



OUTPUT 4:
LIBRO DE TEXTO: ACUAPONÍA



AQU@TEACH:

Innovative educational techniques to promote learning among European students using aquaponics



Autores principales:

Ranka Junge, Nadine Antenen

Institución de autores principales:

Zurich University of Applied Sciences

Autores colaboradores:

Zurich University of Applied Sciences: Jena Jamsek, Fridolin Tschudi

University of Greenwich: Sarah Milliken, Benz Kotzen

Technical University of Madrid: Morris Villarroel, Fernando Torrent

University of Ljubljana: Tjaša Griessler Bulc, Andrej Ovca, Franja Prosenc, Darja Istenič, Darja Rugej, Marija Tomšič

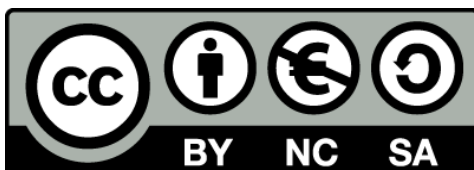
Biotechnical Centre Naklo: Uroš Strniša, Marija Gregori

Marzo de 2020

Copyright © Socios del Proyecto Aqu@teach

Aqu@teach es una asociación estratégica Erasmus+ en la enseñanza superior (2017-2020) dirigida por la Universidad de Greenwich, en colaboración con la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zurich (Suiza), la Universidad Politécnica de Madrid (España), la Universidad de Liubliana y el Centro Biotecnológico de Naklo (Eslovenia).

Esta obra está protegida por una licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\) license](#). Usted es libre de compartir - copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato - y adaptarlo - remezclarlo, transformarlo y construir sobre él - con la condición de que dé el crédito apropiado, proporcione un enlace a la licencia e indique si se hicieron cambios. Si remezcla, transforma o construye sobre el material, debes distribuir tus contribuciones bajo la misma licencia que el original. No puede utilizar el material con fines comerciales.



CONTENIDOS

1. TECNOLOGÍA ACUAPÓNICA	12
1.1 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA ACUAPÓNICA	12
1.2 ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS ACUAPÓNICOS.....	14
1.2.1 ACUICULTURA.....	15
1.2.2 HIDROPONÍA	16
1.3 CLASIFICACIÓN DE LA ACUAPONÍA.....	17
1.3.1 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON EL MODO OPERATIVO: EXTENSIVO (CON USO INTEGRADO DE LODO) E INTENSIVO (CON SEPARACIÓN DE LODOS).....	18
1.3.2 MANEJO DEL CICLO HÍDRICO	19
1.3.3 TIPOS DE SISTEMAS HIDROPÓNICOS USADOS EN ACUAPONÍA.....	20
<i>Técnica de lámina de agua con nutrientes (Nutrient Film Technique).....</i>	<i>20</i>
<i>Lecho con sustrato</i>	<i>21</i>
<i>Agua profunda o Cultivo de balsa flotante</i>	<i>22</i>
1.3.4 USO DEL ESPACIO: SISTEMAS HORIZONTALES Y VERTICALES.....	23
1.4 HISTORIA DE LA ACUAPONÍA	23
1.5 EJEMPLOS DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS EN EL MUNDO.....	25
1.5.1 EUROPA	25
1.5.2 ASIA	28
1.5.3 LAS AMÉRICAS	29
1.5.4 AUSTRALIA	29
1.6 TEMAS DE INVESTIGACIÓN RECIENTES EN ACUAPONÍA	30
1.6.1 TENDENCIAS EN ACUAPONÍA	30
1.6.2 TENDENCIAS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS.....	31
1.6.3 INVESTIGACIÓN SOCIO-ECONÓMICA	32
1.7 REFERENCIAS	33
2.1 INTRODUCCIÓN A LA ACUICULTURA	37
2.2 TECNOLOGÍA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA (RAS).....	39
2.2.1 LOS TANQUES CON PECES.....	40
2.2.2 SEPARACIÓN DE SÓLIDOS	41
2.2.3 DESINFECCIÓN	42

2.2.4	BIOFILTRACIÓN	44
2.2.5	DESGASIFICACIÓN Y AIREACIÓN	44
2.2.5.1	<i>Desgasificación</i>	45
2.2.5.2	<i>Oxigenación</i>	45
2.2.6	BOMBAS Y POZOS DE BOMBEO	45
2.3	GESTIÓN DEL SISTEMA DE ACUICULTURA POR RECIRCULACIÓN	46
2.3.1	DENSIDAD ANIMAL	46
2.3.2	MONITOREO	47
2.3.2.1	<i>Algunos consejos para el diseño y la seguridad del sistema</i>	49
2.3.2.2	<i>Algunos consejos para el mantenimiento del sistema</i>	49
2.3.2.3	<i>¿Cuándo controlar la calidad del agua?</i>	49
2.3.2.4	<i>Sistemas automatizados de vigilancia y control</i>	49
2.4	PLANIFICACIÓN DE LA PARTE DE ACUICULTURA DE RECIRCULACIÓN PARA UN SISTEMA ACUAPÓNICO	51
2.5	REFERENCIAS.....	53
3.	ANATOMÍA DE PECES, SALUD Y BIENESTAR	54
3.1	ANATOMÍA GENERAL EXTERNA	54
3.2	ANATOMÍA GENERAL INTERNA.....	58
3.3	FISIOLOGÍA DE LA RESPIRACIÓN	61
3.4	BIENESTAR DE LOS PECES.....	62
3.4.1	INTRODUCCIÓN	62
3.4.2	LEGISLACIÓN EN LA UE	63
3.4.3	MEDIDAS ESPECÍFICAS PARA EVALUAR EL BIENESTAR	63
3.4.4	EL EJE HPI Y LA RESPUESTA AL ESTRÉS	64
3.4.5	INDICADORES OPERATIVOS DE BIENESTAR	65
3.5	REFERENCIAS.....	66
4.	ALIMENTACIÓN Y CRECIMIENTO DE LOS PECES.....	68
4.1	INTRODUCCIÓN GENERAL A LA ALIMENTACIÓN DE LOS PECES	68
4.2	NECESIDADES DE ENERGÍA	69
4.3	PRINCIPALES INTERACCIONES ENTRE LA INGESTIÓN Y LOS FACTORES AMBIENTALES.....	70
4.3.1	FACTORES ABIÓTICOS	70
4.3.2	FACTORES BIÓTICOS	71
4.4	COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LOS ALIMENTOS PARA PECES Y NUTRIENTES ESENCIALES	72
4.5	TIPOS DE PIENSO.....	74
4.6	ESTRATEGIAS DE ALIMENTACIÓN.....	75
4.7	ALIMENTADORES AUTOMÁTICOS	78

4.8 PLAN DE PRODUCCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LA GRANJA	80
4.9 DISEÑAR PIENSOS PARA LA ACUAPONÍA.....	82
CRECIMIENTO DE LOS PECES Y RETENCIÓN DE NITRÓGENO.....	82
FUENTE DE NITRÓGENO	83
ABSORCIÓN DE NITRÓGENO POR EL PEZ.....	83
PÉRDIDAS DE NITRÓGENO EN LOS SÓLIDOS.....	84
4.10 REFERENCIAS	85
5. EQUILIBRIO DE AGUA Y NUTRIENTES.....	86
5.1 MACRO- Y MICRONUTRIENTES.....	86
5.1.1 LOS ELEMENTOS DEL UNIVERSO	86
5.1.2 MACRO- Y MICRO-NUTRIENTES Y SUS FUNCIONES EN LOS ORGANISMOS.....	87
5.2 LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS DE LOS PRINCIPALES NUTRIENTES EN LA ACUAPONÍA.....	89
5.2.1 EL CICLO DEL NITRÓGENO	89
5.2.2 CICLO DE FÓSFORO	95
5.3 NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS.....	96
5.3.1 ELEMENTOS NUTRITIVOS ESENCIALES	96
5.3.2 DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y EL PH	101
5.3.3 TRASTORNOS NUTRICIONALES EN LAS PLANTAS	102
5.4 SUMINISTRO DE NUTRIENTES EN LA ACUAPONÍA	107
5.5 REFERENCIAS	111
6. HIDROPONÍA	114
6.1 INTRODUCCIÓN A LA HIDROPONÍA.....	114
6.1.1 LOS PRINCIPIOS DE LA HIDROPONÍA	114
6.1.2 VENTAJAS DE LA HIDROPONÍA	114
6.1.3 DESVENTAJAS DE LA HIDROPONÍA	115
6.2 SISTEMAS HIDROPÓNICOS	115
6.2.1 HIDROPONÍA DE LECHO CON MEDIO/SUSTRATO	116
6.2.2 TÉCNICA DE PELÍCULA DE NUTRIENTES (NFT)	120
6.2.3 CULTIVO EN AGUAS PROFUNDAS (DWC).....	121
6.2.4 AEROPONÍA.....	122
6.3 ANATOMÍA Y FISIOLÓGÍA DE LAS PLANTAS Y NECESIDADES DE CULTIVO	122
6.3.1 ANATOMÍA DE PLANTAS	122
6.3.2 FISIOLÓGÍA DE LAS PLANTAS.....	123
Fotosíntesis	124

<i>Respiración</i>	124
<i>Osmosis y plasmólisis</i>	124
<i>Transpiración</i>	125
<i>Fototropismo</i>	125
<i>Fotoperiodismo</i>	126
6.3.3 REQUERIMIENTOS DE CULTIVO	126
<i>Luz</i>	126
<i>Agua</i>	127
<i>Dióxido de carbono (CO₂)</i>	128
<i>Temperatura</i>	128
<i>Humedad relativa</i>	129
6.4 PRÁCTICAS GENERALES DE CULTIVO	129
6.4.1 TRASPLANTES A PARTIR DE SEMILLAS	129
6.4.2 TRASPLANTES A PARTIR DE ESQUEJES	132
6.4.3 TRASPLANTES MEDIANTE INJERTOS.....	133
6.5 FERTIRRIGACIÓN	133
6.6 SISTEMAS DE CONTROL DE LOS INVERNADEROS	135
6.6.1 LUZ.....	135
6.6.2 TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	138
6.6.3 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	139
6.6.4 CIRCULACIÓN DEL AIRE	139
6.6.5 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL	140
6.7 REFERENCIAS	140
7. VARIEDADES DE PLANTAS	142
7.1 INTRODUCCIÓN	142
7.2 SELECCIÓN DE PLANTAS	144
7.2.1 VERDURAS DE HOJA VERDE.....	144
7.2.1.5 <i>Repollo</i>	149
7.2.1.6 <i>Hojas de mostaza</i>	150
7.2.1.7 <i>Nasturtium</i>	150
7.2.2 HIERBAS	151
7.2.2.1 <i>Cilantro</i>	152
7.2.2.2 <i>Menta</i>	153
7.2.2.3 <i>Albahaca</i>	153
7.2.2.4 <i>Cebollino</i>	155
7.2.2.5 <i>Perejil</i>	156
7.2.2.6 <i>Hinojo</i>	156

7.2.3 CULTIVOS FRUTALES	157
7.2.3.1 Tomates.....	157
7.2.3.2 Pimientos.....	159
7.2.3.3 Pepino.....	161
7.2.3.4 La berenjena.....	162
7.2.3.5 Fresas	162
7.2.4 SELECCIÓN DE CULTIVOS PARA DIFERENTES SISTEMAS.....	164
FIGURA 6: CUBOS BATO (DERECHA) QUE SE ESTÁN USANDO PARA CRECER FRESAS EN LA GRANJA URBANA DE LA UNIVERSIDAD DEL DISTRITO DE COLUMBIA EN BELTSVILLE (HTTPS://WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/USDAGOV/32245870463)	166
7.3 PROGRAMACIÓN DE CULTIVOS.....	167
7.4 REFERENCIAS.....	169
8. MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS.....	171
8.1 EL CONCEPTO DE MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS (MIP)	171
8.2.1 HIGIENE DE LAS CONDICIONES DE CULTIVO.....	175
8.2.2 VARIEDADES DE CULTIVOS TOLERANTES Y RESISTENTES	176
8.2.3 ESPACIOS ADECUADOS ENTRE PLANTAS	176
8.2.4. SUMINISTRO ADECUADO DE NUTRIENTES.....	176
8.2.5 MONITOREO	177
8.2.6 DEFENSA FÍSICA.....	177
8.2.6.1 Redes.....	177
8.2.6.2 Trampas	178
8.2.7 APOYAR LA COMUNIDAD NATURAL DE ORGANISMOS SUPRESORES DE ENFERMEDADES	178
8.2.7.1 Microorganismos beneficiosos.....	178
8.2.7.2 Insectos beneficiosos y plantas banqueras	179
8.2.8 SI TODO LO DEMÁS FALLA	179
8.3 LAS PLAGAS Y ENFERMEDADES MÁS COMUNES	180
8.3.1 IDENTIFICACIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES	180
8.3.2 ENFERMEDADES COMUNES DE LAS PLANTAS.....	181
8.3.2.1 Moho gris (<i>Botrytis</i>)	181
8.3.2.2 Putrefacción del tallo (<i>Sclerotinia</i>)	182
8.3.2.3 Moho polvoroso (orden <i>Erysiphales</i>).....	182
8.3.3 PLAGAS COMUNES DE LAS PLANTAS	183
8.3.3.1 Pulgones.....	183
8.3.3.2 Moscas blancas (familia <i>Aleyrodidae</i>)	184
8.3.3.3. Araña de dos puntos o araña roja (<i>Tetranychus urticae</i>)	185
8.3.3.4 Minador de hojas	185
8.3.3.5 Trips (orden <i>Thysanoptera</i>).....	186

8.4 CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS	187
8.4.1 ENEMIGOS NATURALES DE LAS PLAGAS.....	187
8.4.1.1 Parásitos	187
8.4.1.2 Patógenos	188
8.4.1.3 Depredadores.....	188
8.4.1.4 Distinguir entre plagas y los enemigos naturales	188
8.4.2 EJEMPLOS DE AGENTES BIOLÓGICOS	189
8.4.2.1 Crisopas verdes comunes (<i>Chrysoperla carnea</i>).....	190
8.4.2.2 El parasitoide de mosca blanca <i>Encarsia formosa</i>	191
8.4.2.3 Nematodos entomopatógenos	192
8.4.2.4 Ácaros depredadores	193
8.4.2.5 Avispa parasitoide (<i>Aphidius colemani</i>).....	195
8.5 REFERENCIAS	196
9. MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS.....	198
9.1 INTRODUCCIÓN A LA MONITORIZACIÓN.....	198
9.1.1 PARÁMETROS CIENTÍFICOS.....	198
9.1.2 ¿POR QUÉ MONITORIZAR?	199
9.1.3 DIFERENTES ACERCAMIENTOS A LA MONITORIZACIÓN	200
9.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MONITORIZACIÓN	201
9.1.5 FRECUENCIA DE MONITOREO	202
9.2 PARÁMETROS IMPORTANTES EN LA ACUAPONÍA	202
9.2.1 LA TECNOLOGÍA.....	202
Eliminación de sólidos	202
Biofiltración.....	204
Formación de biopelículas.....	204
Bombas de agua y aire.....	205
Pantallas	206
Posibilidad de desacoplamiento del sistema hidropónico	206
9.2.2 CALIDAD DE AGUA	206
Oxígeno disuelto	207
pH.....	208
Temperatura del agua	209
Nitrógeno total (amonio, nitrito, nitrato)	210
Fósforo y otros nutrientes	211
Dureza del agua	213
Contaminación por algas, sólidos sedimentables	214
9.2.3 SALUD DE LAS PLANTAS	215
Enfermedad.....	215

<i>Humedad relativa</i>	216
<i>Temperatura del aire</i>	217
<i>Intensidad de la luz</i>	218
9.2.4 SALUD DE LOS PECES	219
<i>Tasas de alimentación</i>	219
<i>Crecimiento</i>	220
<i>Indicadores para evaluar las poblaciones de peces</i>	221
<i>Estrés</i>	222
<i>Enfermedad</i>	223
9.2.5 PARÁMETROS DE INTERÉS ESPECIAL	223
9.3 REFERENCIAS	224
10. SEGURIDAD ALIMENTARIA	227
10.1 MARCO JURÍDICO	228
10.2 RIESGOS PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN LA ACUAPONÍA	228
10.3 BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS Y DE HIGIENE	231
10.3.1 UBICACIÓN, DISEÑO Y DISPOSICIÓN	231
10.3.2 EQUIPO	233
10.3.3 HIGIENE DEL TRABAJADOR	234
10.3.4 ABASTECIMIENTO DE AGUA	238
10.3.5 ALIMENTACIÓN PARA PECES	238
10.3.6 RECOLECCIÓN Y ELABORACIÓN	238
10.3.7 LIMPIEZA Y SANEAMIENTO	242
10.3.8 CONTROL DE ANIMALES Y PLAGAS	245
10.3.9 DESECHOS Y SUSTANCIAS PELIGROSAS	246
10.4 SISTEMA HACCP	247
10.5 REFERENCIAS	251
11. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA	253
11.1 ¿QUÉ ES LA CIENCIA, QUÉ ES LA INVESTIGACIÓN? TÉRMINOS BÁSICOS	253
11.1.1 DEFINICIONES GENERALES	253
<i>Ciencia</i>	253
<i>Investigación</i>	253
11.1.2 VOCABULARIO DE INVESTIGACIÓN	253
<i>Variables y niveles de medición</i>	254
<i>Validez, fiabilidad, precisión y exactitud</i>	256
11.2 FUNDAMENTOS DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA	257
11.2.1 DISEÑOS DE INVESTIGACIÓN	257

11.2.2 MEDIDAS PRELIMINARES	259
11.2.3 DISEÑO DE PROTOCOLOS.....	262
11.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	266
11.2.5 PUBLICACIÓN DEL INFORME DE LA INVESTIGACIÓN	268
11.3 METODOLOGÍA CIENTÍFICA APLICADA A LA ACUAPONÍA	272
11.4 REFERENCIAS	276
12. DISEÑAR Y CONSTRUIR	278
12.1 COMENZANDO A DISEÑAR UN SISTEMA ACUAPÓNICO.....	278
12.2 ESTUDIO DE VIABILIDAD: UBICACIÓN E INFRAESTRUCTURA.....	280
12.3 EL TANQUE PARA PECES.....	281
12.3.1 VOLUMEN.....	281
12.3.2 FORMA DEL TANQUE	282
12.3.3 ALTURA Y PROPORCIÓN	284
12.3.4 MATERIALES.....	285
12.3.5 TAPAS PARA TANQUES	286
12.3.6 FLUJO DEL AGUA.....	287
12.3.6.1 <i>Entrada y salida</i>	287
12.4 SEPARACIÓN DE SÓLIDOS.....	289
12.5 EL BIOFILTRO.....	292
12.5.1 ¿SE NECESITA UN BIOFILTRO SEPARADO?.....	292
12.5.2 ELECCIÓN DEL BIOFILTRO	292
12.5.3. <i>Desgasificación y aireación</i>	294
12.6 LECHOS DE CULTIVO.....	298
12.6.1 FLUJO DE AGUA Y POSICIONAMIENTO DE LOS LECHOS DE CULTIVO.....	298
12.6.2 MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	298
12.6.3 CONSTRUCCIÓN DE LA ENTRADA Y SALIDA DE AGUA	299
12.7 CONEXIONES, MOVIMIENTO DE AGUA Y AIREACIÓN	299
12.7.1 FONTANERÍA	299
12.7.2 FLUJO DE AGUA Y BOMBAS	299
12.7.3.1 <i>Regulación del flujo de agua y del nivel de agua</i>	301
12.7.3.2 <i>Problemas con el movimiento del agua</i>	301
12.7.3.3 <i>Pérdidas de agua y reservas de agua</i>	302
12.8 FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO	302
12.8.1 PROCEDIMIENTOS BÁSICOS DE MANTENIMIENTO Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	302
12.8.2 FALLOS DEL SISTEMA Y SISTEMAS DE EMERGENCIA	305

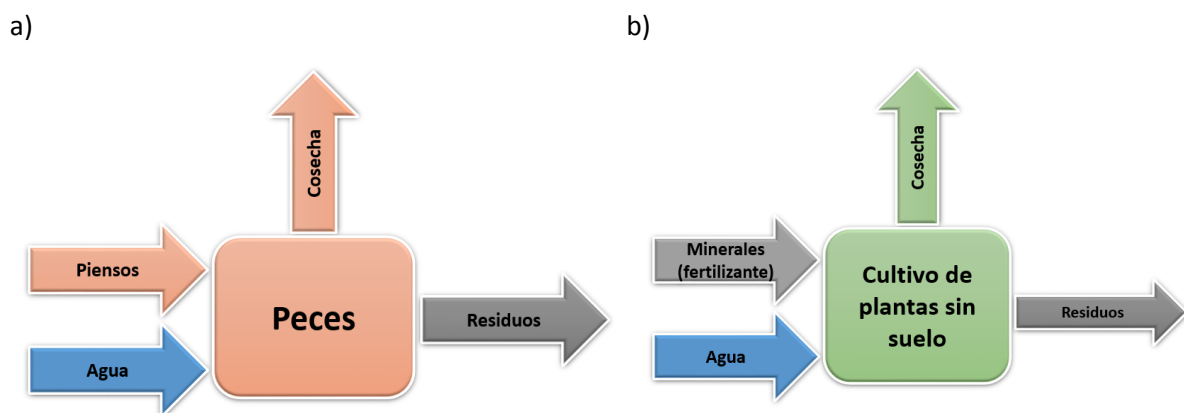
12.9 REFERENCIAS	306
13. AGRICULTURA URBANA	307
13.1 INTRODUCCIÓN A LA AGRICULTURA URBANA	307
13.2 TIPOLOGÍA DE LAS GRANJAS URBANAS COMERCIALES EN INTERIORES	309
13.2.1 INVERNADEROS DE AZOTEA.....	309
13.2.2 INVERNADEROS INDEPENDIENTES.....	311
13.2.3 GRANJAS VERTICALES Y FÁBRICAS DE PLANTAS	312
13.2.4 GRANJAS DE CONTENEDORES	317
13.3 LA SOSTENIBILIDAD DE LAS GRANJAS URBANAS COMERCIALES EN INTERIORES	318
13.3.1 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.....	319
13.3.2 SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA.....	319
13.3.3 LA AGRICULTURA URBANA Y LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	322
13.4 LEGISLACIÓN Y GOBERNANZA	323
13.5 MODELOS EMPRESARIALES DE AGRICULTURA URBANA	326
4. Recuperar los bienes comunes	327
13.6 CONCLUSIONES	334
13.7 REFERENCIAS	335
14. ACUAPONÍA VERTICAL	338
14.1 INTRODUCCIÓN	338
14.2 TORRES DE CRECIMIENTO	339
14.3 LECHOS HORIZONTALES APILADOS	347
14.4 SISTEMAS DE ARMAZÓN EN A	351
14.5 MUROS VIVOS	354
14.6 CONCLUSIONES	357
14.7 REFERENCIAS.....	358
15. ASPECTOS SOCIALES DE LA ACUAPONÍA.....	360
15.1 INTRODUCCIÓN.....	360
15.1.1 SEGURIDAD ALIMENTARIA	360
15.1.2 DESIERTOS ALIMENTARIOS.....	364
15.1.3 SOBERANÍA ALIMENTARIA.....	365
15.1.4 REDES ALIMENTARIAS ALTERNATIVAS.....	366
15.2 ACUAPONÍA Y LA EMPRESA SOCIAL	368
15.3 LA ACUAPONÍA COMO HERRAMIENTA EDUCATIVA	371
15.4 LA ACUAPONÍA Y EL BIENESTAR (HUMANO)	372

15.5 EL POTENCIAL DE LA ACUAPONÍA PARA EL BIENESTAR DE LOS ANCIANOS.....	374
15.5.1 CAPACIDADES COGNITIVAS-CONDUCTUALES.....	375
15.5.2 INTEGRACIÓN SENSORIAL-MOTORA	376
15.5.3 HABILIDADES MOTORAS.....	378
15.6 REFERENCIAS	380

1. TECNOLOGÍA ACUAPÓNICA

1.1 Introducción a la tecnología acuapónica

Hoy en día, como resultado del rápido crecimiento de la población, el aumento de las necesidades alimentarias y la urbanización, la cantidad de tierra agrícola está disminuyendo rápidamente y nuestros océanos están sobreexplotados. Para satisfacer la futura demanda de alimentos, se necesitan tecnologías de producción de alimentos innovadoras, que ahorren espacio y sean ecológicas. La acuaponía es un policultivo (sistema integrado de producción multi-trófica) que consiste en dos tecnologías: la acuicultura de recirculación (una piscifactoría) y el cultivo de hortalizas sin suelo (hidroponía). El objetivo principal de la acuaponía es reutilizar los nutrientes provenientes del pienso de los peces y las heces de los peces para cultivar plantas ([Graber y Junge 2009](#); [Lennard y Leonard 2004](#); [Lennard y Leonard 2006](#); [Rakocy et al. 2003](#)). La integración de dos sistemas en uno ayuda a eliminar algunos de los factores insostenibles del funcionamiento independiente de la acuicultura y los sistemas hidropónicos ([Somerville et al. 2014](#)).



c)

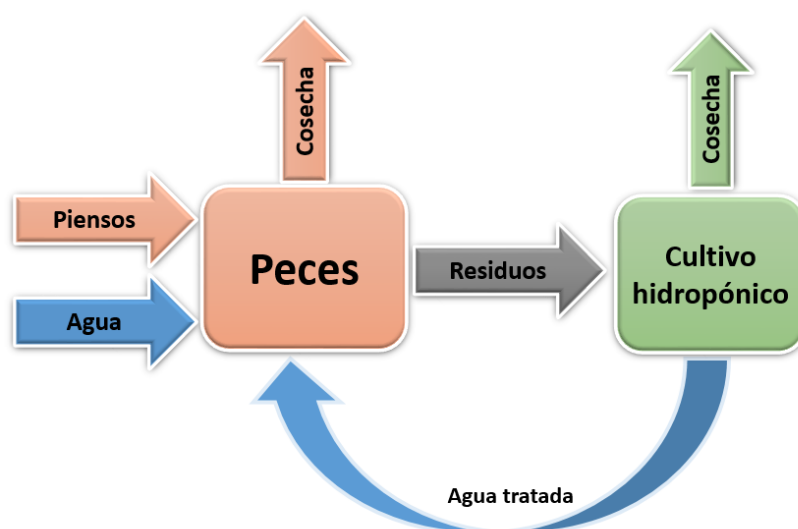


Figura 1: Flujo de materia en acuicultura (a), hidroponía (b), y acuaponía (c).

Los excrementos de los peces pueden ser utilizados por las plantas directamente o después de que las bacterias hayan convertido el amoníaco en nitrito y nitrato. El alimento para peces en formato de pienso añade un suministro continuo de nutrientes a las plantas, resolviendo así la necesidad de cualquier descarga o sustitución de soluciones de nutrientes agotadas o incluso el ajuste de las soluciones para la hidroponía. Los beneficios económicos del sistema también son potencialmente mayores puesto que la necesidad de comprar fertilizante adicional se ve reducido para el cultivo de las plantas. La acuaponía es una práctica agrícola que está en plena expansión y que, por lo tanto, ofrece una serie de beneficios potenciales; sin embargo, también existen importantes debilidades en este sistema de producción agrícola potencialmente sostenible (Tabla 1).

En teoría, el concepto podría contribuir, tanto a nivel regional como mundial, a la solución de algunos de los problemas cruciales a los que se enfrenta nuestro planeta: la disponibilidad y el uso de agua potable y de riego, la contaminación de las aguas superficiales por la cría de animales y la gestión de los recursos de fertilizantes no renovables. Sin embargo, todavía existen muchos obstáculos teóricos y prácticos para la expansión de esta prometedora tecnología.

Tabla 1. Ventajas y debilidades de la acuaponía (Diver 2006; Joly *et al.* 2015; Somerville *et al.* 2014)

Ventajas/beneficios	Debilidades
<p>Conservación de los recursos hídricos</p> <p>Uso eficiente de la fuente de nutrientes (pienso para peces)</p> <p>Reciclaje de recursos no renovables (como el fósforo o potasio) y también de recursos renovables, pero escasos (como el agua)</p> <p>No se utilizan herbicidas o plaguicidas químicos, ya que el reciclaje del agua dentro del sistema dificulta su uso debido a sus efectos adversos tanto en los peces como en las plantas</p>	<p>La puesta en marcha es más cara en comparación con otras tecnologías</p> <p>Es necesario un conocimiento profundo de los organismos (peces, plantas, bacterias) involucrados</p> <p>Los requisitos de los peces y las plantas pueden ser diferentes, y no se pueden cumplir en todos los lugares sin una inversión importante en tecnologías de invernadero.</p> <p>Es necesaria una gestión y dedicación diaria</p>

<p>Uso muy restringido de plaguicidas de origen biológico</p> <p>Mayor nivel de bioseguridad y menos contaminantes</p> <p>Reducción de los costos de operación (en comparación con la acuicultura o la hidroponía por separado)</p> <p>Se puede utilizar en terrenos no cultivables</p> <p>Los materiales de construcción y la información están ampliamente disponibles</p> <p>Puede funcionar en diferentes climas y en lugares tanto rurales como urbanos, permitiendo así la producción de alimentos o cultivos comerciales para la familia.</p> <p>Puede aumentar la productividad del espacio disponible, ya que se pueden cosechar dos cultivos en la misma superficie (si las peceras se colocan debajo de la unidad de producción de la planta)</p>	<p>Requiere electricidad, suministro de plantas y alevines (peces jóvenes)</p> <p>En la mayoría de los países europeos el estatus legal de la acuaponía no está claro (actividad empresarial, actividad agrícola)</p>
--	---

Por lo tanto, la acuaponía tiende a ser un método ecológico y respetuoso con el clima que produce alimentos nutritivos y, al mismo tiempo, satisface la demanda de los consumidores para un estilo de vida sostenible y saludable. Siempre que la inversión no sea demasiado elevada, la acuaponía es ideal para los países en vías de desarrollo, ya que los peces proporcionan las proteínas necesarias y una segunda fuente de ingresos. Los cultivos comerciales de alto valor, como las verduras, pueden cultivarse en un sistema acuapónico en zonas en las que los métodos de cultivo convencionales sólo pueden producir cereales. Debido a que el sistema suele estar encerrado en un invernadero, la acuaponía es resistente a los cambios climáticos. Sin embargo, la acuaponía también se ha implementado con éxito en el exterior. Para una opción menos costosa, las plantas pueden cubrirse con un simple techo (que proporciona protección contra las inclemencias del tiempo y evita el acceso de pájaros y otros animales) en lugar de un invernadero completo. Esto es especialmente viable para las naciones en desarrollo en los trópicos. A pesar de las debilidades, se piensa que la acuaponía se convertirá en un método de producción de alimentos cultivados localmente, por ejemplo en un entorno urbano con unidades de producción más pequeñas diseñadas para hogares y restaurantes. Se necesita tanto más investigación como más educación para desarrollar esta tecnología emergente. En particular, se necesita investigación para optimizar el sistema de producción hacia una producción segura y económica sostenible. La técnica abre nuevas perspectivas para crear nuevos "empleos verdes". El creciente número de granjas acuícolas requerirá el surgimiento de una nueva profesión: el agricultor acuapónico ([Graber et al. 2014](#)).

1.2 Elementos de los sistemas acuapónicos

El "hardware" o parte sólida de un sistema acuapónico consiste en (i) los tanques para peces, (ii) las bombas de agua y aire para oxigenar, (iii) las unidades de separación de sólidos (filtros de tambor, colectores), (iv) el biofiltro, (v) el método de cultivo de plantas, y (vi) los materiales de fontanería.

Estos elementos contienen una serie de organismos dónde los productores primarios (plantas) están separados de los consumidores (principalmente peces), y los microorganismos omnipresentes construyen un "puente" entre estos dos grupos principales.

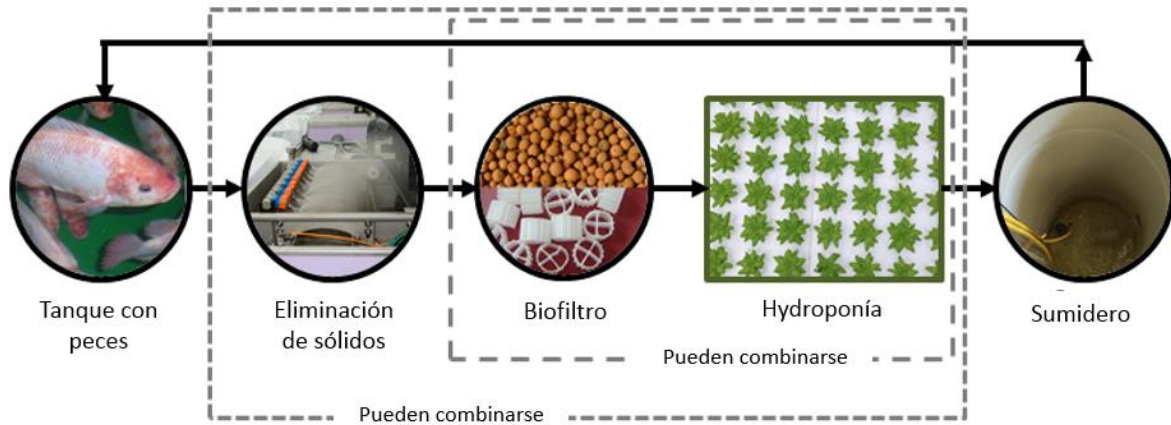


Figure 2. Componentes principales de un sistema acuapónico (basado en [Rakocy et al. 2006](#))

1.2.1 Acuicultura

La acuicultura es la cría en cautividad y la producción de peces y otras especies de animales y plantas acuáticas en condiciones controladas ([Somerville et al. 2014](#)). La acuicultura se está convirtiendo en un suministro cada vez más importante de la proteína para la población mundial, al tiempo que disminuye la presión sobre los océanos sobreexplotados. Sin embargo, las técnicas de acuicultura, como los sistemas de aguas abiertas, los cultivos en estanques y los sistemas de flujo, liberan aguas residuales ricas en nutrientes en el medio ambiente, causando eutrofización e hipoxia en las masas de agua. En los sistemas de acuicultura de recirculación (RAS), estas aguas residuales se tratan y se reutilizan dentro del sistema. No obstante, estos sistemas consumen mucha energía y generan mucho lodo (proveniente de los peces) que se tiene que tratar por separado. Por lo tanto, la acuaponía también puede considerarse como una forma de RAS o una extensión de RAS.

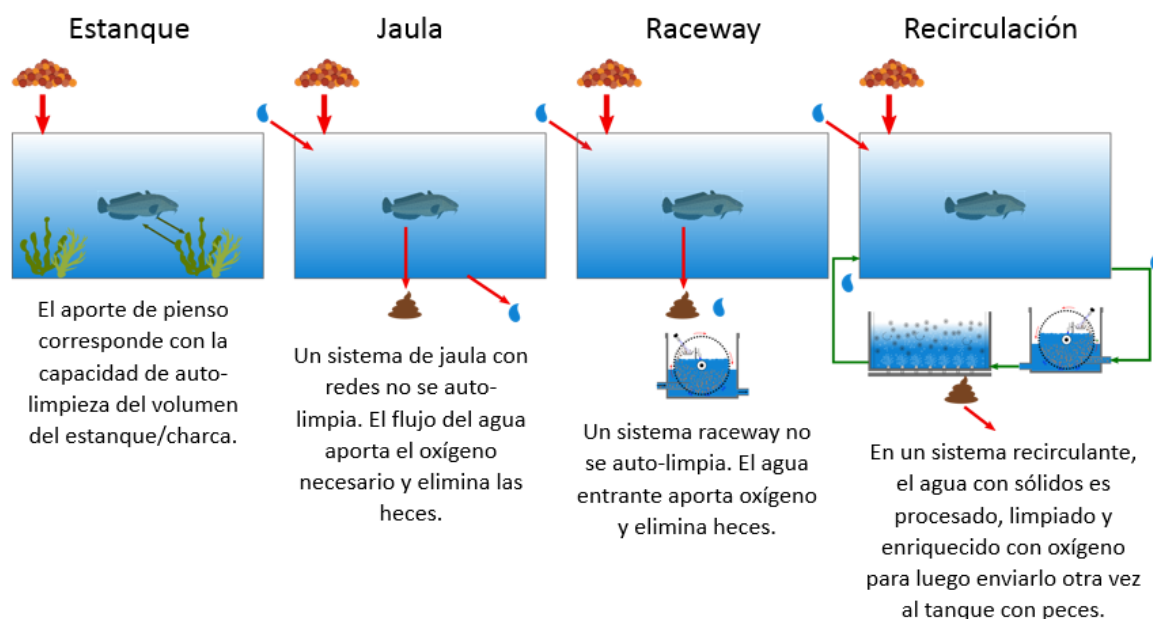


Figura 3. Los tipos más comunes de sistemas de acuicultura. Para más detalle ver Capítulo 7.

1.2.2 Hidroponía

El desarrollo de la hidroponía se remonta al trabajo del Dr. William Gericke en la Universidad de California en 1929 ([Gericke 1937](#)). La hidroponía se ha ido expandiendo en las últimas décadas, principalmente porque permite un aumento de los rendimientos al reducir las plagas y las enfermedades transmitidas por el suelo (*soil-borne diseases*), y porque permite manipular las condiciones de cultivo para satisfacer los requerimientos óptimos de las plantas, al tiempo que aumenta la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes. También permite el desarrollo de la agricultura en tierras de baja calidad ([Somerville et al. 2014](#)). Sin embargo, el llamado cultivo hidropónico convencional también tiene sus inconvenientes. Utiliza fertilizantes minerales costosos, y a menudo de origen insostenible, para producir cultivos, y consume energía. Los sistemas hidropónicos requieren una cantidad considerable de macronutrientes (C, H, O, N, P, K, Ca, S, Mg) y micronutrientes (Fe, Cl, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Ni), que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Los nutrientes se añaden a las soluciones hidropónicas en forma iónica. C, H y O están disponibles en el aire y en el agua. Las concentraciones de nutrientes deben ser monitoreadas. Los sistemas acuapónicos, por otro lado, utilizan agua rica en residuos de los peces como fuente de nutrientes para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la composición de nutrientes del agua no siempre se ajusta perfectamente a las necesidades de las plantas. Algunos nutrientes suelen ser deficientes, por lo que es necesario añadirlos para ajustar su concentración, por ejemplo, se puede tener que añadir hierro, fosfato y potasio ([Bittsanszky et al. 2016a](#)). Se explicará más en detalle los nutrientes necesarios en los capítulos 5 y 6.

1.3 Clasificación de la acuaponía

A veces la delimitación entre la acuaponía y otras tecnologías integradas no es clara. [Palm et al. \(2018\)](#) propusieron una nueva definición de acuaponía, dónde la mayoría (> 50%) de los nutrientes que sostienen el crecimiento de las plantas deben derivarse de los desechos/residuos originados por la alimentación de los organismos acuáticos. Ellos proponen que se distinga entre la acuaponía en sentido estricto (*sensu stricto*) que sólo se aplica a los sistemas con hidroponía y sin el uso de tierra. Algunos de los nuevos sistemas integrados de acuicultura que combinan la producción de peces con la de algas también entrarían dentro de este concepto. Por otro lado, el término acuaponía en el sentido más amplio (*aquaponics sensu lato*) puede aplicarse a sistemas que incluyen la horticultura y técnicas de producción de cultivos que utilizan los procesos de mineralización, tamponamiento y función de almacenamiento de nutrientes de los diferentes sustratos, incluyendo el suelo. [Palm et al. \(2018\)](#) proponen usar el término "agricultura acuapónica" para estas actividades.

Tabla 2. Una clasificación de la acuaponía de acuerdo con los diferentes principios de diseño con ejemplos para cada categoría (adaptado de [Maucieri et al. 2018](#))

Objetivos de diseño	Categorías	Ejemplos
Objetivo o grupo de interés principal	Producción comercial de cultivos	ECF Farm
	Autoabastecimiento	Somerville et al. 2014
	Educación	Graber et al. 2014 Junge et al. 2014
	Empresa social	Laidlaw y Magee, 2016
	Reverdecimiento y decoración	Schnitzler 2013
Tamaño	L grande (>1000 m ²)	Monsees et al. 2017
	M medio (200-1000 m ²)	Graber et al. 2014
	S pequeño (50-200 m ²)	Roof Water Farm
	XS muy pequeño (5-50 m ²)	Podgrajšek et al. 2014
	XXS sistemas micro (<5 m ²)	Maucieri et al. 2018 Nozzi et al. 2016
Modo de funcionamiento de la parte acuícola	Extensivo (se permite el uso integrado de residuo sólido/lodo en las mesas de cultivo)	Graber y Junge 2009
	Intensivo (se obliga el uso del lodo residual)	Schmautz et al. 2016b Nozzi et al. 2018
Manejo del ciclo hídrico	Bucle cerrado (sistemas "acoplados"): el agua se recircula para acuicultura	Graber y Junge 2009 Monsees et al. 2017
	Bucle abierto o fin de tubo (sistemas "desacoplados"): después de la parte hidropónica, el agua no se recircula o solo parcialmente para acuicultura	Monsees et al. 2017
Tipo de agua	Agua dulce	Schmautz et al. 2016b Klemenčič y Bulc 2015
	Agua salada	Nozzi et al. 2016
Tipo de Sistema hidropónico	Lechos con diferentes sustratos	Roosta y Afsharipoor 2012 Buhmann et al. 2015
	Sistema inundación-flujo (<i>ebb-flow</i>)	Nozzi et al. 2016

	Bolsas	Rafiee and Saad 2010
	Riego por goteo	Schmautz et al. 2016b
	Cultivos con agua profunda (balsas flotantes)	Schmautz et al. 2016b
	Lámina de agua (<i>nutrient film technique</i> -NFT)	Lennard and Leonard 2006 Goddek et al. 2016a
Uso del espacio	Horizontal	Schmautz et al. 2016b Klemenčič y Bulc 2015
	Vertical	Khandaker y Kotzen 2018

La acuaponía puede abordar varios objetivos o involucrar varias partes interesadas, desde la investigación y el desarrollo, las actividades educativas y sociales, hasta la agricultura de subsistencia y la producción de alimentos a escala comercial. Puede implementarse de varias maneras y en varios ambientes, como en tierras áridas y contaminadas, producción en patios traseros, agricultura urbana, etc. Si bien un sistema puede cumplir simultáneamente varios objetivos, como el reverdecimiento y la decoración, la interacción social y la producción de alimentos, normalmente no puede lograr todos ellos al mismo tiempo. Para funcionar satisfactoriamente para cada uno de los posibles objetivos, los componentes de un sistema tienen que cumplir con requisitos diferentes, a veces contrapuestos. La elección de un sistema acuapónico adecuado para una situación particular debe basarse en evaluaciones realistas (incluyendo un plan de negocios sólido, cuando sea apropiado) y debe resultar en una solución a la medida. Si seguimos la clasificación de [Maucieri et al. \(2018\)](#), que clasifica los sistemas acuapónicos de acuerdo con varias categorías diferentes (por ejemplo, objetivo, modo operativo, tamaño, tipo de sistema hidropónico, etc.), surgen varias opciones distintas para elegir un sistema acuapónico adecuado (Tabla 2). Cualquier decisión tiene que ser tomada dentro de los límites del presupuesto disponible, aunque es posible construir un sistema a coste bajo.

1.3.1 Clasificación de acuerdo con el modo operativo: extensivo (con uso integrado de lodo) e intensivo (con separación de lodos)

Una parte del sistema acuapónico es el tanque para los peces, donde se alimenta a los peces y, a través de su metabolismo, las heces y el amoníaco se excretan en el agua. Sin embargo, las altas concentraciones de amoníaco son tóxicas para los peces. A través de las bacterias nitrificantes ubicados en el agua pero concentrados en el biofiltro, el amoníaco se transforma en nitrito y luego en nitrato. Este último es relativamente inofensivo para los peces y es la forma de nitrógeno preferida para el cultivo de plantas como las hortalizas. La producción extensiva integra el biofiltro así como la eliminación de lodos directamente dentro de la unidad hidropónica, utilizando sustratos que proporcionan el soporte adecuado para el crecimiento de la biopelícula, como grava, arena y arcilla expandida. En la producción intensiva se utiliza un sistema de separación de biofiltro y lodo por separado. Ambos métodos operativos tienen sus ventajas y desventajas. Mientras que el uso integrado de los lodos permite un reciclaje completo de los nutrientes, los aspectos negativos incluyen el agua turbia y el bajo rendimiento del biofiltro, que sólo permite una densidad limitada de peces. Por otro lado, la separación del lodo y el biofiltro permiten un almacenamiento intensivo de peces de hasta 100 o más kg/m³. Los aspectos positivos incluyen agua clara, menor DBO (demanda bioquímica

de oxígeno), menor carga microbiana y rendimiento optimizado del biofiltro. Sin embargo, estos sistemas sólo permiten un reciclaje parcial de los nutrientes. Puede ser necesaria una etapa adicional de tratamiento de lodos (en el propio lugar o fuera), como la conexión a un biodigestor de lodos o vermi-compostaje ([Goddek et al. 2016b](#)).

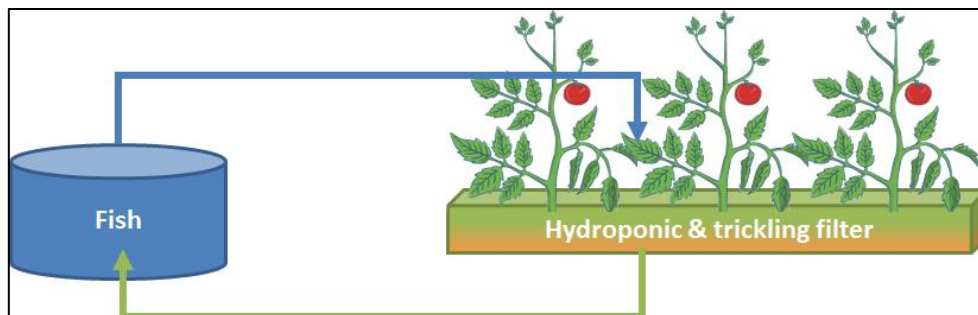


Figura 4: Sistema acuapónica con uso de lodos residuales integrado.

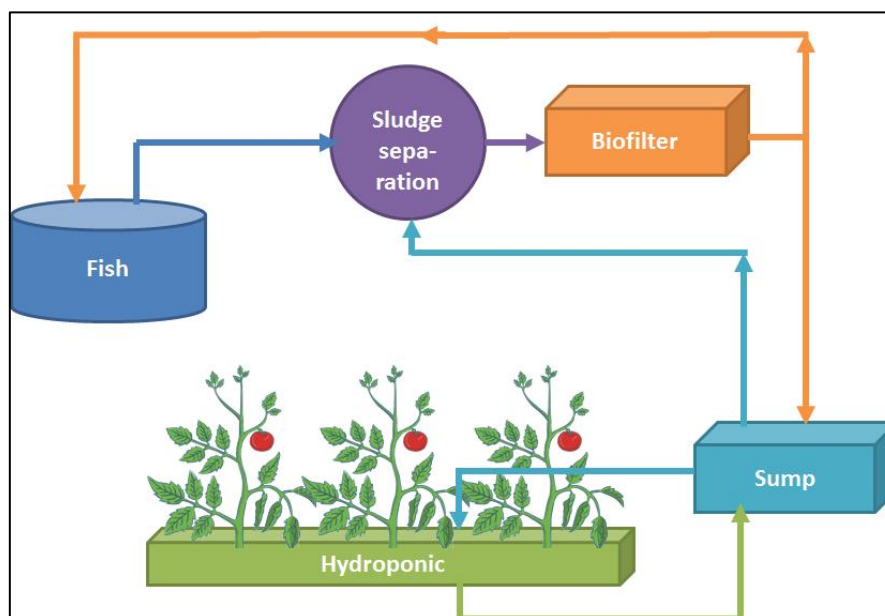


Figura 5: Posible diseño para un sistema acuapónico con un sistema de separación de lodos.

1.3.2 Manejo del ciclo hídrico

Sistemas de bucle cerrado (acoplado): Los sistemas acuapónicos pueden ser contruidos y operados como un bucle de recirculación, con el flujo de agua moviéndose en ambas direcciones: desde la pecera a la unidad hidropónica y viceversa. El agua se recircula constantemente desde el RAS (acuicultura) a la unidad hidropónica y de vuelta al RAS.

Sistemas de bucle abierto: recientemente se han producido avances hacia el control independiente de cada unidad del sistema, principalmente debido a los diferentes requisitos ambientales de los peces y las plantas. Estos sistemas, en los que la acuicultura, la hidroponía y, en su caso, la re-mineralización del lodo de los residuos de los peces pueden controlarse de forma independiente, se denominan sistemas acuapónicos desacoplados (DAPS). Los sistemas acuapónicos desacoplados consisten en un

RAS conectado a la unidad hidropónica (con un depósito adicional) a través de una válvula unidireccional. El agua se recircula por separado dentro de cada sistema y se suministra a petición del RAS a la unidad hidropónica, pero no vuelve a fluir (Goddek *et al.* 2016a, Monsees *et al.* 2017).

La Figura 6 muestra una ilustración esquemática de la acuaponía acoplada y desacoplada. En el sistema acoplado (bucle cerrado), que consiste en un RAS (azul: tanques de crianza, clarificador y biofiltro) directamente conectado a la unidad hidropónica (verde: bandejas NFT), el agua circula constantemente desde el RAS a la unidad hidropónica y de vuelta al RAS. En el sistema acuapónico desacoplado (de circuito abierto) que consiste en un RAS conectado a la unidad hidropónica (con depósito adicional) a través de una válvula unidireccional, el agua se recircula por separado dentro de cada sistema y el agua se suministra a petición del RAS a la unidad hidropónica, pero no vuelve al RAS.

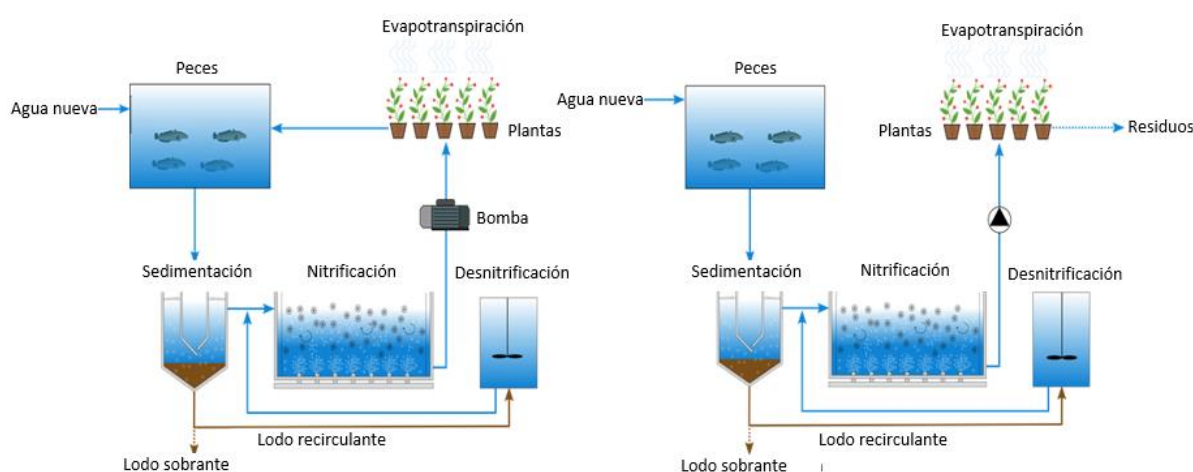


Figura 6: Esquema de un sistema acuapónico acoplado (izquierda) y desacoplado (derecha).

1.3.3 Tipos de sistemas hidropónicos usados en acuaponía

Técnica de lámina de agua con nutrientes (*Nutrient Film Technique*)

En los sistemas de lámina de agua, el agua procedente del tanque con peces se pasa a través del fondo de un tubo horizontal de PVC, en una película fina o lámina. Estos tubos tienen agujeros cortados en la parte superior, en los que las plantas crecen de tal manera que sus raíces cuelgan dentro del agua que fluye en el fondo. Los nutrientes del agua del tanque son absorbidos por las plantas, y como sus raíces están sólo parcialmente sumergidas, esto les permite estar en contacto con el oxígeno atmosférico también.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de NFT

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de agua constante • Se requiere un tanque sumidero pequeño • Fácil de mantener y limpiar • Requiere poco volumen de agua • La infraestructura para hidroponía es ligera, apropiado para cultivos en azoteas 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere filtración para prevenir asfixia de raíces • Material caro • Menos estable (si hay menos agua) • Solo adecuado para verduras de hoja y hierbas que tienen un sistema de raíces más pequeño • -sensibles a variaciones en temperatura

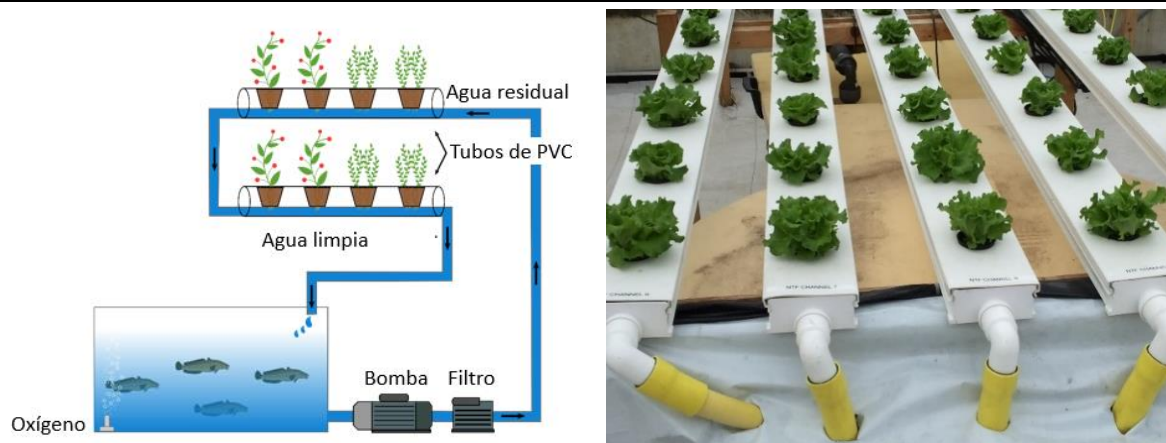


Figura 7: Nutrient film technique (NFT). Izquierda: esquema de un sistema entero. Derecha: fotografía de un sistema (Foto ZHAW)

Lecho con sustrato

Los lechos rellenos de sustrato son el diseño más popular para la acuaponía a pequeña escala. Estos diseños utilizan el espacio de manera eficiente, requieren una inversión inicial relativamente baja y son adecuados para principiantes debido a su estabilidad y simplicidad. En estos lechos, el sustrato se utiliza para sujetar a las raíces de las plantas y funciona como un filtro mecánico y biológico.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del lecho con sustrato.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Biofiltración: el medio sirve como sustrato para las bacterias nitrificantes - Actúa como un medio filtrante de sólidos - La mineralización tiene lugar directamente en el lecho - El sustrato puede ser colonizado por una amplia gama de microflora, algunas de las cuales pueden tener efectos beneficiosos 	<ul style="list-style-type: none"> - Algunos medios e infraestructuras son muy pesados: no siempre son adecuados para azoteas - Puede llegar a ser difícil de manejar y relativamente costoso a gran escala - El mantenimiento y la limpieza son difíciles - La obstrucción puede conducir a la canalización del agua, a una biofiltración ineficiente y, por lo tanto, también a un suministro ineficiente de nutrientes a las plantas - El medio puede obstruirse si la densidad de peces excede la capacidad de carga de los lechos, y esto puede requerir una filtración adicional - La evaporación del agua es mayor en los lechos con más superficie expuesta al sol

- Si se aplica el método de inundación y drenaje, el tamaño es importante, y el tanque del sumidero tiene que ser grande



Figure 8: Técnica del lecho con sustrato. Izquierda – Esquema general para el sistema completo. Derecho – Un ejemplo del sistema en ZHAW Waedenswil (Foto: Robert Junge)

Agua profunda o Cultivo de balsa flotante

La balsa contiene agujeros en los que las plantas crecen en macetas, de tal manera que sus raíces se sumergen en el agua. La balsa también puede colocarse para que flote directamente en el tanque, o se puede hacer que el agua sea bombeada desde el tanque con peces hasta un sistema de filtración y luego a canales que contienen una serie de balsas. Un aireador proporciona oxígeno tanto al agua del tanque como a la que contiene la balsa. Como las raíces no tienen un medio al que adherirse, este sistema sólo puede utilizarse para cultivar verduras o hierbas frondosas, y no plantas más grandes. Es el sistema más popular para fines comerciales, debido a la rapidez y facilidad de la cosecha.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de cultivo con agua profunda.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de agua constante • Sumidero pequeño • Fácil de mantener y limpiar 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere un biofiltro separado • Requiere grandes volúmenes de agua • Infraestructura hidropónica es pesado • Es necesario un dispositivo para airear las raíces

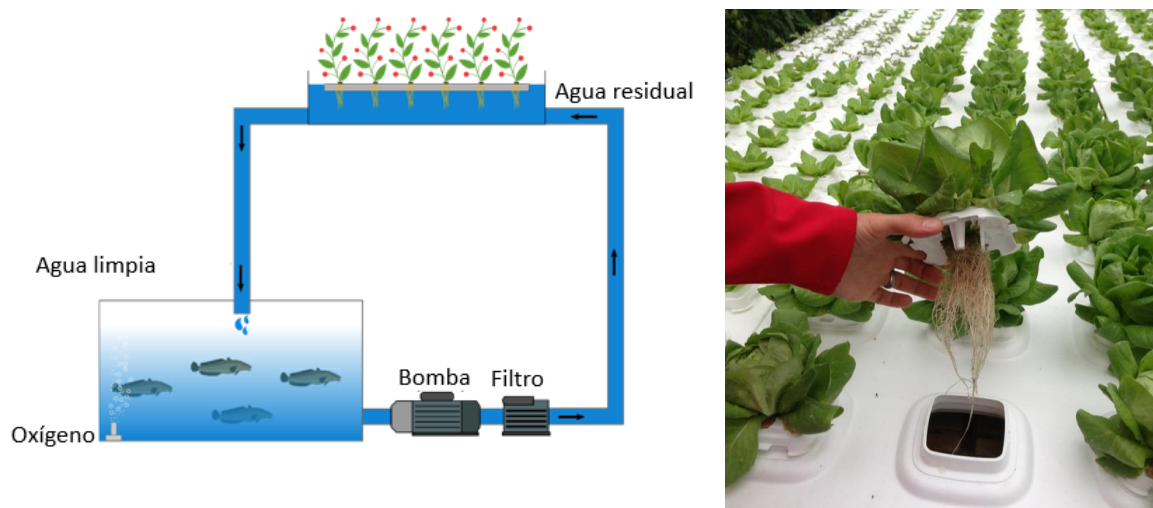


Figure 9: Cultivo con agua profunda o balsas flotantes. Izquierda – Dibujo de un sistema entero. Derecha – Lechuga creciendo sobre una balsa de poliestireno con las raíces suspendidas en el agua.

1.3.4 Uso del espacio: sistemas horizontales y verticales

La mayoría de los sistemas acuapónicos utilizan tanques o lechos de cultivo horizontales, emulando el cultivo tradicional de tierra para producir vegetales. Sin embargo, a lo largo de los años, han surgido y evolucionado nuevas tecnologías de cultivo de paredes vivas y verticales que, cuando se vinculan a la parte de acuicultura del sistema acuapónico, pueden permitir el cultivo de más plantas en forma vertical en lugar de horizontal y, por lo tanto, hacer que los sistemas sean más productivos ([Khandaker y Kotzen 2018](#)).

Los **sistemas horizontales** tienen la ventaja de utilizar eficientemente la luz del día, y pueden funcionar bien sin iluminación adicional, incluso en invierno. Por lo tanto, tienen un bajo consumo de energía eléctrica. El coste de inversión inicial es medio/bajo, especialmente si el precio del terreno es bajo.

Los **sistemas verticales** presentan una solución óptima para ahorrar espacio, lo que los hace muy adecuados para instalaciones urbanas, ya sea para la decoración o para la producción hiperlocal de alimentos. Sin embargo, requieren luz sobre los lechos de cultivo. También requieren menos bombas de agua, pero de mayor potencia, lo que se suma a un mayor consumo de energía eléctrica. Los costos de inversión inicial también son altos.

1.4 Historia de la acuaponía

El concepto de utilizar los excrementos de los peces para fertilizar las plantas existe desde hace milenios, y las primeras civilizaciones de Asia y América del Sur utilizaron este método. Los ejemplos

más conocidos son las "islas estacionarias" o [chinampas](#) aztecas establecidas en lagos poco profundos de América Central (1150-1350 a.C.), y el [sistema de acuicultura usando arroz y peces](#) introducido en Asia hace unos 1.500 años, y que todavía se utiliza hoy en día. Tanto el sistema de acuicultura de arroz y peces como las chinampas fueron incluidos por la FAO en la lista de Sistemas de Patrimonio Agrícola de Importancia Mundial ([Koochafkan y Altieri 2018](#)).

En Europa, los primeros RAS se remontan a finales de la década de los 70 ([Bohl 1977](#)). Al mismo tiempo [Naegel \(1977\)](#) ya había probado la integración de la hidroponía con los ciclos de agua y nutrientes del RAS. La acuaponía contemporánea en los EE.UU. comenzó con la investigación pionera de Todd, a la que se hace referencia en [Love et al. \(2014\)](#), junto con los estudios de [Goldman et al. 1974](#), [Ryther et al. 1975](#) de la reutilización de los nutrientes de las aguas residuales para la producción vegetal y animal. Antes de los avances tecnológicos de los '80, la mayoría de los intentos de integrar la hidroponía y la acuicultura tuvieron un éxito limitado. En 1980 y 1990 se produjeron avances en el diseño de sistemas, la biofiltración y la identificación de las proporciones óptimas entre peces y plantas, que condujeron a la creación de sistemas cerrados que permiten el reciclado del agua y la acumulación de nutrientes para el crecimiento de las plantas. Los pioneros de la acuaponía que inspiraron a muchos seguidores fueron:

- El Dr. Mark McMurtry ([McMurtry et al. 1990](#)) comenzó a trabajar en acuaponía cuando estaba en la Universidad Estatal de Carolina del Norte a mediados de los años ochenta y principios de los noventa. Llamó el método el "Sistema Integrado de AquaVegeculture" (IAVS). Los actuales sistemas de inundación y drenaje, como los que prefieren los profesionales de la jardinería, se derivan de este modelo.
- El Dr. James Rakocy diseñó el que quizás sea el diseño más copiado, el sistema acuapónico de [The University of Virgin Islands \(UVI\)](#) en 1980 ([Rakocy et al. 2003](#); [Rakocy et al. 2004](#)). Ha desarrollado coeficientes y cálculos vitales para maximizar la producción tanto de peces como de plantas, manteniendo al mismo tiempo un ecosistema equilibrado.
- En Australia, el Dr. Wilson Lennard también ha realizado cálculos clave y planes de producción para otros tipos de sistemas ([Lennard y Leonard 2004](#); [Lennard y Leonard 2006](#)).
- En Canadá, el Dr. Nick Savidov ([Savidov y Brooks 2004](#)) demostró que, cuando se alcanzaban algunos niveles clave de nutrientes, los sistemas acuapónicos tenían una producción significativamente superior de tomates y pepinos en comparación con los sistemas hidropónicos.

Estos avances en la investigación, así como muchos otros, han allanado el camino para varios grupos de profesionales y empresas que están empezando a brotar en todo el mundo. Sin embargo, la investigación en acuaponía no despegó realmente hasta después de 2010 (véase el número comparativo de publicaciones científicas sobre hidroponía, acuicultura y acuaponía en la figura 10). Sin embargo, hay una gran diferencia entre lo que el mundo está "hablando" y lo que se está investigando actualmente. [Junge et al. \(2017\)](#) acuñaron el término 'hype ratio' como indicador de la popularidad de un tema en los medios de comunicación públicos en comparación con el mundo académico. Se calcula como los resultados de búsqueda en Google divididos por los resultados de búsqueda en Google Académico. La acuaponía tiene un 'hype ratio' de más de 1000, que es significativamente mayor que, por ejemplo, la hidroponía (más de 100) y la acuicultura (alrededor de

20). En este sentido, la acuaponía puede denominarse 'una tecnología emergente' y un tema científico emergente.

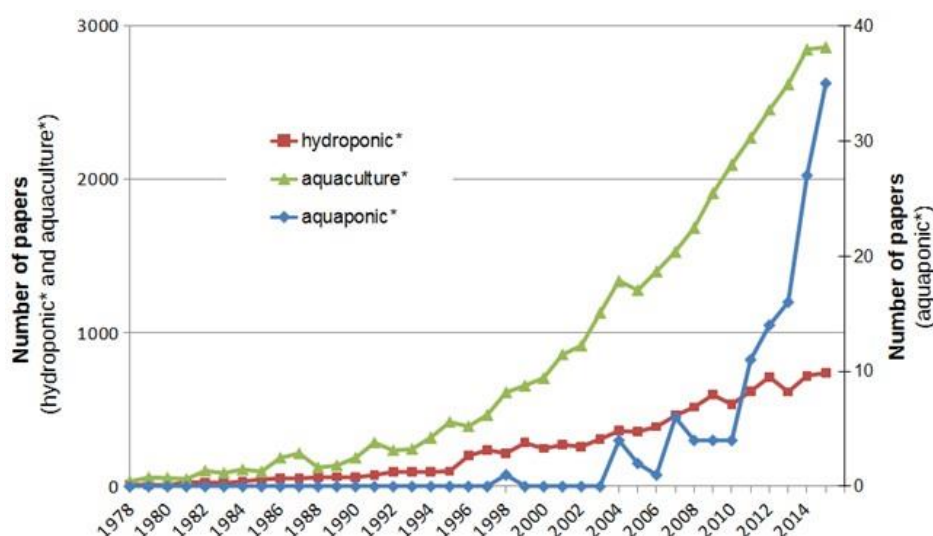


Figura 10: El número de artículos científicos publicados sobre hydroponic*, aquaculture*, y aquaponic*‡ desde 1978 hasta 2015 (se recogieron los datos de Scopus el 17 de septiembre de 2016). ‡ Nótese que la escala para el eje aquaponic* es dos veces menor que la de hydroponic* o aquaculture* (de [Junge et al. 2017](#)).

1.5 Ejemplos de sistemas acuapónicos en el mundo

Existen un abanico enorme de diferentes tipos de sistemas acuapónicos en el mundo en las diferentes continentes. Se resume algunos sistemas y sus características más importantes en la Tabla 5.

1.5.1 Europa

Entre los años 2014 y 2018, la Unión Europea financió la acción COST FA1305 "EU Aquaponics Hub", que supuso la cooperación de los países miembros en la investigación de los sistemas acuapónicos como tecnología pertinente para la producción sostenible de pescado y vegetales en la UE. El [sitio web](#) de la acción es una muy buena fuente de información, con enlaces a hojas de datos, publicaciones y vídeos de escuelas de capacitación. El mismo grupo realizó una encuesta sobre la utilización de la acuaponía en Europa, subrayando que la mayoría de las unidades son pequeñas y están relacionadas con la investigación ([Villarroel et al., 2017](#)). Se publicó en Google Mapas un [mapa](#) de casi todas las instalaciones de acuaponía conocidas en Europa.

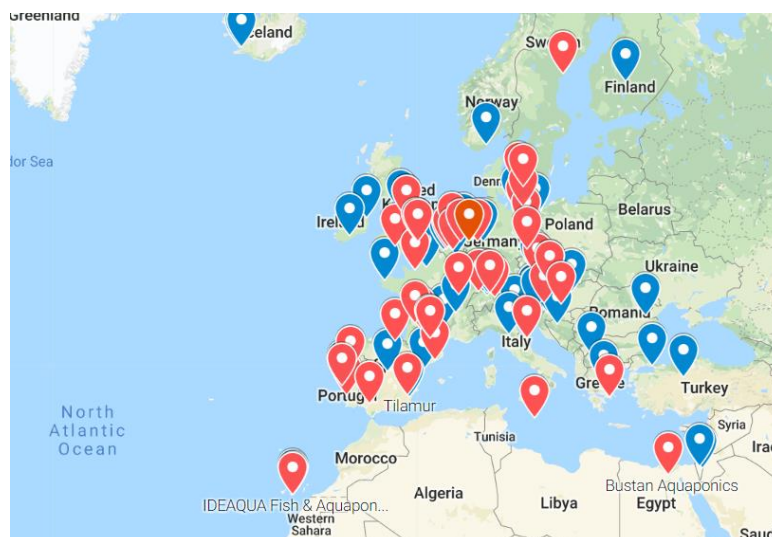


Figura 11: [Mapa de instalaciones acuapónicas en Europa.](#)

El mapa incluye la ubicación de todos los institutos de investigación (azul) y empresas (rojo) que actualmente trabajan en la acuaponía. No puede ser editado directamente, pero los investigadores y empresas que quieran ser añadidos pueden enviar sus datos a morris.villarroel@upm.es. Como se desprende del mapa, la colaboración de la industria es esencial para que la acuaponía cumpla su promesa de ser un sistema viable de producción local de alimentos en la UE. En el mapa figuran actualmente 50 centros de investigación y 45 empresas, lo que sugiere un buen equilibrio entre la investigación y el desarrollo.

Tabla 6: Resumen de algunos sistemas acuapónicos en el mundo.

Country	Purpose y type	Fish	Plants	Author(s)
Australia	Research Backyard system (ebb-and-flow)	Murray cod	Lettuce	Lennard y Leonard 2004
Barbados	Research Backyard system (ebb-and-flow)	Red Tilapia	Basil and okra (growth medium: coconut husk)	Connolly y Trebic 2010
United States Virgin Islands	Research Commercial system Raft hydroponic	Tilapia	Basil, okra	Rakocy et al. 2003
China	Large commercial system (ponds)	Environment for natural spawning of native fish	Rice, canna flowers	Duncan 2014
Germany, Berlin	Research, demonstration, education (NFT and NGS* channels)	Trout	Strawberries, pak choi, mini cucumber, salads	Roof Water Farm
Hawaii	Large commercial system	Tilapia	Salads	Kunia Country Farms
Hungary, Kaposvar	Social institution (grow beds, NFT)	Wels catfish	Herbs, lettuce, tomatoes, strawberries	Passive Aquaponics

Iceland	Research Small commercial system (grow beds, raft cultures, NFT channels)	Tilapia	Tomatoes, beans, lettuce	Thorarinsdottir 2015
Iran	Research Based on UVI Model Raft, grow beds	Common carp, grass carp and silver carp	Tomatoes	Roosta y Afsharipoor 2012
Slovenia, Naklo	Vocational education Based on 'Waedenswil' model (grow beds, raft cultures, NFT channels)	Carp	Salads	Podgrajšek et al. 2014
United Arab Emirates	Large commercial system Raft hydroponic	Tilapia, barramundi	Salads	Smith 2015
Vietnam	Research Backyard system (grow beds)	Tilapia	Canna flowers, water spinach, salads	Trang y Brix 2014

* New growing system: www.ngsystem.com

Islandia: El sistema acuapónico de [Svinna-verkfraedi Ltd](#) consiste en tres tanques de peces de 4 m³, un filtro tambor, un biofiltro, un tanque de sumidero y canales NFT. La parte hidropónica se ha utilizado para cultivar tomates, alubias y lechuga. La empresa está probando diferentes sistemas hidropónicos (lechos de cultivo, cultivos en balsa, canales NFT), y recientemente ha añadido cangrejos de río al sistema para hacer uso de los lodos de las peceras ([Thorarinsdottir 2015](#)).

Hungría: La empresa húngara [Passive Aquaponics](#) construyó una casa de aquaponía pasiva en la empresa social "Asociación de discapacitados del condado de Somogy". La casa se calienta con gas (70%) combinado con un calentador de abono (30%). El bagre de Wels (*Silurus glanis*) se cría en pequeños tanques. Las unidades hidropónicas, llenas de arcilla expandida, se utilizan para cultivar hierbas (albahaca, menta), lechuga, tomates, pimientos, fresas e incluso plantas de plátano.

Alemania: La Granja Azotea de Agua ([Roof Water Farm](#)) en Berlín es un proyecto de demostración para la gestión innovadora de las aguas urbanas y la producción de alimentos. Se centra en un uso higiénicamente seguro del agua de lluvia, de las aguas grises y de las aguas negras, combinado con tecnologías descentralizadas de tratamiento del agua, para la producción de alimentos acuapónicos e hidropónicos.



Figure 12: Izquierda: – Roof Water Farm (Foto: Grit Bürgow). Derecha – Centro educativo agrícola Strickhof (Foto: Roger Bolt)

Suiza: En el centro de enseñanza agrícola de Strickhof, en el cantón de Zurich, construyó un [sistema acuapónico experimental](#) en 2012, principalmente con fines educativos. Construido en la parte posterior de un antiguo invernadero en una superficie de aproximadamente 36 m², consta de una pecera de 3 m³, cinco canales NFT y dos mesas de inundación y flujo.

1.5.2 Asia

China: Hasta donde sabemos, el mayor sistema acuapónico jamás construido está en el [Lago Taihu](#). El lago tiene una industria de acuicultura importante, que causó la eutrofización y por lo tanto problemas con *blooms* de algas. Esta situación impulsó a los investigadores a buscar nuevas soluciones. Decidieron probar una tecnología llamada Aqua Biofilter, que está diseñada para eliminar los nutrientes que causan las *blooms* de algas. Esto dio como resultado un sistema acuapónico que cubre 1.6 hectáreas y se utiliza para cultivar arroz en estanques de peces ([Duncan 2014](#)).

Vietnam: [Trang y Brix \(2014\)](#) construyeron un sistema acuapónico en el delta del Mekong, que es una de las zonas de acuicultura más productivas de Vietnam. Construyeron tres sistemas acuapónicos integrados y cerrados a escala piloto al aire libre (3 x aprox. 2 m³), y demostraron que éstos pueden proporcionar un importante ahorro de agua y permitir el reciclado de nutrientes en comparación con los estanques de peces tradicionales, además de aportar beneficios adicionales a los piscicultores.

Irán: Se diseñó un sistema acuapónico experimental en la Universidad Vali-e-Asr de Rafsanjan basado en el modelo UVI para investigar los efectos de las aplicaciones foliares de algunos micro y macronutrientes en el crecimiento y el rendimiento del tomate en comparación con un sistema hidropónico. El sistema acuapónico consiste en tres unidades acuapónicas idénticas y separadas. Cada unidad tiene un tanque para la cría de peces, un clarificador, un tanque de filtrado, un tanque de degasificación y una unidad de lecho de crecimiento de plantas ([Roosta y Afsharipoor 2012](#)).

Emiratos Árabes Unidos: A finales de 2013 uno de los mayores sistemas acuapónicos comerciales del mundo fue construido por Paul Van der Werf del Grupo Earthan de Queensland. La granja consiste en un cobertizo de 4.500 m² que produce alrededor de 40 toneladas de tilapia. La instalación también está pilotando un programa de cría de barramundis juveniles. Los sistemas utilizan las aguas residuales de un fabricante de alimentos cercano, que de otro modo serían vertidas en el desierto. La única vulnerabilidad del sistema es que sin enfriamiento por evaporación, las temperaturas en el invernadero pueden alcanzar los 68°C ([Smith 2015](#)).

1.5.3 Las Américas

Barbados: tiene un clima oceánico tropical con poca variación de temperatura (aprox. 20-32 °C) debido a los refrescantes vientos alisios del este del Océano Atlántico. En 2009 se construyó un sistema acuapónico experimental con un volumen aproximado de 6m³ con el fin de obtener parámetros para mejorar el sistema, y hacer recomendaciones de gestión con el objetivo de optimizar los resultados de la biomasa de peces y plantas ([Connolly y Trebic 2010](#)).

Islas Vírgenes de los Estados Unidos: El [sistema acuapónico a escala comercial de la Universidad de las Islas Vírgenes \(UVI\)](#) se ha convertido en el modelo de muchos sistemas posteriores. El sistema acuapónico tuvo un buen rendimiento durante un período sostenido de tiempo, y produjo tilapia de manera continua durante 4 años. Durante ese tiempo, se realizaron dos ensayos para evaluar la producción de albahaca y quimbombó, que resultó ser muy superior a la producción de campo de control ([Rakocy et al. 2003](#)).

Hawái: [Kunia Country Farms](#) comenzó a funcionar en 2010, y es ahora una de las mayores granjas acuapónicas y productora de verduras de hoja en el estado de Hawái. Su sistema está compuesto por tres acuarios que contienen tilapia, 18 lechos de cultivo (cultivo en aguas profundas con balsas de poliestireno) y un tanque de sumidero. Cada lecho de cultivo puede albergar entre 1650 y 3300 plantas. Todo el sistema tiene un volumen de agua de aproximadamente 380 m³. Dado que las necesidades eléctricas del sistema son bajas, pero aún muy costosas en Hawái, planean construir un sistema fotovoltaico de 20 kW que generará suficiente energía solar para hacer que la granja sea neutra para la red eléctrica.

1.5.4 Australia

[Lennard y Leonard 2004](#) utilizaron el bacalao de Murray (*Maccullochella peelii peelii*) y la lechuga (*Lactuca sativa*) para probar las diferencias entre dos regímenes de inundación acuapónica: a) flujo recíproco, y b) flujo constante. Su sistema experimental consistía en 12 unidades acuapónicas separadas e idénticas. Cada unidad tenía una pecera, un biofiltro y un lecho de cultivo hidropónico.

Ambos sistemas funcionaron bien, pero el sistema de flujo constante mostró mejores resultados en cuanto al rendimiento de la lechuga.

1.6 Temas de Investigación recientes en acuaponía

1.6.1 Tendencias en acuaponía

Como hemos visto antes, el diseño de sistemas exitosos depende del grupo usuario final. Producción sin suelo y de alta producción requiere el uso de alta tecnología (bombas, aireadores, sensores) y mucho conocimiento, así que normalmente se ajusta mejor a sistemas comerciales. No obstante, es posible diseñar y operar sistemas de baja tecnología que requieren menos destrezas en cuanto a la operación diaria, y permiten obtener resultados respetables. Esto implica un compromiso (alta tecnología/baja tecnología) y la amplia gama de aplicaciones de la acuaponía tiene consecuencias en las vías de desarrollo de la tecnología, el diseño de sistemas y los aspectos socioeconómicos. La tecnología acuapónica podría desarrollarse por lo menos en dos direcciones: por un lado, hacia soluciones de baja tecnología (probablemente sobre todo en los países en desarrollo y para aplicaciones no profesionales) y, por otro lado, hacia instalaciones de alta tecnología altamente eficientes (predominantemente en los países desarrollados y con socios profesionales/comerciales) ([Junge et al. 2017](#)).

Si bien la tecnología en sí no impone límites a una zona de la explotación agrícola (porque puede ser modular), el tamaño de las explotaciones agrícolas urbanas viene determinado por: i) las características de la zona disponible, que necesariamente está fragmentada en una ciudad (zonas industriales abandonadas, edificios infrautilizados o vacíos y tejados); y ii) las limitaciones que plantea la economía de la producción de cultivos. Como regla general, la superficie necesaria para alcanzar el umbral de rentabilidad de las operaciones comerciales es de unos 1.000 m². Las instalaciones de los aficionados y en patios traseros pueden ser, por supuesto, mucho más pequeñas. Las granjas acuapónicas pueden crecer/ampliarse aumentando el número de sistemas operativos (o módulos), o yendo en vertical, aunque no pueden ampliarse demasiado sin aumentar considerablemente los costos de construcción y de energía. La gama de tamaños de las granjas acuapónicas urbanas oscilará probablemente entre 150 m² y 3000 m², debido a las limitaciones de espacio, económicas y de gestión, pero esto podría ser suficiente para cubrir las necesidades básicas de un surtido de hortalizas frescas para parte de la población urbana. Las granjas acuapónicas periurbanas podrían ser más grandes y modificarse para incluir sistemas de acuicultura en tierra firme o para reutilizar efluentes ricos en nutrientes, lodos de pescado compostados en las zonas rurales.

La tecnología acuapónica en sí misma puede considerarse inmadura, ya que todavía hay problemas por resolver. El simple hecho de vincular un sistema de acuicultura de última generación con un sistema hidropónico de última generación no tiene en cuenta otros factores, como los problemas de obstrucción de los filtros de tambor, la ineficacia de los sedimentadores, los fallos de oxígeno, los sedimentadores mal diseñados y las tuberías de agua obstruidas. Aunque la influencia de los lechos de cultivo de plantas (NFT, riego por goteo, cultivo en aguas profundas) es ya bien conocida en los sistemas hidropónicos, la elección de esos lechos en los sistemas acuapónicos debe estudiarse más a

fondo, ya que tendrá consecuencias para la productividad y el funcionamiento. También es necesario seguir investigando en otras esferas. Como los microorganismos son omnipresentes, desempeñan un papel importante en todas las etapas de la producción acuapónica. La influencia de las condiciones ambientales en su abundancia, diversidad y funciones podría investigarse, por ejemplo, mediante la utilización de los métodos de la nueva generación de secuencias ([Schmautz et al. 2016a](#)). Una de las cuestiones centrales es el control apropiado de plagas y enfermedades para los sistemas acuapónicos. Los problemas relacionados con la protección de las plantas en la acuaponía fueron examinados por [Bittsanszky et al. \(2016b\)](#). Llegaron a la conclusión de que, dado que se dispone de muy pocos instrumentos para la protección fitosanitaria en la acuaponía, se debe hacer hincapié en las medidas de precaución para reducir al mínimo la infiltración de plagas y patógenos. Por otra parte, los métodos de control biológico de plagas actualmente disponibles para la agricultura orgánica tienen que adaptarse a la acuaponía (véase el capítulo 8).

Para que la acuaponía se desarrolle como un método exitoso de alta tecnología para la producción de alimentos, habrá que centrarse en la reducción de las necesidades de mano de obra. Si bien ya se ha desarrollado bastante la automatización (para el riego y la alimentación, la vigilancia en línea y las alarmas para muchos parámetros, especialmente el oxígeno), es necesario perfeccionarla para permitir operaciones más precisas y eficientes en cuanto a la mano de obra, lo que requerirá el desarrollo de sensores adecuados. Una opción para reducir la mano de obra podría ser el uso de robots. Deberían desarrollarse sistemas versátiles, similares a [Farmbot](#), para su uso exclusivo en la acuaponía

1.6.2 Tendencias en el diseño de sistemas

Si bien la acuaponía tiene el potencial de ser sostenible, los estudios de análisis del ciclo vital (ACV) exhaustivos de las operaciones y productos acuapónicos son escasos ([Forchino et al. 2017](#); [Maucieri et al. 2018](#)). Sin embargo, es evidente que el impacto ecológico de la acuaponía podría mejorarse aún más si se aprovecharan las fuentes de energía renovables, se desarrollaran métodos de aprovechamiento de la luz del día para evitar el uso de energía eléctrica, se utilizara agua pre-tratada o reciclada o agua de lluvia y se mejorara el control climático de los invernaderos. En un entorno urbano, la acuaponía debería integrarse más en los edificios, permitiendo el intercambio de gas, agua y energía entre los invernaderos y los edificios. También es necesario mejorar los ciclos de los materiales orgánicos. La alimentación de los peces es el principal aporte de nutrientes y define, en gran medida, la sostenibilidad de la operación. Aquaponics (al igual que RAS) requiere una nutrición óptima para los peces, y los alimentos para peces deben consistir en materiales sostenibles de origen local (orgánicos, vegetarianos, insectos). El bucle acuapónico debe cerrarse aún más mediante la digestión del lodo de los peces a fin de reutilizar los nutrientes del sistema acuapónico, o mediante la cría de lombrices rojas y/o insectos en los residuos vegetales y su utilización para la alimentación de los peces, con lo que el lodo residual de los peces y los residuos vegetales se convertirán en abono. El objetivo es llegar a un concepto de cero desechos en la granja para reducir la huella de carbono. Los estudios sobre las emisiones de gases de efecto invernadero podrían completar este cuadro. Por último, la posibilidad de utilizar organismos novedosos en la acuaponía (por ejemplo, plantas acuáticas, peces marinos, algas y algas marinas, crustáceos, etc.) debería seguir explorándose para

ampliar el ciclo ecológico. Los nuevos productos de la acuicultura y de las plantas también podrían tener repercusiones en la viabilidad económica de la tecnología, como se examina en la siguiente sección.

1.6.3 Investigación socio-económica

En la actualidad, la acuaponía es un sector empresarial pequeño pero emergente. Aunque la producción de alimentos es el objetivo básico de la operación, a menudo se combina con el turismo y la educación para mejorar la rentabilidad. Debido a su enfoque tecnológico transversal relativamente novedoso, la acuaponía no tiene un estatuto jurídico claro dentro de la normativa vigente en Europa ([Joly et al. 2015](#)). Mientras que en los Estados Unidos los productos acuapónicos pueden ser certificados como orgánicos, en Europa esto no es posible actualmente porque la acuaponía implica la producción de plantas sin suelo y RAS, ninguna de las cuales están permitidas por las regulaciones orgánicas de la UE.

A pesar del potencial de la acuaponía como tecnología de producción de alimentos, todavía hay cuestiones abiertas. Como hemos demostrado anteriormente, la acuaponía es un tema prominente en los medios de comunicación social, pero se sabe poco sobre el conocimiento y la aceptación de los consumidores, que deben ser entendidos en diferentes entornos culturales y de mercado. En general, no se sabe lo suficiente sobre la forma en que deben comunicarse a los consumidores las ventajas de sostenibilidad de la acuaponía, en comparación con la calidad del producto, como el sabor, la frescura, la salud y el precio ([Newman et al. 2014](#)).

Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones sobre acuaponía se han centrado en el desarrollo de instalaciones funcionales. Una forma de mejorar la rentabilidad podría ser mejorar la eficiencia. El uso eficiente de las fuentes de energía alternativas, el agua y el reciclado de los efluentes orgánicos ahorrarán costes de producción, pero es necesario evaluarlos en función de los mayores costes de inversión. Para aumentar la producción comercial, también deben desarrollarse nuevos modelos comerciales en relación con las ideas emergentes de las economías circulares y locales, pero la gestión de las interfaces aumenta la complejidad. En este caso, será necesario abordar las cuestiones de las condiciones marco de los costos de explotación, la logística local y los determinantes del comportamiento de compra de verduras y pescado. Además de la mejora de la eficiencia tecnológica, también hay cuestiones relativas a la gestión operacional, y podría ser interesante explorar nuevas variedades de cultivos sensibles al transporte a fin de obtener un precio de mercado suficientemente alto evitando la competencia con la horticultura especializada. Sin embargo, la combinación de una nueva tecnología con nuevos productos también aumenta la incertidumbre empresarial.

La acuaponía es especialmente útil para los educadores: incluso un sistema de clases pequeñas ofrece una amplia gama de posibilidades de instrucción en diferentes niveles educativos, desde la escuela primaria hasta la universidad (véase el Capítulo 15). La acuaponía puede integrarse fácilmente en todas las asignaturas de STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas), no sólo para demostrar los principios biológicos y ecológicos básicos, sino también la química, la física y las matemáticas. Se

pueden obtener una variedad de competencias y habilidades al operar los sistemas acuapónicos, tales como habilidades básicas de laboratorio, trabajo en equipo, ética ambiental, por nombrar sólo algunas. La amplitud de los aspectos socioeconómicos que se esbozan aquí ilustra que la acuaponía sólo florecerá con una amplia colaboración entre varios actores clave adicionales más allá de los científicos e ingenieros naturales. Entre ellos podrían figurar, por ejemplo, i) diseñadores y arquitectos para proporcionar diseños estéticamente agradables; ii) científicos sociales para ayudar a comprender las percepciones y la aceptación de la acuaponía entre un público más amplio; y iii) científicos de la salud y la nutrición para explorar la forma en que los productos acuapónicos podrían incorporarse a las dietas como alimentos sanos y producidos de forma sostenible. También es necesario desarrollar circuitos de retroalimentación para los desarrolladores de sistemas y los fisiólogos de plantas y peces, a fin de mejorar los sistemas en lo que respecta a la demanda de los consumidores, la sostenibilidad y el valor nutritivo de los productos.

1.7 Referencias

- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B. y Komives, T. 2016a. [Nutrient supply of plants in aquaponic systems](#). *Ecocycles* 2 (2), 17-20.
- Bittsanszky, A., Gyulai, G., Junge R., Schmautz, Z. y Komives, T. 2016b [Plant protection in ecocycle-based agricultural systems: Aquaponics as an example](#). In *Proceedings of the 28th International Plant Protection Congress (IPPC), Berlin, Germany, 24–27 August 2016*.
- Bohl, M. 1977. [Some initial aquaculture experiments in recirculating water systems](#). *Aquaculture* 11 (4), 323-328.
- Buhmann, A. K., Waller, U., Wecker, B. y Papenbrock, J. 2015. [Optimization of culturing conditions and selection of species for the use of halophytes as biofilter for nutrient-rich saline water](#). *Agricultural Water Management* 149, 102-114.
- Connolly, K. y Trebic, T. 2010. [Optimization of a Backyard Aquaponic Food Production System](#). Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Macdonald Campus, McGill University, BREE 495 Design 3.
- Diver, S. 2006. [Aquaponics – Integration of Hydroponics with Aquaculture](#). ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service.
- Duncan, T. 2014. [World's largest aquaponics project, in China's third largest aquaculture lake](#). Permaculture Research Institute.
- Forchino, A.A., Lourguoui, H., Brigolin, D. y Pastres, R. 2017. [Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the life cycle assessment \(LCA\)](#). *Aquacultural Engineering* 77, 80-88.
- Gericke, W.F. 1937. [Hydroponics — Crop production in liquid culture media](#). *Science* 85 (2198), 177-178.
- Goddek, S., Espinal, C.A., Delaide, B., Jijakli, M.H., Schmautz, Z., Wuertz, S. y Keesman, K J. 2016a. [Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach](#). *Water* 8 (7), 303.
- Goddek, S., Schmautz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K.J., Wuertz, S. y Junge, R. 2016b. [The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce](#). *Agronomy* 6 (2), 37.
- Goldman, J.C., Tenore, K.R., Ryther, J.H. y Corwin, N. 1974. [Inorganic nitrogen removal in a combined tertiary treatment—marine aquaculture system—I. Removal efficiencies](#). *Water Research* 8 (1), 45-54.

- Graber, A. y Junge, R. 2009. [Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production](#). *Desalination* 246 (1-3), 147-156.
- Graber, A., Durno, M., Gaus, R., Mathis, A. y Junge, R. 2014a. [UF001 LokDepot, Basel: The first commercial rooftop aquaponic farm in Switzerland](#). In *International Conference on Vertical Farming and Urban Agriculture (VFUA 2014)*, Nottingham, United Kingdom, 9–10 September 2014.
- Graber, A., Antenen, N. y Junge, R. 2014b. [The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab](#). In Maček Jerala, M. y Maček, M.A. (eds). *Conference VIVUS: Transmission of Innovations, Knowledge and Practical Experience into Everyday Practice. Collection of Papers, Strahinj, 14–15 November 2014*, pp. 245-255.
- Joly, A., Junge, R. y Bardocz, T. 2015. [Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions](#). *Ecocycles* 1 (2), 3-5.
- Junge, R., Wilhelm, S. y Hofstetter, U. 2014. [Aquaponic in classrooms as a tool to promote system thinking](#). In Maček Jerala, M. y Maček, M.A. (eds.) *Conference VIVUS: Transmission of Innovations, Knowledge and Practical Experience into Everyday Practice. Collection of Papers, Strahinj, 14-15 November 2014*, pp. 234-244.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T. y Jijakli, M.H. 2017. [Strategic points in aquaponics](#). *Water* 9 (3), 182.
- Khandaker, M. y Kotzen, B. 2018. [The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates](#). *Aquaculture Research* 49 (4), 1454-1468.
- Klemenčič, A.K. y Bulc, T.G. 2015. [The use of vertical constructed wetland and ultrasound in aquaponic systems](#). *Environmental Science and Pollution Research* 22 (2), 1420-1430.
- Koohafkan, P. y Altieri, M.A. 2018. [Globally Important Agricultural Heritage Systems: A Legacy for the Future](#). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Laidlaw, J. y Magee, L. 2016. [Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne](#). *Local Environment* 21 (5), 573-590.
- Lennard, W.A. y Leonard, B.V. 2004. [A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system](#). *Aquaculture International* 12 (6), 539-553.
- Lennard, W.A. y Leonard, B.V. 2006. [A comparison of three different hydroponic sub-systems \(gravel bed, floating and nutrient film technique\) in an aquaponic test system](#). *Aquaculture International* 14 (6), 539-550.
- Love, D.C., Fry, J.P., Genello, L., Hill, E.S., Frederick, J.A., Li, X. y Semmens, K. 2014. [An international survey of aquaponics practitioners](#). *PLoS ONE* 9 (7), e102662.
- Maucieri, C., Forchino, A.A., Nicoletto, C., Junge, R., Pastres, R., Sambo, P. y Borin, M. 2018. [Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered material](#). *Journal of Cleaner Production* 172, 3119-3127.
- McMurtry, M.R., Nelson, P.V., Sanders, D.C. y Hodges, L. 1990. [Sand culture of vegetables using recirculated aquacultural effluents](#). *Applied Agricultural Research* 5 (4), 280-284.
- Monsees, H., Kloas, W. y Wuertz, S. 2017. [Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes](#). *PloS ONE* 12 (9), e0183056.
- Naegel, L.C. 1977. [Combined production of fish and plants in recirculating water](#). *Aquaculture* 10 (1), 17-24.
- Newman, G.E., Gorlin, M. y Dhar, R. 2014. [When going green backfires: How firm intentions shape the evaluation of socially beneficial product enhancements](#). *Journal of Consumer Research* 41 (3), 823-839.

- Nozzi, V., Parisi, G., Di Crescenzo, D., Giordano, M. y Carnevali, O. 2016. [Evaluation of *Dicentrarchus labrax* meats and the vegetable quality of *Beta vulgaris* var. *cicla* farmed in freshwater and saltwater aquaponic systems](#). *Water* 8 (10), 423.
- Nozzi, V., Graber, A., Schmautz, Z., Mathis, A. y Junge, R. 2018. [Nutrient Management in Aquaponics: Comparison of Three Approaches for Cultivating Lettuce, Mint and Mushroom Herb](#). *Agronomy* 8 (3), 27.
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Jijakli, M.H. y Kotzen, B. 2018. [Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature](#). *Aquaculture International* 26 (3), 813-842.
- Podgrajsek, B., Schmautz, Z., Krivograd Klemencic, A., Jarni, K., Junge, R. y Griessler Bulc, T. 2014. [Preliminarni monitoring akvaponicnega sistema v biotehniskem centru Naklo: Preliminary Monitoring of an Aquaponic System in Biotechnical Center Naklo](#). *Moje Podeljelje* 5 (9), 10-11.
- Rafiee, G. y Saad, C.R. 2010. [The effect of natural zeolite \(clinoptilolite\) on aquaponic production of red tilapia \(*Oreochromis* sp.\) and lettuce \(*Lactuca sativa* var. *longifolia*\), and improvement of water quality](#). *Journal of Agricultural Science and Technology* 8, 313-322.
- Rakocy, J.E., Schultz, R.C., Bailey, D.S. y Thoman, E.S. 2003. [Aquaponic Production of Tilapia and Basil: Comparing a Batch and Staggered Cropping System](#). *Acta Horticulturae* 648, 63-70.
- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, R.C. y Thoman, E.S. 2004. [Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system](#). In *New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, pp. 12-16.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P. y Losordo, T.M. 2006. [Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics — Integrating Fish and Plant Culture](#). Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 454.
- Roosta, H.R. y Afsharipoor, S. 2012. [Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems](#). *Advances in Environmental Biology* 6 (2), 543-555.
- Ryther, J.H., Goldman, J.C., Gifford, C.E., Huguenin, J.E., Wing, A.S., Clarner, J.P., Williams, L.D. y Lapointe, B.E. 1975. [Physical models of integrated waste recycling-marine polyculture systems](#). *Aquaculture* 5 (2), 163-177.
- Savidov, N. y Brooks, A.B. 2004. [Evaluation and Development of Aquaponics Production and Product Market Capabilities in Alberta](#). Crop Diversification Centre South, Brooks, Alberta.
- Schmautz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., Goesmann, A., Junge, R. y Smits, T.H.M. 2016a. [Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system](#). *Archives of Microbiology* 199 (4), 613-620.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T. y Junge, R. 2016b. [Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods](#). *Water* 8 (11), 533.
- Schnitzler, W.H. 2013. [Urban hydroponics for green and clean cities and for food security](#). *Acta Horticulturae* 1004, 13-26.
- Smith, L. 2015. [Aquaculture expert helps build one of the world's biggest fish farms in Middle East](#). *New South Wales Country Hour*.
- Somerville et al. 2014. Introduction to aquaponics. Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. 2014. [Small-scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 1-10.

Thorarinsdottir, R.I. (ed.) 2015. [Aquaponics Guidelines](#). EU Lifelong Learning Programme, Reykjavik.

Trang, N.T.D. y Brix, H. 2014. [Use of planted biofilters in integrated recirculating aquaculture-hydroponics systems in the Mekong Delta, Vietnam](#). *Aquaculture Research* 45 (3), 460-469.

Villarroel, M., Junge, R., Komives, T., König, B., Plaza, I., Bittsanszky, A., y Joly, A. 2016. [Survey of aquaponics in Europe](#). *Water*, 8 (10), 468.

2. ACUICULTURA

2.1 Introducción a la acuicultura

La acuicultura es la cría en cautividad y la producción de peces y otras especies de animales y plantas acuáticas en condiciones controladas ([Somerville et al. 2014](#)). Debido a la sobrepesca y a la consiguiente disminución de las poblaciones de peces silvestres, la acuicultura ha adquirido una importancia creciente en los últimos decenios (Figura 1), y puede incrementar en importancia en el futuro a medida que las poblaciones de peces silvestres se enfrenten a la inmensa presión por el cambio climático ([Gibbens 2019](#)).

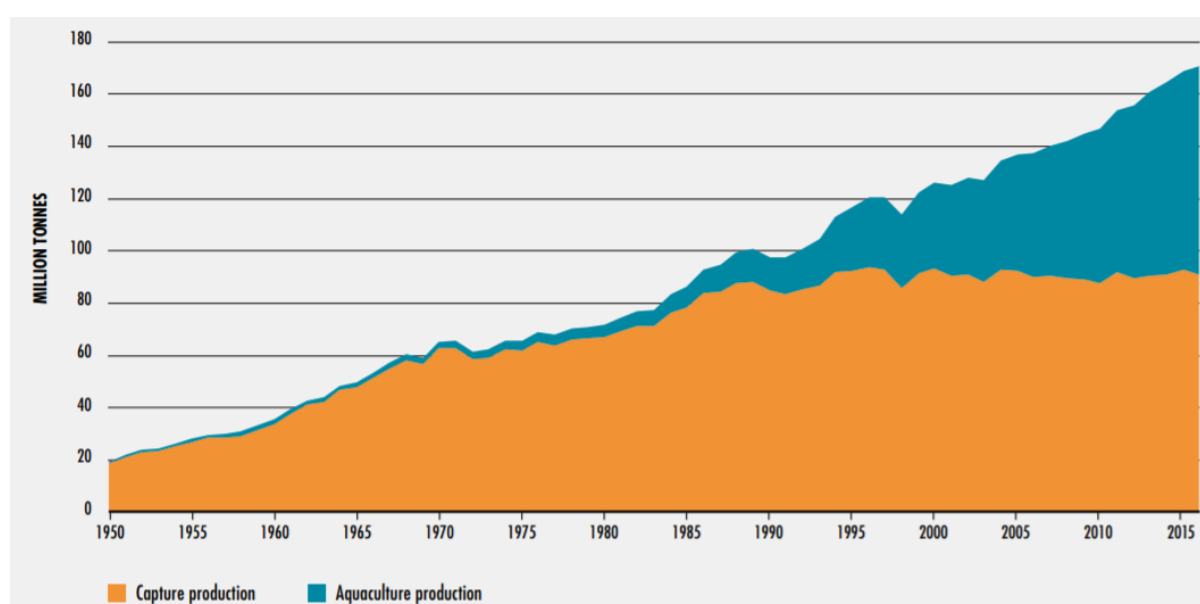


Figura 2: En 2016 la producción de proveniente de la acuicultura representaba sobre 47% del total de la producción de peces a nivel mundial ([FAO 2018](#))

El objetivo principal de cualquier sistema de acuicultura es producir, cultivar y vender peces u otros animales acuáticos o plantas. La situación básica de la cría de peces se muestra en la Figura 2. Los peces que viven en un cuerpo de agua reciben alimento y oxígeno. Su metabolismo los convierte en excrementos y CO₂ que, si se acumulan en el agua, son tóxicos para los peces. Las diferentes tecnologías de cría de peces hacen frente a este problema utilizando diferentes estrategias.

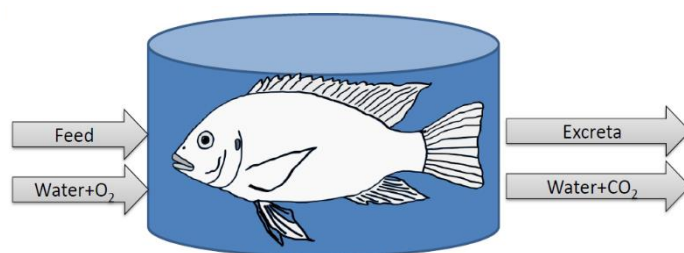


Figura 2: Representación gráfica del principio básico de la acuicultura desde el punto de vista del agua. Los peces consumen pienso y oxígeno. Su metabolismo los convierte en excrementos y CO_2 , que son tóxicos para el pez. El agua se convierte en agua residual.

Los sistemas de acuicultura pueden clasificarse en cuatro tipos básicos: estanques de peces, jaulas con redes, sistemas *raceway* o flujo unidireccional y sistemas de recirculación (Figura 3). Las técnicas de acuicultura "abiertas", como las jaulas y los sistemas unidireccionales liberan aguas residuales ricas en nutrientes en el medio ambiente, lo que puede causar eutrofización y la falta de oxígeno hipoxia en las masas de agua. En los sistemas de acuicultura de recirculación (RAS) estas aguas residuales se tratan y se reutilizan dentro del sistema.

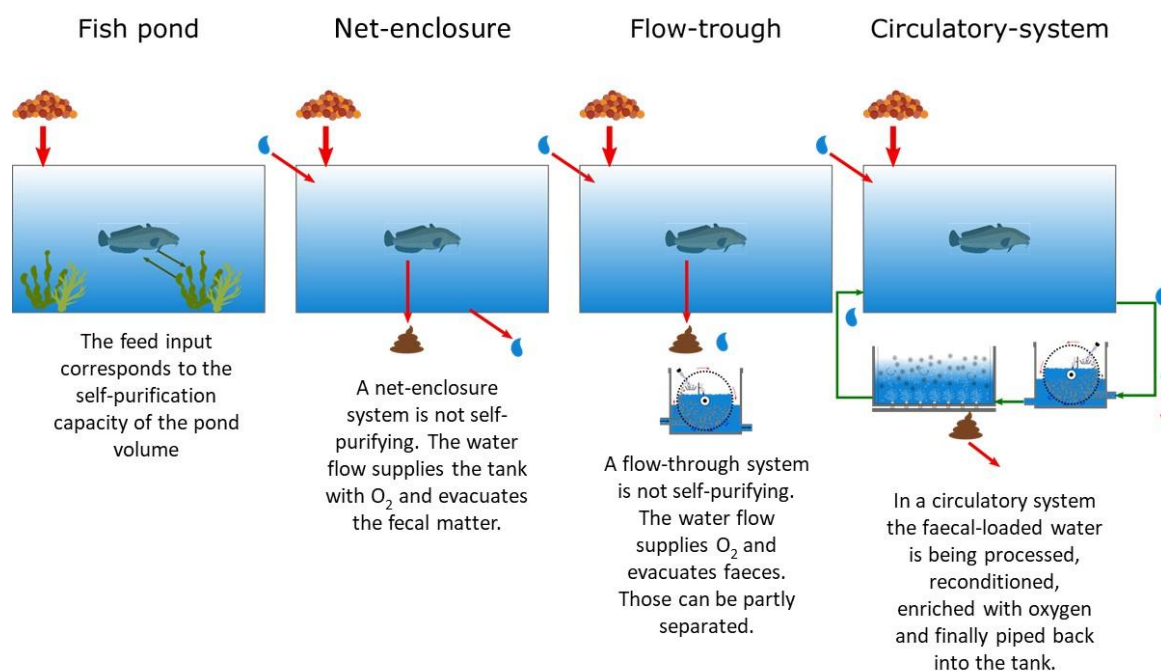


Figura 3: Los diferentes tipos de sistemas de acuicultura (estanques, jaulas con redes, unidireccional y recirculante).

El RAS tiene varias ventajas en comparación con otros sistemas de acuicultura: es un sistema totalmente controlado que es en gran medida independiente de las condiciones locales; tiene un uso muy bajo del agua con bajos flujos de aguas residuales; y la producción puede planificarse y orientarse durante todo el año. Sin embargo, también tiene desventajas, como los importantes costos de inversión y de operación, y el alto riesgo de operación debido a una tecnología propensa a fallar. Por lo tanto, la selección de especies se limita principalmente a

carnívoros, que tienen mayor demanda y precio en el mercado que los herbívoros, y el sistema depende totalmente de los alimentos artificiales (piensos). En este contexto, la acuaponía puede considerarse una forma de RAS o una extensión de la RAS. Por lo tanto, en este capítulo se presenta con más detalle la parte de acuicultura de un sistema acuapónico de recirculación.

2.2 Tecnología de recirculación de agua (RAS)

Un sistema de acuicultura de recirculación (RAS) consiste en tanques de peces y varias unidades de filtración que limpian el agua. En un RAS clásico el agua está, por lo tanto, en flujo constante desde los tanques con peces a través del sistema de filtración y luego de vuelta a los peces (Figura 4). Debido al metabolismo de los peces, el agua que sale de los tanques contiene altas concentraciones de sólidos, nutrientes y dióxido de carbono, mientras que es pobre en oxígeno en comparación con el agua de entrada. El objetivo de las unidades de filtración es disminuir las concentraciones de sólidos, nutrientes, toxinas y dióxido de carbono, y aumentar los niveles de oxígeno disuelto en el agua antes de devolverla a la pecera.

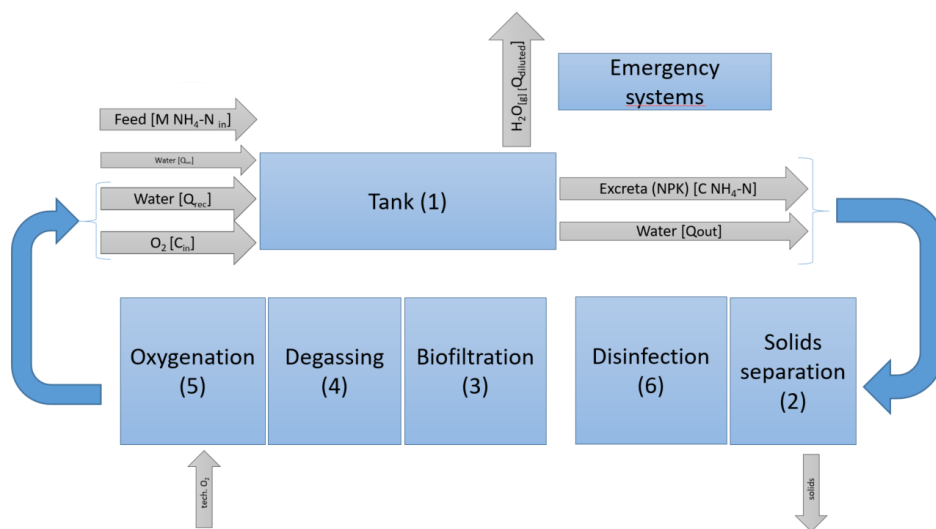


Figura 4: Los componentes principales de un sistema de recirculación (RAS).

El sistema de filtración consta de varias etapas (Figura 4). El primer paso de tratamiento después de la salida es la separación de los sólidos (Figura 4, punto 2) donde los sólidos (restos de comida, heces, y conjuntos de bacterias) se eliminan del agua. Después de esto, el agua se desinfecta con rayos UV (Figura 4, punto 6). Este paso no siempre se lleva a cabo en las piscifactorías y también se puede colocar después del biofiltro. El agua entra entonces en el biofiltro (Figura 4, Punto 3), donde las bacterias metabolizan parte de la carga orgánica y oxidan el amoníaco a nitritos y luego a nitratos. Todas estas reacciones metabólicas bacterianas utilizan el oxígeno disuelto (O₂) y, como los peces, liberan dióxido de carbono (CO₂) en el agua. Por lo tanto, los niveles de CO₂ en el agua tienen que ser reducidos después de la biofiltración. Esto se hace en la unidad de degasificación en la que se

aumenta la superficie del agua al aire para que el CO₂ entre en la fase aérea (Figura 4, punto 4). Como último paso, la concentración de oxígeno en el agua debe aumentarse hasta un nivel adecuado para los peces. Esto se hace en la unidad de oxigenación (Figura 4, punto 5). En las siguientes secciones se describen estos componentes del sistema con más detalle.

2.2.1 Los tanques con peces

Los tanques son dónde los peces se engordan, y por lo tanto, un componente básico de un RAS. Los diseños de tanques "clásicos" son los tanques redondos y cuadrados. Uno de los principales aspectos que hace que los tanques redondos sean favorables a los cuadrados es el efecto de auto-limpieza que puede lograrse mediante un patrón hidráulico circular (Figura 5). El flujo en los tanques tiene dos funciones: i) la distribución uniforme del agua de entrada y del alimento de los peces; y ii) el transporte de las partículas al centro del tanque. El flujo primario rotativo es el flujo de la entrada y luego en el sentido de las agujas del reloj/en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del tanque. Transporta los sólidos sedimentables al fondo. El flujo rotatorio primario crea un flujo radial secundario y juntos generan un tanque auto-limpiante.

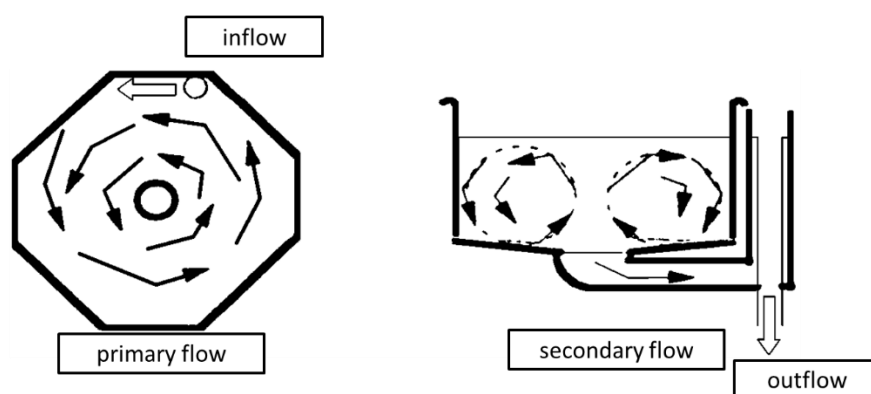


Figura 5: Papel de flujos primarios y secundarios: el flujo primario asegura una buena distribución de agua del agua de entrada y el flujo secundario contribuye a la eliminación de sólidos (adaptado de [Timmons et al. 1999](#))

Aunque los tanques redondos tienen numerosas ventajas sobre los cuadrados, su principal desventaja (baja eficiencia de área) a menudo los convierte en una solución subóptima para una granja RAS. Por lo tanto, en los últimos décadas se han desarrollado y ensayado otras numerosas formas de tanques (en el Capítulo 12 se presentan más detalles).

Desde que el RAS ha ganado popularidad y estos sistemas se planifican también como empresas en gran escala (por ejemplo, [Nordic Aquafarms](#) tiene previsto invertir 500 millones de dólares en una explotación de RAS en Belfast, Maine, EE.UU.), los diseños de grandes tanques han adquirido cada vez más importancia. Estos grandes tanques son a menudo (al menos en teoría) mucho más eficientes en función de los costos que los tradicionales tanques más pequeños (Figura 6).



Figura 6: Un tanque circular grande (profundidad 6 m, diámetro 32.5 m) que forma parte de un RAS para salmones ([Swiss Alpine Fish](#))

Las condiciones de flujo tienen un impacto importante en la salud de los peces. Se pueden establecer diferentes flujos de agua y así estructurar las cuencas hidráulicamente mediante el uso de paneles. De esta manera los peces se mantienen en la parte óptima del tanque (Figura 7).

Es importante saber que los nadadores necesitan nadar, en otras palabras, necesitan una corriente. La velocidad de la corriente debe adaptarse a la especie de pece. Generalmente, los peces más pequeños requieren una velocidad de corriente menor, aunque debe ser lo suficientemente alta como para asegurar que la separación de los sólidos aún funcione. Todo esto también tiene un impacto en la calidad de la carne de los peces.

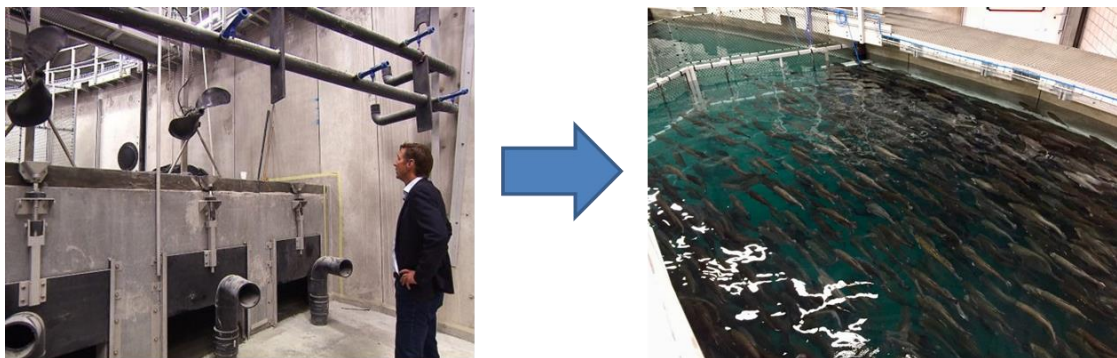


Figura 7: Sistema unidireccional desarrollado para salmones, Swiss Alpine Fish AG, Lostallo, Switzerland

2.2.2 Separación de sólidos

Hay varias razones para la eliminación de los sólidos. En primer lugar, la calidad del agua mejora al reducir los sólidos orgánicos, lo que reduce la mineralización (respiración aeróbica) y, por lo tanto, también ayuda a estabilizar el contenido de oxígeno. En segundo lugar, la

preservación de la calidad del agua también beneficia la absorción del alimento y el control de los lotes de peces. Además, la eliminación de los sólidos reduce la carga bacteriana, porque elimina la fuente de alimentación de los microorganismos. La elevada actividad bacteriana en la columna de agua lleva a un consumo innecesario de oxígeno.

Otro beneficio de la eliminación de sólidos es la prevención de la obstrucción de las branquias de los peces, que puede provocar un crecimiento lento o incluso la muerte. Sin embargo, esto depende de la especie de los peces. Los peces que se alimentan por filtración, como muchas especies de carpas, pueden incluso depender de una cierta cantidad de compuestos suspendidos en su hábitat natural y, por lo tanto, también pueden soportar una mayor cantidad de sólidos en suspensión, en el RAS, comparado con, por ejemplo, los salmónidos ([Avnimelech 2014](#)).

Una de las razones técnicas más importantes por las que es necesario eliminar los sólidos es la posible obstrucción del biofiltro (véase el Capítulo 9). Además, la eficacia de la reducción de gérmenes mediante la desinfección (ver Capítulo 9) aumenta con la eliminación de sólidos. Los sólidos en el agua de los peces tienen diferentes tamaños, y los tratamientos para eliminar estos sólidos varían principalmente según su tamaño (Figura 8).

El tratamiento de las aguas residuales y la eliminación de lodos son factores importantes en el coste del RAS intensivo. Por kg de pescado producido, un sistema RAS requiere 300-1000 l de intercambio de agua, y produce 100-200 g de lodo (peso seco). Para minimizar el volumen de aguas residuales es factible tratar el agua de lodo que resulta de la separación de los sólidos. De esta manera, incluso un sistema de filtración de baja tecnología puede lograr una reducción significativa del volumen final de las aguas residuales.

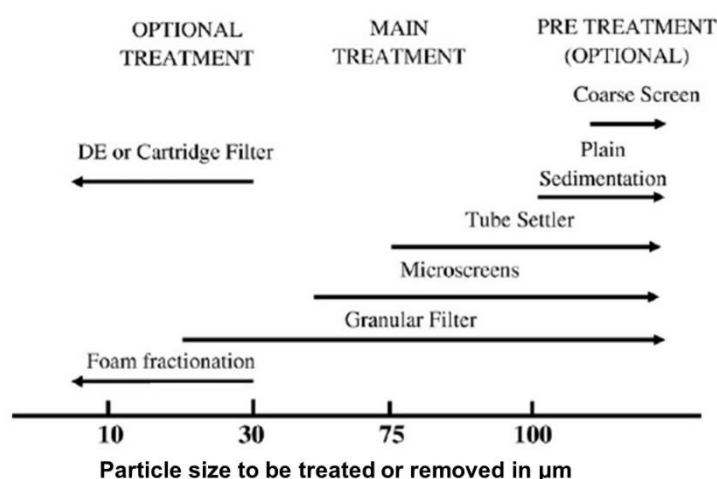


Figura 8: Procesos de eliminación de sólidos y el rango de tamaño de partículas (en µm) para los cuales son más efectivos (adaptado de [Timmons and Ebeling 2007](#))

2.2.3 Desinfección

Las enfermedades bacterianas y virales pueden plantear serios problemas para el RAS intensivo. La desinfección del agua con ozono o radiación UV son los métodos más comunes. La luz UV a una cierta intensidad puede destruir el ADN de bio-organismos como patógenos y organismos unicelulares. En el RAS la luz UV (Figura 9) está mayormente comprendida en un corto tramo de tubería entre la unidad de filtración mecánica (por ejemplo, el filtro de tambor) y el biofiltro. La intensidad o dosis de la luz UV puede expresarse en $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ (energía por área). En el RAS la dosis de UV necesaria para matar (desactivar) alrededor del 90% de los organismos oscila entre 2000-10.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Sin embargo, para matar a todos los hongos y pequeños parásitos puede ser necesaria una dosis de hasta 200.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Para una máxima eficiencia es importante colocar la luz UV después del sistema de filtración mecánica para que no sea obstruida por los sólidos en suspensión.

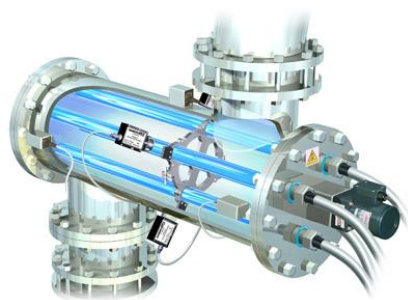


Figura 9: Reactor UV (ultravioleta) ([AKR UV Systems](#))

La adición de ozono (O_3) es otro método eficiente para reducir los patógenos y otros organismos no deseados en un RAS. En contacto con el agua se divide en O_2 y un radical de oxígeno libre O . Este radical "ataca" y oxida las sustancias orgánicas. Esto da lugar a la degradación de las partículas en suspensión o de algunas sustancias (clarificación de la turbidez del agua, formación de color por los ácidos húmicos). Asimismo, las paredes celulares biológicas de los organismos también son atacadas por el radical O de la molécula de ozono, matando bacterias, algas flotantes y filamentosas. Sin embargo, el ozono es muy reactivo y también puede dañar a las bacterias nitrificantes del biofiltro y atacar las branquias de los peces si se aplica en cantidades demasiado elevadas. Por lo tanto, la dosis debe ser monitoreada permanentemente.

Los agentes químicos pueden utilizarse para tratamientos puntuales para reducir la concentración de gérmenes en el agua. Es muy común el uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), a veces estabilizado por el ácido peracético ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$). Una sobredosis puede tener efectos severos en la salud de los peces y puede dañar las bacterias del filtro.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la desinfección con UV, ozono y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en el RAS.

	Agente desinfectante		
	UV	Ozono	H ₂ O ₂
Ventajas	<p>Solo funciona localmente dentro del reactor UV</p> <p>Puede aplicarse sin dañar a los peces</p> <p>Manejo sencillo</p> <p>Barato</p>	<p>Muy efectivo a la hora de eliminar organismos indeseables como patógenos</p> <p>Descompone moléculas complejas en compuestos pequeños y biodegradables</p> <p>Oxida nitritos a nitratos</p>	<p>Muy efectivo a la hora de eliminar organismos indeseables como patógenos</p>
Desventajas	<p>Sensible a turbidez de agua, no efectivo en agua con alto contenido en sólidos</p> <p>Hay que sustituir las bombillas (cada año)</p> <p>Si el periodo de radiación es demasiado corto (i.e. el flujo es demasiado alto) la desinfección no es efectivo</p>	<p>La aplicación correcta es compleja</p> <p>Pueden dañar a los peces y al biofiltro</p> <p>Encender/apagar puede variar niveles de nitritos y disminuir la cantidad de bacterias nitrificantes en el biofiltro</p> <p>Relativamente caro</p>	<p>Aplicación limitada, como para desinfectar tanques vacíos o equipos o reducir la carga bacteriana en los tanques</p> <p>Una sobredosis puede dañar seriamente a los peces</p> <p>Puede dañar el filtro</p>

2.2.4 Biofiltración

El proceso de nitrificación tiene lugar en el biofiltro para oxidar el amoníaco libre tóxico en nitrito, que también es tóxico, y eventualmente en nitrato no tóxico. Las bacterias nitrificantes son el corazón del biofiltro. Estas bacterias crecen en la superficie del medio filtrante. El medio filtrante puede ser fijo (por ejemplo, un filtro percolador) o móvil (por ejemplo, un filtro de lecho móvil). Las bacterias nitrificantes son sensibles a los cambios en la calidad del agua del sistema (especialmente el pH y la temperatura), por lo que los cambios rápidos deben evitarse o realizarse en pasos lentos, ya que de lo contrario pueden morir grandes cantidades de bacterias nitrificantes, lo que provocaría picos de amoníaco y nitrito en el sistema. Además, como las bacterias nitrificantes son aeróbicas, el contenido de oxígeno disuelto en el biofiltro debe mantenerse siempre en un determinado umbral (dependiendo también de la temperatura del agua). Las reacciones químicas que tienen lugar en el biofiltro se explican en el Capítulo 5. En el Capítulo 12 se dan más detalles sobre la elección de la biofiltración correcta.

2.2.5 Desgasificación y aireación

La transferencia de gas entre la fase líquida y la fase gaseosa ocurre cuando hay sub-saturación en una fase. La solubilidad del gas depende de la presión, la temperatura, la salinidad y la presión parcial del gas. La transferencia tiene lugar sobre las superficies de contacto entre el gas y el líquido. La aireación

aumenta el contenido de oxígeno en el agua. La **desgasificación** elimina del agua gases como el dióxido de carbono.

2.2.5.1 Desgasificación

Los gases, especialmente el dióxido de carbono resultante de la respiración de los peces y las bacterias, se acumulan en el agua del sistema. Esto puede tener efectos perjudiciales en los peces si las concentraciones son demasiado altas. Por lo tanto, se suele añadir una unidad desgasificadora al RAS intensivo. La salida de gas (desgasificación) se logra aumentando la superficie de contacto entre el agua y el aire, ya sea mediante la aireación de la columna de agua o mediante el rociado de agua a través del aire. Diferentes biofiltros ya tienen un alto efecto desgasificador: en un filtro de goteo el agua pasa a través del aire, mientras que en un filtro de lecho móvil el aire pasa a través del agua. Por lo tanto, esto puede hacer que una unidad de desgasificación adicional sea redundante.

2.2.5.2 Oxigenación

El contenido de oxígeno disuelto (O_2) es uno de los parámetros de calidad del agua más importantes en el RAS y a menudo la primera limitación en situaciones de emergencia (por ejemplo, en caso de cortes de electricidad, fallo de la bomba, etc.). Existen numerosas técnicas para enriquecer el oxígeno disuelto en el agua. La entrada de gas en el agua (aireación) puede mejorarse: i) maximizando el área de contacto entre el oxígeno y el agua utilizando torbellinos o pequeñas burbujas; ii) maximizando el período de contacto entre el oxígeno y el agua utilizando un diámetro de burbuja pequeño y/o un flujo de agua lento; iii) aumentando la presión (aumenta la solubilidad) - nivel de agua, recipiente de presión; y iv) aumentando la presión parcial de O_2 (aumenta la solubilidad) - oxígeno puro.

Entrada de oxígeno de alta eficiencia

En el RAS intensivo las tecnologías de oxigenación dependen del uso de oxígeno puro en lugar de la simple aireación que se vuelve impracticable a ciertas densidades de peces. El oxígeno se produce in situ con un generador de oxígeno o lo suministra una empresa externa y se almacena en tanques de alta presión fuera de las instalaciones de acuicultura.

Entrada de oxígeno de baja eficiencia

En los estanques de peces extensivos, el aporte de oxígeno de baja eficiencia suele ser suficiente. Esto se logra: i) manteniendo el agua fría, ya que tiene niveles más altos de oxígeno disuelto, y ii) aumentando el movimiento del agua. Diferentes modos de aireación pueden servir (véase el Capítulo 12).

2.2.6 Bombas y pozos de bombeo

Una bomba es para el RAS lo que el corazón es para el cuerpo humano. Si falla, el resultado puede ser catastrófico. Por lo tanto, no se debe escatimar en gastos al comprar una bomba. Uno puede usar bombas de velocidad controlada para reducir el flujo si es necesario. Usando una serie en paralelo de bombas con válvulas de retención, se pueden reducir las posibilidades de fallo del sistema. Antes de comprar una bomba, se deben calcular las

pérdidas de presión en las tuberías, por ejemplo con la ayuda de esta calculadora en línea: <http://www.pressure-drop.com/Online-Calculator/>.

2.3 Gestión del sistema de acuicultura por recirculación

2.3.1 Densidad animal

La densidad animal es un factor muy importante que debe decidirse de antemano cuando se diseña un RAS. La densidad de población puede definirse de diferentes maneras (Tabla 2), y es importante saber cuándo y por qué se utilizan diferentes definiciones.

Tabla 2: Definiciones de densidad de población.

	Densidad de individuos	Densidad en términos de biomasa
Densidad por superficie	(#/m²) Independiente de la profundidad del tanque Relevante para peces de fondo	(kg/m²) Independiente de la profundidad del tanque Relevante para peces de fondo A menudo más alto para peces grandes comparado con pequeños
Densidad por volumen	(#/m³) A menudo alto para peces pequeños a pesar de que la densidad en biomasa es más alto	(kg/m³) Relevante para peces de libre natación

Las diferentes especies de peces tienen diferentes densidades de población posibles. La densidad es un factor central para determinar el bienestar de los peces, aunque todavía no están claros todos los aspectos biológicos. Hay especies de peces que tienen un comportamiento diferente a diferentes densidades. Por ejemplo, la tilapia adopta un comportamiento de cardumen a altas densidades y un comportamiento territorial a bajas densidades. Por lo tanto, para evitar que los peces se dañen entre sí, deben ser criados a una cierta densidad. Para utilizar el espacio de manera eficiente y evitar el canibalismo, un tanque debe contener peces de aproximadamente el mismo tamaño. Esto significa: a) que una instalación de acuicultura debe tener varios tanques para albergar peces de diferentes clases de tamaño, y b) que la población de peces debe ser clasificada según su tamaño ocasionalmente, y redistribuida en los tanques. Las densidades de población bajas y altas en los sistemas de acuicultura tienen varias consecuencias para la gestión de un RAS (Tabla 3).

Tabla 3: Características de sistemas de densidades altas y bajas.

Factores de influencia para sistemas con la misma producción anual	Alta densidad	Baja densidad
Cambios en parámetros de agua	Cambios bruscos	Cambios paulatinos

Tiempo de respuesta (e.g., fallo de bomba)	Más corto, más estrés para peces	Más largo, el manejo del sistema es más seguro
Capacidad de los tanques para peces por volumen de producción	Menos capacidad necesaria para el mismo volumen de producción	Necesita más capacidad. Se puede compensar en parte usando tanques más profundos pero son más caros y requieren tuberías y bombas más caros
Flujo de recirculación/desplazamiento necesarios por volumen de producción [m ³ /h].	Mismo	Mismo. Debido a la lentitud del sistema, existen picos más suaves = componentes más pequeños = hardware más barato para acondicionar el agua
Desplazamiento de volumen relativo a volumen del tanque	Alto	Bajo
Dimensiones de los tanques	Tanques más pequeños con una densidad alta están más predispuestas al estrés, dependiendo de la especie	En tanques más grandes, peces tímidos tienen una distancia de escape más grande

2.3.2 Monitoreo

Los procedimientos de vigilancia deben definirse de acuerdo con los pasos indicados en la Figura 10. Los sistemas RAS o acuapónicos son complicados y se componen de muchas partes. Muchas cosas pueden salir mal, por lo que los operadores tienen que estar permanentemente alertas (Tabla 4, véase también el Capítulo 9).

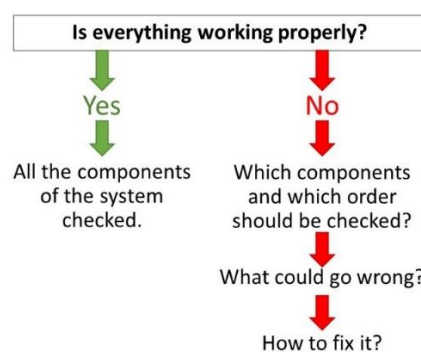


Figura 10: Los pasos lógicos para crear un protocolo de monitoreo.

La máxima prioridad de la gestión del sistema es la salud de los peces y las plantas. Por lo tanto, la vigilancia debe ser priorizada de acuerdo a las "prioridades del soporte vital" (Tabla 5). La Tabla 6 enumera los elementos importantes que deben ser monitoreados diariamente.

Tabla 4: ¿Qué puede fallar?

Tipo / Sistema	Causas
Fuera de tu control	Inundaciones, tornados, huracanes, viento, nieve, hielo, tormentas, apagones, vandalismo/robo
Errores del personal	Errores por parte del operario, olvido de mantenimiento causando fallos en sistema de seguridad o componentes del sistema, alarmas desactivados
Nivel del agua	Desagüe dejado abierto, tubería caída o quitado, goteo en sistema, línea de desagüe roto, desbordamiento de agua en tanque
Flujo del agua	Válvula cerrada o abierta demasiado, fallo en bomba, pérdida de vacío, malla de entrada bloqueada, tubería bloqueadas, tubería de retorno rota/despegada
Calidad de agua	Bajo nivel de oxígeno disuelto, alto CO ₂ , agua de entrada supersaturada, temperatura alta/baja, altos niveles de amoníaco, nitritos o nitratos, alcalinidad baja
Filtros	Filtros obturados, pérdida excesiva de fuerza
Sistema de aireación	Motor del soplador se sobrecalienta debido a presión excesiva, cinta suelta o rota, difusores bloqueados o desacoplados, goteras en líneas de entrada

Tabla 5: Prioridades para el monitoreo y respuesta.

		Parámetro	Tiempo de respuestas
Prioridad	Alta	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia eléctrica - Nivel de agua - Oxígeno disuelto 	<p>Muy rápido (minutos)</p> <p>Se requiere alarma!</p>
	Media	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Dióxido de carbono - pH 	Tiempo de respuesta moderada (horas)
	Baja	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrógeno (amoníaco, nitrito, nitrato) - Sólidos en suspensión 	Parámetros cambian paulatinamente (monitoreo diario o semanalmente)

Tabla 6: Aspectos importantes que se debería controlar diariamente.

Potencia eléctrica	Suministro de una a tres fases, sistemas individuales tienen enchufes GFCI
Nivel del agua	Tanque de cultivo (alto/bajo), sumidero a bombas (alto/bajo), filtros (alto/bajo)
Aeración	Presión del aire/oxígeno (alto/bajo)
Flujo del agua	Bombas, tanques de cultivo, filtros sumergidos, calentadores en línea
Temperatura	Tanques de cultivo (alto/bajo), sistemas de calentar/enfriar (alto/bajo)

2.3.2.1 Algunos consejos para el diseño y la seguridad del sistema

- Elegir los sensores con cuidado, etiquetar todo, e incluir la capacidad de expansión en todos los componentes
- Instalar los sensores y el equipo donde sean visibles y fácilmente accesibles para su mantenimiento y calibración
- Recuerde que el agua y la electricidad son una combinación fatal, así que use voltajes bajos (5 VDC, 12 VDC o 24 VDC o AC) para protegerse y proteger a los peces.
- Etiquete claramente los modos de armado y desarmado del sensor, preferiblemente con LEDs en cada estación para mostrar el estado del sensor.

2.3.2.2 Algunos consejos para el mantenimiento del sistema

- Tener un manual de mantenimiento bien preparado y accesible para que el personal lo lea
- Mantener un plan de programación de mantenimiento semanal/mensual/anual y mantener archivos de los principales registros de servicio y manuales de equipo
- Mantener las listas de control de los instrumentos diarios/semanales/mensuales
- Realizar verificaciones regulares (y algunas no anunciadas) del sistema, incluyendo el disparo de cada sensor y la verificación del funcionamiento de los sistemas de respaldo automático y del marcador telefónico
- Proporcionar al personal capacitación en el manejo de las alarmas de rutina
- Asegúrese de que el personal esté familiarizado con el sistema operativo completo, incluyendo el suministro de agua, la aireación y los sistemas de respaldo de emergencia.

2.3.2.3 ¿Cuándo controlar la calidad del agua?

Los peces digieren según el momento en que se alimentan, y la cantidad de heces depende de la cantidad de alimento ingerido. Por lo tanto, los niveles más altos de amonio se esperan después de la última comida (por la noche) y el valor más bajo antes de la primera comida (por la mañana). Por lo tanto, las mediciones de la calidad del agua tienen que hacerse al final de la alimentación para captar los picos de amonio (Figura 11).

2.3.2.4 Sistemas automatizados de vigilancia y control

La vigilancia automatizada es cada vez más asequible. Existen varios sistemas de adquisición y control de datos disponibles en el mercado para aplicaciones en RAS y/o acuaponía. Un sistema de vigilancia incluye: i) sensores para medir las variables deseadas, ii) una interfaz para convertir la información eléctrica en una forma legible por una computadora o un microprocesador, iii) un ordenador, iv) programas informáticos para hacer funcionar el sistema y v) pantallas. Es importante hacer coincidir los componentes para que el sistema de vigilancia funcione.

Una de las funciones más importantes de un sistema de vigilancia es proporcionar alertas al operador del sistema en caso de mal funcionamiento y problemas. Si se detecta que las variables críticas están

fuera de los límites aceptables, es necesario establecer alertas. Es importante diseñar y probar el sistema de vigilancia y alarma para que no se envíen falsas alertas con demasiada frecuencia. Las falsas alarmas demasiado frecuentes hacen menos probable que el operador u operadores respondan ([Timmons et al. 1999](#)). Las alarmas deben ser construidas y operadas de manera que se alerte a las personas pertinentes. Se pueden colocar alarmas visuales y sonoras en zonas clave de un establecimiento para alertar a los trabajadores de los problemas. Fuera de las horas normales de trabajo es necesario emplear alarmas remotas (por lo general a través de mensajes SMS).

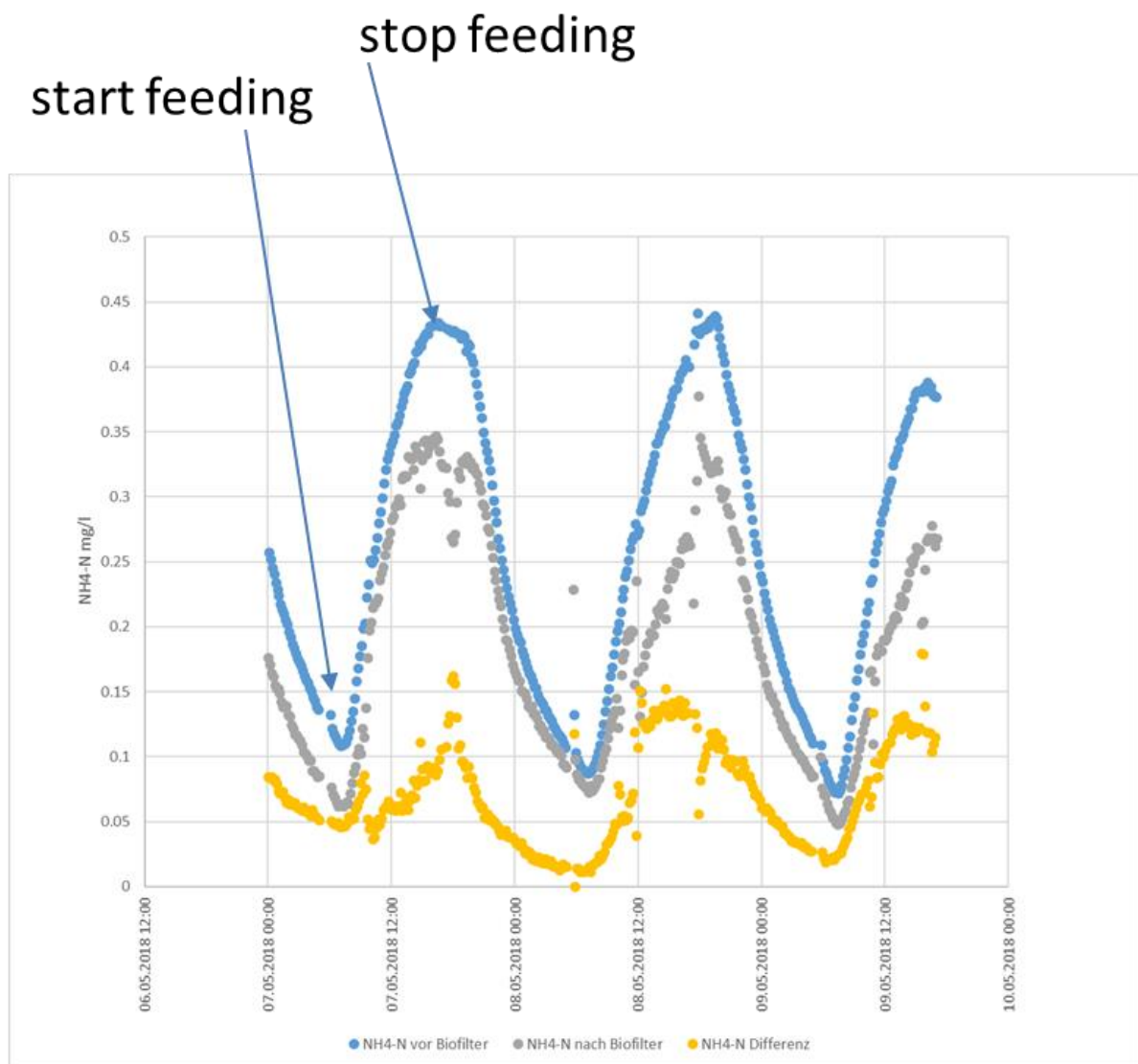


Figura 11: Comportamiento de producción diario de $\text{NH}_4\text{-N}$ en agua en un sistema RAS. Azul = antes del biofiltro; gris = después del biofiltro; amarillo = diferencia entre azul y gris.

2.4 Planificación de la parte de acuicultura de recirculación para un sistema acuapónico

En la acuaponía es muy importante que la entrada y salida de nutrientes esté en equilibrio durante todo el período de crecimiento de la planta. Este equilibrio puede controlarse principalmente mediante dos enfoques diferentes:

- Enfoque 1: Se utiliza un sistema de acuicultura de recirculación (RAS) existente para dimensionar la unidad hidropónica correspondiente con las plantas (Figura 12). Este enfoque se trata en el ejercicio del Módulo 5 (balance de agua y nutrientes).
- Enfoque 2: El RAS se dimensiona en función de la planta y la producción de peces deseada (Figura 13). Esto se trata en el ejercicio del Módulo 2.

El objetivo de dimensionar la parte del RAS de un sistema acuapónico es ajustar las diferentes etapas de tratamiento del agua para lograr tanto una buena calidad de agua para los peces como un suministro suficiente de nutrientes para las plantas. Siempre es una ventaja que el sistema no se vea afectado en la mayor medida posible por las fluctuaciones estacionales (temperatura, oxígeno disuelto, amonio, nitrito y nitrato). En general, se puede decir que un gran volumen de agua y bajas densidades de almacenamiento hacen que los sistemas sean más estables. Es importante que se planifique todo el año y que se tengan en cuenta las diferencias entre las especies de peces y plantas, así como las etapas de crecimiento de todas las especies. Como apoyo a esta planificación, se recomienda utilizar la "Base de planificación para dimensionar la parte de acuicultura de recirculación de un modelo de sistema acuapónico" (Tschudi 2018).

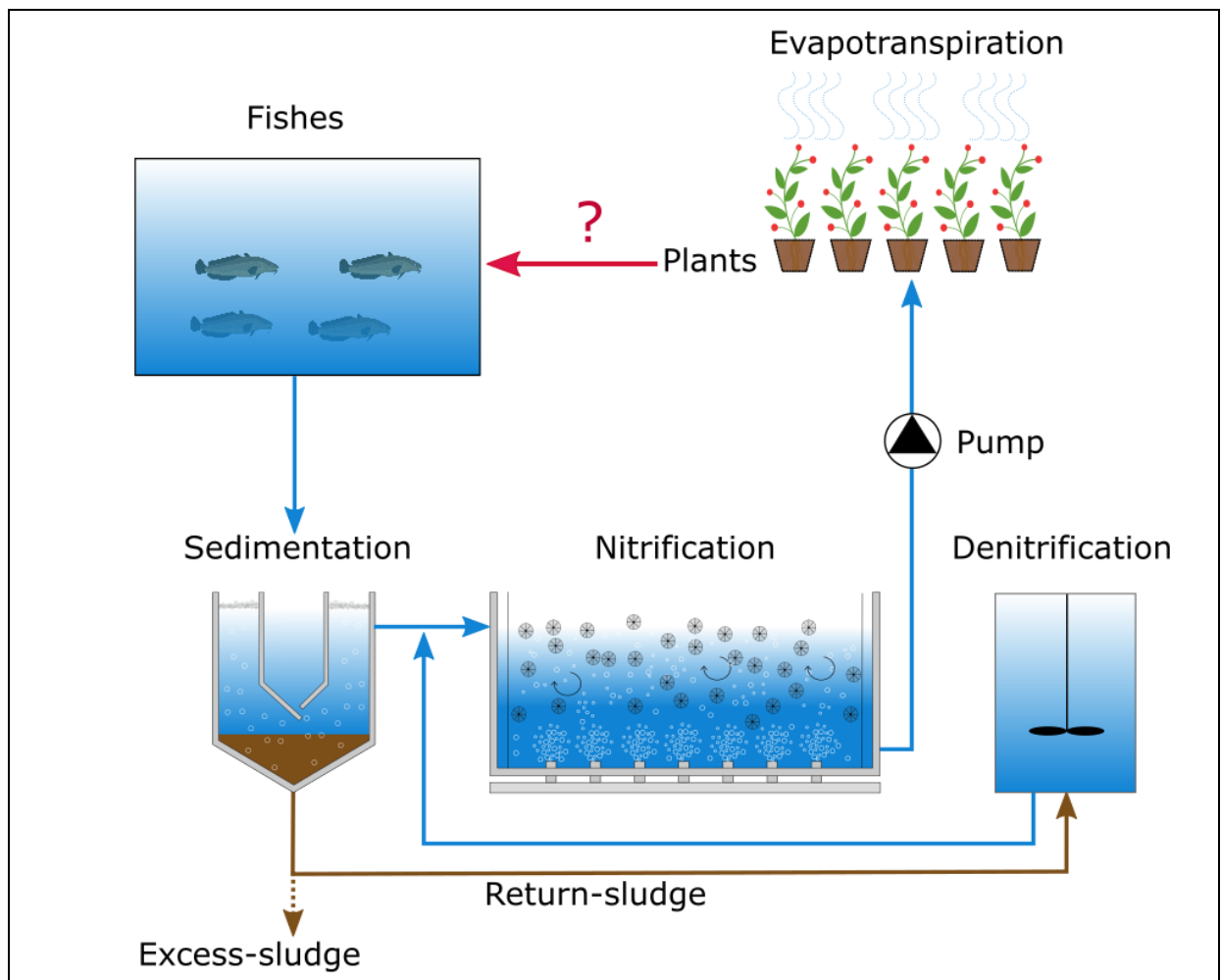


Figura 12: Dimensionar la absorción de los nutrientes por parte de la plantas basado en las dimensiones del RAS.

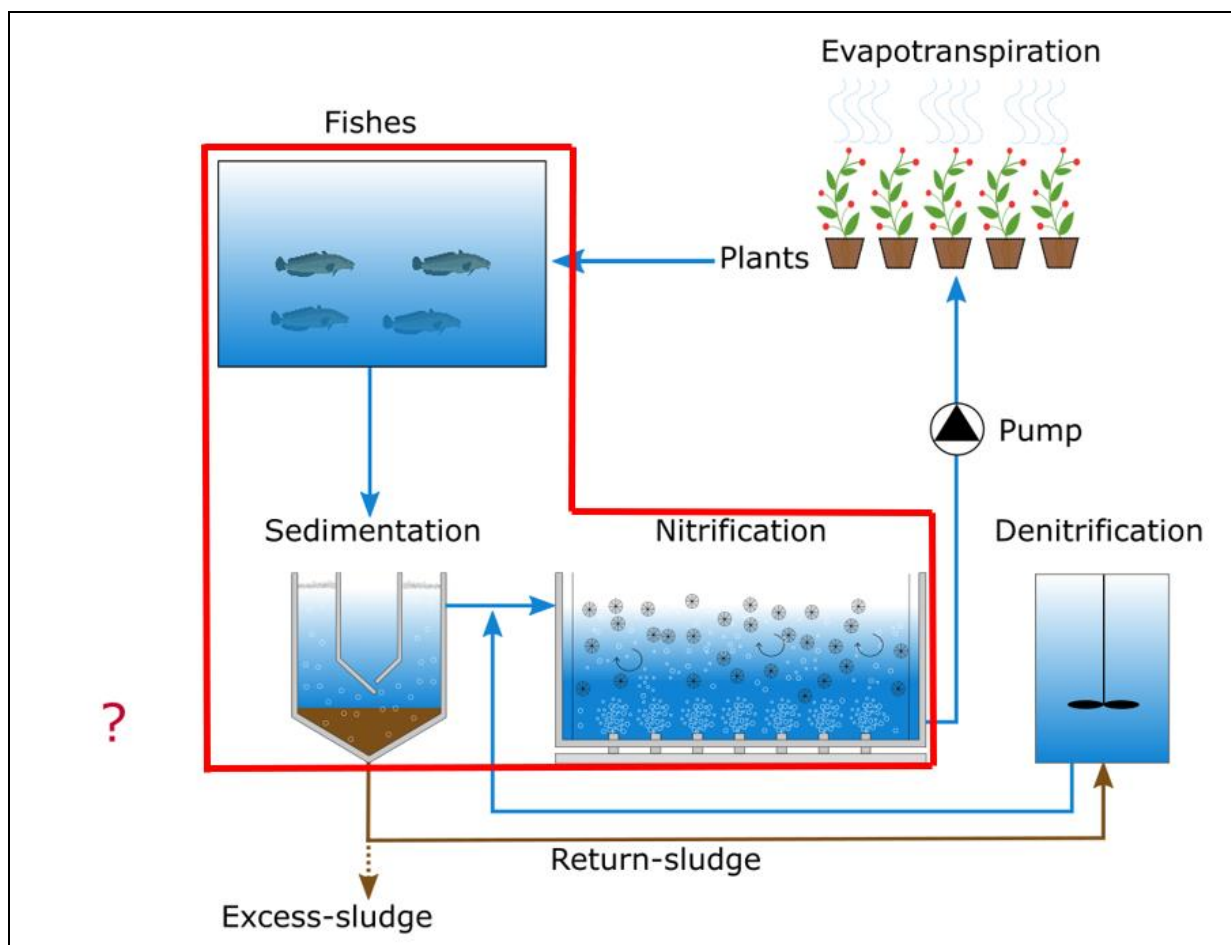


Figura 13: Producción deseada de plantas y peces y el dimensionamiento correspondiente del RAS

2.5 Referencias

- Avnimelech, Y. 2014. [Biofloc Technology – A Practical Guide Book](#) (3rd edition). The World Aquaculture Society, Baton Rouge.
- FAO 2018. [The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 - Meeting the sustainable development goals](#). Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Gibbens, S. 2019. [Climate change is depleting our essential fisheries](#). *National Geographic* online. Retrieved 15. February 2019.
- Somerville et al. 2014. Introduction to aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [Small-scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 1-10.
- Timmons, M.B. y Ebeling, J.M. 2007. [Recirculating Systems](#). Northeastern Regional Aquaculture Center, Ithaca, NY.
- Timmons, M.B., Riley, J., Brune, D., and Lekang, O.-I. 1999. Facilities Design. In CIGR–The International Commission of Agricultural Engineering (eds.) [CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume II: Animal Production & Aquacultural Engineering](#). American Society of Agricultural Engineers, USA. pp 245-280.
- Tschudi, F. 2018. *Planning basis for dimensioning the aquaculture part of an aquaponic system*. Wädenswil: Zurich University of Applied Sciences, Research Group Aquaculture Systems, unpublished.

3. ANATOMÍA DE PECES, SALUD Y BIENESTAR

3.1 Anatomía general externa

La idea principal de este capítulo es presentar varias características anatómicas importantes de los peces y relacionarlas con su función y fisiología. Hay más de 20.000 especies de peces de agua dulce y marina en nuestro planeta, cada una con sus requisitos específicos y nichos ecológicos, lo que ha llevado a adaptaciones corporales específicas. Sin embargo, muchos de los peces, especialmente los teleósteos (peces óseos con una premaxila móvil), comparten algunas características comunes. Aunque el número de especies utilizadas en la acuicultura es probablemente superior a 200, el número utilizado en la acuaponía es más reducido y se limita principalmente a los peces de agua dulce (Tabla 1).

Tabla 1: Resumen de las especies de peces usadas en acuaponía, incluido las especies citadas en dos encuestas internacionales sobre acuaponía ([Love et al. 2014](#); [Villarroel et al. 2016](#))

Nombre común	Especie	Familia	Orden
Tilapia	<i>Oreochromis niloticus</i>	Cichlidae	Cichliformes
Pez gato (<i>catfish</i>)	<i>Pangasius pangasius</i>	Pangasiidae	Siluriformes
Carpa koi	<i>Cyprinus carpio</i>	Cyprinidae	Cypriniformes
Trucha (<i>trout</i>)	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Salmonidae	Salmoniformes
Lubina rayada	<i>Morone saxatilis</i>	Moronidae	Perciformes
Perca	<i>Sander lucioperca</i>	Percidae	Perciformes
Mojarra	<i>Lepomis macrochirus</i>	Centrarchidae	Perciformes

La mayoría de los peces utilizados en acuaponía siguen un esquema anatómico básico (Figura 1). Si se observa a lo largo, hay tres regiones principales del cuerpo: la cabeza, la región del tronco y la cola ([Canada Department of Fisheries and Oceans 2004](#)). En cuanto a las posibles anomalías, los veterinarios tienden a centrarse en los problemas relacionados con los ojos, las aletas y la piel. Aparte de éstos, hay otras partes de la anatomía externa que son importantes en cuanto a las medidas indirectas del bienestar de los peces, la calidad de los peces y los problemas de salud, y es necesario poder localizarlas. Por ejemplo, la toma de muestras de sangre suele implicar la inyección de una aguja debajo de la línea lateral en la región de la cola para encontrar la vena caudal. Para marcar a los individuos, normalmente se inyectan transpondedoras integradas pasivas (*PIT tags* en inglés) en el músculo debajo de la aleta dorsal. Otras pinturas plásticas pueden inyectarse en la boca o cerca de los ojos, pero cualquier tipo de marca exterior suele causar problemas, ya que afectan a la piel, que es muy delicada, y puede provocar infecciones. Además, el conocimiento básico de la anatomía de algunas especies específicas también puede ayudar a evitar el fraude al comprarlos comercialmente.

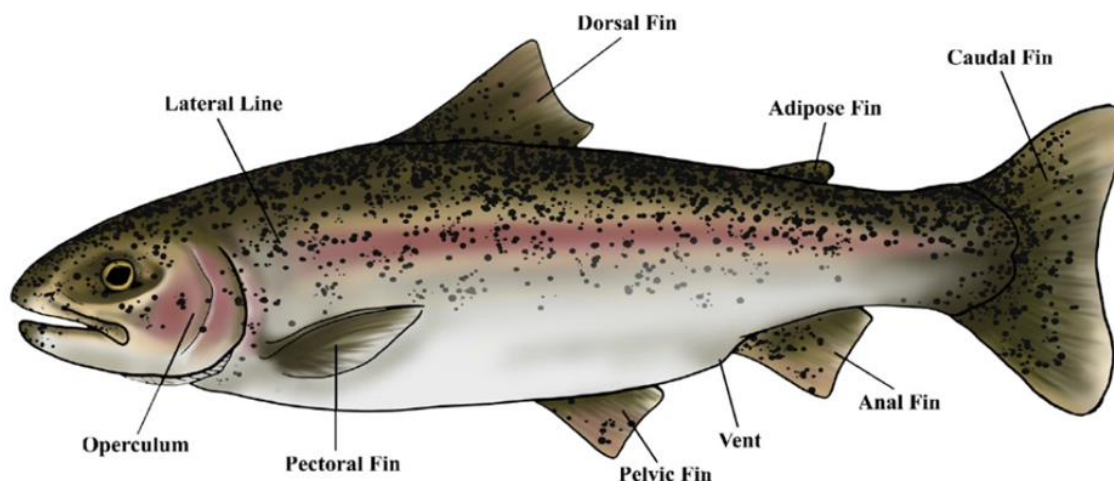


Figura 1: Anatomía externa básica de un pez (de <http://anatomyhumanbody.us>)

Ojos y nariz

A diferencia de algunos personajes de dibujos animados, los peces reales no tienen párpados. Por lo tanto, no sólo sus ojos están en contacto directo con el agua circundante en todo momento, dando una idea de la importancia de la calidad del agua, sino que también son bastante sensibles a la luz (no tienen forma de "cerrar" sus ojos). Por eso muchos peces prefieren evitar la luz solar directa y se congregan en lugares con sombra. El pez cueva mexicano (*Astyanax mexicanus*) es un ejemplo de pez ciego, pero la mayoría de los peces utilizados en la acuicultura pueden ver muy bien. En un pez vivo, la exoftalmia bilateral (el abultamiento de ambos ojos de sus cuencas) se utiliza a menudo como indicador general de infección. La exoftalmia unilateral es probablemente el resultado de una contusión. Después de la matanza, la blancura del ojo se utiliza como indicador de calidad (véase el [Council Regulation \(EC\) 2406/96](#)). Por ejemplo, un pescado con alta calidad tendrá un ojo convexo con una pupila negra y brillante, mientras que un pez con un ojo cóncavo, una pupila gris y una córnea "lechosa" es de baja calidad y debe ser descartado. Cerca de los ojos hay dos pequeñas aberturas (*nares*) que conducen a una zona con sensores olfativos que pueden ser bastante sensibles en muchos peces. Por ejemplo, los salmónidos utilizan sus sensores olfativos durante la migración para volver a sus zonas de cría originales. Técnicamente, para poder oler algo, tiene que haber una corriente dentro y fuera de las narinas, normalmente mientras los peces están nadando pero, a diferencia de los mamíferos, los agujeros no conducen a la garganta.

Opérculo y branquias

El opérculo es una cubierta ósea que protege las branquias, los pulmones de los peces que capturan el oxígeno disuelto en el agua. La frecuencia opercular, o la velocidad a la que los opérculos se abren y cierran durante un período de tiempo, puede utilizarse para verificar si los peces están respirando correctamente o pueden estar excesivamente estresados. En los peces anestesiados o muertos, los veterinarios a menudo "miran debajo del capó", levantando el opérculo para examinar las branquias, que deben ser de color rojo brillante y húmedas, y no estar cubiertas de moco, blancas o malolientes.

La observación externa de las branquias también puede proporcionar información sobre posibles infecciones bacterianas o parasitarias. En comparación con los mamíferos, los pulmones de los peces son, por lo tanto, más un órgano externo que interno, lo que subraya una vez más la importancia de la calidad del agua para proteger este delicado e importante órgano (por ejemplo, el correcto pH del agua). Por último, aparte de la absorción de oxígeno y la liberación de CO_2 , las branquias son una importante salida para los residuos nitrogenados (Figura 2). [Hoar y Randall \(1984\)](#) calcularon que más del 80% del amoníaco (NH_3) se excreta a través de las branquias, mientras que sólo trazas de él pasan a través de la orina.

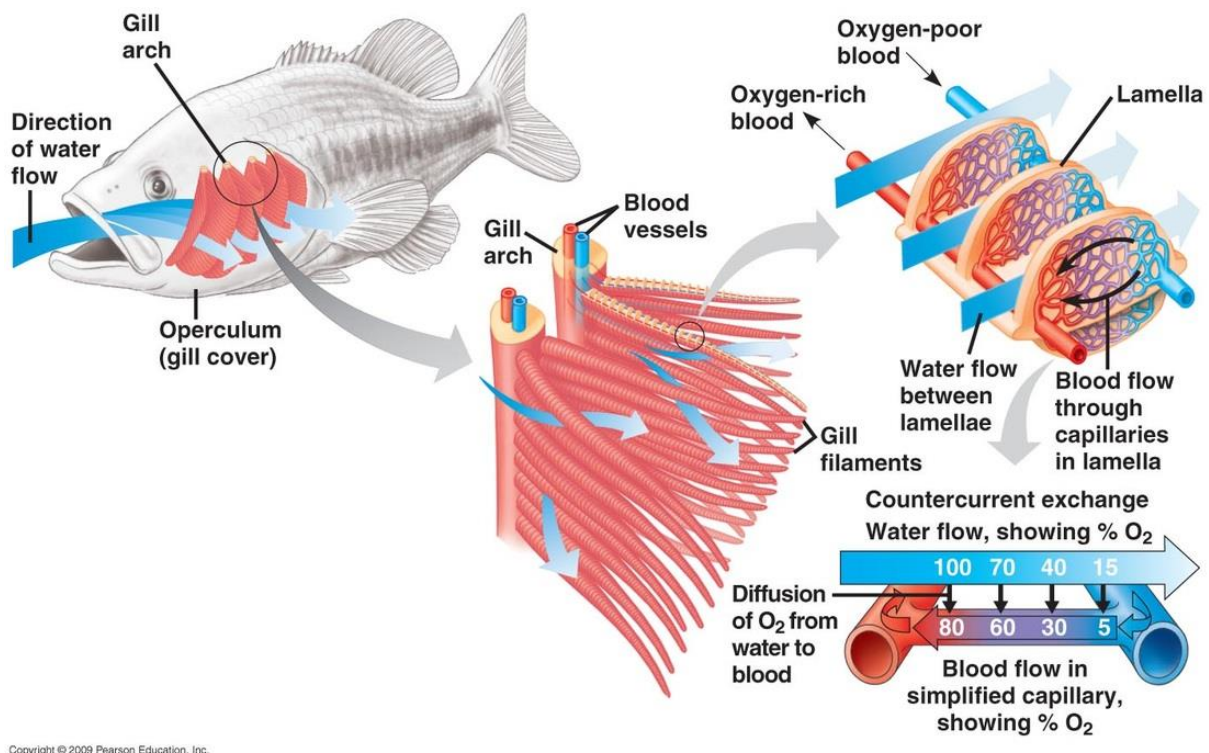


Figura 2: Las branquias funcionan bajo el principio de flujo contra-corriente: el flujo del agua y de la sangre van en direcciones opuestas. Asimismo, la concentración de O_2 en sangre puede aumentarse hasta llegar a la concentración del agua circundante (fuente <https://338373gasexchange.weebly.com/fish.html>).

Piel

La piel es uno de los órganos más importantes de los peces. Tiene tres componentes básicos: la dermis (capa interna), la epidermis (capa externa) y las escamas. Las escamas están incrustadas en la dermis, que es la responsable de dar color. La mucosidad es producida por la epidermis y ayuda a proteger las células. Tiene propiedades antimicóticas y antibacterianas y desempeña un papel en la función inmunológica ([Wainwright y Lauder 2017](#)). Cualquier tipo de lesión o pérdida de escamas en la piel puede tener graves consecuencias para los peces, ya que la curación en un entorno acuoso puede tardar mucho tiempo y las heridas pueden quedar anegadas. Imagínese, por ejemplo, tratar de curar un corte de papel en un dedo manteniéndolo sumergido en un vaso de agua durante una semana.

Todo el proceso de curación llevaría mucho más tiempo y estarías más expuesto a infecciones bacterianas. Por todas estas razones es una buena idea usar guantes de plástico cuando se manipulan peces vivos para no dañar su piel.

La línea lateral es parte del órgano de la piel y consiste en escamas perforadas con cilios que están conectadas al sistema nervioso y proporcionan información sobre el movimiento del agua alrededor del pez y la presión (constituyendo un órgano sensorial que no se encuentra en los mamíferos). Esto permite a los peces cazar de noche o moverse en aguas muy opacas al sentir las vibraciones a su alrededor. La línea lateral también tiene importancia culinaria, ya que al cortar a lo largo de esta línea en un pescado cocido se separará la sección superior carnosa de la sección visceral de abajo. Varios estudios recientes han relacionado el color de la piel del lomo del pescado (entre la aleta dorsal y la cabeza) con la personalidad. Por ejemplo, en el salmón, [Castanheira et al. \(2017\)](#) concluyen que los peces con piel más oscura o con manchas más oscuras en esa región son más agresivos.

Aletas

Las aletas pueden utilizarse como indicadores indirectos de la salud y el bienestar de los peces. Queremos evitar el deshilachado de las aletas (cuando la piel se desprende entre los radios), la erosión de las aletas (coloración blanca en las puntas de las aletas) y la necrosis (células muertas en las aletas) o las manchas descoloridas. Estas últimas pueden indicar la presencia de parásitos.

Aleta dorsal

Normalmente los peces tienen una sola aleta dorsal, pero también pueden tener dos (una después de la otra, como en la lubina). La aleta dorsal se utiliza principalmente para ayudar a mantener a los peces en posición vertical. Se apoya en los radios espinosos que a menudo son eréctiles para permitir a los peces "abrir o cerrar" en función de las necesidades de señalización o navegación. La tilapia tiene una gran aleta dorsal con rayos puntiagudos que pueden cortar fácilmente las manos inocentes que quieran agarrarla. El número de radios por aleta también puede ser usado para identificar la especie de pez. Por ejemplo, la trucha arco iris tiene entre 10 y 12 radios en su aleta dorsal, mientras que la trucha común (que no se cultiva normalmente en acuaponía) tiene alrededor de 13 y 14.

Aleta adiposa

Se trata de una aleta bastante corta y gorda que es común en los salmónidos, pero cuya función no está clara. Está llena de grasa y parece tener neuronas sensoriales. A veces se corta en las granjas de salmón para diferenciarlo del salmón salvaje, pero [Reimchen y Temple \(2004\)](#) encontraron que los peces sin aleta adiposa tienen una mayor amplitud del latido de la cola, lo que indica que esta aleta tiene un papel en el comportamiento natural de natación, y que cortarla probablemente tiene un efecto negativo sobre el bienestar animal.

Aleta caudal

Esta es la aleta más grande y poderosa y está directamente conectada a la columna vertebral. Se utiliza para empujar a los peces hacia adelante. Al igual que la cola de los lechones, también puede ser mordisqueada por otros peces o ser erosionada al ser frotada en diferentes superficies. La cola también es importante para fines de medición (Figura 3). Además de pesar el pez, los acuicultores suelen medir la longitud estándar (desde la boca hasta el principio de la cola) y la longitud de la horquilla (desde la boca hasta la horquilla de la cola).

Aleta anal

Esta aleta es posterior al ano y al poro urogenital.

Aletas pectorales y ventrales

Cerca del opérculo los peces tienen aletas pectorales, que se corresponden aproximadamente con los brazos de los mamíferos terrestres, y debajo de ellas están las aletas ventrales o pélvicas, que se corresponden aproximadamente con las "piernas". En algunos peces, generalmente los considerados "menos evolucionados" (es decir, los que han cambiado menos con el tiempo en comparación con sus antepasados), como los salmónidos, las aletas ventrales están más abajo en la región del tronco, mientras que están más cerca en los peces más modernos (como la tilapia). Las aletas pectorales ayudan a los peces a moverse hacia arriba y hacia abajo, mientras que las aletas ventrales son más importantes para detener el movimiento.

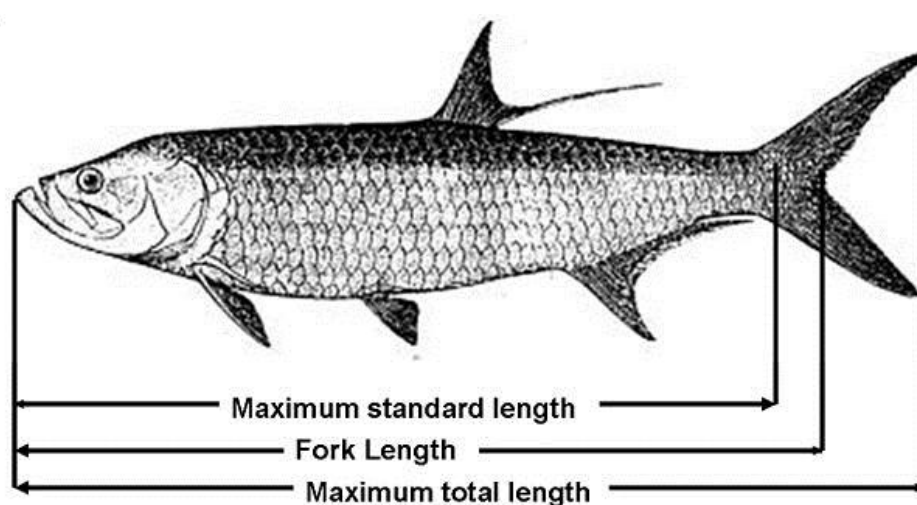


Figura 3: Ejemplo de medidas de longitud para un pez. Normalmente se usa la longitud total para las ecuaciones de crecimiento (fuente <http://www.nefsc.noaa.gov/lineart/tarpon.jpg>)

3.2 Anatomía general interna

En esta sección esbozaremos los órganos internos más importantes de los peces (Figura 4), subrayando las principales diferencias con los mamíferos y algunos hechos importantes que influyen en la forma en que se debe mantener a los peces.

Cerebro

Los peces tienen cerebros pequeños comparados con los vertebrados terrestres. Por ejemplo, el cerebro humano pesa aproximadamente 1,4 kg y representa alrededor del 2% de la masa corporal total, pero los cerebros de los peces sólo representan el 0,15% de su masa corporal. No obstante, a diferencia de muchos vertebrados, los cerebros de los peces son bastante adaptables y mantienen la capacidad de crecer y cambiar a lo largo de la vida (mantienen la capacidad de producir nuevas neuronas; [Zupanc 2009](#)). Los cerebros de los peces tienen tres regiones principales: el cerebro anterior (con los lóbulos olfativos y el telencéfalo), el cerebro medio (lóbulos ópticos) y el cerebro posterior (cerebelo). Los peces no tienen neocórtex, lo que algunos científicos creen que es necesario para ser plenamente conscientes del dolor, pero existen otras estructuras importantes que sugieren que

pueden sentir dolor, como la amígdala, el cerebelo y el palio (capa externa del telencéfalo; para más información ver [Braithwaite 2010](#)).

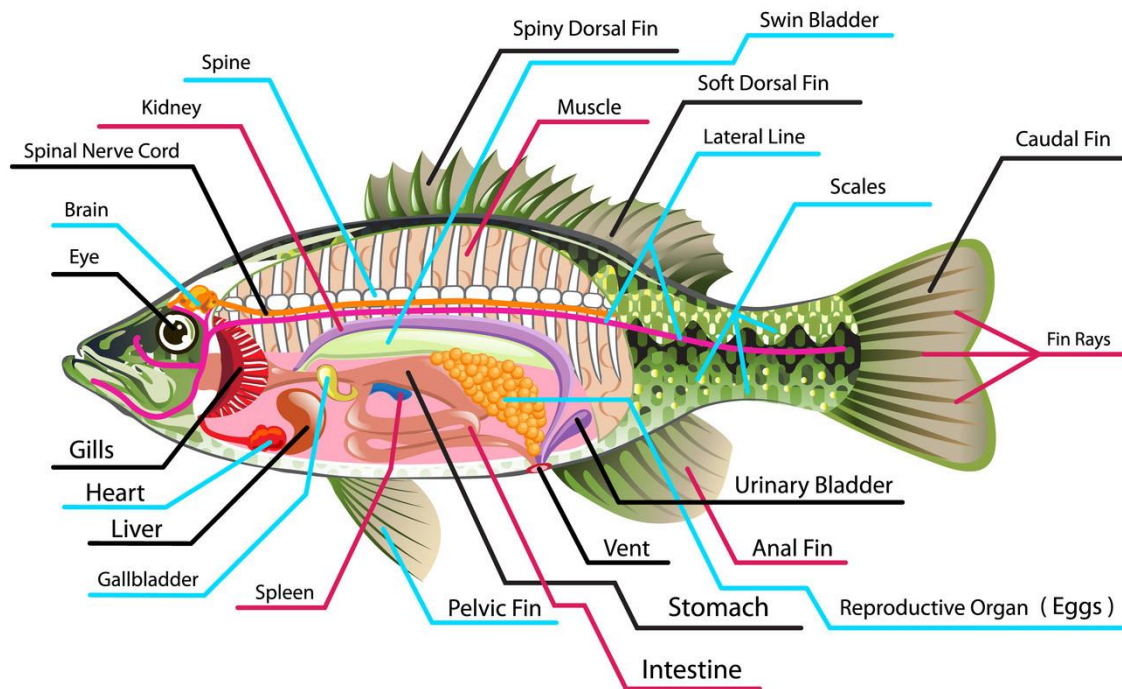


Figura 4: Anatomía general interna de los peces (fuente <http://www.animalsworlds.com/internal-anatomy.html>)

Corazón

El corazón está situado justo debajo de las branquias. Al igual que el cerebro, es bastante pequeño y relativamente simple comparado con los vertebrados terrestres, normalmente sólo pesa unos pocos gramos. Tiene la capacidad de contracción para recoger la sangre del cuerpo y enviarla a las branquias en un sistema de un solo ciclo que se comentará más adelante en la sección sobre la respiración. Es un circuito simple con una aurícula, un ventrículo y un cono que conduce directamente a las branquias. No hay un doble circuito como en los mamíferos, donde la sangre enviada a los pulmones vuelve al corazón para ser bombeada de nuevo al cuerpo. En los peces, las branquias "bombean" la sangre al cuerpo sin enviarla de vuelta al corazón.

Sistema digestivo

La composición general del sistema digestivo de los peces es similar a la de otros vertebrados, con boca, esófago, estómago, intestino delgado, intestino grueso y ano. Sin embargo, hay poca demarcación entre las diferentes secciones del intestino delgado, ni hay una válvula ileocecal que separe el intestino delgado del grueso. Los peces carnívoros (como el salmón) tienen un estómago simple y corto, mientras que los herbívoros (como la carpa o la tenca) pueden carecer totalmente de estómago y tener un intestino más largo con ciegos pilóricos. Los ciegos son derivaciones del tracto digestivo que ayudan a aumentar la superficie total para la digestión y a extraer nutrientes esenciales.

Tejido graso intra-peritoneal

Una diferencia importante entre los peces silvestres y los cultivados es la cantidad de grasa que se acumula en la cavidad intraperitoneal de estos últimos. El peritoneo es la membrana que recubre la cavidad abdominal. La cavidad intraperitoneal es el espacio entre el peritoneo que rodea el abdomen y el peritoneo que rodea los órganos digestivos internos. Por ejemplo, la dorada que proviene de la acuicultura suele acumular más grasa intraperitoneal que la dorada silvestre, mientras que los peces que ayunan durante períodos más largos tienen menos grasa que los peces que ayunan durante menos tiempo ([Mozanzadeh et al. 2017](#)). El tejido graso intraperitoneal es de color blanco y se adhiere al intestino. Tener un exceso de esta grasa es negativo ya que contiene fuentes ricas en ácidos grasos omega 3 (que provienen del alimento) y que se desperdicia, ya que los consumidores normalmente no lo consumen.

Bazo

El bazo es normalmente un órgano circular de color rojo oscuro unido al intestino. Ayuda a limpiar la sangre, contiene glóbulos blancos y es una parte importante del sistema inmunológico.

Hígado

El hígado es bastante grande y rojizo, y los principiantes a veces lo confunden con el corazón (pero este último es mucho más pequeño). Juega un papel vital en la desintoxicación de cualquier contaminante orgánico o inorgánico que se encuentre en la comida o el agua, así como en la síntesis de proteínas y en el almacenamiento de grasas y glucógeno. Debajo del hígado está la vesícula biliar de color verde amarillento. La mayoría de los peces no tienen un páncreas distinguible sino más bien cuerpos de Brockmann, una colección de células endocrinas que se encuentran a lo largo del tracto digestivo y que pueden producir insulina.

Vejiga natatoria

Este órgano es único en los peces. Puede llenarse o vaciarse para controlar la flotabilidad, y por lo tanto afecta a la cantidad de energía necesaria para nadar. También puede ser usado para producir o percibir sonidos. Los peces pueden ser o bien fisóstomos (como la trucha), que pueden llenar su vejiga natatoria a través de un conducto neumático que está conectado al intestino, o bien fisoclistos (como la lubina), sin conexión directa entre el esófago y la entrada de la vejiga natatoria, por lo que debe llenarse utilizando una glándula de gas. Los peces fisóstomos están mejor preparados para los cambios repentinos en la altura del agua, mientras que a las especies fisoclistas les llevará más tiempo. Para todos los peces es importante llenar de aire la vejiga natatoria en una etapa temprana de su desarrollo, a fin de asegurar un crecimiento adecuado y evitar deformaciones de la columna vertebral ([Davidson et al. 2011](#)).

Riñones

Los riñones son órganos emparejados que son bastante largos y estrechos, y dorsales a la vejiga natatoria. Juegan un papel importante en la homeostasis de la sangre (es decir, mantener los niveles adecuados de iones disueltos), lo que explica su considerable tamaño. Al igual que en los mamíferos, son necesarios para "limpiar" la sangre, lo que es especialmente importante en un medio acuoso donde la concentración de diferentes iones debe ser monitoreada continuamente. Cabe señalar aquí que los peces de agua dulce y salada han adoptado métodos opuestos para mantener niveles adecuados de electrolitos en la sangre. Los peces de agua dulce tienen una concentración más alta de iones en su sangre y en el agua circundante. Por lo tanto, debido a la ósmosis, las branquias y los riñones de esos peces deben trabajar para evitar absorber demasiada agua (H₂O) y perder demasiados iones (beben poco y "orinan" mucho). En agua salada ocurre lo contrario: los peces beben más agua y

orinan poco, ya que la concentración de iones en su sangre es menor que la del agua circundante. En las unidades acuapónicas, hay que tener cuidado de que la solución de nutrientes para las plantas no tenga un efecto negativo en los peces debido a niveles inadecuados de iones. En el extremo del riñón hay una vejiga para almacenar la orina, pero es muy pequeña en comparación con los mamíferos, sobre todo porque en comparación se produce poca orina (como se ha mencionado anteriormente, gran parte de los desechos nitrogenados se excretan por las branquias).

Testículos y ovarios

La mayoría de los peces utilizados en la acuaponía se utilizarán como alimento y no madurarán sexualmente (los reproductores se mantienen en una instalación separada). Sin embargo, es útil saber que los órganos de reproducción sexual de los peces son internos y comienzan a desarrollarse en lo profundo de la región dorsal del pez, cerca de la cabeza del riñón. A medida que los peces maduran, las gónadas crecen en tamaño drásticamente hacia el poro urogenital cerca del ano. Durante la temporada de cría el semen o los huevos serán expulsados para su fertilización externa.

3.3 Fisiología de la respiración

El aire que respiramos es mayormente nitrógeno (78%) y 21% de oxígeno. El agua que "respiran" los peces también contiene oxígeno, pero en una concentración mucho menor, menos del 1%. Además, como el agua es 840 veces más densa que el aire y 60 veces más viscosa, a los peces les cuesta más esfuerzo "respirar" para extraer el oxígeno, alrededor del 10% de su energía metabólica. En comparación, los animales terrestres sólo utilizan alrededor del 2% de su energía metabólica para extraer oxígeno del aire. Por ejemplo, la trucha arco iris necesita mover aproximadamente 600 ml de agua por sus branquias por minuto por kg de peso mientras que, en comparación, los reptiles terrestres como las tortugas sólo necesitan mover 50 ml de aire min⁻¹ kg⁻¹. En consecuencia, aunque las branquias de los peces son bastante eficientes, la obtención de suficiente oxígeno del agua circundante puede ser difícil y su carencia pone en peligro la vida del animal.

Los peces capturan el oxígeno utilizando sus branquias que están en contacto directo con el agua circundante y son presa fácil de parásitos e infecciones bacterianas. La superficie total de las branquias es aproximadamente 10 veces la superficie de todo el cuerpo. Las branquias también son importantes para el intercambio de iones (manteniendo el equilibrio ácido-base) y en la eliminación de desechos, como el amoníaco. Así, los peces básicamente orinan por sus branquias y respiran a través de ellas. Para obtener oxígeno, el agua es atraída hacia la cavidad bucal y luego se cierra la boca para forzar la salida del agua a través de los dos opérculos. Este movimiento de bombeo crea un flujo unidireccional de agua, a diferencia de la inhalación y la exhalación a través del mismo orificio en los mamíferos terrestres. Algunos peces, como los tiburones, pueden mantener la boca abierta mientras nadan, lo que aparentemente proporciona un flujo de agua suficiente sobre las branquias para respirar normalmente. Si tus tanques lo permiten, puedes tratar de medir la frecuencia cardíaca de tus peces indirectamente contando la frecuencia opercular, es decir, las veces que los opérculos se abren y cierran durante un minuto. Esta medición puede utilizarse como indicador indirecto del bienestar de los animales, ya que los peces estresados tienen altas frecuencias operculares.

La mayoría de los peces tienen cuatro arcos branquiales a cada lado de su cuerpo. Cada arco consiste en una varilla ósea blanca que va de arriba a abajo (ventral-dorsal) de la cual salen los filamentos

primarios en forma de V en dirección caudal. Los filamentos primarios o láminas primarias son rojos ya que están llenos de sangre. Cada lámina primaria tiene láminas secundarias que la atraviesan perpendicularmente y transportan células sanguíneas individuales para facilitar el intercambio de gases (liberan CO₂ y capturan O₂ utilizando la hemoglobina de los glóbulos rojos). El flujo de la sangre corre en contra del flujo de agua, lo que aumenta su eficiencia. Además, los peces pueden abrir o cerrar el conjunto de filamentos primarios para exponer más láminas secundarias al agua, respirando más profundamente. Después de llenarse de oxígeno, las células sanguíneas continúan moviéndose por el cuerpo a través de las arterias.

3.4 Bienestar de los peces

3.4.1 Introducción

La acuicultura es uno de los pocos tipos de producción animal que ha crecido continuamente en las últimas décadas, en alrededor de un 10% anual a nivel internacional ([Moffitt y Cajas-Cano 2014](#)). Sin embargo, a medida que aumenta la producción y aparecen nuevos métodos, como la acuaponía, han aumentado problemas relacionados con la salud y el bienestar de los peces. Aunque parezca sorprendente, desde 1990 se han publicado más de 1.300 artículos científicos sobre el bienestar de los peces (véase el Tabla 2). No todos esos estudios tratan de especies producidas comercialmente, pero en general el número de todos los peces es comparable o superior al de algunas otras especies como las ovejas, los caballos o las aves de corral.

Tabla 2: Resumen del número de publicaciones (artículos) sobre bienestar animal para diferentes especies de animales de granja (basado en una búsqueda en la *Web of Science* para los años 1990-2017).

Especies	Artículos
Peces	1295
Trucha	550
Ovino	1149
Vacuno	2417
Porcino	2638
Caballos	926
Aves	1078

Una de las primeras revisiones científicas del bienestar de los peces fue realizada por [Conte \(2004\)](#) de la Universidad de California en Davis, seguida unos años más tarde por dos grupos del Reino Unido ([Huntingford et al. 2006](#) y [Ashley 2007](#)). En su revisión, [Conte \(2004\)](#) subraya que los piscicultores ya saben que el bienestar es importante y que hay que reducir al mínimo el estrés, ya que los peces tienen requisitos específicos en cuanto a la manipulación y el entorno, fuera de los cuales no prosperan ni sobreviven. Es decir, en comparación con los animales terrestres, los peces son más exigentes en cuanto a las condiciones de crecimiento y pueden sufrir estrés fácilmente, tanto que también pueden morir fácilmente. [Huntingford et al. \(2006\)](#) resume los principales argumentos para creer que los peces pueden sentir dolor. Los peces son seres complejos que desarrollan un comportamiento sofisticado, por lo que los autores creen que probablemente pueden sufrir, aunque

puede ser diferente en grado y tipo que en el caso de los humanos. En esa revisión, los autores acaban identificando cuatro puntos críticos a la hora de considerar el bienestar de los peces: garantizar que los peces no se críen sin agua ni alimento; garantizar que los productores proporcionen agua de buena calidad y equipos adecuados; que no se restrinjan sus movimientos ni su comportamiento natural; y que se evite el sufrimiento mental y físico. En su examen, [Ashley \(2007\)](#) comienza con una descripción de la industria y los puntos críticos que pueden comprometer el bienestar de los peces, incluida la densidad de peces en las jaulas y los problemas de agresión. Por ejemplo, algunas especies, como la tilapia, son más agresivas cuando se las mantiene a bajas densidades que a altas densidades. Es importante señalar que [Ashley \(2007\)](#) ofrece una tabla de los principales problemas de bienestar de los peces de 7 páginas. En conclusión, hay mucha literatura científica sobre el bienestar de los peces y se han identificado varias áreas críticas. Sin embargo, en lo que respecta a la acuaponía, hay muy pocos estudios sobre el bienestar de los peces criados junto con plantas, pero podemos aprender de otros estudios sobre el bienestar de los peces mantenidos en sistemas de recirculación a pequeña escala.

3.4.2 Legislación en la UE

En Europa, todo animal criado con fines de explotación agrícola debe cumplir la [Directiva 98/58/EC](#), que es una ley que establece varias condiciones mínimas para el adecuado bienestar de los animales vertebrados. Aunque los peces están técnicamente incluidos en esa Directiva, están prácticamente exentos debido a la falta de conocimientos sobre el bienestar de los peces, por lo que no hay requisitos específicos sobre las condiciones mínimas para los peces utilizados en la acuicultura. Desde 2006, se han publicado varios informes en Europa, por ejemplo, del [European Council of the European Food Safety Authority \(EFSA\)](#), en los que se dan recomendaciones científicas para las especies más comunes utilizadas en la acuicultura. En general, al menos en Europa, parece haber acuerdo general en que los peces sufren estrés cuando los niveles de oxígeno son bajos y cuando se sacan del agua, y que el estrés crónico en los peces compromete el sistema inmunológico y puede hacerlos más vulnerables a contraer enfermedades.

3.4.3 Medidas específicas para evaluar el bienestar

Los estudios sobre el bienestar de los peces comenzaron más tarde que para otras especies de animales de granja, en parte porque la acuicultura es una ciencia de producción animal más joven y también porque para muchos no estaba claro si los peces podían sentir dolor. Hasta hace poco, los peces no se consideraban animales sensibles, pero esa situación ha ido cambiando. [Sneddon \(2003\)](#) fue uno de los primeros en demostrar que las truchas tienen receptores del dolor (nociceptores) en la cara y mandíbula. Demostraron que esos receptores responden a estímulos potencialmente perjudiciales y envían señales nerviosas a la médula espinal y al cerebro. Además, parece que las truchas son conscientes del dolor, ya que cambian de comportamiento complejo cuando se les da una sustancia nociva, pero vuelven al comportamiento normal cuando se les da morfina (que esencialmente elimina el dolor). Esos hallazgos también se han confirmado en otras especies, como la carpa dorada, en que la ansiedad y el miedo disminuyen cuando se les administran dosis de morfina ([Nordgreen et al. 2009](#)). Por otra parte, otros científicos como [Rose \(2002\)](#) sostienen que los peces no pueden sentir dolor como los humanos, ya que carecen de una neocortex. Por lo tanto, es probable que no sean conscientes de su dolor de la misma manera que nosotros, aunque reaccionen al dolor de manera similar. Sea como fuere, ambas partes están de acuerdo en que los peces pueden estresarse y que han desarrollado una respuesta fisiológica compleja a los factores de estrés. Dawkins

también señala la importancia de que todos se preocupen por el bienestar de los animales, estén o no conscientes, simplemente porque un bienestar animal deficiente conduce a peces enfermos e insalubres, lo que tiene efectos negativos para los productos y consumidores ([Dawkins 2017](#)).

3.4.4 El eje HPI y la respuesta al estrés

La cascada de actividades neuroendocrinas que se liberan en los peces después de que se dan cuenta de un factor estresante son muy similares a las respuestas que se observan en otros vertebrados. Al igual que en los mamíferos, la respuesta neuroendocrina inmediata se denomina respuesta primaria y consiste en señales nerviosas que liberan adrenalina y noradrenalina de las células cromafinas (en la cabeza del riñón), cuyo equivalente en los mamíferos es la médula suprarrenal (Figura 5). Después de la respuesta primaria hay una respuesta secundaria más lenta que tarda de 2 a 15 minutos en activar el eje hipotálamo-hipófisis-intestino, o HPI ([Sumpter et al. 1991](#)). El hipotálamo produce la hormona liberadora de corticotropina (CRH) que estimula la producción de cortisol por parte del tejido interrenal (también asociado a los riñones), que se corresponde con la corteza suprarrenal en los mamíferos ([Okawara et al. 1992](#)). La respuesta secundaria incluye un aumento de la frecuencia cardíaca, una mayor captación de oxígeno por las branquias y un aumento de la concentración de glucosa en el plasma por medio de la glucogenólisis ([Pickering y Pottinger 1995](#)).

Aunque no existe una relación sencilla entre el estrés y el bienestar, sabemos que están relacionados y que la respuesta a un factor estresante puede utilizarse para dar una idea del grado del desafío. Teniendo esto en cuenta, siempre es preferible considerar varios indicadores al mismo tiempo, incluidos los índices de crecimiento, la respuesta del sistema inmunológico y otros indicadores fisiológicos.

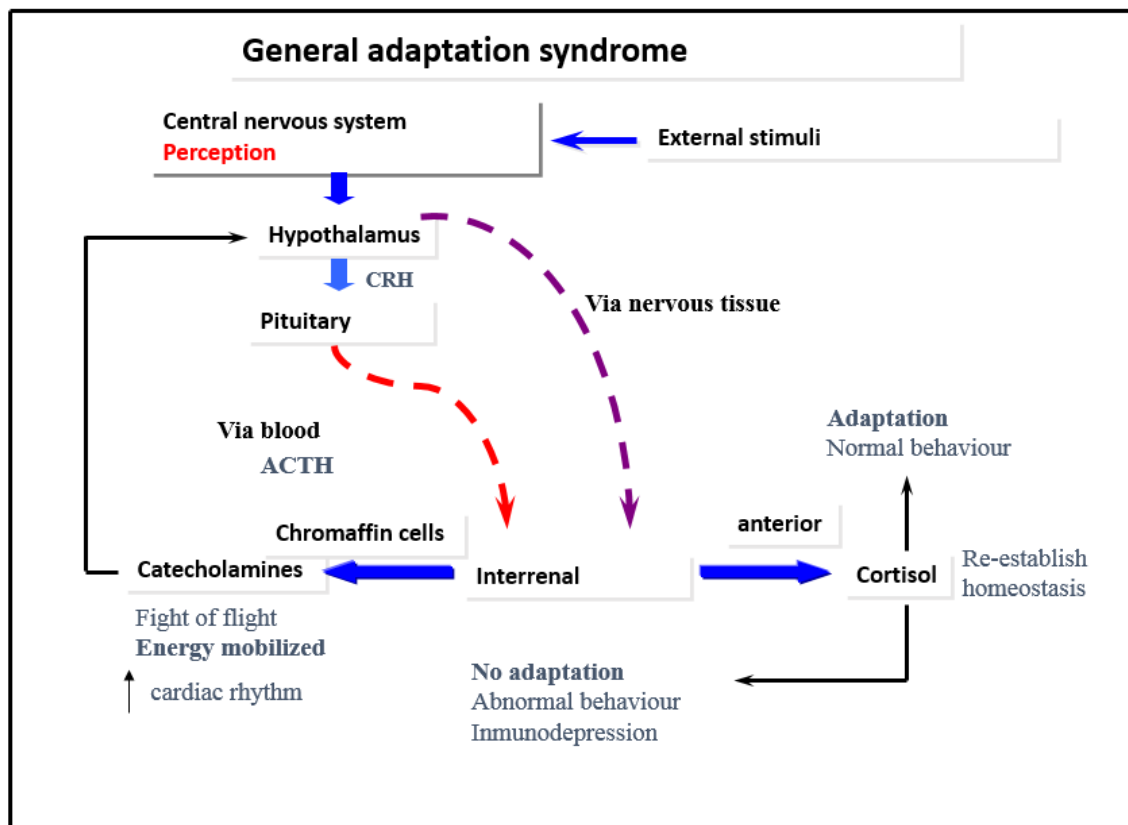


Figura 5: El eje HPI en los peces y la cascada de respuestas a un factor estresante (fuente M. Villarroel).

3.4.5 Indicadores operativos de bienestar

A nivel industrial, se está elaborando un nuevo enfoque para analizar los peces que implica interacciones entre los científicos que estudian el bienestar de los animales y las empresas que se esfuerzan por ser más eficientes. Juntos están desarrollando indicadores de bienestar operativos (OWI). Un buen ejemplo para el salmón es el manual presentado por [Noble et al. \(2018\)](#) que explica a los acuicultores cómo evaluar a nivel comercial el entorno inmediato, los diferentes grupos de peces y los peces individuales. Como ya se ha mencionado, se han publicado muchos artículos científicos sobre el bienestar de los peces, la mayoría de los cuales se basan en observaciones realizadas en el laboratorio. Los OWI son indicadores prácticos que se utilizan a nivel de granja y pueden explicarse y replicarse fácilmente. Los OWI pueden separarse en dos grandes grupos: los más relacionados con el medio ambiente y los relacionados con los peces. Estos últimos pueden aplicarse a grupos de peces o individualmente. Por último, los indicadores individuales pueden incluir análisis de laboratorio que son menos operativos *per se* pero que pueden proporcionar información útil a corto plazo (véase la Figura 6). La OWI puede dar una idea del estado actual de la producción en cuanto a las necesidades de los peces y su bienestar. Paralelamente, pueden utilizarse para ayudar a desarrollar buenas prácticas y para identificar los puntos críticos que pueden tener un efecto negativo.

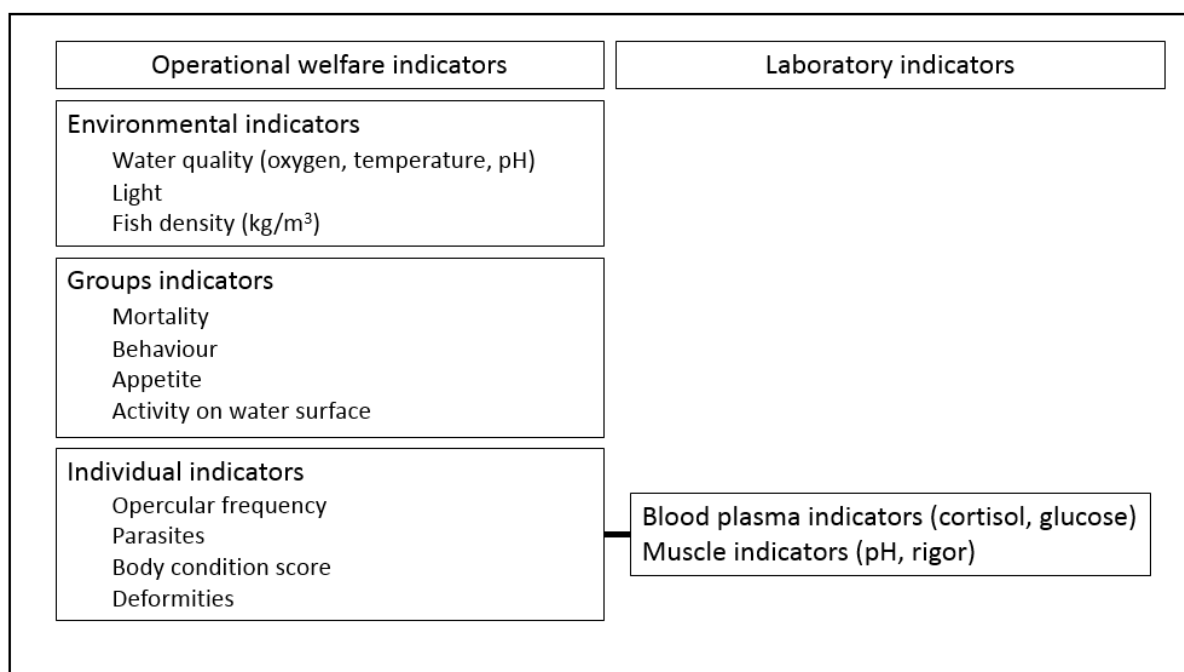


Figura 6: Resumen de los indicadores operativos utilizados en las piscifactorías, incluidos los indicadores que varían según el entorno y el animal. Los indicadores basados en los animales pueden basarse en grupos de peces o en individuos, y los indicadores individuales pueden incluir análisis de laboratorio.

En general, los acuicultores utilizan la alimentación como un indicador indirecto de bienestar. Es decir, uno se acerca al tanque y proporciona alimento, y los peces responden yendo a la superficie y

comiendo, lo cual es una buena señal. Si los peces no vienen a comer, han perdido el apetito por alguna razón y se necesita más información. Aunque se puede comprar mucho equipos para alimentar a los peces automáticamente, se recomienda alimentarlos a mano al menos una vez al día para tener una idea de cómo lo están haciendo. Si los peces no comen, eso afectará a su aumento de peso, que también es relativamente fácil de medir. Otro indicador operativo que es común en las piscifactorías es calcular el coeficiente de condición en peso vivo (el peso vivo dividido por el cubo de la longitud). Indica el estado nutricional ([Bavčević et al. 2010](#)), y da una idea de la cantidad de grasa intraperitoneal. El índice hepato-somático (HSI) se define como la relación entre el peso del hígado y el peso vivo. Durante los períodos de ayuno, las necesidades de energía se satisfacen principalmente movilizand las reservas de glucógeno del hígado, mientras que las reservas de grasa se dejan más o menos intactas durante los primeros días ([Peres et al. 2014](#)). Así pues, el HSI puede utilizarse para indicar las reservas de energía existentes, ya que el hígado es un importante regulador del uso de nutrientes en el pescado ([Christiansen y Klungsøyr 1987](#)).

3.5 Referencias

- Ashley, P.J. 2007. [Fish welfare: current issues in aquaculture](#). *Applied Animal Behaviour Science* 104 (3-4), 199-235.
- Bavčević, L., Klanjšček, T., Karamarko, V., Aničić, I. y Legović, T. 2010. [Compensatory growth in gilthead sea bream \(*Sparus aurata*\) compensates weight, but not length](#). *Aquaculture* 301 (1-4), 57-63.
- Braithwaite, V. 2010. [Do Fish Feel Pain?](#) Oxford University Press, Oxford.
- Canada Department of Fisheries and Oceans 2004. [Animal User Training Template. 1.0. Anatomy and Physiology of Salmonids](#).
- Castanheira, M.F., Conceição, L.E., Millot, S., Rey, S., Bégout, M.L., Damsgård, B., Kristiansen, T., Höglund, E., Øverli, Ø. y Martins, C.I.M. 2017. [Coping styles in farmed fish: consequences for aquaculture](#). *Reviews in Aquaculture* 9, 23-41.
- Christiansen, D.C. y Klungsøyr, L. 1987. [Metabolic utilization of nutrients and the effects of insulin in fish](#). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry* 88 (3), 701-711.
- Conte, F.S. 2004. [Stress and the welfare of cultured fish](#). *Applied Animal Behaviour Science* 86 (3-4), 205-23.
- [Council Regulation \(EC\) No 2406/96 of 26 November 1996 laying down common marketing standards for certain fishery products](#).
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C. y Summerfelt, S.T. 2011. [Abnormal swimming behavior and increased deformities in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* cultured in low exchange water recirculating aquaculture systems](#). *Aquacultural Engineering* 45 (3), 109-117.
- Dawkins, M.S. 2017. [Animal welfare with and without consciousness](#). *Journal of Zoology*, 301 (1), 1-10.
- Hoar, W.S. y Randall, D.J. 1984. [Fish Physiology: Gills: Part B – Ion and Water Transfer](#). Academic Press, Cambridge MA.
- Huntingford, F.A., Adams, C., Braithwaite, V.A., Kadri, S., Pottinger, T.G., Sandøe, P. y Turnbull, J.F. 2006. [Current issues in fish welfare](#). *Journal of Fish Biology* 68 (2), 332-72.
- Love, D.C., Fry, J.P., Genello, L., Hill, E.S., Frederick, J.A., Li, X. y Semmens K. 2014. [An international survey of aquaponics practitioners](#). *PLoS One* 9, e102662.

- Moffitt, C.M. y Cajas-Cano, L. 2014. [Blue Growth: the 2014 FAO state of world fisheries and aquaculture](#). *Fisheries* 39 (11), 552-553.
- Mozanzadeh, M., Marammazi, J.G., Yaghoubi, M., Yavari, V., Agh, N. y Gisbert, E. 2017. [Somatic and physiological responses to cyclic fasting and re-feeding periods in sobaity sea bream \(*Sparidentex hasta*, Valenciennes 1830\)](#). *Aquaculture Nutrition* 23, 181-191.
- Noble, C., Gismervik, K., Iversen, M.H., Kolarevic, J., Nilsson, J., Stien, L.H. y Turnbull, J.F. (eds.) 2018. [Welfare indicators for farmed Atlantic salmon: tools for assessing fish welfare](#).
- Nordgreen, J., Garner, J.P., Janczak, A.M., Ranheim, B., Muir, W.M. y Horsberg, T.E. 2009. [Thermonociception in fish: effects of two different doses of morphine on thermal threshold and post-test behaviour in goldfish \(*Carassius auratus*\)](#). *Applied Animal Behaviour Science* 119 (1-2), 101-107.
- Okawara, Y., Ko, D., Morley, S.D., Richter, D. y Lederis, K.P. 1992. [In situ hybridization of corticotropin-releasing factor-encoding messenger RNA in the hypothalamus of the white sucker, *Catostomus commersoni*](#). *Cell and Tissue Research* 267 (3), 545-549.
- Peres, H., Santos, S. y Oliva-Teles, A. 2014. [Blood chemistry profile as indicator of nutritional status in European seabass \(*Dicentrarchus labrax*\)](#). *Fish Physiology and Biochemistry* 40 (5), 1339-1347.
- Pickering, A. y Pottinger, T. 1995. [Biochemical effects of stress](#). *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes* 5, 349-379.
- Reimchen, T.E. y Temple, N.F. 2004. [Hydrodynamic and phylogenetic aspects of the adipose fin in fishes](#). *Canadian Journal of Zoology* 82, 910-916.
- Rose, J.D. 2002. [The neurobehavioral nature of fishes and the question of awareness and pain](#). *Reviews in Fisheries Science* 10 (1), 1-38.
- Sneddon, L.U. 2003. [The evidence for pain in fish: the use of morphine as an analgesic](#). *Applied Animal Behaviour Science* 83 (2), 153-162.
- Sumpter, J., Le Bail, P., Pickering, A., Pottinger, T. y Carragher, J. 1991. [The effect of starvation on growth and plasma growth hormone concentrations of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*](#). *General and Comparative Endocrinology* 83 (1), 94-102.
- Villarroel, M., Junge, R., Komives, T., König, B., Plaza, I., Bittsánszky, A., y Joly, A. 2016. [Survey of aquaponics in Europe](#). *Water* 8 (10), 468.
- Wainwright, D.K. y Lauder, G.V. 2017. [Mucus matters: The slippery and complex surfaces of fish](#). In Gorb, S.N. y Gorb, E.V. (eds.) *Functional Surfaces in Biology III: Diversity of the Physical Phenomena*, pp. 223-246. Springer, New York.
- Zupanc, G.K. 2009. [Towards brain repair: insights from teleost fish](#). *Seminars in Cell and Developmental Biology* 20 (6), 683-690.

4. ALIMENTACIÓN Y CRECIMIENTO DE LOS PECES

4.1 Introducción general a la alimentación de los peces

La alimentación y la nutrición de los peces son aspectos fundamentales de la acuicultura, tanto en lo que respecta al crecimiento esperado de los peces como en la significación económica para la viabilidad de la instalación. Una alimentación adecuada depende del desarrollo de la formulación de piensos de calidad y de la elección de métodos apropiados para distribuir los piensos a los peces en los tanques. Además de afectar al crecimiento, la alimentación también puede afectar a la salud y el bienestar de los peces, lo que depende a su vez de cuánto sabemos acerca de las necesidades de cada especie. Cada especie tiene su propia historia natural y etapas de crecimiento bien definidas, que deben ser comprendidas a fin de proporcionar una atención óptima.

Las especies de peces candidatas para la acuaponía (véase el Capítulo 3, Tabla 1) ocupan nichos ecológicos bien definidos en su hábitat natural. Por esa razón, es necesario proporcionar condiciones adecuadas para un desarrollo apropiado, que incluyan las mejores condiciones de estabulación, lo que significa definir bien la temperatura, la salinidad, la calidad del agua y la velocidad más adecuada del flujo del agua de acuerdo a los requerimientos de la especie. Normalmente las fases más exigentes son el mantenimiento de los reproductores y la fertilización/incubación de óvulos o huevos, pero la producción acuapónica normalmente se ocupará de las fases posteriores, llamadas "de engorde o crecimiento". A medida que aumenta la escala de la acuicultura y las granjas acuapónicas, se hace más complejo mantener un gran número de fases de producción en la misma instalación, por lo que las empresas se especializan en una o dos etapas, como la cría de alevines o la crianza hasta tamaños comerciales. En el caso de la acuicultura en sistemas de recirculación (RAS), normalmente el ciclo elegido suele partir de alevines que se crían hasta la talla comercial, con el objetivo de simplificar la parte de producción de peces del sistema con sólo una o dos fases, por supuesto en el caso de que sea posible.

En términos generales, la alimentación en la acuicultura difiere en algunos aspectos fundamentales en comparación con la ganadería terrestre. Éste normalmente se autoalimenta utilizando lo que se conoce como alimentadores *ad libitum* (cada animal puede elegir cuándo acercarse al comedero y cuánto comer en cualquier momento del día). En ese caso es relativamente fácil para el granjero detectar la ración que realmente ha ingerido cada animal o grupo de animales. En el caso de la acuicultura y la acuaponía, los peces también pueden utilizar auto-alimentadores, pero es mucho más difícil juzgar la cantidad de alimento que realmente consumen. El peligro es que cualquier alimento extra que caiga en el agua y que no se ingiera se convierta en un residuo que "contamina" el sistema. Por lo tanto, hay que hacer esfuerzos para estimar el alimento a distribuir y la ración precisa que los peces necesitan.

Una forma de distribuir el alimento es manualmente desde fuera de los tanques, repartiéndolo por toda la superficie del agua, observando el comportamiento de los peces hasta que parezcan estar saciados, y en ese momento detener el suministro de la alimentación. Dado que los peces se alimentan bajo el agua, no es tan fácil saber cuándo dejan de alimentarse o cuánto han comido, o incluso si algunos peces comieron más que otros. Cuanto más sabemos sobre una especie, más sabemos sobre sus hábitos de alimentación. Por ejemplo, las tilapias del Nilo en estado silvestre son omnívoras

cuando son jóvenes (juveniles), comiendo tanto zooplancton como fitoplancton, mientras que se vuelven más herbívoras a medida que crecen (< 6 cm de largo) ([FAO 2018](#)). La trucha, por otra parte, es mayormente carnívora durante toda su vida, con una dieta casi exclusivamente basada en insectos y cualquier pez más pequeño que puedan atrapar. En todo caso, la percepción y el conocimiento de las personas que se encargan de la alimentación es muy importante, especialmente si la alimentación se hace manualmente. Para obtener más información sobre los hábitos de alimentación de las distintas especies, véase el Sistema de Información sobre Alimentos y Fertilizantes para la Acuicultura, administrado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación ([FAO 2018](#)).

Otra forma de alimentar es utilizar alimentadores automáticos en lugar de la alimentación manual. En este caso podríamos depender de los avances tecnológicos, como las cámaras submarinas, para detectar cuando los peces ya no están comiendo. Todo el alimento que entra en el tanque se convierte en parte del sistema, ya sea que se coma o no. De hecho, la alimentación de los peces es el principal elemento externo de cualquier sistema acuapónico y debe ser cuidadosamente controlado. El alimento no ingerido permanece en el tanque y causa dos problemas, uno asociado con su coste y otro asociado con su eliminación del propio sistema. Estos dos problemas evidencian la necesidad de contar con diseños adecuados.

La hidráulica del sistema debería facilitar la eliminación del alimento no ingerido. Normalmente esto implica adecuar los tanques de manera que la parte inferior sea más estrecha que la superior, y se promueva y facilite que las heces y sólidos en suspensión se asienten en el fondo y puedan ser eliminadas de manera eficiente. Si el diseño es deficiente, la limpieza será más compleja y los peces pueden sentirse molestos por la necesidad de aumentar la frecuencia de las rutinas de mantenimiento. Cualquier disminución de las condiciones sanitarias de los tanques tendrá consecuencias inmediatas en el bienestar de los peces y en la propia rentabilidad de la granja. Por lo tanto, incluso si conocemos las necesidades nutricionales de la especie, una instalación mal diseñada dificultará la provisión de los requisitos adecuados para el buen bienestar de los peces, y el alimento se desperdiciará.

4.2 Necesidades de energía

Como todos los animales vivos, los peces requieren energía, y esa energía es proporcionada por la oxidación de los componentes orgánicos en el alimento. Los peces requieren energía para llevar a cabo sus actividades diarias, como respirar y nadar, y para transformar, restaurar y hacer crecer sus tejidos corporales. Las necesidades energéticas de los peces dependen de su estado fisiológico y de las condiciones ambientales. En general, los peces hacen un uso más eficiente de la energía ingerida en comparación con los mamíferos terrestres, debido a las siguientes razones:

1. Las especies acuáticas son poikilotermos, lo que significa que su temperatura corporal es la misma que la del agua circundante, por lo que no necesitan gastar energía calentando su cuerpo o manteniéndolo a una temperatura constante, como ocurre con el ganado terrestre;
2. Como viven en el agua, los peces no necesitan un esqueleto corporal fuerte para soportar su peso bajo la plena presión de la gravedad, como en el ganado terrestre, ni requieren los costosos procesos metabólicos necesarios para mantener ese esqueleto;
3. Los desechos nitrogenados de los peces se eliminan como amoníaco directamente de las branquias, lo que consume menos energía que tener que fabricar urea o ácido úrico y luego eliminarlo, como hacen los mamíferos y las aves.

En la Figura 1 se presenta un panorama general del equilibrio de nutrientes y energía en los peces. Si suponemos que ha ingerido todo el alimento suministrado, la energía se distribuye porcentualmente entre los diferentes procesos fisiológicos, dentro de unos límites. Si se mantiene en condiciones de estrés (mala iluminación, baja calidad del agua, densidades de población inadecuadas), donde los peces están vivos pero no se sienten cómodos, alrededor del 40% de la energía del alimento se consumirá sólo para hacer frente al estrés, dejando sólo el 30% para el crecimiento. Por otro lado, en condiciones óptimas, los peces utilizarán hasta un 40% para el crecimiento. Obviamente, la viabilidad económica de un sistema acuapónico dependerá del uso óptimo de la energía proporcionada. Para ello tenemos que asegurarnos de que ingieren todo el alimento, y que proporcionamos las condiciones de estabulación óptimas para que los peces se desarrollen con el mínimo estrés posible.

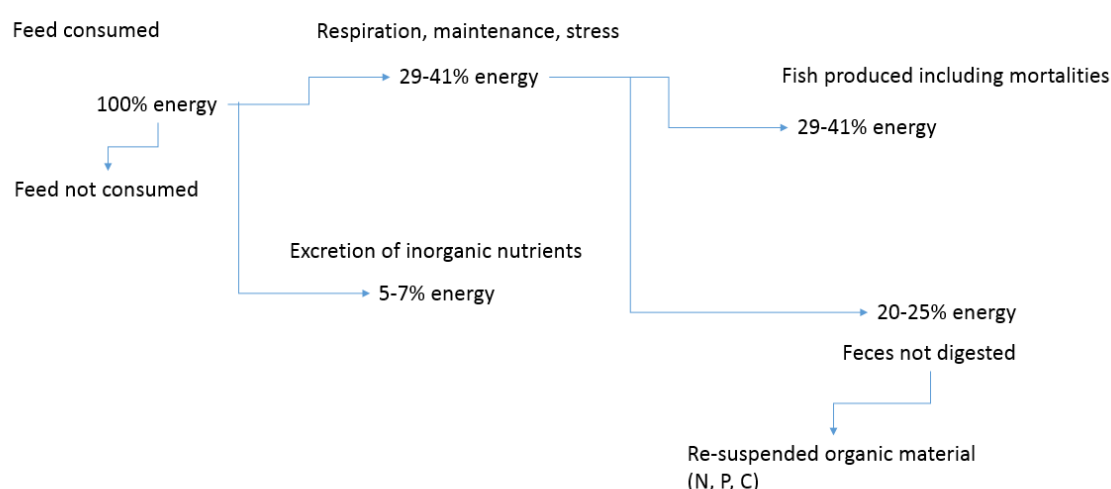


Figure 1: Equilibrio de nutrientes y energía para los peces mantenidos en sistemas de recirculación.

4.3 Principales interacciones entre la ingestión y los factores ambientales

Como se ha comentado anteriormente, deberíamos poder estabular a cada especie según sus necesidades. Para ello necesitamos, antes de empezar, un profundo conocimiento de las especies con las que vamos a trabajar, y de las necesidades que va a requerir la instalación. Una vez que tengamos esta información, deberíamos ser capaces de mantener durante la duración del ciclo, las mejores y más adecuadas condiciones de estabulación en nuestro sistema, que en nuestro caso lo relacionamos con los sistemas acuapónicos.

4.3.1 Factores abióticos

Los principales aspectos ambientales a considerar y que tienen un efecto directo en la producción son los siguientes:

1. Parámetros físico-químicos del agua de origen, que son independientes de la propia actividad acuícola:
 - a. La temperatura del agua, que regula todos los procesos metabólicos

- b. Salinidad o conductividad del agua
 - c. Turbidez y sólidos totales en suspensión
 - d. Cualquier compuesto potencialmente tóxico en la fuente de agua. La calidad inicial del agua disponible es uno de los factores básicos del éxito de la instalación
2. Parámetros físico-químicos del agua del tanque:
- a. Gases disueltos: fundamentalmente oxígeno, que debe ser vigilado continuamente y que es requerido por los peces para su normal funcionamiento. Paralelamente, el dióxido de carbono se produce por la respiración de los peces, y en el circuito están presentes otros gases, como el nitrógeno (que puede aparecer durante la sobresaturación del agua bombeada), o el sulfuro de hidrógeno o el metano procedente de la descomposición anaeróbica de los sedimentos.
 - b. Micronutrientes o macronutrientes disueltos, que están relacionados con el alimento suministrado, incluyen varios elementos vitales para el desarrollo de los peces, como el fósforo, el hierro y, especialmente, las sustancias nitrogenadas metabolizadas y excretadas por los peces.

4.3.2 Factores bióticos

Las diferentes especies de peces son extraordinariamente diversas en cuanto a sus necesidades sociales, como la densidad de población. Históricamente, los peces elegidos para la acuicultura son robustos en las diferentes condiciones que se van a encontrar en todo el proceso de cría, lo que es básico para una gestión adecuada. Ello incluye la realización de las tareas diarias propias en la granja sin que genere muchas complicaciones sanitarias en los peces. En el caso de la acuicultura, uno de los peces más popular es la tilapia, bien conocida por su robustez.

El inicio del desarrollo de la acuicultura, se tuvo que domesticar especies silvestres, que normalmente eran de difícil manejo, con complicaciones para reproducirlos y criarlos. Por ello se buscaban especies que tuvieran un alto valor económico de mercado para que su cría tuviera viabilidad económica. Ese alto valor cubría los costos de producción de aquellas especies iniciales delicadas. Un claro ejemplo es la trucha arco iris, que al principio era una especie con tecnologías de producción complicada, a pesar de que ahora parece relativamente simple. Cualquier gestión deficiente y el movimiento inadecuado de los peces producía estrés e incluso la pérdida de escamas, lo cual provocaba infecciones. Todas estas incidencias provocaban o facilitaban la aparición de enfermedades y otros problemas comunes de los peces que sufren estrés en su estabulación. Ejemplos de especies que se están domesticando actualmente y que no han alcanzado su pleno potencial en la acuicultura europea, son por ejemplo, la lota (*Lota lota*) y el timalo (*Thymallus thymallus*). El desarrollo tecnológico y los conocimientos acumulados en acuicultura han mejorado drásticamente las técnicas utilizadas en las operaciones rutinarias de las granjas, como la toma de muestras de los peces, el conteo de los peces, el movimiento de los peces vivos, etc. Los principales aspectos que influirán en el bienestar de los peces en los tanques incluyen:

1. Estructura social: dependiendo de la especie, algunas son bastante territoriales, y debemos manejar estas características en los tanques. Por ejemplo, sabemos que las truchas son muy territoriales, y que requieren una clasificación de tamaño frecuente durante las fases iniciales de crecimiento para evitar la aparición de peces dominantes que dañen a los peces más

pequeños. En ese caso es mejor mantener a los peces dentro de un rango de tamaño estrecho en cada tanque, separando distintas tallas para mejorar la producción. También sabemos que las especies de tilapia y de Clarias muestran dos modos de comportamiento diferentes: territorial si se encuentran en densidades bajas, y de enjambrazón/escuela si se encuentran en densidades altas. Por lo tanto, las bajas densidades no siempre son mejores para todas las especies de peces.

2. Densidad de peces: cada especie tiene una densidad de población mínima y máxima por debajo o por encima de la cual pueden surgir problemas y el bienestar de los peces se verá comprometido. La densidad se mide normalmente en kg/m^3 y varía según el sistema. En algunos sistemas industriales de RAS de alto rendimiento se cultivan tilapias por encima de los 60 kg/m^3 , pero normalmente los sistemas acuapónicos utilizan densidades más bajas, alrededor de 20 kg/m^3 (véase, por ejemplo, las [Aquaponic Gardening Rules of Thumb](#)), aunque los valores pueden variar ampliamente según el tamaño de los peces y el sistema de RAS.
3. Perturbación humana: depende de la especie. Las tencas (*Tinca tinca*), por ejemplo, son bastante volátiles, y pueden hacerse daño al chocar contra las paredes del tanque cuando son perturbadas o incluso cuando notan sombras humanas. Una solución es poner cortinas alrededor de los tanques para evitar ser vistos, o colocar los tanques sobre soportes de goma para minimizar las vibraciones de los pasos humanos o las máquinas.
4. Presa o alimento: el tamaño del alimento debe ser apropiado para el tamaño de los peces, y distribuido en todo el tanque para no promover los peces dominantes. De lo contrario, los peces menos proactivos no ganarán peso y los tanques deberán ser clasificados por tamaño más a menudo, lo cual es estresante.
5. Predadores. La presencia de predadores, como gatos, perros o pájaros cerca de los tanques, puede estresar mucho a los peces, y es necesario evitar el contacto mediante el uso de límites artificiales como las vallas.
6. Ruidos fuertes, como la música (especialmente sonidos graves) pueden ser estresantes para los peces también.

4.4 Composición proximal de los alimentos para peces y nutrientes esenciales

Cuando comenzaron las investigaciones sobre los alimentos para peces hace más de 50 años, los científicos analizaron, en primer lugar, las dietas naturales de las especies en cuestión. La trucha, como ejemplo de pez carnívoro, tenía una dieta natural que consistía en 50% de proteína, 15% de grasa, 8% de fibra y 10% de ceniza, que es alta en proteínas en comparación con los mamíferos terrestres. Desde entonces, los investigadores han tratado de encontrar el equilibrio adecuado de proteínas, carbohidratos, grasas, fibras, vitaminas y minerales para los peces utilizados en la acuicultura ([Bhilave et al. 2014](#)).

Uno de los componentes más importantes de cualquier alimento para peces es la proteína. Todas las proteínas están compuestas de aminoácidos en diferentes proporciones. Por lo tanto, los nutricionistas modernos tienden a examinar las necesidades de proteínas en función de las necesidades de aminoácidos y tratan de identificar los niveles ideales de las más importantes. Esto

hace que todo el sistema sea más eficiente, ya que los peces no obtienen aminoácidos adicionales (que luego se desperdician), y tienen suficientes aminoácidos esenciales para crecer saludablemente. Por lo general, el nivel de proteína es la primera y más importante pregunta que hay que hacer al diseñar una dieta. También es una cuestión clave en la acuaponía, ya que la proteína de los alimentos es la fuente de todos los residuos de nitrógeno que más tarde serán utilizados por las plantas (véase el Capítulo 5).

Los carbohidratos están compuestos de glucosa, la principal fuente de energía para los animales. En los piensos para peces, el carbohidrato más comúnmente encontrado es el almidón, que ayuda a mantener unidos los gránulos de pienso y proporciona una fuente de energía barata. Aunque suele encontrarse en cantidades bajas en los piensos para peces, los últimos acontecimientos han hecho que aumente su uso. Ahora, en un esfuerzo por ahorrar proteínas, es decir, por reducir la cantidad de aminoácidos que se descomponen para producir energía, los nutricionistas de peces están suministrando más carbohidratos, con la ventaja de que estos últimos también son más baratos que las proteínas (ver por ejemplo, [Lazzarotto et al. 2018](#)). El único inconveniente es que este enfoque hace que muchos peces carnívoros sean más herbívoros o vegetarianos, ya que los carbohidratos adicionales son en su mayoría de origen vegetal. Muchos estudios realizados en los últimos 5 años han analizado cómo esto puede afectar el crecimiento y el bienestar de los peces, y los resultados son prometedores.

Las grasas están compuestas por triglicéridos o ácidos grasos que, al igual que los carbohidratos, proporcionan energía a los peces y, a diferencia de los carbohidratos, pueden almacenarse en diferentes órganos. Muchos peces, especialmente los de aguas frías, dependen de altos niveles de grasa en su dieta (menos del 15%), incluyendo los ácidos grasos omega-3 y omega-6. Los ácidos grasos también son necesarios para transportar las vitaminas solubles en grasa. Los niveles relativamente altos de grasa en la mayoría de las dietas de los peces significa que se necesitan antioxidantes para mantener su estabilidad, evitando la degradación durante el procesamiento y el almacenamiento del alimento ([Harper y Wolf 2009](#)).

La fibra bruta es la parte no digestible o difícil de digerir del alimento que ayuda a promover la motilidad intestinal (peristalsis). Las cenizas representan los minerales de los piensos, como el potasio, el fósforo, el cobre y el zinc. Si se superan los minerales que pueden ser asimilados por los peces, los minerales adicionales se disolverán en el agua. Esto también es importante en la acuaponía, ya que podemos diseñar alimentos que proporcionen un exceso de minerales que acabarán siendo excretados por los peces y que, por lo tanto, estarán disponibles para las plantas. Sin embargo, normalmente es una buena idea optimizar en primer lugar el alimento para los peces.

Un concepto importante en la nutrición de los peces es la relación entre proteína digestible y energía digestible, a menudo abreviada como PD/ED. Si la dieta que se da a los peces es saludable y equilibrada, dejarán de comer cuando "sientan" que se ha alcanzado su presupuesto energético. La energía puede provenir de la grasa, los carbohidratos o las proteínas. Como se ha visto anteriormente, la fuente de energía más accesible es el carbohidrato, seguido de la grasa, y por último la proteína. Si la dieta es alta en proteínas en comparación con la energía fácilmente accesible (un alto PD/ED), los peces tendrán que comer más proteínas de las que necesitan para crecer. Así, esa proteína extra no se convertirá en músculo, sino que se descompondrá y se utilizará para otros fines metabólicos, o simplemente se desperdiciará. Por otro lado, si la PD/ED es baja, entonces los peces dejarán de comer antes de tener lo suficiente para crecer adecuadamente, y se debilitarán ([Oliva-Teles 2012](#)).

En resumen, la Tabla 2 proporciona datos sobre la composición general de una dieta para la trucha adulta (carnívora) y la tilapia adulta (herbívora), siendo esta última el pez más utilizado en la acuaponía. La cantidad de vitaminas y minerales es baja en comparación con los demás componentes principales, y depende de la mezcla de vitaminas y minerales utilizada por la fábrica de pienso. Por ejemplo, el sistema acuapónico de la Universidad Estatal de Arizona que se utiliza para cultivar tilapia utiliza piensos con 5mg/kg de ácido fólico y 66 mg/kg de vitamina E en lo que respecta a las vitaminas, y 7 mg/kg de fósforo y 0,5 mg/kg de magnesio en lo que respecta a los minerales (véase [Fitzimmons 2018](#)), entre otros.

Tabla 2: Resumen de la composición del alimento (en porcentaje del peso seco) para un carnívoro (trucha) y un herbívoro (tilapia). El 10% restante incluye cenizas con vitaminas y minerales.

	Trucha ¹	Tilapia ²
Proteína	50	30
Carbohidratos	17	46
Ácidos grasos	15	9
Fibra	8	5

¹FAO 2018; ²Tran-Ngoc *et al.* 2016

4.5 Tipos de pienso

En Europa, la acuicultura intensiva comenzó a finales del siglo XIX, cuando los gobiernos decidieron criar peces para obtener alevines que se utilizaron para repoblar lagos y ríos ([Polanco y Bjørndal 2018](#)). Esos peces representaban una importante fuente de proteína para las comunidades fluviales, y ayudaban a aliviar el hambre. Se procuró promover las especies más apreciadas, como los salmónidos, que son carnívoros. A medida que aumentó la producción y los peces se mantuvieron bajo cuidados intensivos durante períodos más largos, los acuicultores comenzaron a formular piensos que cumplieran con los requerimientos nutricionales de sus especies. Al principio capturaban macroinvertebrados, especialmente en las fases iniciales de alevinaje, en las masas de agua cercanas, pero eso era estacional y la oferta era limitada. Más tarde, los peces se alimentaron con productos de desecho de los mataderos, que se trituraban para formar una pasta alimenticia, o se picaban en pequeños trozos y se tiraban directamente al agua. Como resultado, muchas granjas de salmónidos se establecieron cerca de los mataderos, muy especialmente cuando no había cámaras de frío que permitiesen el transporte de esos alimentos tan perecederos.

Las piscifactorías cercanas a los puertos utilizaban el pescado desechado de las pesquerías, pero el suministro no siempre era constante y la logística asociada a su almacenamiento, era cada vez más difícil de organizar a medida que aumentaba la producción. Así que los granjeros comenzaron a hacer una pasta con pescado desechado que se mezclaba con harina de pescado, a la que a veces añadían proteína vegetal u otros complementos alimenticios. La pasta también podía tener forma de pellets, lo que facilitaba su distribución en muchos tanques, pero como esta pasta contenía pescado triturado, con un grado de humedad importante, no podía mantenerse durante mucho tiempo sin descomponerse y perder sus calidades nutricionales. Con el tiempo, los nutricionistas de peces comenzaron a desarrollar alimentos granulados secos a mediados del siglo XX. Eran secos y por ello

mucho más fáciles de almacenar. Se formulaban de acuerdo a las necesidades nutricionales de cada especie, y facilitaron enormemente el crecimiento de las producciones.

Esos primeros alimentos secos granulados o compuestos, sin duda fueron una de las claves que facilitaron la expansión de las piscifactorías. Desde entonces se han realizado intensas investigaciones sobre las materias primas más apropiadas y económicamente rentables para utilizar en las formulaciones de los piensos. Todo el proceso se mejoró mediante la introducción de la técnica de extrusión, que aplica alta presión a la pasta de los piensos durante intervalos cortos, aumentando la temperatura, aligerando el gránulo (lo que le permite flotar en el agua durante períodos más largos) y permitiendo la incorporación de más aceite de pescado. También mejoró la compactación de los gránulos para que no se disolvieran inmediatamente al entrar en contacto con el agua. Todo ello, dotaba a los alimentos utilizados actualmente de notables ventajas, frente a los piensos inicialmente utilizados.

Más recientemente se ha continuado realizando más esfuerzos para producir alimentos más sostenibles y orgánicos. Como se mencionó anteriormente, para los carnívoros esto significa reducir la dependencia del uso de harinas de pescado en los piensos para peces (y sustituirla por proteínas vegetales como la harina de soja, complementadas con los adecuados aminoácidos y otros componentes) y el aceite de pescado. Para la tilapia también significa reducir o eliminar cualquier harina o aceite de pescado, manteniendo la calidad de la carne. Las investigaciones recientes se han centrado en fuentes alternativas de proteínas para muchos tipos de peces, incluyendo el uso de algas o harina de insectos.

4.6 Estrategias de alimentación

Además de utilizar los alimentos adecuados nutricionalmente, debemos asegurarnos de que los gránulos proporcionados son del tamaño adecuado para la boca del pez. Para los peces pequeños esto significa generalmente un gránulo muy fino y para los peces más grandes un gránulo redondo o cilíndrico que puede ser de varios mm de diámetro. Por ejemplo, [Aquaponics USA](#) sugiere usar harina/polvo para tilapia desde la eclosión hasta las 3 semanas de vida, más tarde para el primer alevín se utiliza granulado (1/32 de pulgada o 0,9 mm) hasta que alcanza los 2 cm de longitud, a continuación el pienso granulado de alevín (1/16 de pulgada o 1,6 mm) hasta unos 4 cm de longitud, y por último se recomienda un gránulo mayor (3/16 de pulgada o 4,8 mm) hasta alcanzar los 6 cm de longitud.

También es necesario distribuir el alimento adecuadamente. Normalmente el alimento es lanzado a la superficie del tanque y el personal percibe cómo reaccionan los peces, siendo conscientes de que cada especie reacciona de una manera propia, pero generalizando: si se mueven a la superficie y comienzan a comer (generalmente una buena señal), o si permanecen en el fondo del tanque (generalmente una mala señal). Sin embargo, en ninguno de los dos casos es obvio si están comiendo correctamente, cuánto termina en sus bocas y cuánto se desperdicia. Debido a estos problemas es bastante fácil sobrealimentarlos.

En general, el alimento se distribuye a los peces de acuerdo con las tablas de alimentación que son preparadas por el productor de alimentos en términos de la temperatura del agua y la etapa de crecimiento. Pero la percepción del personal que distribuye la alimentación es muy importante ya que puede determinar el grado de saciedad de los peces alimentados, y eso está relacionado directamente con su salud y su bienestar. Se están haciendo cada vez más esfuerzos para automatizar el proceso en

la actualidad, y los sistemas han mejorado considerablemente, pero no podemos subestimar la importancia de la observación diaria del comportamiento de los peces, que es probablemente el método mejor y más directo para comprender su estado. Si bien se han realizado muchas investigaciones para optimizar la alimentación para un crecimiento máximo, es evidente que si les damos menos alimento del que necesitan, crecerán menos con relación a su potencial y el productor perderá dinero.

Para entender el proceso de alimentación necesitamos definir algunos conceptos, basados en la Figura 2, que fue desarrollada por Skretting, una importante compañía de alimentos. Necesitamos definir el concepto de ración máxima, que es la ración teóricamente ideal que se debe dar a los peces. Sin embargo, esta ración máxima es específica para cada granja, ya que depende de condiciones externas propias de cada granja, como puede ser la calidad y la temperatura del agua, así como del propio diseño de las instalaciones. Los principales conceptos e índices utilizados comercialmente son los siguientes:

1. Índice o “factor” de conversión (IC): es la relación entre la cantidad de alimentos ingeridos (en g. o kg.) dividida por el aumento de peso en vivo. A nivel comercial a veces utilizamos un “Índice de conversión de alimentos industrial”, que es una cifra aproximada basada en la cantidad total de pienso suministrado durante un determinado período de tiempo dividido por las toneladas de pescado producidas. En ese caso, si hubo mortalidad, no restamos el alimento consumido por los peces antes de su muerte. Esta “IC industrial” da una idea de los costes de producción reales. Otro índice similar es el “índice de conversión biológico” (ICB), que es el kg de alimento realmente consumido por los peces dividido por los kilogramos que han crecido. Es más difícil calcular el ICB a nivel industrial, ya que requiere de conseguir recolectar datos muy precisos de los peces, lo cual es complejo de realizar en las granjas, pero es útil cuando queremos saber la eficiencia de las nuevas formulaciones de alimentos recién desarrollados, y es un índice que necesitan saber las casas fabricantes de piensos. El IC describe la cantidad de pienso precisada para obtener un kg del pez considerado:

$$IC = \frac{\text{Pienso aportado a los peces [kg]}}{\text{Ganancia en peso vivo [kg]}}$$

Esta proporción refleja el valor nutricional y económico de un pienso. Un IC de 1 significa que utilizas 1 kg de pienso para obtener un 1 kg de pez en peso vivo. Cuanto más alto es el IC, más alto es el coste en alimentación de dicha especie. Los peces jóvenes tienen un IC más bajo (entre 0,4 y 0,8), mientras que los peces adultos tienen un IC entre 0,9 y 2. El IC es propio de cada especie y del pienso de cada fabricante. A veces se obtiene un mayor rendimiento económico utilizando piensos caros, pero de alta calidad, por las mejoras obtenidas en un mejor estado y crecimiento de los peces, teniendo que considerar que la adquisición de piensos más baratos, pudiera ser mucho más caro para el granjero, pues los peces crecerían menos y el factor de conversión sería mayor.

2. Tasa de crecimiento específico (TCE): representa el porcentaje de crecimiento diario de los peces. Es específica para cada especie y está relacionada con el tamaño de los peces y la temperatura del agua. Al igual que el IC es adimensional (sin unidades) y es útil para comparar datos entre granjas o especies. La TCE muestra el crecimiento medio diario de un pez en porcentaje de su peso corporal:

$$TCE \left[\frac{\%}{d} \right] = \left(\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{T_2 - T_1} \right) * 100$$

Dónde W_1 y W_2 representan el peso de los peces al inicio y al final de periodo de crecimiento, respectivamente y $(T_2 - T_1)$ denotan la duración de periodo de crecimiento en días.

3. La tasa de alimentación diaria (TCD): el porcentaje de alimentación proporcionado expresado como porcentaje del peso de los peces (% de peso de los peces por día). Normalmente este porcentaje es mayor para los peces más jóvenes (alrededor del 10%) y menor para los más viejos (alrededor del 1-2%).
4. Ración consumida: la ración realmente consumida por los peces.
5. Ración de mantenimiento: la ración precisa necesaria para mantener a los peces a un peso constante sin crecimiento.
6. Ración máxima: la ración necesaria para obtener el máximo crecimiento posible de la especie.

En la Figura 2 podemos visualizar el concepto de la ración máxima, que proporciona el máximo crecimiento de la especie en cultivo. Esta ración máxima será específica para cada granja, y depende de las condiciones locales. A medida que nos acerquemos a la ración máxima, el crecimiento aumentará, pero si nos pasamos del límite, estamos desperdiciando alimento y el factor de conversión aumentará. Sin embargo, en términos generales es aconsejable alimentar a los peces pequeños más que la ración máxima, ya que el desperdicio será pequeño debido a la pequeña biomasa existente, y tenderemos a maximizar el crecimiento. Pero en el caso del crecimiento final, tendemos a ser más prudentes, ya que hay una gran biomasa en el agua, y cualquier alimento extra que se pierda será costoso y aumentará el impacto ambiental negativo, haciendo necesario su limpieza.

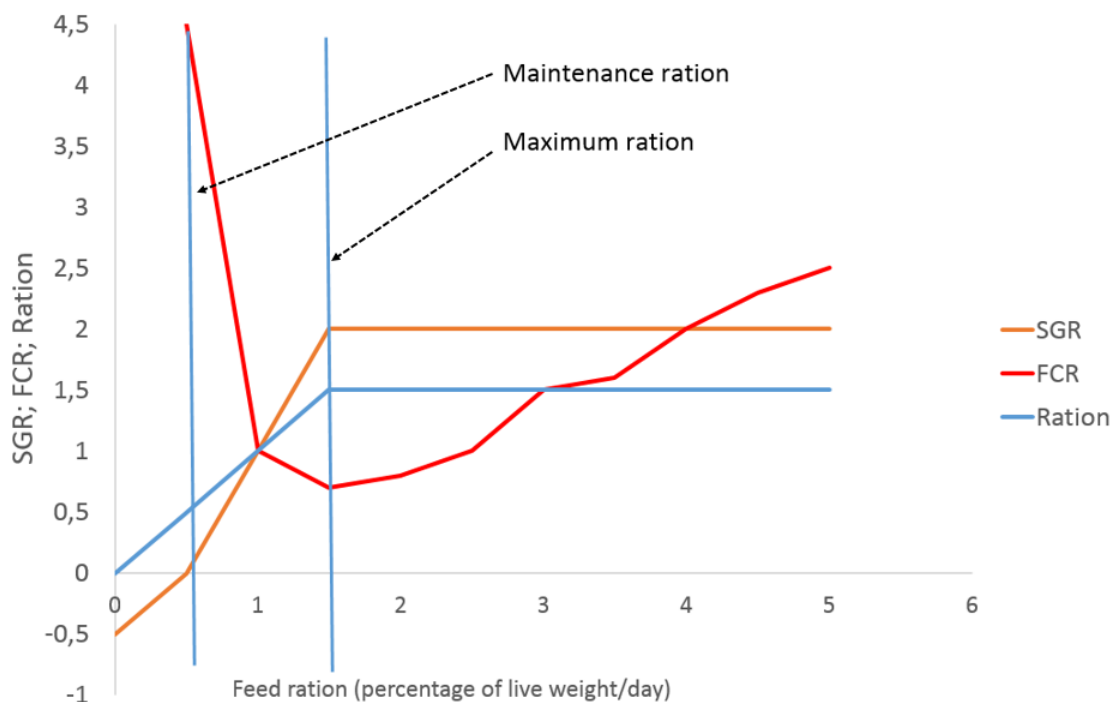


Figura 2: Evolución de la tasa de crecimiento específico (TCE), la tasa de conversión alimenticia (IC) y la ración de alimento proporcionada a los peces en términos del porcentaje de alimento por peso vivo de los peces por día.

Siguiendo la Figura 2, con una pequeña ración de alimento, los peces utilizarán toda la energía para sus actividades diarias e incluso podrán perder peso (donde el IC tenderá a infinito si no hay crecimiento). Si aumentamos la ración, los peces mejorarán su crecimiento así como el IC. En el punto de máximo crecimiento, que es el obtenido con ración máxima, cualquier alimento proporcionado en exceso será un problema económico y ambiental, sin beneficios para la producción. Por esa razón, tenemos que ajustar la ración de alimento al crecimiento de los peces hasta un punto cercano a la ración máxima, pero teniendo cuidado de no pasar de ese punto.

Como ya se ha mencionado, el control de los procesos biológicos que intervienen en la acuicultura requiere una supervisión para anticiparse a los posibles problemas. Es importante poder solucionar los problemas con la mayor antelación posible, lo que implica detectar síntomas muy leves al principio. Todo ello contribuirá a reducir los costos de producción y a mejorar la eficiencia. Por consiguiente, el sector de la acuicultura comprende que necesita capacitar adecuada y continuamente al personal, especialmente a los encargados de la alimentación.

Incluso en los sistemas de acuicultura modernizados como el RAS, que están cada vez más informatizados y automatizados, el personal tiene que ser consciente de los sofisticados procesos biológicos que se producen en la unidad. Los avances tecnológicos van en aumento, pero deben ir acompañados de una capacitación adecuada en la utilización de las técnicas disponibles para mejorar la producción a todos los niveles. Esos conceptos son la base del éxito. De hecho, la capacitación continua del personal que participa en la alimentación es un instrumento muy importante en las operaciones acuícolas. El supervisor de la alimentación determina, en gran medida, la rentabilidad de la granja, ya que proporciona la energía para que los peces crezcan. Cualquier cambio en los hábitos de alimentación, por pequeño que sea, puede ser un síntoma de problemas en el sistema que, si no se corrigen, pueden convertirse en graves problemas sanitarios.

4.7 Alimentadores automáticos

La automatización de la alimentación requiere el conocimiento de los hábitos alimenticios de la especie en cuestión. También necesitamos conocer detalles técnicos, como el número de peces en cada tanque y sus tamaños. La alimentación manual tiene ventajas, como se mencionó anteriormente, y todavía se utiliza para "mantenerse en contacto" con los peces. Sin embargo, los desarrollos tecnológicos pueden facilitar esta labor. Hoy en día hay muchos tipos de alimentadores automáticos, especialmente para proyectos a gran escala con una gran biomasa. Aquí nos centramos en los diferentes tipos de alimentadores automáticos utilizados en RAS.

Normalmente el alimento que se distribuye es seco y peletizado (granulado), y se coloca directamente en el tanque donde puede flotar durante un tiempo, pero con el tiempo tenderá a hundirse hasta el fondo. La mayoría de los peces comen el alimento en la superficie o en su camino hacia abajo de la columna de agua, antes de que llegue al suelo del tanque. Muchas especies utilizadas en la acuicultura son depredadores en el hábitat natural y muestran un comportamiento agresivo al comer, lo que puede dar lugar a problemas. La mayoría de los alimentadores automáticos modernos tienen en

cuenta este hecho, ya que una mala alimentación con alimentadores inadecuados puede dar lugar a poblaciones con individuos dominantes que comen en exceso, mientras que los individuos más sumisos se quedan sin comer. La consecuencia inmediata es una mayor variedad de tamaños en el tanque (más diversidad intraespecífica en el peso vivo), lo que hace necesario clasificarlo más a menudo, a fin de romper la jerarquía social y aumentar la eficiencia de la alimentación. Los alimentadores automáticos pueden dividirse en dos grandes grupos, relacionados con la biomasa de los peces y la cantidad de alimento que debe distribuirse:

1. Alimentadores para juveniles: distribuyen pequeñas raciones con una alta frecuencia (5-10 veces al día). El pellet es muy pequeño y el alimento puede almacenarse directamente en el alimentador y rellenarse a mano.
2. Comederos para el engorde: distribuyen grandes cantidades de alimento con una frecuencia relativamente baja (1-3 veces al día). Los pellets son grandes y los comederos se rellenan a mano o automáticamente.

El coste de alimentar a los peces manualmente es bastante alto, tanto en términos de las toneladas de alimento necesarias como de la dedicación de tiempo necesaria para distribuirlo. En los siguientes sitios web de empresas se ofrecen detalles de los diseños de los comederos disponibles para las diferentes especies y granjas acuícolas (www.acuitec.es; www.akvagroup.com; www.aquacultur.de). Las partes básicas de los alimentadores en crecimiento son:

1. Almacenamiento o depósitos para diferentes tipos de pellets o gránulos que se distribuyen en grandes bolsas (Big bags) o directamente entregados por camión a los silos de alimentación.
2. Distribución de los piensos del depósito al lugar de distribución en el tanque. La tubería va desde el lugar de almacenamiento hasta el alimentador automático, que a su vez tiene un pequeño depósito. En esta etapa los pellets se mueven mediante sistemas mecánicos o compresores e inyección de aire. Este equipo es bastante especializado para asegurar un suministro correcto y una higiene adecuada. Ejemplos del grado de sofisticación de los sistemas de alimentación utilizados en la acuicultura intensiva pueden encontrarse en el grupo [AKVA](http://www.akva.com). Algunas empresas también utilizan robots de alimentación para los alevines en el RAS, que es una forma automatizada de llenar los depósitos cercanos al tanque. Los robots se mueven por todo el edificio utilizando guías o rieles que cuelgan del techo (véase por ejemplo [Crystalvision](http://www.crystalvision.com)).
3. Distribuidor final en la unidad productiva
Esta es la parte final del sistema de alimentación automática. Aquí el alimento, de acuerdo a las últimas tecnologías en salmónidos, tiene que ser esparcido en la superficie del tanque todo al mismo tiempo, permitiendo así que todos los peces se alimenten simultáneamente, evitando la competición entre ellos, lo que es mejor que colocar los pellets en un pequeño lugar, que promueve la dispersión de tallas. Así pues, el lugar de distribución es importante para mantener la población del tanque más o menos de tamaños homogéneos.
4. Vigilancia del alimento realmente consumido
Los recientes avances tecnológicos permiten detectar cuando los peces dejan de comer, lo que envía una señal a los alimentadores automáticos para que dejen de proporcionarles

alimento. Estos sistemas funcionan con cámaras subacuáticas o detectores acústicos y láser, que permiten al alimentador saber cuándo el apetito de los peces está disminuyendo.

4.8 Plan de producción y seguimiento de la evolución de la granja

Todas las granjas acuapónicas necesitan objetivos de producción bien definidos y un plan de producción adecuado para cumplir esos objetivos. Específicamente, es útil definir los siguientes aspectos con mucha antelación:

1. Las especies a utilizar
2. El tamaño de los alevines necesarios inicialmente y el tamaño objetivo de los adultos que se venderán al final. Esto ayudará a definir los ciclos productivos de la granja (tipos de tanques, etc.)
3. Las densidades y condiciones de alojamiento óptimas y máximas para cada etapa de crecimiento. Esto ayudará a definir la carga máxima de biomasa viva en la instalación, y la producción anual
4. La gestión sanitaria que se utilizará para mantener las condiciones óptimas para los peces
5. El nivel de capacitación del personal involucrado

El bienestar de los peces y la viabilidad económica de la instalación dependerán del cumplimiento de los objetivos que se presupuesten en el proyecto. Es necesario saber si los peces están alcanzando el crecimiento esperado y transformando el alimento adecuadamente, y si la mortalidad es mayor de lo esperado, que se comprobará en los muestreos mensuales. Debemos conocer la curva de crecimiento esperado en relación con la temperatura del agua. Conociendo los datos de temperatura previstos, podremos conocer con antelación la duración del ciclo, y con estos datos podremos diseñar un plan de producción que será la base de los costos de operación. Una vez que la producción ha comenzado, debe ser monitorizada con continuidad con los muestreos adecuados.

Debe haber una clara trazabilidad que permita conocer el historial del pescado producido. Necesitamos saber desde el inicio del ciclo, el día de comienzo de la estabulación, el número de peces y su tamaño inicial. Diariamente registramos cada una de las actividades de producción que se van llevando a cabo, como la tasa diaria de alimento, el modo de limpieza y las medidas de los parámetros físicos y químicos del agua. En la Figura 3 presentamos un ejemplo de una hoja de control. Estos datos se recogen diariamente para cada uno de los tanques y deben ser almacenados en el informe mensual y procesados para poder determinar la evolución de la producción acuícola. Periódicamente debemos pesar una muestra representativa de peces para ir estimando el crecimiento en cada tanque. Debemos capturar suficientes peces para que representen la población del tanque, normalmente al menos 10-15 individuos por cada 100 peces. La alimentación se ajusta entonces periódicamente de acuerdo con ese peso promedio de los peces, que nos permitirá estimar la biomasa viva del estanque.

Daily Control Sheet per Tank									
Tank number:				Treatment:					
Number of fish:				Average weight:				Density:	
Source tank:				Destination tank:					
Day	Temperature (°C)	Oxygen (mg/l)	Flow inlet (l/s)	Cleaning (partial/complete)	Mortality (number dead)	Feed (g)	Treatments (medical)	Marks	Observations (treatments, movements, incidents)
1									
2									
3									
.									
.									
28									
29									
30									
31									

Figura 3: Hoja de datos para anotar los detalles sobre los tanques y los peces diariamente

Hay muchos programas de control de software en el mercado, como los de la empresa noruega [AKVA GROUP](#), que se utilizan para gestionar los piensos. Ellos proveen dos programas. *Fishtalk* cubre la mayoría de los aspectos de control y planificación en la granja, así como los costos de producción. Los informes generados y el análisis de la evolución de la producción son la base de las decisiones que debe tomar el gerente, tanto a corto como a largo plazo. *AKVAconnect* está relacionado con el software de plataforma proporcionado por AKVA GROUP y controla la automatización y los ajustes óptimos de los procesos y actividades en la granja. Ofrece un control completo, con vigilancia permanente de la interacción entre máquinas, sensores y otros procesos.

Otro ejemplo de la información producida y procesada durante la producción de peces es [STEINSVIK](#) para la producción de salmón. En la Figura 4 podemos ver una pantalla de control de la unidad de producción, con las condiciones físicas y de crecimiento, el apetito de los peces, el inventario de los peces, el ritmo diario de alimentación, etc. Para otros ejemplos, véase www.aqua-manager.com.

Por último, como parte del plan de producción, es importante mantener los alimentos bajo un almacenamiento adecuado. Por lo general, los alimentos se presentan en forma de gránulos secos hechos por extrusión y, por lo tanto, son relativamente fáciles de almacenar. La calidad de los pellets es alta y son bastante compactos, con pérdidas limitadas de gránulos disueltos en el agua ya que no se descomponen fácilmente. Para mantener la calidad de los alimentos secos es importante almacenarlos en silos o en una zona de almacenamiento seco que esté aislado y protegido del exceso de calor. Si el alimento se humedece puede contaminarse con hongos, que a su vez producen micotoxinas que pueden dañar a los peces.



Figura 4: Pantalla de control del programa automático de Steinsvik para granjas acuícolas.

4.9 Diseñar piensos para la acuaponía

Los piensos para peces usados en la acuicultura pueden ser caseros o comprados a empresas de piensos especializadas que formulan dietas específicas en función de la especie y la edad de los peces. Normalmente los productores comerciales utilizan piensos especializados, ya que se garantiza que satisfacen todas las necesidades nutricionales de los peces, y tienden a ser más previsibles y rentables en comparación con la fabricación y formulación de piensos propios. Sin embargo, los piensos formulados no siempre son perfectos y pueden tener efectos que varían con la calidad del agua donde viven los peces y ello puede producir distintos desechos provenientes de su metabolismo. Sólo recientemente los científicos e ingenieros han comenzado a estudiar dietas específicas para peces en sistemas de recirculación y en unidades acuapónicas. Teóricamente parece posible proporcionar a los peces alimento en gránulos, lo que les ayudará a crecer rápidamente, y a la vez proporcionar suficientes nutrientes para las plantas que más tarde se "alimentarán" de esta agua. En la práctica, sin embargo, las cosas son más difíciles, y dependen de muchos parámetros complejos como la temperatura y el pH del agua reciclada, así como la microbiota en los intestinos de los peces y en los biofiltros. Un profesional de la acuicultura debería conocer los fundamentos de la composición de los alimentos para tener alguna forma de juzgar con qué alimento sería mejor empezar. Aunque tal vez no sea necesario diseñar los alimentos desde el principio, los estudiantes deberían poder elegir el mejor alimento para este sistema después de leer las siguientes secciones.

Crecimiento de los peces y retención de nitrógeno

El nitrógeno que eventualmente será eliminado como amoníaco por los peces proviene de la proteína del alimento. Aunque hay algo de nitrógeno en otros componentes del alimento, casi todo el nitrógeno absorbido por los peces y eliminado como desecho proviene de los aminoácidos ya que, como su nombre lo indica, todos ellos contienen nitrógeno en la composición química.

Si conocemos el porcentaje de nitrógeno en el alimento, podemos calcular la cantidad aproximada que será excretada como amoníaco en el agua por un proceso similar al de la micción. Ese amoníaco se convertirá más tarde en nitrato que será suministrado a las plantas. Cabe señalar aquí, sin embargo,

que los peces no orinan realmente pero, a diferencia de la mayoría de los mamíferos, eliminan los desechos nitrogenados a través de sus branquias (similares a nuestros pulmones). En las secciones siguientes seguiremos la fuente y el destino del nitrógeno en un sistema acuapónico, basándonos en [Seawright et al. \(1998\)](#), que fueron uno de los primeros grupos en publicar estudios sobre el ciclo de los nutrientes en los sistemas acuapónicos, hace varios decenios. En su trabajo proporcionan una ecuación para calcular el balance de nitrógeno en el sistema, que utilizaremos como guía. Después de calcular el nitrógeno presente en el alimento, calculamos cuánto se retiene en los peces, cuánto se pierde como alimento no comido y cuánto se pierde en las heces, para terminar con la concentración de amoníaco en el agua circundante.

Fuente de nitrógeno

La alimentación es la principal fuente de nitrógeno en nuestro sistema acuapónico. Para calcular la cantidad total de nitrógeno que se coloca en el tanque a través de la alimentación, primero necesitamos saber la cantidad exacta de alimentación utilizada, en gramos o kilogramos. Luego necesitamos saber el porcentaje de proteína en el alimento. Esto normalmente se muestra en la etiqueta del alimento o está disponible por el productor del mismo. Como se mencionó en las secciones anteriores, los alimentos para peces tienen altas proporciones de proteína, normalmente entre el 25% y el 50%. Una vez que conocemos el porcentaje de proteína podemos calcular el porcentaje de nitrógeno dividiéndolo por 6,25. Utilizamos ese número ya que los nutricionistas asumen que $1/6,25$ o aproximadamente el 16% de toda la proteína disponible es nitrógeno. Por lo tanto, para un alimento para tilapia con 35% de proteína sabemos que tiene $35\% * 16\% = 5,6\%$ de nitrógeno. Si añadimos, por ejemplo, 120 gramos de alimento al tanque en un día, estamos añadiendo $120 * 5,6\% = 6,72$ g de nitrógeno.

Absorción de nitrógeno por el pez

El pez absorberá el nitrógeno en sus depósitos de proteínas, que son principalmente su músculo. Sin embargo, la mayor parte del peso corporal de los peces es agua, por lo que hay que descartar ese peso, ya que el nitrógeno sólo está presente en lo que se puede llamar el "peso seco del músculo". En general, y en base a los resultados de nuestro laboratorio y a los hallazgos de la literatura (por ejemplo, [Seawright et al. 1998](#)), el peso seco de la tilapia es alrededor del 27% de su peso corporal o, dicho de otro modo, el 73% del músculo de la tilapia es agua.

A continuación necesitamos saber la tasa de conversión alimenticia o índice de conversión (IC). El IC es la relación entre el alimento suministrado dividido por el peso ganado. El inverso de la IC se llama la eficiencia alimentaria, o la ganancia de peso dividida por el alimento ingerido. El IC es típicamente alrededor de 1-2 en los peces. La eficiencia de la alimentación, por otra parte, puede verse como el IC dividida por 1. Es decir, para un índice de conversión de 1,5, la eficiencia de la alimentación es $1/1,5 = 66,73\%$. En otras palabras, alrededor de dos tercios del alimento que consumen los peces será absorbido por el músculo de los peces y contado como crecimiento.

Por supuesto que sería mejor tener una alta eficiencia alimenticia (cercana al 100%); cuanto más alta sea, más ventajoso es económicamente. Sin embargo, los peces tienen un límite máximo para la cantidad de músculo que pueden acumular con el tiempo. A medida que el músculo crece, la cantidad de proteína crecerá (así como la cantidad de nitrógeno total en el músculo), pero la proporción de proteína en el músculo se mantendrá más o menos estable. El porcentaje total de nitrógeno con

respecto al peso corporal es de alrededor del 8,8% en la tilapia. Esto puede variar entre las especies, pero es un buen número aproximado.

Así que, dependiendo del alimento proporcionado, podemos estimar cuánto nitrógeno será retenido en los peces. Si proporcionamos 120 g de alimento utilizando los valores sugeridos anteriormente, entonces el nitrógeno retenido en los peces se encontrará multiplicando el alimento por el peso seco, por la eficiencia del alimento y por el porcentaje de nitrógeno en el músculo de los peces, es decir, $120\text{g} * 27\% * 66,73\% * 8,8\% = 1,90$ gramos de nitrógeno del alimento permanecerán en los peces.

Pérdidas de nitrógeno en los sólidos

Además de perderse en forma de orina, los residuos de nitrógeno pueden perderse a través de las heces. Podemos medir el contenido de proteína o nitrógeno de las heces ya que se acumulan en el filtro de sólidos de nuestro sistema, o podemos extraerlas diariamente y almacenarlas. Los desechos sólidos también pueden contener alimento que no fue ingerido pero, como se mencionó anteriormente, es difícil medir exactamente cuánto alimento no fue consumido por los peces, por lo que agrupamos las heces y el alimento no consumido como desechos sólidos. Antes del análisis, los desechos sólidos se secan para calcular el peso seco, y luego se mide el contenido de nitrógeno. En un sistema RAS la cantidad total de sólidos es de alrededor del 10%, es decir, el 10% del alimento proporcionado a los peces termina como residuo sólido (incluyendo las heces y los pellets de los peces que no se ingieren). Basado en resultados en nuestro laboratorio, encontramos que el contenido de nitrógeno de las heces en el caso de varios sistemas RAS con tilapia era del 4,8%.

Como explicamos anteriormente, la proteína es 16% de nitrógeno, o eso es lo que los nutricionistas estiman. Por lo tanto, si sólo tenemos una medida de nitrógeno, para obtener la cantidad de proteína de la que provino originalmente necesitamos "retro-calcular" dividiendo la cantidad de nitrógeno por 16%, que es lo mismo que multiplicarlo por 6,25% ($1/16 = 0,0625$ o 6,25%). Así que en el caso de que el contenido de nitrógeno de las heces fuera del 4,8%, la cantidad de proteína sería del $4,8\% * 6,25\% = 30\%$.

Finalmente, para calcular los gramos totales de nitrógeno perdidos en sólidos por la cantidad de alimento que proporcionamos al tanque, necesitamos multiplicar la cantidad de alimento (120 g) por el porcentaje de alimento que se pierde en sólidos (heces y alimento no comido), y el porcentaje de nitrógeno en los sólidos (4,8%). Digamos que el porcentaje de alimento perdido en sólidos es del 10%, el nitrógeno perdido en sólidos en ese caso sería: $120\text{g} * 10\% * 4,8\% = 0,576$ g de nitrógeno en el alimento se pierde en forma de sólidos. De nuevo, esto es sólo un ejemplo, y ese porcentaje puede variar dependiendo del sistema y otras condiciones.

El nitrógeno disuelto en el agua en forma de amoníaco

A continuación podemos utilizar los cálculos anteriores para cuantificar el nitrógeno disuelto en el agua, que se pierde esencialmente como residuo de amoníaco. Primero añadimos el nitrógeno absorbido por los peces y perdido en las heces, y luego lo restamos del nitrógeno aplicado a través de la alimentación. El nitrógeno restante es la cantidad perdida o disuelta en el agua. En el caso anterior, $6,72 - (1,90 + 0,576) = 4,24$ g de NH_3 . Es decir, el 63,1% ($4,24/6,72$) del nitrógeno de la alimentación se convierte en NH_3 . Es excretado por la branquia como NH_3 pero, dependiendo del pH del agua, se convierte en NH_4 . El término TAN denota el nitrógeno amoniacal total, o la combinación de $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$. En la Figura 6 proporcionamos un ejemplo de los resultados de nuestro laboratorio donde el nitrógeno total fue calculado en el alimento, y luego medido en los peces, las heces y el agua.

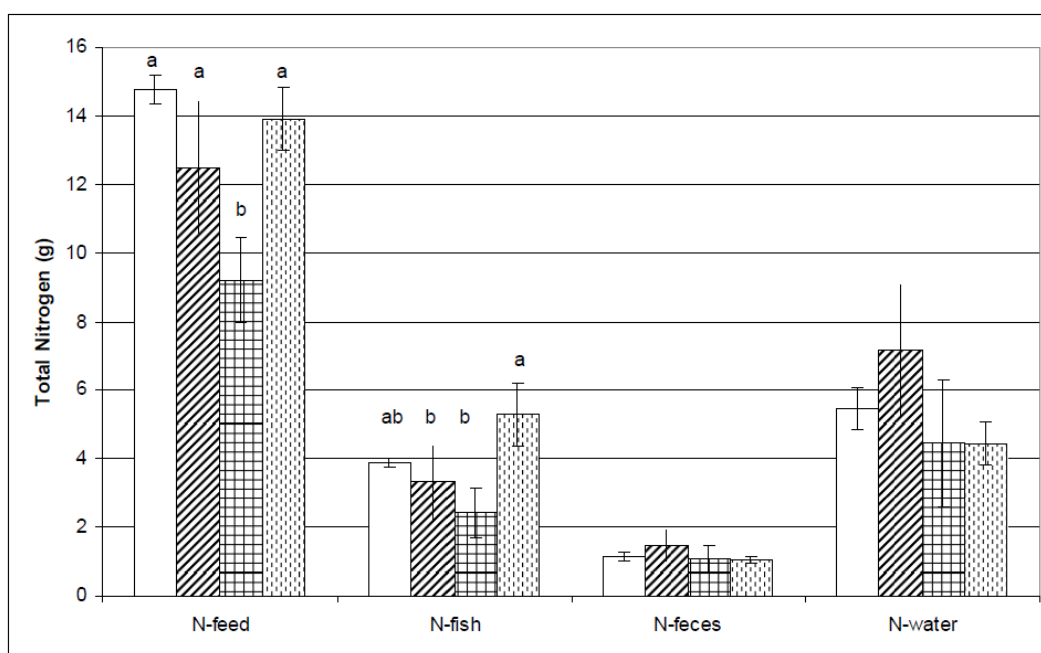


Figura 5: Ejemplo de un análisis del ciclo de nitrógeno en la tilapia utilizando cuatro alimentos diferentes basados en diferentes fuentes de proteína (harina de pescado, soja, gluten de maíz y concentrado de guisantes).

4.10 Referencias

- Bhilave, M.P., Nadaf, S.B. y Deshpande, Y.V. 2014. [Proximate analysis of formulated feed](#). Originally published in 2010 in *All About Feed* 1(9).
- FAO 2018. Aquaculture Feed and Fertilizer Resources Information System. [Rainbow trout](#). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fitzimmons, K. 2018. [Introduction to tilapia nutrition](#). University of Arizona.
- Harper, C. y Wolf, J.C. 2009. [Morphologic effects of the stress response in fish](#). *ILAR* 50 (4), 387-396.
- Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., y Corraze, G. 2018. [Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout \(*Oncorhynchus mykiss*\): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression](#). *PloS One*, 13(1), e0190730.
- Oliva-Teles, A. 2012. [Nutrition and health of aquaculture fish](#). *Journal of Fish Diseases* 35 (2), 83-108.
- Polanco, J. F. y Bjørndal, T. 2018. Paper 2 [Aquaculture diversification in Europe: the kingdom of Spain and the kingdom of Norway](#). In *Planning for aquaculture diversification: the importance of climate change and other drivers: FAO Technical Workshop 23–25 June 2016, Rome Italy* (p. 37). Food y Agriculture Org.
- Seawright, D.E., Stickney, R.R. y Walker, R.B. 1998. [Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems](#). *Aquaculture* 160, 215-237.
- Tran-Ngoc, K. T., Dinh, N. T., Nguyen, T. H., Roem, A. J., Schrama, J. W., y Verreth, J. A. 2016. [Interaction between dissolved oxygen concentration and diet composition on growth, digestibility and intestinal health of Nile tilapia \(*Oreochromis niloticus*\)](#). *Aquaculture* 462, 101-108.

5. EQUILIBRIO DE AGUA Y NUTRIENTES

5.1 Macro- y micronutrientes

5.1.1 Los elementos del universo

Hay 92 elementos naturales en la Tierra. Algunos están muy bien estudiados, otros no: por ejemplo el ástato ([Bryson 2003](#)). El problema es que algunos elementos son muy raros. Por ejemplo, hay solamente 24,5 g del elemento francio en la corteza de la Tierra en cada momento dado. Sólo unos 30 de los elementos que se dan de forma natural están extendidos en la Tierra, y muy pocos son importantes para la vida (Figura 1). En el sistema solar, en las estrellas en general, y probablemente en el universo en su conjunto, los elementos más abundantes son los más livianos: más del 75% de hidrógeno (H), 25% de helio (He), y alrededor del 1% de todos lo demás. En la categoría de "todos lo demás" los elementos numerados pares son más abundantes que los elementos impares. La abundancia tiende a caer rápidamente con el aumento del número atómico. Sin embargo, el carbono (C), el oxígeno (O), el magnesio (Mg), el silicio (Si) y el hierro (Fe) son anormalmente altos en relación con estas tendencias generales, mientras que el litio (Li), el berilio (Be) y el boro (B) son anormalmente bajos. En la corteza terrestre el orden de abundancia es O (< 50%), Si (> 20%), Al, Fe, Mg, Ca, Na, y K. Estos son todos los tipos de elementos de los que están hechas las rocas. En la Tierra en su conjunto, debido al núcleo y al manto, Fe, Ni, y Mg, se vuelven más comunes, mientras que O, Si, Al siguen siendo los principales constituyentes generales (Tabla 1). En lo que respecta a la vida, los elementos tienen diferentes funciones (Tabla 2). Hemos evolucionado para utilizar o tolerar los elementos, pero vivimos dentro de estrechos márgenes de aceptación. Por regla general, nuestra tolerancia a los elementos es directamente proporcional a su abundancia en la corteza terrestre ([Bryson 2003](#)).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xa
Cs	Ba	Ln	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

<div></div>	Bulk biological elements	<div></div>	Trace elements believed to be essential for bacteria, plants and/or animals	<div></div>	Possibly essential trace elements for some species
-------------	--------------------------	-------------	---	-------------	--

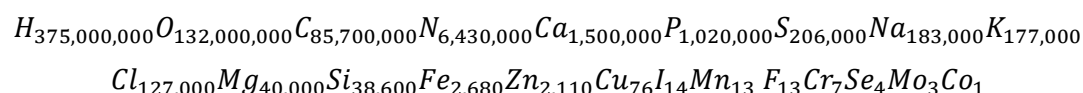
Figura 1: La distribución de los elementos que ocurren naturalmente y que se sabe o se cree que son esenciales para la vida en la tabla periódica. La comprensión de la importancia ecológica de C, N y P es mucho más avanzada que la de los otros elementos (basado sobre [Da Silva y Williams 2001](#))

Tabla 1: La abundancia de los elementos en % de peso seco de la corteza terrestre, algas verdes y animales (datos de diferentes fuentes) en comparación con la lechuga cultivada en un sistema hidropónico, y el alimento para peces (Schmautz, datos no publicados). Obsérvese que la frecuencia (y con ella la disponibilidad) de los elementos de la corteza terrestre no coincide con la frecuencia en los seres vivos.

Element	Symbol	Earth crust (%)	Diatoms (green algae)	Animals	Lettuce	Fish feed
Oxygen	O	47.4	44.4	18.6	59.9	69.2
Carbon	C	0.048	22.5	48.4	33.1	46
Hydrogen	H	0.15	4.6	8.7	4.9	6.8
Nitrogen	N	0.0025	3.8	8.7	4.7	7.6
Calcium	Ca	4.1	0.8	8.5	2.8	2.3
Phosphorous	P	0.1	0.425	4.3	1.2	1.3
Sulphur	S	0.026	0.6	0.54	0.6	0.8
Potassium	K	2.1	2	0.75	9.1	1.3
Sodium	Na	2.3	0.6	0.73	0.9	1.4
Magnesium	Mg	2.3	0.32	0.1	1.0	0.27
Silicium	Si	27.7	20	0.012	0.43	0.1
Aluminium	Al	8.2	0.1	0.0003	0.16	0.02
Iron	Fe	4.1	0.35	0.016	0.13	0.03

5.1.2 Macro- y micro-nutrientes y sus funciones en los organismos

Los elementos químicos tienen diferentes papeles y participan principalmente en diferentes funciones en un organismo (Tabla 2). Los organismos no requieren de todos estos elementos en las mismas cantidades. Algunos elementos se requieren en grandes cantidades, mientras que otros se requieren en cantidades mínimas. Esto queda bien ilustrado por esta fórmula estequiométrica provisional para un ser humano vivo ([Sterner y Elser 2002](#)):



Esto significa que por cada átomo de cobalto (Co) en nuestro cuerpo, hay 132 millones de átomos de oxígeno (O). Las principales necesidades nutricionales de las plantas y los animales, sin las cuales no pueden completar un ciclo de vida normal, se esbozan en la Figura 2. Los macronutrientes se requieren en mayores cantidades. Los micronutrientes se requieren en cantidades mínimas.

Tabla 2: Funciones primarias y los elementos químicos (o iones asociados) que intervienen en su realización para los organismos (modificado de [Sternner y Elser 2002](#)). Los elementos con una función relativamente menor se indican entre paréntesis.

Función	Elementos	Forma química	Ejemplos
Estructurales (polímeros biológicos y materiales de apoyo)	H, O, C, N, P, S, Si, B, F, Ca, (Mg), (Zn)	Involucrados en compuestos químicos o compuestos inorgánicos escasamente solubles	<ul style="list-style-type: none"> moléculas biológicas (proteínas, ADN, grasas, carbohidratos) tejidos (músculo, pulmón, hojas...) esqueletos; conchas; dientes tejidos de soporte de las plantas (lignina, celulosa)
Electroquímica	H, Na, K, Cl, HPO_4^{2-} , (Mg), (Ca)	Iones libres	<ul style="list-style-type: none"> transmisión de mensajes de iones libres en los nervios señalización celular metabolismo de la energía
Mecánica	Ca, HPO_4^{2-} , (Mg)	Iones libres intercambiando con iones ligados	<ul style="list-style-type: none"> contracción muscular
Catalítica (ácido-base)	Zn, (Ni), (Fe), (Mn)	Complejo con enzimas	<ul style="list-style-type: none"> Digestión (Zn). El zinc oxida el alcohol. Hidrólisis de urea (Ni) Eliminación de PO_4 en medios ácidos (Fe, Mn)
Catalítica (redox)	Fe, Cu, Mn, Mo, Se, (Co), (Ni), (V)		<ul style="list-style-type: none"> Reacciones con O_2 (Fe, Cu) Fijación de nitrógeno (Mo) Reducción de nucleótidos (Co) Co es necesario para la creación de vitamina B₁₂

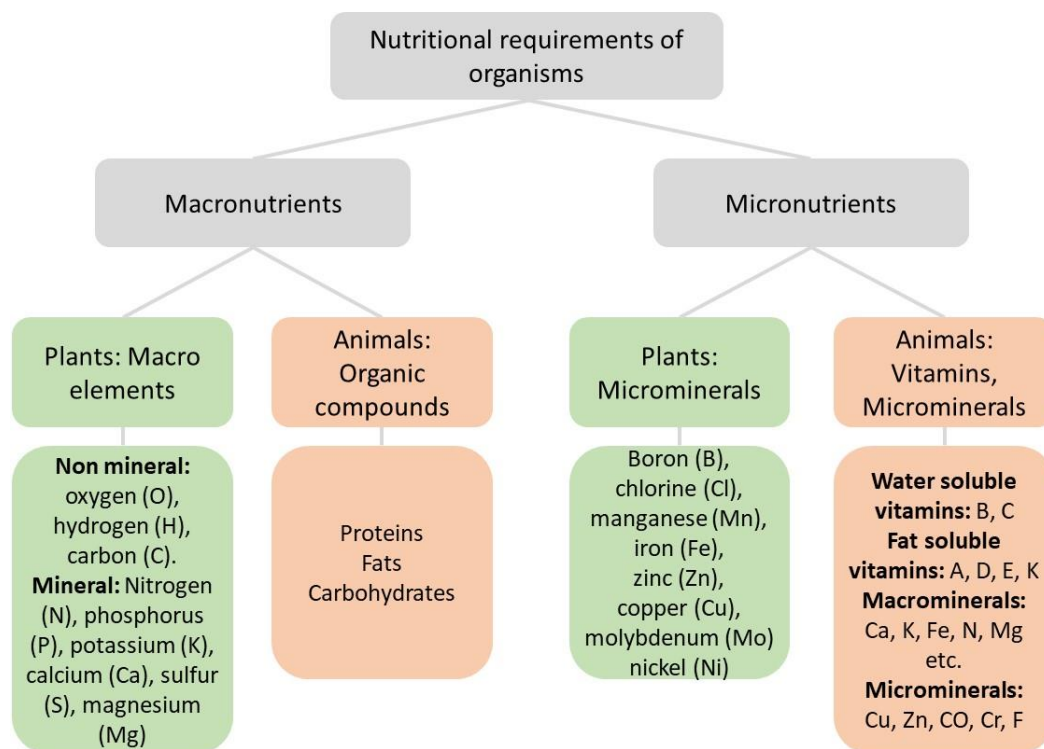


Figura 2: Necesidades nutricionales de plantas y animales. Tenga en cuenta que el agua (necesaria para todos los seres vivos) no está incluida en la tabla. Los animales obtienen sus nutrientes de la comida y la bebida. Las plantas, a excepción de las parasitarias y carnívoras, absorben los elementos nutritivos esenciales de su entorno (aire, solución del suelo, solución de nutrientes)

5.2 Los ciclos biogeoquímicos de los principales nutrientes en la acuaponía

5.2.1 El ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para todos los organismos vivos y es el principal nutriente de interés en la acuicultura. Se encuentra en los aminoácidos (partes de las proteínas), en los ácidos nucleicos (ADN y ARN), y en la molécula de transferencia de energía adenosina trifosfato ([Pratt y Cornely 2014](#)). Como el nitrógeno se produce en muchas formas químicas, el ciclo del nitrógeno es muy complejo (Figura 3).

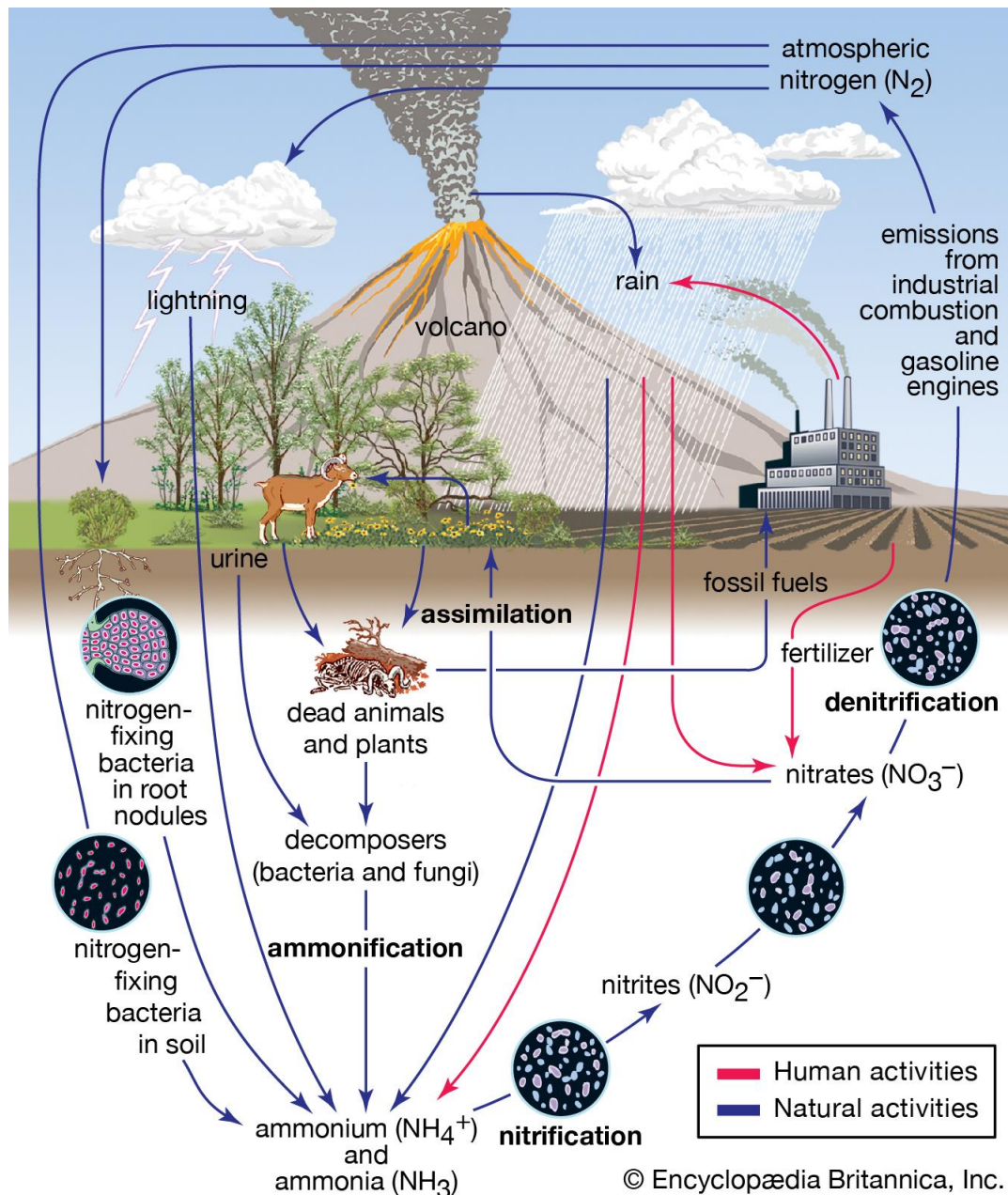


Figura 3: La forma general del ciclo del nitrógeno ([Encyclopædia Britannica](#))

La mayor parte de la atmósfera de la Tierra (78%) es gas nitrógeno atmosférico, que es di-nitrógeno molecular (N_2). El gas de nitrógeno es muy poco reactivo y no sirve para la mayoría de los organismos. La fijación de nitrógeno son todos los procesos que convierten el gas de nitrógeno atmosférico en compuestos que pueden denominarse nitrógeno reactivo (Nr). El Nr incluye todos los compuestos de N biológicamente activos, fotoquímicamente reactivos y radioactivamente activos en la atmósfera y la biosfera. Incluye formas inorgánicas reducidas de N (por ejemplo, NH_3 y NH_4^+), formas inorgánicas oxidadas (por ejemplo, NO_x , HNO_3 , N_2O y NO_3^-) y compuestos orgánicos (por ejemplo, urea, aminas y proteínas; [Galloway et al. 2008](#)).

La fijación del nitrógeno puede ocurrir naturalmente por medio de los rayos, ya que el aire muy caliente rompe los enlaces de N_2 , iniciando la formación de ácido nitroso. Puede realizarse

químicamente en una reacción llamada proceso de Haber-Bosch. La fijación biológica del nitrógeno ocurre cuando el N_2 se convierte en amoníaco por una enzima llamada nitrogenasa. Los microorganismos que fijan el N_2 son en su mayoría anaeróbicos. La mayoría de las legumbres (alubias, guisantes, etc.) tienen nódulos en sus sistemas de raíces que contienen bacterias simbióticas llamadas rizobios que ayudan a la planta a crecer y a competir con otras plantas. Cuando la planta muere, el nitrógeno fijo es liberado, haciéndolo disponible para otras plantas.

La Figura 4 muestra el ciclo del nitrógeno tal como ocurre en la acuaponía. En la acuaponía, dos partes de la cadena alimentaria (productores primarios y consumidores) que suelen ocurrir juntas están separadas espacialmente en los compartimentos de la acuicultura y la hidroponía. Los efectos sinérgicos que permiten una utilización eficiente de los nutrientes están mediados por microorganismos.

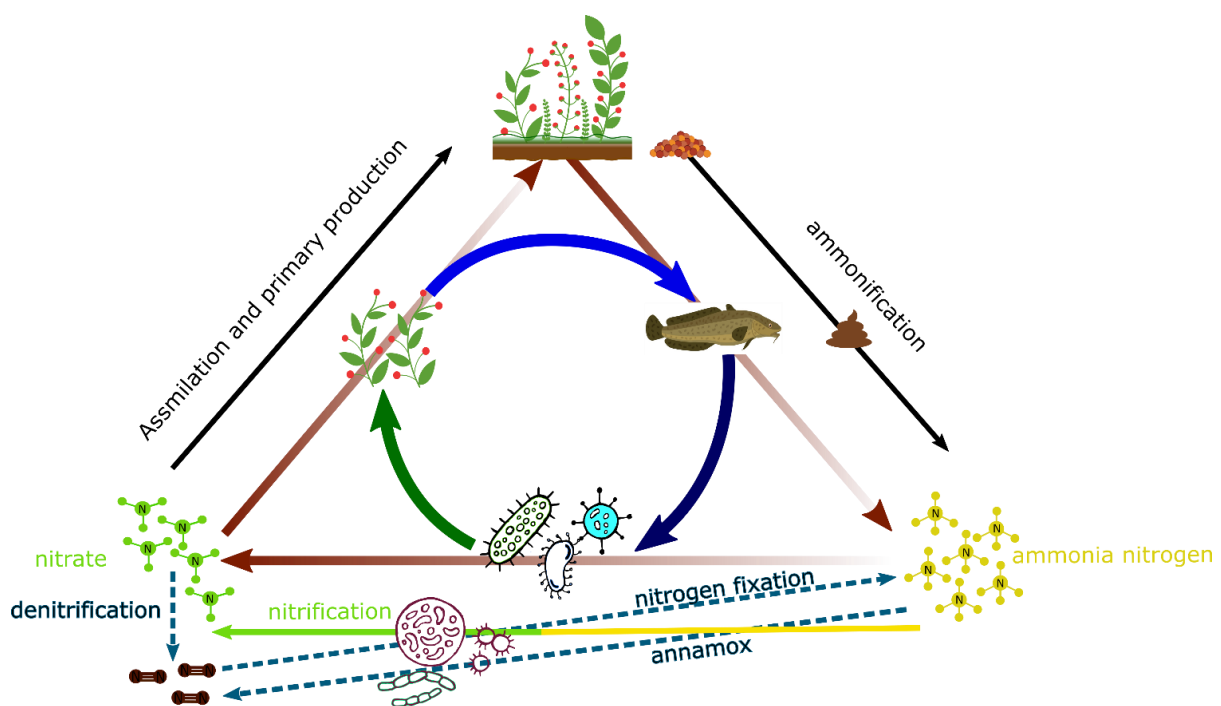


Figura 4: El ciclo de nitrógeno en acuaponía.

El nitrógeno entra en el sistema acuapónico a través de la alimentación de los peces, que es ingerido por éstos y posteriormente excretado como nitrógeno amoniacal total (TAN, amoníaco - NH_3 y amonio - NH_4^+) (Wongkiew *et al.* 2017). El nitrógeno se convierte en amonio (NH_4^+) en condiciones de pH ácido o neutro, o en amoníaco (NH_3) a niveles de pH más altos. La concentración de amoníaco depende del contenido de amonio, del pH y de la temperatura (Figura 5, Tabla 3). El amoníaco es menos soluble en agua que el NH_4^+ ; por lo tanto, el N se convierte rápidamente en una forma gaseosa y se emite desde el agua (Gay y Knowlton 2009).

Mientras que el amonio (NH_4^+) no es tóxico, el amoníaco (NH_3) sí lo es. Por lo tanto, el TAN debe ser eliminado del agua del sistema e idealmente convertido en nitrato por dos razones: i) el amoníaco y el nitrito, un producto secundario de la nitrificación, son ambos perjudiciales para los peces, mientras que el nitrato es tolerado por los peces hasta 150-300 mg/L (Graber y Junge 2009); ii) el NST no es

óptimo para las plantas, que requieren predominantemente nitratos o una mezcla de amonio y nitrato para su crecimiento ([Hu et al. 2015](#)). Este proceso de oxidación biológica del amoníaco o del amonio a nitrito seguido de la oxidación del nitrito a nitrato se denomina nitrificación y tiene lugar principalmente en el biofiltro de los sistemas acuapónicos (Tabla 4). La nitrificación es un proceso aeróbico realizado por pequeños grupos de bacterias y archaeas autótrofas y fue descubierto por el microbiólogo ruso [Sergei Winogradsky \(1892\)](#).

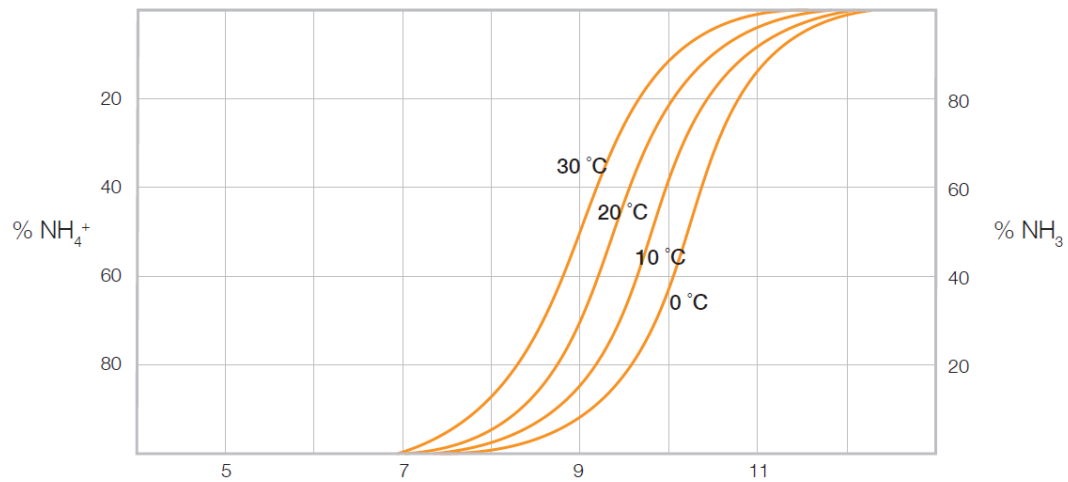


Figura 5: El equilibrio de amoníaco-amonio en función de diferentes temperaturas y pH (de [Cofie et al., 2016](#)).

Tabla 3: Porcentaje (%) de amoníaco no ionizado en solución acuosa a diferentes valores de pH y temperaturas. Para calcular la cantidad de amoníaco no ionizado presente, la concentración de nitrógeno amoniacal total (TAN) debe multiplicarse por el factor apropiado seleccionado de esta tabla utilizando el pH y la temperatura de su muestra de agua y dividirse por 100. Si la concentración resultante es superior a 0,05 mg/L, el amoníaco está dañando a los peces (adaptado de [Francis-Floyd et al. 2009](#)).

	pH																
T(°C)	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2
6	0.13	0.21	0.34	0.53	0.84	1.33	2.10	3.28	5.10	7.85	11.90	17.63	25.33	34.96	46.00	57.45	68.15
8	0.16	0.25	0.40	0.63	0.99	1.56	2.45	3.83	5.93	9.09	13.68	20.08	28.47	38.68	50.00	61.31	71.52
10	0.18	0.29	0.46	0.73	1.16	1.82	2.86	4.45	6.88	10.48	15.65	22.73	31.80	42.49	53.94	64.98	74.63
12	0.22	0.34	0.54	0.86	1.35	2.12	3.32	5.17	7.95	12.04	17.82	25.58	35.26	46.33	57.78	68.44	77.46
14	0.25	0.40	0.63	1.00	1.57	2.47	3.85	5.97	9.14	13.76	20.18	28.61	38.84	50.16	61.47	71.66	80.03
16	0.29	0.46	0.73	1.16	1.82	2.86	4.45	6.88	10.48	15.66	22.73	31.80	42.49	53.94	64.99	74.63	82.34
18	0.34	0.54	0.85	1.34	2.11	3.30	5.14	7.90	11.97	17.73	25.46	35.12	46.18	57.62	68.31	77.35	84.41
20	0.39	0.62	0.98	1.55	2.44	3.81	5.90	9.04	13.61	19.98	28.39	38.55	49.85	61.17	71.40	79.83	86.25
22	0.46	0.72	1.14	1.79	2.81	4.38	6.76	10.31	15.41	22.41	31.40	42.04	53.48	64.56	74.28	82.07	87.88
24	0.52	0.83	1.31	2.06	3.22	5.02	7.72	11.71	17.37	25.00	34.56	45.57	57.02	67.77	76.92	84.08	89.33
26	0.60	0.96	1.50	2.36	3.70	5.74	8.80	13.26	19.50	27.74	37.83	49.09	60.45	70.78	79.33	85.88	90.60
28	0.69	1.10	1.73	2.71	4.23	6.54	9.98	14.95	21.78	30.68	41.16	52.58	63.73	73.58	81.53	87.49	91.73
30	0.80	1.26	1.98	3.10	4.82	7.43	11.29	16.78	24.22	33.62	44.53	55.99	66.85	76.17	83.51	88.92	92.71
32	0.93	1.50	2.36	3.69	5.72	8.77	13.22	19.48	27.68	37.76	49.02	60.38	70.72	79.29	85.85	90.58	93.89

Tabla 4: Ecuaciones químicas de la nitrificación. La nitrificación suele ser un proceso de dos pasos, realizado por un grupo especializado de bacterias, llamadas nitrificantes.

Ecuación	Bacteria involucrada
$NH_4^+ + 1.5 O_2 \rightarrow NO_2^- + 2 H^+ + H_2O + \text{energía}$	Nitrificación; bacteria que oxidan amonio (AOB)
$NO_2^- + 0.5 O_2 \rightarrow NO_3^- + \text{energía}$	Nitrificación; bacteria que oxidan nitrito (NOB)
$NH_4^+ + 2.0 O_2 \rightarrow NO_3^- + 2 H^+ + H_2O + \text{energía}$	Nitrificantes

La transformación del amoníaco en nitrito suele ser el paso limitante de la nitrificación. Esto se debe a que la AOB (bacterias del género *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosovibrio* sp., etc.) y la NOB (bacterias del género *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus*, etc.) tienen diferentes tasas de crecimiento, lo que provoca una nitrificación parcial, especialmente durante el período inicial, que conduce a la acumulación de NO₂ hasta que los nitrificantes se establecen completamente, lo que puede llevar hasta 4 semanas (Figura 6).

Desnitrificación (Tabla 5) es la conversión del nitrato (NO₃⁻) en nitrito (NO₂⁻), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y finalmente en gas nitrógeno (N₂) en condiciones anóxicas y anaeróbicas (niveles muy bajos o nulos de oxígeno disuelto). La desnitrificación se lleva a cabo por medio de los dentrificadores, que pertenecen a grupos taxonómicamente diferentes de archaea y bacterias heterótrofas. Como el N₂O es un gas de efecto invernadero más potente que el CO₂, su producción debe reducirse al mínimo ([Zou et al. 2016](#)) a fin de maximizar las tasas de incorporación del N en la biomasa vegetal.

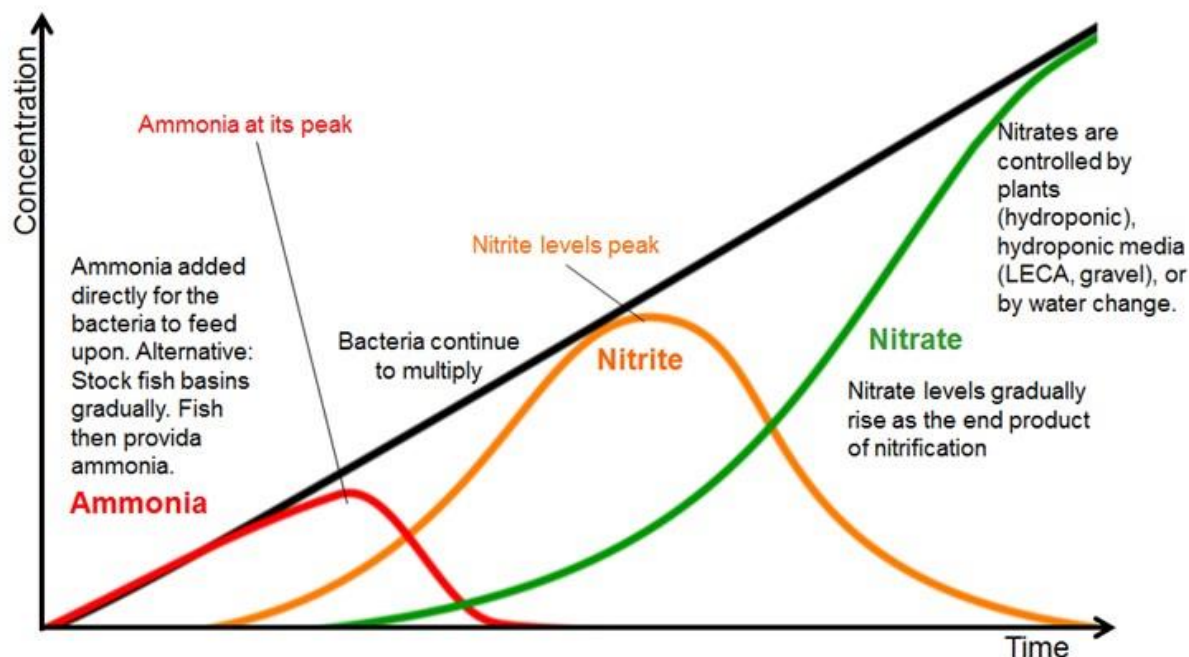


Figura 6: Inicio del biofiltro: desarrollo de concentraciones de amoníaco, nitrito y nitrato a lo largo del tiempo

Tabla 5: Ecuaciones químicas de las reacciones de desnitrificación. La desnitrificación procede generalmente mediante alguna combinación de las siguientes reacciones medias, con la enzima catalizadora de la reacción entre paréntesis.

Ecuaciones	Enzima que cataliza la reacción
$NO_3^- + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow NO_2^- + H_2O$	Reductasa de nitrato
$NO_2^- + 2 H^+ + e^- \rightarrow NO + H_2O$	Reductasa de nitrito
$2 NO + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow N_2O + H_2O$	Reductasas de óxido nítrico
$N_2O + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow N_2 + H_2O$	Reductasa de óxido nitroso
$2 NO_3^- + 12 H^+ + 10 e^- \rightarrow N_2 + 6 H_2O$	El proceso entero puede expresarse como una reacción redox balanceada neta

Oxidación anaeróbica de amonio (anammox). Las bacterias que estaban involucradas en este proceso fueron identificadas en 1999 ([Strous et al. 1999](#)). El anammox podría existir en los sistemas acuapónicos porque las características del agua son similares a las de los sistemas de acuicultura, en los que se ha demostrado que se produce el proceso anammox ([Wongkiew et al. 2017](#)). Sin embargo, la tasa de anammox es 10 veces más lenta que la tasa de nitrificación. Se ha informado de que el proceso anammox contribuye a la pérdida de nitrógeno en diferentes ecosistemas ([Burgin y Hamilton 2007](#), [Hu et al. 2010](#)). Dado que el amoníaco y el nitrito están disponibles en los sistemas acuapónicos,

el gas nitrógeno podría formarse mediante el proceso anammox en condiciones anóxicas en el biofiltro (Tabla 6).

Tabla 6: Ecuación química de la reacción anamox.

Ecuación	Bacteria involucrada
$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2 H_2O$ + <i>energía</i>	Bacteria anamox

5.2.2 Ciclo de fósforo

El fósforo (P) es el segundo macronutriente más importante para el crecimiento de las plantas y se requiere en cantidades relativamente grandes. Desempeña un papel en la respiración y la división celular y se utiliza en la síntesis de compuestos energéticos. El P entra en el sistema acuapónico por medio de la alimentación de los peces, el agua del grifo y las adiciones de fertilizantes (si procede). La forma química en que el P está presente en la solución de nutrientes depende del pH. Los pKs (medida cuantitativa de la acidez) para la disociación del H_3PO_4 en $H_2PO_4^-$ y luego en HPO_4^{2-} son 2,1 y 7,2 respectivamente ([Schachtman et al. 1998](#), citado en [da Silva Cerozi y Fitzsimmons 2016](#)). Por lo tanto, en el rango de pH que se mantiene en los sistemas acuapónicos, el P está mayormente presente en forma de $H_2PO_4^-$ y menos como H_3PO_4 o HPO_4^{2-} . Las plantas sólo pueden absorber P como los iones ortofosfato libres $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} . Estudios experimentales y de simulación han demostrado que la disponibilidad de P disminuye con el aumento del pH del agua acuapónica debido a la precipitación (Figura 7).

Si el pH en la solución nutritiva acuapónica aumenta, el P se une a varios cationes, de modo que hay menos iones P libres (PO_4) disponibles en la solución, pero hay más especies de fosfato de calcio insoluble, que se precipitan de la solución. Estos complejos insolubles pueden acumularse en el lodo (*sludge*) de los peces ([Schneider et al. 2005](#)) o en los sedimentos y el perifiton de las paredes y las tuberías del sistema acuapónico. [Yogev et al. \(2016\)](#) estimaron que esta pérdida puede ser de hasta el 85%. Una opción para evitar esta pérdida masiva de P a través de los lodos es añadir un compartimento de digestión al sistema acuapónico. Durante la digestión aeróbica o anaeróbica, el P se libera en el digestato y puede reintroducirse en el agua circulante ([Goddek et al. 2016](#)). [da Silva Cerozi y Fitzsimmons \(2016\)](#) también demostraron la importancia de la materia orgánica y la alcalinidad para mantener los iones de fosfato libres en la solución a altos rangos de pH. Sin embargo, se recomienda que el pH en los sistemas acuapónicos se mantenga en un rango de 5,5-7,2 para una disponibilidad y absorción óptimas por las plantas.

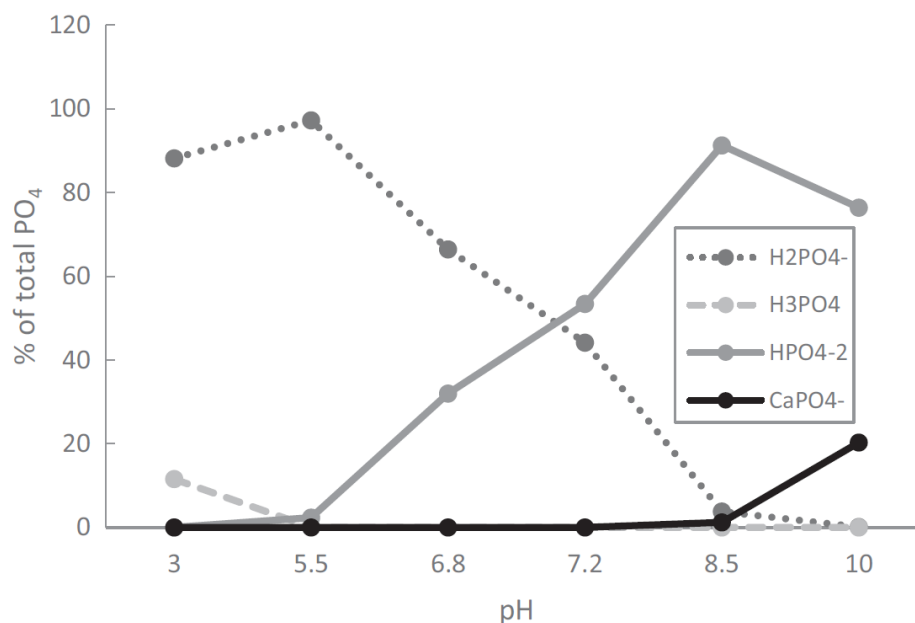


Figura 7: Especiación de las principales formas de P en la solución acuapónica en función del pH, tal como se simula en Visual MINTEQ. Nótese que no todas las especies de PO₄ están descritas en la tabla (de [da Silva Cerozi y Fitzsimmons 2016](#))

La dinámica precisa del fósforo en la acuaponía aún no se comprende del todo. El principal aporte de fósforo en el sistema es la alimentación de los peces, y en los sistemas sin suplementos el fósforo tiende a ser limitante ([Graber y Junge 2009](#); [Seawright et al. 1998](#)). Esta es también la razón por la que hasta el 100% del fósforo presente en el agua de los peces puede ser reciclado en la biomasa de la planta, dependiendo del diseño del sistema ([Graber y Junge 2009](#)).

5.3 Nutrición de las plantas

5.3.1 Elementos nutritivos esenciales

Las plantas requieren 16 ([Resh 2013](#)) o, según otras fuentes, 17 ([Bittszansky et al. 2016](#)) elementos nutritivos esenciales sin los cuales no pueden completar su ciclo de vida normal. Las plantas requieren nutrientes esenciales para su normal funcionamiento y crecimiento. El rango de suficiencia de una planta es el rango de cantidad de nutrientes necesarios para satisfacer las necesidades nutricionales de la planta y maximizar su crecimiento. La amplitud de este rango depende de cada especie de planta y del nutriente en particular. Los niveles de nutrientes que se encuentran fuera del rango de suficiencia de una planta hacen que el crecimiento y la salud general de los cultivos disminuyan debido a una deficiencia o toxicidad.

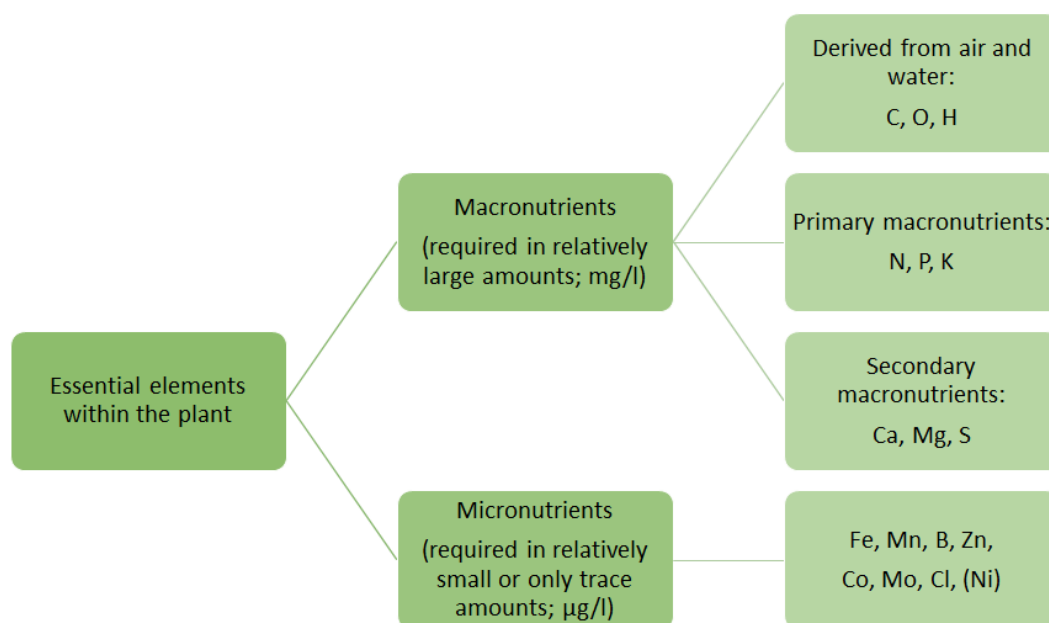


Figura 8: Clasificación de los elementos esenciales (nutrientes) que se necesitan para el crecimiento de la planta.

Las plantas normalmente obtienen sus nutrientes necesarios del agua y de los minerales del suelo. En los cultivos hidropónicos necesitan que se les suministre agua y minerales. En la acuicultura, la situación se complica por el hecho de que el agua del sistema contiene una mezcla muy compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos procedentes de los desechos y la comida de los peces. Hay dos categorías principales de nutrientes: macronutrientes y micronutrientes (Figura 8). Ambos tipos son esenciales, pero en cantidades diferentes. Se necesitan cantidades mucho mayores de los seis macronutrientes que de los micronutrientes, que sólo se necesitan en cantidades ínfimas ([Jones y Olson-Rutz 2016](#)).

Los macronutrientes se dividen en tres grupos. Los términos "primario" y "secundario" se refieren a la cantidad, y no a la importancia de un nutriente. La falta de un nutriente secundario es tan perjudicial para el crecimiento de las plantas como la deficiencia de cualquiera de los tres nutrientes primarios, o la deficiencia de micronutrientes. Es importante tener una comprensión básica de la función de cada nutriente para poder apreciar cómo afectan al crecimiento de las plantas (Tabla 6). Una buena orientación sobre la cantidad de un nutriente necesario es medir la composición elemental del material vegetal (Figura 9). Si se producen deficiencias de nutrientes, es importante poder identificar qué elemento falta en el sistema y ajustarlo en consecuencia, añadiendo fertilizante suplementario o aumentando la mineralización (véanse también los capítulos 6 y 9).

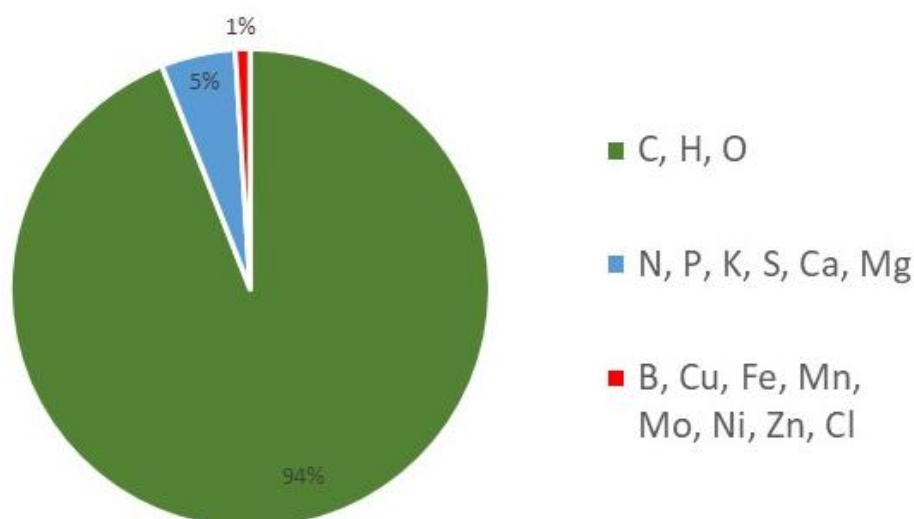


Figura 9: Representación de cantidades de nutrientes en la materia seca de las plantas.

Tabla 6: Elementos esenciales y su función en las plantas (adaptado de [Resh 2013](#))

Elemento	Rol
Carbono (C)	El C forma la columna vertebral de la mayoría de las biomoléculas, incluyendo proteínas, almidones y celulosa. La fotosíntesis convierte el CO ₂ del aire o del agua en carbohidratos que se utilizan para almacenar y transportar energía dentro de la planta.
Hidrógeno (H)	El H es un componente de todos los compuestos orgánicos. Se obtiene casi enteramente del agua. Es importante en el intercambio catiónico en las relaciones planta-suelo. Los iones H ⁺ son necesarios para impulsar la cadena de transporte de electrones en la fotosíntesis y en la respiración.
Elemento	Rol
Elemento	Rol
Oxígeno (O)	El O es un componente de muchos compuestos orgánicos e inorgánicos de las plantas. Sólo unos pocos compuestos orgánicos, como el caroteno, no contienen O. Se puede adquirir en muchas formas: O ₂ and CO ₂ , H ₂ O, NO ₃ ⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻ and SO ₄ ²⁻ . También está involucrado en el intercambio de aniones entre las raíces y el medio externo. Las plantas producen O ₂ durante la fotosíntesis pero luego requieren O ₂ para someterse a la respiración aeróbica y descomponer esta glucosa para producir ATP.
Nitrógeno (N)	El N forma parte de un gran número de compuestos orgánicos, incluyendo aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y clorofila. Es esencial para la fotosíntesis, el crecimiento celular y los procesos metabólicos. Por lo general, el N disuelto se encuentra en forma de nitrato, pero las plantas pueden utilizar cantidades moderadas de amoníaco e incluso aminoácidos libres.

Fosforo (P)	El P forma parte de la columna vertebral fosfolípida de los ácidos nucleicos (como el ADN, el ácido desoxirribonucleico) y el trifosfato de adenosina (ATP, la molécula que almacena energía en las células), y está presente en ciertas coenzimas. Es esencial para la fotosíntesis, así como para la formación de aceites y azúcares, y fomenta la germinación y el desarrollo de las raíces en las plántulas. Como los tejidos jóvenes requieren más energía, es particularmente importante para los jóvenes.
Potasio (K)	K actúa como coenzima o activador de muchas enzimas. La síntesis de proteínas requiere altos niveles de potasio. Se utiliza para la señalización celular a través de un flujo de iones controlado a través de las membranas. El K también controla la apertura de las estomas, y está involucrado en el desarrollo de flores y frutas. También está involucrado en la producción y transporte de azúcares, la captación de agua, la resistencia a las enfermedades y la maduración de los frutos. El K no forma una parte estructural estable de ninguna molécula dentro de las células de las plantas.
Calcio (Ca)	El Ca se encuentra en las paredes celulares como el pectato de calcio, que se une a las paredes primarias de las células adyacentes. Participa en el fortalecimiento de los tallos y contribuye al desarrollo de las raíces. Se requiere para mantener la integridad de la membrana y es parte de la enzima α -amilasa. Se precipita como cristales de oxalato de calcio en las vacuolas. A veces interfiere con la capacidad del magnesio para activar las enzimas
Magnesio (Mg)	El Mg es una parte esencial de la molécula de clorofila. Sin Mg, la clorofila no puede capturar la energía solar necesaria para la fotosíntesis. El Mg también se requiere para la activación de muchas enzimas necesarias para el crecimiento. Es esencial para mantener la estructura del ribosoma, contribuyendo así a la síntesis de las proteínas.
Azufre (S)	El S se incorpora en varios compuestos orgánicos, incluyendo aminoácidos (metionina y cisteína) y proteínas (como las enzimas fotosintéticas). La coenzima A y las vitaminas tiamina y biotina también contienen S.
Boro (B)	El B es uno de los nutrientes menos comprendidos. Se utiliza con el Ca en la síntesis de la pared celular y es esencial para la división celular. B aumenta la tasa de transporte de azúcares desde las hojas maduras de las plantas hasta las regiones de crecimiento activo (punto de crecimiento, raíces, nódulos de las raíces en las legumbres) y también a los frutos en desarrollo. Las necesidades de B son mucho mayores para el crecimiento reproductivo, ya que ayuda a la polinización y al desarrollo de los frutos y las semillas. Otras funciones incluyen el metabolismo del N, la formación de ciertas proteínas, la regulación de los niveles hormonales y el transporte del K a las estomas (que ayuda a regular el equilibrio hídrico interno).
Cloro (Cl)	El Cl está clasificado como un micronutriente, sin embargo las plantas pueden absorber tanto Cl como elementos secundarios como el S. El Cl es importante en la

	<p>apertura y cierre de las estomas. Se requiere para la fotosíntesis, donde actúa como activador de enzimas durante la producción de oxígeno del agua. Funciona en el equilibrio catiónico y el transporte dentro de la planta. Está involucrado en la resistencia y tolerancia a las enfermedades. El Cl compite con la absorción de nitrato, tendiendo a promover el uso de nitrógeno amoniacal. La disminución de la captación de nitrato puede ser un factor en el papel del cloro en la supresión de enfermedades, ya que los altos nitratos de las plantas se han asociado con la gravedad de las enfermedades.</p>
Cobre (Cu)	<p>El Cu activa algunas enzimas que intervienen en la síntesis de lignina y es esencial en varios sistemas enzimáticos. También se requiere en la fotosíntesis, la respiración de las plantas y ayuda en el metabolismo de los carbohidratos y las proteínas de las plantas. El Cu también sirve para intensificar el sabor y el color en los vegetales, y el color en las flores.</p>
Hierro (Fe)	<p>El Fe es necesario para la síntesis de la clorofila y algunos otros pigmentos y es una parte esencial de las ferredoxinas. Las ferredoxinas son pequeñas proteínas que contienen átomos de Fe y S que actúan como portadores de electrones en la fotosíntesis y la respiración. El Fe también forma parte de la nitrato reductasa y activa algunas otras enzimas.</p>
Manganeso (Mn)	<p>El Mn activa una o más enzimas en la síntesis de ácidos grasos, las enzimas responsables de la formación de ADN y ARN, y las enzimas implicadas en la respiración. Participa directamente en la producción fotosintética de O₂ a partir de H₂O y está involucrado en la formación de cloroplastos, la asimilación de nitrógeno y la síntesis de algunas enzimas. Juega un papel en la germinación del polen, el crecimiento del tubo de polen, la elongación de las células de la raíz y la resistencia a los patógenos de la raíz.</p>
Molibdeno (Mo)	<p>El Mo actúa como un portador de electrones en la conversión del nitrato en amonio antes de que se utilice para sintetizar los aminoácidos dentro de la planta. Es esencial para la fijación de nitrógeno. Dentro de la planta, el Mo se utiliza en la conversión del fósforo inorgánico en formas orgánicas.</p>
Níquel (Ni)	<p>El Ni es el cofactor metálico de las ureas-enzimas: sin él están inactivas (Polacco et al. 2013). Las ureasas están presentes en bacterias, hongos, algas y plantas, pero están ausentes en los peces y otros animales. Las enzimas ureasas son responsables de la desintoxicación catabólica de la urea, residuos potencialmente fitotóxicos excretados por los peces.</p>
Zinc (Zn)	<p>El Zn activa una serie de enzimas que son responsables de la síntesis de ciertas proteínas, incluyendo algunas enzimas importantes como el alcohol deshidrogenasa, la deshidrogenasa del ácido láctico, etc. Se utiliza en la formación de clorofila y algunos hidratos de carbono, la conversión de almidones en azúcares y su presencia en el tejido vegetal ayuda a la planta a soportar las temperaturas</p>

frías. El Zn es necesario para la formación de auxinas, que son hormonas que ayudan a regular el crecimiento y a alargar el tallo.

5.3.2 Disponibilidad de nutrientes y el pH

Los nutrientes existen tanto en forma de compuestos complejos e insolubles como en formas simples que suelen ser solubles en agua y están fácilmente disponibles para las plantas. Las formas insolubles deben desglosarse en formas disponibles para beneficiar a la planta. Estas formas disponibles se resumen en el Tabla 7.

Tabla 7: Formas de nutrientes absorbidos y concentraciones aproximadas en el tejido seco de la planta (adaptado de [Jones y Olson-Rutz 2016](#))

Elemento	Forma absorbida	Rango de concentración en tejido seco de la planta (%)
Nitrógeno (N)	NO_3^- (nitrato) / NH_4^+ (amonio)	1 - 5
Fósforo (P)	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} (fosfato)	0.1 – 0.5
Potasio (K)	K^+	0.5 – 0.8
Calcio (Ca)	Ca^{2+}	0.2 - 1.0
Magnesio (Mg)	Mg^{2+}	0.1 – 0.4
Azufre (S)	SO_4^{2-} (sulfato)	0.1 – 0.4
Boro (B)	H_3BO_3 (ácido bórico) / H_2BO_3^- (borato)	0.0006 – 0.006
Cloro (Cl)	Cl^- (cloruro)	0.1 – 1.0
Cobre (Cu)	Cu^{2+}	0.0005 – 0.002
Hierro (Fe)	Fe^{2+} , Fe^{3+}	0.005 – 0.025
Manganeso (Mn)	Mn^{2+}	0.002 – 0.02
Molibdeno (Mo)	MoO_4^{2-} (molibdato)	0.000005 - 0.00002
Níquel (Ni)	Ni^{2+}	0.00001 – 0.0001
Zinc (Zn)	Zn^{2+}	0.0025 – 0.015

El pH de la solución determina la disponibilidad de los diversos elementos para la planta (Figura 10). El valor del pH es una medida de acidez. Una solución es ácida si el pH es inferior a 7, neutra si el pH está en 7 y alcalina si el pH es superior a 7. Como el pH es una función logarítmica, un cambio de una unidad en el pH significa un cambio de 10 veces en la concentración de H^+ . Por lo tanto, cualquier pequeño cambio en el pH puede tener un gran efecto en la disponibilidad de iones para las plantas. La mayoría de las plantas prefieren un pH entre 6,0 y 7,0 para una óptima absorción de nutrientes.

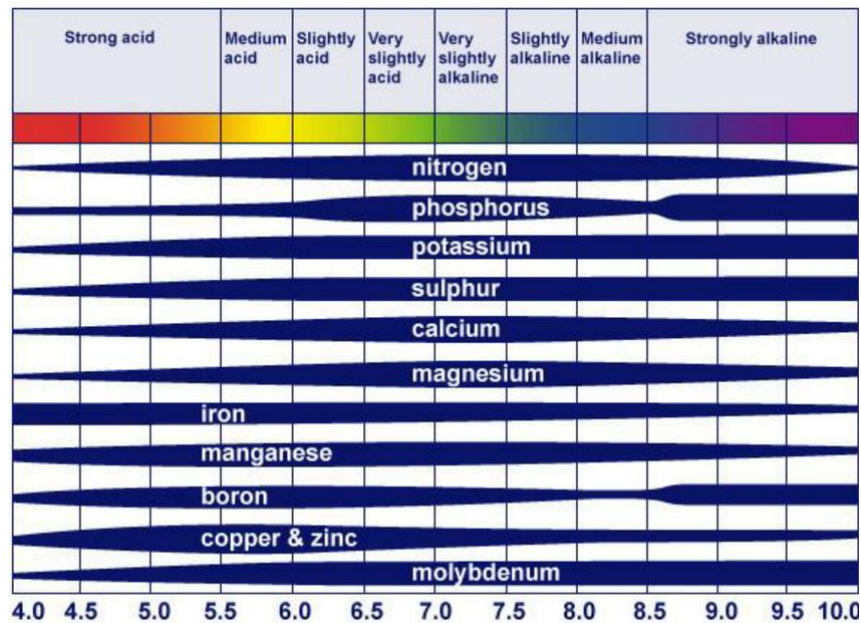


Figura 10: El efecto del pH sobre la disponibilidad de nutrientes para plantas (de [Roques et al. 2013](#))

5.3.3 Trastornos nutricionales en las plantas

Un trastorno nutricional es causado por el exceso o la deficiencia de un determinado nutriente ([Resh 2013](#)). Es importante detectar los trastornos nutricionales lo antes posible, para evitar la propagación de los síntomas y la eventual muerte de la planta. Sin embargo, el diagnóstico preciso de los trastornos de los nutrientes no es fácil, porque muchas deficiencias tienen síntomas superpuestos o solapados. Para complicar más las cosas, también hay enfermedades de las plantas que pueden causar síntomas similares. La única manera de poder distinguir estos síntomas entre sí es adquirir conocimientos a través de la práctica. Observe sus plantas, tome nota de los diferentes síntomas y relaciónelos con los resultados del análisis de la calidad del agua. Además, un principiante siempre debe consultar con un experto.

Un aspecto del diagnóstico es la distinción entre elementos **móviles (Mg, P, K, Zn, N)** e **inmóviles (Ca, Fe, S, B, Cu, Mn)**. Todos los nutrientes se desplazan con relativa facilidad desde la raíz hasta la parte de crecimiento de la planta a través del xilema. Sin embargo, los elementos móviles también pueden ser reposicionados desde las hojas más viejas hasta la región de crecimiento activo de la planta (hojas más jóvenes), cuando se produce la deficiencia. Como resultado, los síntomas de la deficiencia aparecen primero en las hojas más viejas. Por el contrario, los elementos inmóviles, una vez incorporados a las diversas estructuras, no pueden ser desmontados de estas estructuras y retransportados a través de la planta. Los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas jóvenes superiores de la planta. En el Tabla 8 se resume otros aspectos del diagnóstico y su terminología. En el Tabla 9 se describe los síntomas de deficiencia y toxicidad de los elementos esenciales.

Terminología utilizada para la descripción de los síntomas de los trastornos nutricionales (adaptado de [Resh 2013](#))

Término	Descripción
Generalizado	Los síntomas se extienden por toda la planta o la hoja
Localizados	Limitados a una zona de la planta o la hoja
Secado	Necrosis: quemado, seco, aspecto de papel.
Marginal	Clorosis o necrosis en los márgenes de las hojas; normalmente se extiende hacia el interior a medida que el síntoma progresa
Clorosis intervenal	Clorosis (amarillamiento) entre las venas de las hojas
Moteado	Patrón irregular de manchas de luz indistinta (clorosis) y áreas oscuras; a menudo asociado con enfermedades virales
Manchas	Zona descolorida con límites claros adyacentes al tejido normal
Color del envés de las hojas	A menudo se produce una coloración particular en la superficie inferior de las hojas, por ejemplo, la deficiencia de fósforo: coloración púrpura del envés de las hojas
Ahucamiento	Los márgenes o puntas de las hojas pueden ahucarse o doblarse hacia arriba o hacia abajo
Cuadrulado (reticulado)	Patrón de pequeñas venas de las hojas que permanecen verdes mientras que el tejido intervenal se amarillea - deficiencia de manganeso
Tejido quebradizo	Las hojas, los peciolo, los tallos pueden carecer de flexibilidad, se rompen fácilmente cuando se tocan - deficiencia de calcio o boro
Tejido blando	Hojas muy blandas, fácilmente dañado- exceso de nitrógeno
Muerte repentina	Las hojas o el punto de crecimiento mueren rápidamente y se seca el boro o las deficiencias de calcio.
Retraso de crecimiento	Crecimiento más corto de lo normal
Espinoso	Crecimiento espinoso del tallo y los peciolo de las hojas muy delgados y succulentos

Tabla 9: Síntomas de deficiencia y toxicidad de los elementos esenciales (adaptado de [Resh 2013](#))

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
Nitrógeno (N)	La reducción de la proteína resulta en un crecimiento atrofiado y en brotes laterales inactivos. Los tallos, los peciolo y las superficies de las hojas inferiores del maíz y el tomate pueden volverse púrpuras. El contenido de clorofila de las hojas se reduce, lo que da como resultado un color amarillo pálido en general,	Las plantas suelen ser de color verde oscuro con abundante follaje pero generalmente con un sistema radicular restringido. Pueden causar dificultades en la floración y el cuajado de los frutos.

	especialmente en las hojas más viejas. Se reduce la floración, fructificación, y el contenido en proteínas y almidón.	
Fósforo (P)	Poco desarrollo de las raíces, retraso en el crecimiento. Enrojecimiento de las hojas. Hojas de color verde oscuro (puede confundirse con el suministro excesivo de N, ya que también da lugar a hojas de color verde más oscuro). Retraso de la madurez. Las puntas de las hojas de la planta también pueden aparecer quemadas. Los síntomas de deficiencia ocurren primero en las hojas maduras.	Todavía no se han observado síntomas primarios. A veces las deficiencias de Cu y Zn ocurren en presencia de un exceso de P.
Potasio (K)	La deficiencia causará una menor captación de agua y perjudicará la resistencia a las enfermedades. Los síntomas son visibles primero en las hojas más viejas. Los márgenes de las hojas se enroscan hacia adentro. En los dicots, estas hojas son inicialmente cloróticas, pero pronto se desarrollan manchas quemadas dispersas (áreas muertas). En las monocotiledóneas, las puntas y los márgenes de las hojas mueren primero.	Normalmente no son excesivamente absorbidas por las plantas. El exceso de K puede conducir a la deficiencia de Mg, y posiblemente de Mn, Zn o Fe
Calcio (Ca)	Los signos de deficiencias incluyen la quemadura de las puntas en plantas frondosas y raíces, la putrefacción del extremo de la flor en plantas frutales y el crecimiento inadecuado de los tomates. Las hojas jóvenes se ven afectadas antes que las viejas.	No hay síntomas visibles constantes.
Magnesio (Mg)	Sin cantidades suficientes de Mg, las plantas comienzan a degradar la clorofila de las hojas viejas. Esto causa clorosis entre las venas, el principal síntoma de la deficiencia de Mg. Más tarde, pueden aparecer manchas necróticas en el tejido clorótico. El crecimiento se reduce.	No hay información
Azufre (S)	No se encuentra a menudo. La deficiencia de S se puede confundir fácilmente con la falta de N. Los síntomas, como el retraso en el crecimiento, son similares. Sin embargo, la clorosis general se produce primero en las hojas más jóvenes, mientras que los síntomas de la deficiencia de N son visibles primero en las hojas más viejas.	Reducción del crecimiento y del tamaño de las hojas. A veces hay amarillamiento entre las venas o la quema de las hojas.

Boro (B)	Los síntomas varían según la especie y aparecen primero en las hojas nuevas y en los puntos de crecimiento (que a menudo mueren). Las ramas y las raíces son a menudo cortas e hinchadas. Las hojas muestran clorosis moteada, engrosamiento, fragilidad, rizado, marchitamiento. Los tejidos internos a veces se desintegran o decoloran. Como la B ayuda a transportar los azúcares, su deficiencia provoca una reducción de los exudados y azúcares de las raíces de las plantas, lo que puede reducir la atracción y la colonización de los hongos micorrícicos.	El amarillamiento de la punta de la hoja seguido de una necrosis progresiva que comienza en el margen de la hoja y progresa hacia el nervio central. A diferencia de la mayoría de las deficiencias de nutrientes que suelen presentar síntomas de manera uniforme en todo el cultivo, los síntomas B pueden aparecer de manera aleatoria dentro de un cultivo (Mattson y Krug 2015).
-----------------	--	---

Tabla 9 continuación

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
Cloro (Cl)	Marchitamiento de las hojas, a menudo con las puntas gordas. La hoja moteada y la punta del limbo de la hoja se marchita con clorosis y necrosis. Las raíces se atrofian y se engrosan cerca de las puntas. La deficiencia de cloro en la col se caracteriza por la ausencia del típico olor a col.	El exceso de Cl puede ser un componente importante del estrés por salinidad y tóxico para las plantas (Chen et al. 2010). Los síntomas incluyen bordes de hojas chamuscados, bronceado, amarillamiento, abscisión excesiva, reducción del tamaño de las hojas, menor tasa de crecimiento. La acumulación de cloro es mayor en los tejidos más viejos.
Cobre (Cu)	La deficiencia natural es rara. Típicamente, los síntomas empiezan como ahuecamiento de las hojas jóvenes, con pequeñas manchas necróticas en los márgenes de las hojas. A medida que los síntomas progresan, las hojas más nuevas son más pequeñas en tamaño, pierden su brillo y pueden marchitarse. Los puntos de crecimiento (meristemas apicales) pueden necrosarse y morir. Las plantas suelen tener un aspecto compacto, ya	El crecimiento reducido seguido de síntomas de clorosis férrica, retraso en el crecimiento, reducción de las ramas, engrosamiento y oscurecimiento anormal de las raíces.

	que la longitud del tallo entre las hojas se acorta. El exceso de K, P u otros micronutrientes puede causar indirectamente una deficiencia de Cu.	
Hierro (Fe)	Clorosis interveinal pronunciada. Similar a la deficiencia de Mg, pero aquí la clorosis comenzará en las puntas de las hojas más jóvenes y se extenderá a las hojas más viejas. Otros signos, siempre acompañados de la clorosis de la hoja, pueden incluir un crecimiento pobre y la pérdida de la hoja.	No es a menudo evidente en condiciones naturales. Se ha observado después de la aplicación de pulverizaciones donde aparece como manchas necróticas.
Manganeso (Mn)	Las hojas se vuelven amarillas y también hay clorosis entre las venas, primero en las hojas jóvenes. Las lesiones necróticas y el desprendimiento de las hojas pueden desarrollarse más tarde. Desorganización de las láminas de cloroplasto. El Mn puede no estar disponible para las plantas donde el pH es alto. Por eso a menudo se produce junto con la deficiencia de Fe, y también tiene síntomas similares. Los síntomas de la deficiencia de Mn también son similares a los del Mg porque el Mn también es invariable.	A veces la clorosis, la distribución desigual de la clorofila. Reducción del crecimiento.
Molibdeno (Mo)	Como el Mo está estrechamente vinculado al N, su deficiencia puede parecerse fácilmente a la deficiencia del N. Los síntomas de la deficiencia comienzan en las hojas más viejas o en el medio del tallo: clorosis entre las venas, en algunos cultivos la hoja entera se vuelve pálida; necrosis marginal de la hoja o ventosa. Las hojas pueden estar deformadas. Los cultivos más sensibles a la deficiencia de Mo son las crucíferas (brócoli, coliflor, col), las legumbres (alubias, guisantes, tréboles), las poinsetias y las primulas.	Rara vez se observa. Las hojas de tomate se vuelven de color amarillo dorado.

Tabla 9 continuación

Elemento	Deficiencia	Toxicidad
Níquel (Ni)	El Ni es parte de las enzimas que desintoxican la urea. Aunque la urea es una excelente fuente de nitrógeno para las plantas (Yang et al. 2015), en concentraciones más altas es fuertemente tóxica para los tejidos de las plantas. Los síntomas típicos	El Ni es fuertemente fitotóxico en concentraciones más altas. Induce cambios en la actividad de las enzimas antioxidantes, y tiene un efecto negativo en la

	de la toxicidad de la urea, y potencialmente también de la deficiencia de Ni, son la quemadura de las hojas y la clorosis (Khemira et al. 2000).	fotosíntesis y la respiración. Las causas del exceso de Ni son la clorosis, la necrosis y el marchitamiento. La división celular y el crecimiento de las plantas se inhiben. La alta absorción de Ni induce una disminución del contenido de agua, lo que puede actuar como indicador de la toxicidad del Ni en las plantas (Bhalerao et al. 2015).
Zinc (Zn)	Crecimiento atrofiado, con entrenudos acortados y hojas más pequeñas. Los márgenes de las hojas están a menudo distorsionados o arrugados. A veces, clorosis entre las venas.	El exceso de Zn comúnmente produce clorosis férrica en las plantas.

5.4 Suministro de nutrientes en la acuaponía

La composición química del agua del sistema en la acuaponía es muy compleja. Además de una gran cantidad de iones disueltos, contiene sustancias orgánicas resultantes de la liberación de productos del metabolismo de los peces y de la digestión de los alimentos, así como sustancias excretadas por las plantas. Estas sustancias son en gran medida desconocidas, y sus interacciones pueden influir aún más en la composición química y el pH de las soluciones de nutrientes acuapónicos. Todo esto puede ejercer múltiples efectos, aunque en su mayoría aún desconocidos, sobre la absorción de nutrientes por parte de las plantas, sobre la salud de los peces y sobre la actividad microbiana.

Los nutrientes entran en un sistema acuapónico a través de la adición de agua y alimento para peces ([Schmautz et al. 2016](#)). En términos de composición elemental, el alimento para peces contiene alrededor de 7,5% de nitrógeno, 1,3% de fósforo y 46% de carbono (Schmautz, datos no publicados). En términos de compuestos orgánicos, el alimento para peces contiene proteínas (harina de pescado o a base de plantas), grasas (aceite de pescado, aceites vegetales) y carbohidratos ([Boyd 2015](#)). Los peces herbívoros (como la tilapia) sólo necesitan alrededor de un 25% de proteínas en su alimentación, en comparación con los peces carnívoros que requieren alrededor de un 55% de proteínas ([Boyd 2015](#)). Tanto la harina de pescado como la soja son insostenibles (por diferentes razones), por lo que se está investigando intensamente para encontrar sustitutos adecuados de la harina de pescado y dietas a base de plantas ([Boyd 2015](#); [Davidson et al. 2013](#); [Tacon y Metian 2008](#)).

Si se calculan correctamente las proporciones de alimentación, se consumen todos los alimentos añadidos al sistema y sólo se excreta lo que no se utiliza para el crecimiento y el metabolismo (Figura 11). La proporción de nutrientes excretados también depende de la calidad y la digestibilidad de la dieta ([Buzby y Lin 2014](#)). La digestibilidad del alimento para peces, el tamaño de las heces y la

proporción de asentamiento son muy importantes para el funcionamiento del sistema ([Yavuzcan Yildiz et al. 2017](#)). Por lo tanto, la composición de nutrientes del agua del sistema acuapónico, resultante de la calidad del agua añadida, los alimentos para peces añadidos y todas las reacciones metabólicas del sistema, es extremadamente compleja y no siempre se ajusta a las necesidades de la planta. Sin embargo, el bienestar de los peces debe ser una preocupación central, y los alimentos para peces deben elegirse de manera que se ajusten a la especie de peces en cada etapa de desarrollo. La disponibilidad de nutrientes que pueden ser asimilados por las plantas tiene que ser regulada en un segundo paso.

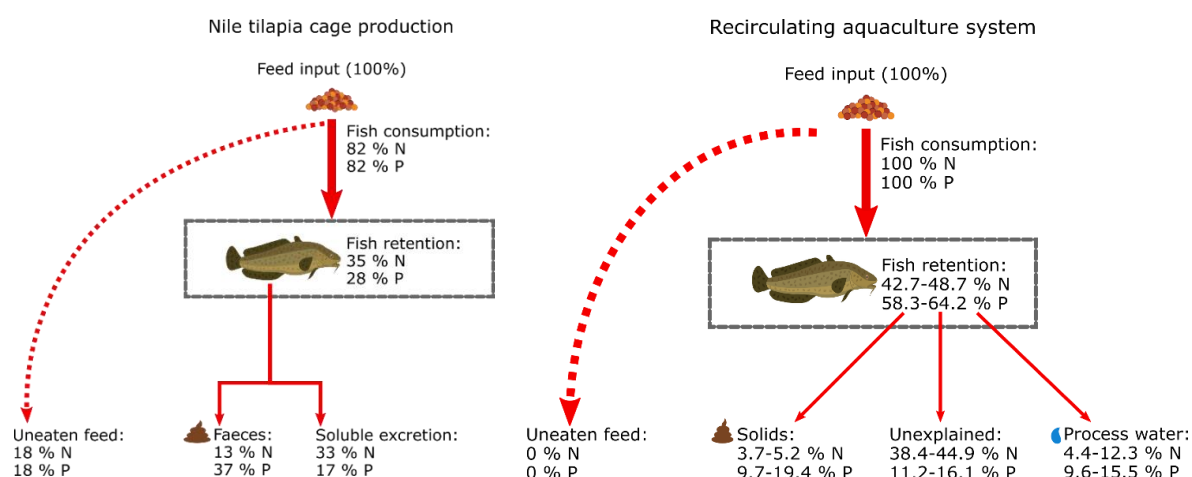


Figura 11: Flujo ambiental de nitrógeno y fósforo (en %) para a) la producción de jaulas de Tilapia del Nilo (de [Montanhini Neto y Ostrensky 2015](#)); b) la producción de RAS (datos de [Strauch et al. 2018](#)). "Unexplained" denota la fracción de N y P que no se puede atribuir a ninguna categoría.

Los datos del Tabla 10 muestran que la mayoría de los nutrientes de las plantas, pero especialmente el P y el Fe, se encuentran en concentraciones significativamente más bajas en el sistema acuapónico investigado en comparación con las soluciones hidropónicas estándar. Esta parece ser una situación típica en el funcionamiento acuapónico; sin embargo, las tasas de crecimiento de los cultivos acuapónicos son, en la mayoría de los casos, satisfactorias (Schmautz, datos no publicados). Veamos más de cerca este fenómeno.

Desgraciadamente, la interpretación de estos datos es muy difícil. La razón es que muy recientemente en la nutrición vegetal la casi bicentenaria "ley de Liebig" (el crecimiento de las plantas está controlado por el recurso más escaso) ha sido sustituida por complicados modelos matemáticos que tienen en cuenta las interacciones entre los elementos nutritivos, los compuestos y los iones individuales ([Baxter 2015](#)). Estos métodos no permiten una evaluación sencilla de los efectos de los cambios en los niveles de nutrientes en un sistema hidropónico o acuapónico. Además, hay que tener en cuenta que no existe una formulación perfecta de las necesidades nutricionales de un cultivo concreto. Los requisitos nutricionales varían según la variedad, la etapa del ciclo vital, la duración del día y las condiciones meteorológicas ([Bittszansky et al. 2016](#); [Resh 2013](#); [Sonneveld y Voogt 2009](#)).

En términos muy generales, para un buen crecimiento de las plantas en los hidropónicos, la concentración de nitrógeno debe mantenerse por encima de 165 mg/l N, la de fósforo por encima de

50 mg/l y la de potasio por encima de 210 mg/l ([Resh 2013](#)). En la acuicultura, esas altas concentraciones son difíciles de alcanzar por varios elementos pertinentes debido a tres razones:

1. Cuanto más altas son las concentraciones en el agua, mayor es la pérdida de nutrientes a través del intercambio de agua o del lodo. Sin embargo, incluso en un sistema cerrado, se requiere un cierto nivel de intercambio de agua para compensar las pérdidas por evapotranspiración y reducir la acumulación de componentes no deseados.
2. Con la elevada concentración de nutrientes en el agua, también se acumulan en el sistema componentes como la sal o las toxinas.
3. El fósforo reacciona con el calcio si éste está presente en mayores concentraciones y precipita como fosfato de calcio.

Las plantas que crecen en el compartimento hidropónico tienen necesidades específicas que dependen de la variedad de la planta y de la etapa de crecimiento ([Resh 2013](#)). Los nutrientes pueden ser suplementados ya sea a través del agua del sistema ([Schmautz et al. 2016](#)) o por aplicación foliar ([Roosta y Hamidpour 2011](#)).

Tabla 10: Comparación de las concentraciones de nutrientes en una solución hidropónica estándar y en el agua de un sistema acuapónico cerrado (Schmautz, datos no publicados)

	Concentración [mg/l]		Relación de la concentración (hidroponía/aquaponía)
	Aquaponía (Schmautz, sin publicar)	Hydroponía (optimizado para lechuga, Resh 2013)	
Macronutrientes			
N (como NO ₃ ⁻)	147	165	1.1
N (como NH ₄ ⁺)	2.8	15	5.4
P (como PO ₄ ³⁻)	5.1	50	10
K (como K ⁺)	84	210	2.5
Mg (como Mg ²⁺)	18	45	2.5
Ca (como Ca ²⁺)	180	190	1.1
S (como SO ₄ ²⁻)	21	65	3.1
Micronutrientes			
Fe (como Fe ²⁺)	0.2	4	20
Zn (Zn ²⁺)	0.2	0.1	0.5
B (como B[OH ₄] ⁻)	0.1	0.5	5
Mn (como Mn ²⁺)	1.4	0.5	0.4
Cu (como Cu ²⁺)	0.1	0.1	1
Mo (como MoO ₄ ²⁻)	0.002	0.05	25

Por lo general, con unas tasas de población de peces adecuadas, los niveles de nitrógeno (N, como nitrato) son suficientes para un buen crecimiento de las plantas, mientras que los niveles de varios otros nutrientes, en particular el hierro (Fe), el fósforo (P), el potasio (K) y el magnesio (Mg) son generalmente insuficientes para el máximo crecimiento de las plantas. Como se observa en el Tabla, otros micronutrientes también podrían ser limitantes. En la acuaponía, es especialmente importante vigilar el pH, porque a un pH superior a 7 varios nutrientes (véase la Figura 10) pueden precipitarse del agua y, por lo tanto, no estar disponibles para las plantas.

El potasio (K) no es necesario para los peces, lo que lleva a una composición de potasio baja en el alimento para peces y a niveles aún más bajos de potasio disponible para las plantas ([Seawright et al. 1998](#)). Para suministrar el potasio, se suele utilizar un tampón de pH KOH, ya que el pH suele disminuir en la acuicultura debido a la nitrificación ([Graber y Junge 2009](#)). Esto tiene el beneficio añadido de aumentar los niveles de potasio, aunque puede ser tóxico para los peces. Se informó que el valor [LC50 valor aguda de toxicidad](#) para los peces es del orden de 80 mg/l. En los sistemas acuapónicos plantados con tomate, el potasio se acumuló principalmente en los frutos ([Schmautz et al. 2016](#)).

El hierro (Fe) también suele ser un factor limitante en la acuaponía, por lo que puede añadirse como medida preventiva antes de que las deficiencias se hagan evidentes. Las altas concentraciones de hierro no dañan el sistema acuapónico, aunque pueden dar un ligero color rojo al agua. A fin de asegurar una fácil absorción por las plantas, el hierro debe ser añadido como hierro quelatado, también conocido como hierro secuestrado. Hay diferentes tipos de quelatos de hierro: Fe-EDTA, Fe-DTPA, y Fe-EDDHA. El hierro puede ser añadido en el agua del sistema (por ejemplo 2 mg L⁻¹ una vez cada dos semanas) o pulverizado directamente en las hojas (aplicación foliar) de 0,5 g L⁻¹) ([Roosta y Hamidpour 2011](#)).

La principal fuente de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) es el agua del grifo, lo que facilita la absorción por las plantas, ya que los nutrientes ya están disponibles ([Delaide et al. 2017](#)). No obstante, estos elementos suelen encontrarse en niveles bajos en los sistemas acuapónicos ([Graber y Junge 2009](#); [Seawright et al. 1998](#), Schmautz, datos inéditos). Especialmente el Ca es a menudo un factor limitante en la acuaponía, ya que sólo puede ser transportado a través de la transpiración activa del xilema. Cuando las condiciones son demasiado húmedas, el calcio puede estar disponible pero bloqueado porque las plantas no transpiran. Aumentar el flujo de aire con respiraderos o ventiladores puede prevenir este problema. De lo contrario, el carbonato de calcio (CaCO₃) o el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) debe ser complementado.

El zinc (Zn) se utiliza como parte del proceso de galvanización de algunas piezas de metal, que puede ser utilizado en la construcción de AP (peceras, pernos, etc.), y se encuentra en los residuos de pescado. Si bien las deficiencias de zinc son raras, la toxicidad del zinc puede plantear un problema en la acuaponía, ya que mientras las plantas pueden tolerar un exceso, los peces no pueden. Los niveles de zinc deben mantenerse entre 0,03 y 0,05 mg/l. La mayoría de los peces se estresarán entre 0,1 y 1 mg/l, y comenzarán a morir entre 4 y 8 mg/l. La mejor manera de mantener los niveles de zinc dentro de un rango inofensivo es evitar los equipos galvanizados ([Storey 2018](#)). No obstante, en algunos sistemas pueden producirse deficiencias de zinc. La deficiencia de zinc puede aliviarse mediante la aplicación foliar de zinc quelado ([Treadwell et al. 2010](#)).

Así pues, se plantea la cuestión de si es necesario y eficaz añadir nutrientes a los sistemas acuapónicos ([Nozzi et al. 2018](#)). Siempre que el sistema esté poblado con suficientes peces, y el pH esté dentro del nivel correcto, no es necesario añadir nutrientes para las plantas con un ciclo de cultivo corto que no producen frutos (por ejemplo, verduras de hoja como la lechuga, [Nozzi et al. 2018](#)). Por el contrario,

las hortalizas frutales (por ejemplo, los tomates, las berenjenas) requieren un suplemento de nutrientes. La cantidad de fertilizantes minerales necesarios puede calcularse utilizando el programa HydroBuddy ([Fernandez 2016](#)) (véase también el ejercicio del módulo 6). Además de nuestra experiencia en la suplementación de nutrientes minerales, en el futuro se deberán probar los fertilizantes hidropónicos orgánicos disponibles en el mercado para definir cuáles no perjudican la vida de los peces. Recientemente se ha sugerido que el tratamiento del lodo de los peces en un digestor, y la reintroducción de este digestato en el sistema de agua, aumentaría el suministro de nutrientes a las plantas ([Goddek et al. 2016](#)). Otro posible beneficio de suministrar al sistema acuapónico nutrientes orgánicos, en lugar de minerales, podría ser un efecto positivo en la población microbiana.

5.5 Referencias

- Baxter, I. 2015. [Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits?](#) *Journal of Experimental Botany* 66 (8), 2127-2131.
- Bhalerao, S.A., Sharma, A.S. y Poojari, A.C. 2015. [Toxicity of nickel in plants.](#) *International Journal of Pure and Applied Biosciences* 3 (2), 345-355.
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen B. y Kórmives, T. 2016. [Nutrient supply of plants in aquaponic systems.](#) *Ecocycles* 2 (2), 17-20.
- Boyd, C.E. 2015. [Overview of aquaculture feeds: Global impacts of ingredient use.](#) In D.A. Davis (ed.) *Feed and Feeding Practices in Aquaculture*, pp. 3-25. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Sawston.
- Bryson, B. 2003. [A Short History of Nearly Everything.](#) Doubleday, London.
- Burgin, A.J. and Hamilton, S.K. 2007. [Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways.](#) *Frontiers in Ecology and the Environment* 5 (2), 89-96.
- Buzby, K.M. y Lin, L.S. 2014. [Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output.](#) *Aquacultural Engineering* 63, 39-44.
- Chen, W., He, Z.L., Yang, X.E., Mishra, S. y Stoffella, P.J. 2010. [Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives.](#) *Journal of Plant Nutrition* 33 (7), 943-952.
- Cofie, O., Nikiema, J., Impraim, R., Adamtey, N., Paul, J. and Koné, D. 2016. [Co-composting of Solid Waste and Fecal Sludge for Nutrient and Organic Matter Recovery.](#) Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). 47p. (Resource Recovery and Reuse Systems Series 3).
- da Silva Cerozi, B. y Fitzsimmons, K. 2016. [The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution.](#) *Bioresource Technology* 219, 778-781.
- Da Silva, J.F. y Williams, R.J.P. 2001. [The Biological Chemistry of the Elements: The Inorganic Chemistry of Life.](#) Oxford University Press, Oxford.
- Davidson, J., Good, C., Barrows, F.T., Welsh, C., Kenney, P.B. y Summerfelt, S.T. 2013. [Comparing the effects of feeding a grain-or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems.](#) *Aquacultural Engineering* 52, 45-57.
- Delaide, B., Delhay, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. y Jijakli, M.H. 2017. [Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system.](#) *Aquacultural Engineering* 78, 130-139.

- Fernandez, D. 2016. [*HydroBuddy v1.62: The First Free Open Source Hydroponic Nutrient Calculator Program Available Online.*](#)
- Francis-Floyd, R., Watson, C., Petty, D. y Pouder, D.B. 2009. [*Ammonia in Aquatic Systems.*](#) University of Florida, IFAS Extension. Publication #FA 16.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P. y Sutton, M.A. 2008. [*Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions.*](#) *Science* 320 (5878), 889-892.
- Gay, S.W. y Knowlton, K.F. 2009. [*Ammonia Emissions and Animal Agriculture.*](#) Virginia Cooperative Extension (VCE) Publications, No. 442-110.
- Goddek, S., Schmautz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K.J., Wuertz, S. y Junge, R. 2016. [*The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce.*](#) *Agronomy* 6 (2), 37.
- Graber, A., y Junge, R. 2009. [*Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production.*](#) *Desalination* 246 (1-3), 147-156.
- Hu, B.L., Zheng, P., Tang, C.J., Chen, J.W., van der Biezen, E., Zhang, L., Ni, B.J., Jetten, M.S., Yan, J., Yu, H.Q. y Kartal, B. 2010. [*Identification and quantification of anammox bacteria in eight nitrogen removal reactors.*](#) *Water Research* 44 (17), 5014-5020.
- Hu, Z., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A.C. y Khanal, S.K. 2015. [*Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics.*](#) *Bioresource Technology* 188, 92-98.
- Jones, C. y Olson-Rutz, K. 2016. [*Plant nutrition and soil fertility.*](#) Montana State University Extension, Nutrient Management Module No. 2.
- Khemira, H., Sanchez, E., Righetti, T.L. y Azarenko, A.N. 2000. [*Phytotoxicity of urea and biuret sprays to apple foliage.*](#) *Journal of Plant Nutrition* 23 (1), 35-40.
- Mattson, N. y Krug, B. 2015. [*Identifying Boron Deficiency and Corrective/Preventative Actions.*](#) Cornell University Cooperative Extension/University of New Hampshire Cooperative Extension.
- Montanhini Neto, R. y Ostrensky, A. 2015. [*Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* \(L.\) reared in cages in tropical climate conditions.*](#) *Aquaculture Research* 46 (6), 1309-1322.
- Nozzi, V., Graber, A., Mathis, A., Schmautz, Z. y Junge, R. 2018. [*Nutrient management in aquaponics: comparison of three approaches on lettuce, mint and mushroom herbs.*](#) *Agronomy* 8 (3), 27.
- Polacco, J.C., Mazzafera, P. y Tezotto, T. 2013. [*Opinion—nickel and urease in plants: still many knowledge gaps.*](#) *Plant Science* 199, 79-90.
- Pratt, C.W. y Cornely, K. 2014. [*Essential Biochemistry*](#) (3rd edition). John Wiley and Sons Inc., MA.
- Resh, H.M. 2013. [*Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower.*](#) CRC Press, Boca Raton.
- Roosta, H.R. y Hamidpour, M. 2011. [*Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems.*](#) *Scientia Horticulturae* 129 (3), 396-402.
- Roques, S., Kendall, S., Smith, K., Newell Price, P. y Berry, P. 2013. [*A review of the non-NPKS nutrient requirements of UK cereals and oilseed rape.*](#) Research Review No. 78. HGCA, Kenilworth.
- Schachtman, D.P., Reid, R.J. y Ayling, S.M. 1998. [*Phosphorus uptake by plants: from soil to cell.*](#) *Plant Physiology* 116 (2), 447-453.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T.G. y Junge, R. 2016. [*Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods.*](#) *Water* 8 (11), 533.

- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E.H. y Verreth, J.A.J. 2005. [Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems](#). *Aquacultural Engineering* 32 (3-4), 379-401.
- Seawright, D.E., Stickney, R.R. y Walker, R.B. 1998. [Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems](#). *Aquaculture* 160, 215–237.
- Sonneveld, C. y Voogt, W. 2009. [Plant Nutrition of Greenhouse Crops](#). Springer, Springer Netherlands.
- Sterner, R.W. y Elser, J.J. 2002. [Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere](#). Princeton University Press.
- Storey, N. 2018. [Why You Need to Be Careful About Zinc in Aquaponics](#). Upstart University.
- Strauch, S., Wenzel, L., Bischoff, A., Dellwig, O., Klein, J., Schüch, A., Wasenitz, B. and Palm, H. 2018. [Commercial African catfish \(*Clarias gariepinus*\) recirculating aquaculture systems: Assessment of element and energy pathways with special focus on the phosphorus cycle](#). *Sustainability* 10 (6), 1805.
- Strous, M., Fuerst, J.A., Kramer, E.H., Logemann, S., Muyzer, G., van de Pas-Schoonen, K.T., Webb, R., Kuenen, J.G. y Jetten, M.S. 1999. [Missing lithotroph identified as new planctomycete](#). *Nature* 400 (6743), 446.
- Tacon, A.G. y Metian, M. 2008. [Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects](#). *Aquaculture* 285 (1-4), 146-158.
- Treadwell, D., Taber, S., Tyson, R. y Simonne, E. 2010. [Foliar-applied micronutrients in aquaponics: A guide to use and sourcing](#). University of Florida IFAS Extension, HS1163.
- Winogradsky, S. 1892. [Contributions à la morphologie des organismes de la nitrification](#). *Arch. Sci. Biol.* 1, 87–137.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W. y Khanal, S.K. 2017. [Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review](#). *Aquacultural Engineering* 76, 9-19.
- Yang, H., Menz, J., Häussermann, I., Benz, M., Fujiwara, T. y Ludewig, U. 2015. [High and low affinity urea root uptake: involvement of NIP5; 1](#). *Plant and Cell Physiology* 56 (8), 1588-1597.
- Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D. y Parisi, G. 2017. [Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review](#). *Water* 9 (1), 13.
- Yogev, U., Barnes, A. y Gross, A. 2016. [Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics](#). *Water* 8 (12), 589.
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Liang, S., Wang, J. y Yan, R. 2016. [Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation](#). *Environmental Science and Pollution Research* 23 (7), 6671-6679.

6. HIDROPONÍA

6.1 Introducción a la hidroponía

6.1.1 Los principios de la hidroponía

La hidroponía es un método de cultivo de plantas sin el uso del suelo, y con los nutrientes añadidos al agua de riego (la llamada fertirrigación) (Figura 1). Las principales diferencias entre las técnicas tradicionales de cultivo en tierra y las técnicas sin suelo se refieren al uso relativo del agua y el fertilizante, y a la productividad general. La agricultura sin suelo también suele requerir menos mano de obra, soporta mejor los monocultivos que la agricultura en tierra y puede utilizarse en tierras no cultivables ([Somerville et al. 2014c](#)).

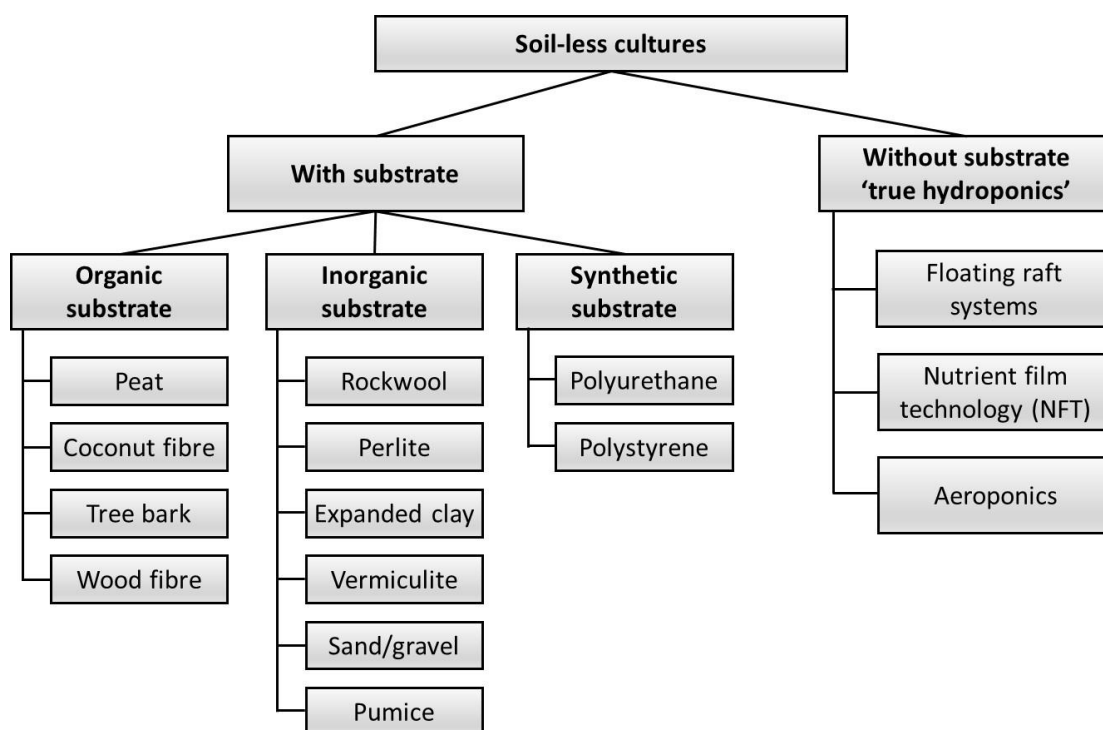


Figura 1: Clasificación de los cultivos sin suelo según el uso de sustrato o medio de cultivo. La función principal del sustrato (si se utiliza) es servir de apoyo a las plantas y proporcionar humedad y aireación.

6.1.2 Ventajas de la hidroponía

La hidroponía permite al agricultor controlar, mantener y ajustar las condiciones de crecimiento de las plantas, asegurando un equilibrio óptimo de nutrientes en tiempo real, la distribución de agua, el pH y la temperatura. Además, no hay competencia de las malas hierbas, y las plantas se benefician de un mayor control de las plagas y enfermedades. Se dice que una planta cultivada en hidroponía utiliza un 90% menos de agua que la que se utilizaría para cultivar la misma planta en el suelo ([Somerville et al. 2014c](#)). En la hidroponía el agua utilizada es la mínima necesaria para el crecimiento de las plantas,

mientras que en la agricultura subterránea se pierde agua por evaporación desde la superficie, filtración al subsuelo, escorrentía y crecimiento de malezas. Por lo tanto, la hidroponía ofrece un gran potencial para la producción de cultivos en zonas donde el agua es escasa o cara. Dado que los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas se encuentran en una solución que se entrega directamente a las raíces, la solución puede adaptarse a las necesidades de la planta en una etapa de crecimiento determinada. Por otra parte, con la agricultura en tierra, los agricultores no pueden controlar plenamente la distribución de nutrientes a las plantas debido a los complejos procesos que tienen lugar en el suelo, y puede perderse algún fertilizante por escorrentía, lo que no sólo disminuye la eficiencia, sino que también causa preocupaciones ambientales. Como las plantas cultivadas en hidroponía sumergen sus raíces directamente en la solución de nutrientes, obtienen lo que necesitan mucho más fácilmente que las plantas cultivadas en el suelo, por lo que suelen tener sistemas radiculares más pequeños y pueden desviar más energía al crecimiento de las hojas y el tallo. Como resultado, el cultivo hidropónico puede lograr entre un 5 y un 25% más de rendimiento que el cultivo en tierra ([Somerville et al. 2014c](#)).

6.1.3 Desventajas de la hidroponía

Sin embargo, también hay algunas limitaciones en los sistemas hidropónicos. El principal problema es el alto costo de instalación inicial. También son vulnerables a los cortes de energía, ya que los dispositivos eléctricos de los sistemas no pueden suministrar la solución nutritiva sin energía. Además, cuando los fitopatógenos (microorganismos como *Verticillium*, *Pythium* y *Fusarium*) contaminan las soluciones o los cultivos, las enfermedades transmitidas por el agua pueden propagarse rápidamente por todo el sistema. Los operadores de los sistemas hidropónicos necesitan conocimientos y técnicas especializadas para producir altos rendimientos de los cultivos; deben aprender las cantidades adecuadas de nutrientes e iluminación, manejar problemas nutricionales complejos, mantener el control de plagas y prevenir la formación de biopelículas en el sistema de tuberías de agua. Por último, aunque las soluciones hidropónicas ricas en nutrientes y los materiales plásticos pueden reutilizarse, los sistemas hidropónicos siguen generando una gran cantidad de desechos que pueden tener repercusiones negativas en el medio ambiente ([Lee y Lee 2015](#)).

6.2 Sistemas hidropónicos

Hay tres tipos principales de sistemas hidropónicos (véase también el módulo 1). En la hidroponía de lecho con medio, las plantas crecen en un sustrato. En los sistemas de técnica de película de nutrientes (sistema llamado NFT por sus siglas en inglés, *nutrient film technique*) las plantas crecen con sus raíces en tubos anchos alimentado con un chorro de agua. En el cultivo en aguas profundas (llamado DWC, *deep water culture*) o en los sistemas de balsa flotante (*raft*), las plantas se suspenden sobre un tanque de agua utilizando una balsa flotante. Cada tipo tiene sus ventajas y desventajas, que se examinan con más detalle a continuación. Las pruebas son algo contradictorias en cuanto a su eficiencia relativa para la producción de cultivos en los sistemas acuapónicos. [Lennard y Leonard \(2006\)](#) compararon los tres subsistemas hidropónicos para la producción de lechuga y encontraron la mayor producción en los lechos de medios de grava, seguidos por la CMA y la NFT. Sin embargo, estudios posteriores de [Pantarella et al. 2012](#) encontraron que la NFT se desempeñaba tan bien como la DWC, mientras que el lecho con sustrato tenía un rendimiento inferior en términos de rendimiento.

En cuanto al papel del diseño del componente hidropónico en el rendimiento general y el consumo de agua de los sistemas acuapónicos, un examen de la bibliografía realizado por [Maucieri et al. 2018](#) determinó que la NFT es menos eficiente que el lecho o la hidroponía de DWC, aunque los resultados no fueron inequívocos. El componente hidropónico influye directamente en la calidad del agua, que es esencial para la cría de peces, y es también la principal fuente de pérdida de agua por evapotranspiración de las plantas. Por lo tanto, el diseño del componente hidropónico influye en la sostenibilidad de todo el proceso, ya sea directamente en términos de consumo de agua y/o indirectamente en términos de costos de gestión del sistema. La elección del componente hidropónico para un sistema acuapónico también influirá en el diseño de todo el sistema. Por ejemplo, en los sistemas de lecho con medio, el sustrato suele proporcionar suficiente superficie para el crecimiento de las bacterias y la filtración, mientras que en los canales NFT la superficie es insuficiente y será necesario instalar biofiltros adicionales ([Maucieri et al. 2018](#)).

6.2.1 Hidroponía de lecho con medio/sustrato

En la hidroponía de lecho, se utiliza un medio o sustrato de crecimiento sin suelo para ayudar a las raíces a soportar el peso de la planta. El lecho de cultivo también sirve como un filtro biológico y físico. De los subsistemas hidropónicos, los lechos de cultivo tienen la filtración biológica más eficiente debido a la gran superficie en la que puede colonizar la biopelícula, que contiene bacterias nitrificantes y de otro tipo. El sustrato también captura los desechos sólidos y en suspensión de los peces y otras partículas orgánicas flotantes, aunque la eficacia de este filtro físico dependerá del tamaño de las partículas y los granos del sustrato, y del caudal del agua. Con el tiempo, las partículas orgánicas se descomponen lentamente por procesos biológicos y físicos en moléculas e iones simples que están disponibles para que las plantas los absorban ([Somerville et al. 2014b](#)).

El sustrato puede ser orgánico, inorgánico, natural o sintético (Figura 1), y está alojado en contenedores de cultivo de diferentes formas. Necesita tener una superficie adecuada y al mismo tiempo permanecer permeable al agua y al aire, permitiendo así que las bacterias crezcan, que el agua fluya y que las raíces de las plantas respiren. Debe ser no tóxico, tener un pH neutro para no afectar la calidad del agua y ser resistente al crecimiento de moho. Tampoco debe ser tan ligero como para que flote. La retención de agua, la aireación y el equilibrio del pH son aspectos que varían según el sustrato. El agua se retiene en la superficie de las partículas y en el espacio de los poros, por lo que la retención de agua está determinada por el tamaño, la forma y la porosidad de las partículas. Cuantas más pequeñas son las partículas, más cerca se agrupan, mayor es la superficie y el espacio poroso, y por lo tanto mayor es la retención de agua. Las partículas de forma irregular tienen una mayor superficie y, por lo tanto, una mayor retención de agua que las partículas lisas y redondas. Los materiales porosos pueden almacenar agua dentro de las propias partículas; por lo tanto, la retención de agua es alta. Mientras que el sustrato debe tener una buena retención de agua, también debe ser capaz de un buen drenaje. Por lo tanto, los materiales excesivamente finos deben ser evitados para prevenir la excesiva retención de agua y la falta de movimiento de oxígeno dentro del sustrato. Todos los sustratos deben ser limpiados periódicamente ([Resh 2013](#)).

Los sustratos también pueden clasificarse como granulares o fibrosos. Los sustratos granulares incluyen agregado de arcilla expandida ligera, grava, vermiculita, perlita y piedra pómez. Los sustratos fibrosos incluyen lana de roca y fibra de coco. El agua se mantiene principalmente en el espacio de

microporos de un sustrato, mientras que el rápido drenaje y la entrada de aire se ve facilitado por los macroporos ([Drzal et al. 1999](#)). Por consiguiente, es esencial una combinación adecuada de poros grandes y pequeños ([Raviv et al. 2002](#)). Los sustratos granulares tienen una alta macroporosidad (disponibilidad de aire) pero una microporosidad comparativamente baja (disponibilidad de agua), mientras que los sustratos fibrosos tienen una alta microporosidad pero una macroporosidad comparativamente baja.

El [agregado de arcilla expandida liviana \(LECA\)](#) es muy liviano comparado con otros sustratos, lo que lo hace ideal para la acuaponía de techo. Se presenta en una variedad de tamaños; los tamaños más grandes con diámetros de 8-20 mm se recomiendan para la acuaponía ([Somerville et al. 2014](#)). Los espacios porosos más grandes (macroporosidad) significan una mejor percolación de la solución a través del sustrato y un mejor suministro de aire, incluso cuando las biopelículas cubren las superficies. Sin embargo, LECA tiene microporos pequeños, y por lo tanto no tiene una buena capacidad de retención de agua.

La [grava volcánica](#) (turba) tiene una relación superficie/volumen muy alta que proporciona un amplio espacio para que las bacterias puedan colonizar, y es casi químicamente inerte, excepto por pequeñas liberaciones de microelementos como el hierro y el magnesio y la absorción de iones de fosfato y potasio en los primeros meses. El tamaño recomendado de la grava volcánica es de 8 a 20 mm de diámetro. Es probable que la grava más pequeña se obstruya con desechos sólidos, mientras que la grava más grande no ofrece la superficie o el apoyo vegetal necesarios ([Somerville et al. 2014b](#)).

La [grava caliza](#) no se recomienda como sustrato, aunque a veces se utiliza. La piedra caliza tiene una relación superficie/volumen inferior a la de la grava volcánica, es comparativamente pesada y no es inerte. La piedra caliza está compuesta principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3), que se disuelve en el agua. Por lo tanto, sólo debe utilizarse cuando las fuentes de agua son muy bajas en alcalinidad o en acidez. No obstante, una pequeña adición de caliza puede ayudar a contrarrestar el efecto acidificante de las bacterias nitrificantes, lo que puede compensar la necesidad de una amortiguación regular del agua en sistemas acuapónicos bien equilibrados ([Somerville et al. 2014b](#)).

La [vermiculita](#) es un mineral micáceo que se expande cuando se calienta por encima de 1000 °C. El agua se convierte en vapor, formando pequeños granos porosos y esponjosos. La vermiculita es muy ligera y puede absorber grandes cantidades de agua. Químicamente, es un silicato hidratado de magnesio, aluminio y hierro. Es neutro en reacción con buenas propiedades de amortiguación, y tiene una capacidad de intercambio catiónico relativamente alta, por lo que puede mantener los nutrientes en reserva y liberarlos posteriormente. También contiene algo de magnesio y potasio, que está disponible para las plantas ([Resh 2013](#)).

La [perlita](#) es un material silíceo de origen volcánico, extraído de los flujos de lava. Se calienta hasta 760 °C, que convierte la pequeña cantidad de agua en vapor, expandiendo así las partículas a pequeños granos esponjosos. La perlita es muy liviana y aguantará de tres a cuatro veces su peso de agua. Es esencialmente neutra, con un pH de 6,0-8,0, pero sin capacidad de amortiguación; a diferencia de la vermiculita, no tiene capacidad de intercambio catiónico y no contiene nutrientes menores. No debe utilizarse sola, sino mezclada con otro sustrato para mejorar el drenaje y la aireación y así evitar la acumulación de nutrientes y los consiguientes problemas de toxicidad, proporcionando al mismo tiempo un entorno rico en oxígeno para que las raíces prosperen ([Resh 2013](#)).

La piedra [pumice o pómez](#), al igual que la perlita, es un material silíceo de origen volcánico y tiene esencialmente las mismas propiedades. Sin embargo, es el mineral en bruto después de su trituración

y cribado, sin ningún proceso de calentamiento, y por lo tanto es más pesado y no absorbe agua tan fácilmente, ya que no ha sido hidratado ([Resh 2013](#)).

La [lana de roca](#) está hecha de roca basáltica que se funde en hornos a una temperatura de 1500 °C. El basalto líquido es entonces hilado en hilos y comprimido en paquetes de lana que son cortados en tablas, bloques o tapones. La mayor parte de la rápida expansión de la industria de los invernaderos en las últimas dos décadas ha sido con el cultivo de lana de roca. Sin embargo, en los últimos años se han planteado preocupaciones sobre su eliminación, ya que no se descompone en los vertederos. Ahora muchos cultivadores están usando un sustrato más sostenible: la fibra de coco ([Resh 2013](#)).

La [fibra de coco](#) (o bonote) es un sustrato orgánico derivado de las cáscaras de coco deshinchadas y molidas. Tiene un pH cercano al neutro y retiene el agua mientras permite una buena cantidad de oxígeno para las raíces ([Resh 2013](#)).

Tabla 1: Características de los diferentes medios de cultivo (de [Somerville et al. 2014b](#))

Sustrato	Superficie (m ² /m ³)	pH	Coste	Peso	Vida útil	Retención de agua	Soporte para plantas
Grava caliza	150-200	Básico	Bajo	Pesado	Largo	Pobre	Excelente
Grava Volcánica	300-400	Neutral	Medio	Medio	Largo	Medio-Pobre	Excelente
Pómez	200-300	Neutral	Medio-Alto	Ligero	Largo	Medio	Medio-Pobre
LECA	250-300	Neutral	Alto	Ligero	Largo	Medio-Pobre	Medio
Fibra coco	200-400 (variable)	Neutral	Bajo-Medio	Ligero	Corto	Alto	Medio

Dependiendo del tipo de sustrato, ocupará aproximadamente el 30-60 por ciento del volumen total de la cama de medios. La profundidad del lecho de cultivo es importante porque controla la cantidad de volumen del espacio radicular en la unidad, lo que a su vez determina los tipos de vegetales que se pueden cultivar. Las grandes hortalizas frutales como los tomates, el quimbombó y el repollo necesitarán una profundidad de sustrato de 30 cm para permitir un espacio suficiente para las raíces y para evitar el enmarañamiento de las raíces y las deficiencias de nutrientes. Las hortalizas de hoja verde pequeñas sólo requieren 15-20 cm de profundidad de sustrato ([Somerville et al. 2014b](#)).



Figura 2: Trasplantes de tomate que crecen en un sistema de contenedores de lecho medio con riego por goteo y sustrato LECA

(https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hydroponics#/media/File:Hydroponic_Farming.jpg)

Hay diferentes técnicas para llevar agua enriquecida con nutrientes a los lechos con medio. Puede ser simplemente goteada desde goteadores conectados a tuberías uniformemente distribuidas en el medio (ver Figura 2). Alternativamente, un método llamado inundación y drenaje (o flujo y refluo) hace que los lechos de los medios se inunden periódicamente con agua que luego se drena de nuevo a un depósito. La alternancia entre la inundación y el drenaje asegura que las plantas tengan nutrientes frescos y un flujo de aire adecuado en la zona de las raíces, lo que repone los niveles de oxígeno. También asegura que haya suficiente humedad en el lecho en todo momento para que las bacterias puedan prosperar en sus condiciones óptimas. La naturaleza de un lecho de medios de inundación y drenaje crea tres zonas separadas que se diferencian por su contenido de agua y oxígeno ([Somerville et al. 2014b](#)):

- La zona superior de 2 a 5 cm es la zona seca, que funciona como una barrera de luz, minimizando la evaporación e impidiendo que la luz golpee directamente el agua, lo que puede dar lugar al crecimiento de algas. También impide el crecimiento de hongos y bacterias nocivas en la base del tallo de la planta, que pueden causar la putrefacción del cuello y otras enfermedades.
- La [zona seca/húmeda](#) tiene tanto humedad como un alto intercambio de gases. Esta es la zona de 10-20 cm donde el lecho medio se inunda y drena intermitentemente. Si no se utilizan técnicas de inundación y drenaje, esta zona será el camino por el que el agua fluye a través del medio. La mayor parte de la actividad biológica se produce en esta zona.
- La [zona húmeda](#) es la parte inferior de 3 a 5 cm del lecho que permanece permanentemente húmeda. En esta zona se acumulan los desechos sólidos de pequeñas partículas y, por lo tanto, también se encuentran aquí los organismos más activos en la mineralización, incluidas las bacterias heterótrofas y otros microorganismos que descomponen los desechos en fracciones y moléculas más pequeñas que pueden ser absorbidas por las plantas a través del proceso de mineralización ([Somerville et al. 2014b](#)).

6.2.2 Técnica de película de nutrientes (NFT)

NFT es un sistema de cultivo de soluciones donde una fina película (de dos a tres milímetros de profundidad) fluye continuamente a lo largo de la base de los pequeños canales en los que se asientan los sistemas de raíces. Con la NFT, el objetivo es que parte de la estera de raíces en desarrollo esté en el flujo de nutrientes, pero las otras raíces están suspendidas por encima de esto en el aire húmedo, accediendo al oxígeno sin estar sumergidas ([Somerville et al. 2014b](#)).



Figura 3: Sistema de tuberías redondas NFT

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroponics_\(33185459271\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroponics_(33185459271).jpg)



Figura 4: Sistema de tuberías NFT rectangular

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroponics_\(33185459271\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroponics_(33185459271).jpg)

Los canales suelen tener forma de tubos (Figura 3). Las tuberías de sección rectangular (Figura 4) son las mejores, con una anchura mayor que la altura, ya que esto significa que un mayor volumen de agua llega a las raíces, aumentando así la absorción de nutrientes y el crecimiento de las plantas. Las hortalizas frutales de mayor tamaño y los policultivos (que cultivan diferentes tipos de hortalizas) requieren tubos más grandes que los necesarios para las hortalizas de hoja verde de crecimiento rápido y las hortalizas pequeñas con pequeñas masas de raíces. La longitud del tubo puede variar, pero hay que tener en cuenta que las deficiencias de nutrientes pueden producirse en las plantas hacia

el final de tubos muy largos porque las primeras plantas ya han despojado de los nutrientes (Figura 5). Se deben utilizar tubos blancos, ya que el color refleja los rayos del sol, manteniendo así el interior de los tubos fresco. Los canales deben colocarse en una pendiente (Figura 5) para que la solución de nutrientes fluya a una buena tasa de flujo, que para la mayoría de los sistemas es de alrededor de un litro por minuto ([Somerville et al. 2014a](#)).



Figura 5: Canales NFT inclinados. El canal del NFT tiene 12,5 m de largo y se alimentó con agua de la pecera adyacente. No se le suministraron nutrientes. Se puede observar la creciente limitación de nutrientes a lo largo del canal

Los sistemas de NFT se utilizan principalmente para producir cultivos de rotación rápida como lechuga, hierbas, fresas, verduras verdes, forraje y microverduras.

6.2.3 Cultivo en aguas profundas (DWC)

El DWC o sistema de balsa flotante es un tipo de sistema hidropónico en el que las plantas se suspenden sobre un tanque utilizando una balsa flotante, y las raíces se sumergen en una solución de nutrientes y se airean mediante una bomba de aire. Sin embargo, a diferencia de los sistemas NFT, en los que los nutrientes de la pequeña película de agua que fluye a nivel de las raíces se agotan rápidamente, el gran volumen de agua que contienen los canales de la DWC permite que las plantas utilicen cantidades considerables de nutrientes. Por lo tanto, la longitud de los canales no es un problema, y pueden variar desde uno a diez metros. La profundidad recomendada es de 30 cm para permitir un espacio adecuado para las raíces de las plantas, aunque las plantas de hoja pequeña, como la lechuga, sólo requieren una profundidad de 10 cm o incluso menos. El caudal de agua que entra en cada canal es relativamente bajo, y por lo general cada canal tiene un tiempo de retención (la cantidad de tiempo que toma reemplazar toda el agua en un recipiente) de 1 a 4 horas. Esto permite una reposición adecuada de nutrientes en cada canal, aunque el volumen de agua y la cantidad de nutrientes en los canales profundos es suficiente para nutrir las plantas durante períodos más largos ([Somerville et al. 2014b](#)). Por otra parte, podría ser necesaria una aireación adicional, porque las tasas de flujo no son lo suficientemente altas para proporcionar suficiente oxígeno.

Algunas plantas, como la lechuga, prosperan en el agua y se cultivan comúnmente utilizando el cultivo en aguas profundas. La CMA es el método más común para las grandes operaciones comerciales que cultivan un cultivo específico (típicamente lechuga, hojas de ensalada o albahaca), y es más adecuado para la mecanización.



Figura 6: Albahaca y otras plantas que crecen en el sistema de DWC en el invernadero de CDC South Aquaponics en Brooks, Alberta
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CDC_South_Aquaponics_Raft_Tank_1_2010-07.jpg)

6.2.4 Aeroponía

En los sistemas aeropónicos, las plantas crecen y se nutren suspendiendo sus estructuras radicales en el aire y rociándolas regularmente con una solución nutritiva. Hay dos tipos principales de sistemas aeropónicos: los aeropónicos de alta presión y los aeropónicos de baja presión, cuya principal diferencia es el tamaño de las gotas de la niebla utilizada en cada caso. Los aeropónicos de baja presión utilizan bombas de baja presión y alto caudal, mientras que los aeropónicos de alta presión utilizan bombas de alta presión (alrededor de 120 PSI) y bajo caudal para atomizar el agua y crear gotas de agua de 50 micrones o menos. En el caso de la niebla extremadamente fina que se asemeja a la niebla, el término "fogponics" se utiliza para denotar un tercer tipo de sistema aeropónico. Las plantas que crecen utilizando un sistema aeropónico tienden a crecer más rápidamente que las que crecen en otros tipos de sistemas hidropónicos debido a su amplia exposición al aumento del oxígeno ([Li et al. 2018](#)).

6.3 Anatomía y fisiología de las plantas y necesidades de cultivo

6.3.1 Anatomía de plantas

La anatomía de las plantas describe la estructura y organización de las células, tejidos y órganos de las plantas en relación con su desarrollo y función. Las plantas con flores están compuestas por tres órganos vegetativos: i) las raíces, que funcionan principalmente para proporcionar anclaje, agua y nutrientes, y para almacenar azúcares y almidón; ii) los tallos, que proporcionan apoyo; y iii) las hojas, que producen sustancias orgánicas mediante la fotosíntesis. Las raíces crecen hacia abajo en respuesta a la gravedad. En general, una planta de semillero produce una raíz primaria que crece directamente hacia abajo y da lugar a raíces laterales secundarias. Éstas pueden producir raíces terciarias, que a su vez pueden ramificarse, y el proceso continúa casi indefinidamente. El crecimiento se produce en la

punta o ápice de la raíz, que está protegida por una tapa de la raíz. Las raíces crecen y se ramifican continuamente, en su búsqueda de minerales y agua. La eficacia de la raíz como órgano absorbente depende de su superficie de absorción en relación con su volumen, que se crea por los pelos de la raíz y el complejo sistema de ramas.

La Figura 7 ilustra la anatomía básica de una planta. El hipocótilo es la porción del tallo que en su base se une a la raíz. En el otro extremo del tallo está el brote terminal, o brote apical, que es el punto de crecimiento. El tallo se divide normalmente en nodos e internodos. Los nódulos sostienen una o más hojas, que están unidas al tallo por peciolo, así como las yemas que pueden crecer en ramas con hojas o flores. Los internodos distancian un nodo de otro. El tallo y sus ramas permiten que las hojas se arreglen para maximizar la exposición a la luz solar, y las flores se arreglen para atraer mejor a los polinizadores. Las ramas surgen de la actividad de los brotes apicales y axilares. La dominancia apical se produce cuando el ápice del brote inhibe el crecimiento de los brotes laterales para que la planta pueda crecer verticalmente. Los brotes, que llevan las hojas, las flores y los frutos, crecen hacia una fuente de luz. Las hojas suelen contener pigmentos y son los lugares de la fotosíntesis (véase 4.3.2.1). Las hojas también contienen estomas, poros por los que sale el agua y a través de los cuales se produce el intercambio de gases (entrada de dióxido de carbono y salida de oxígeno).

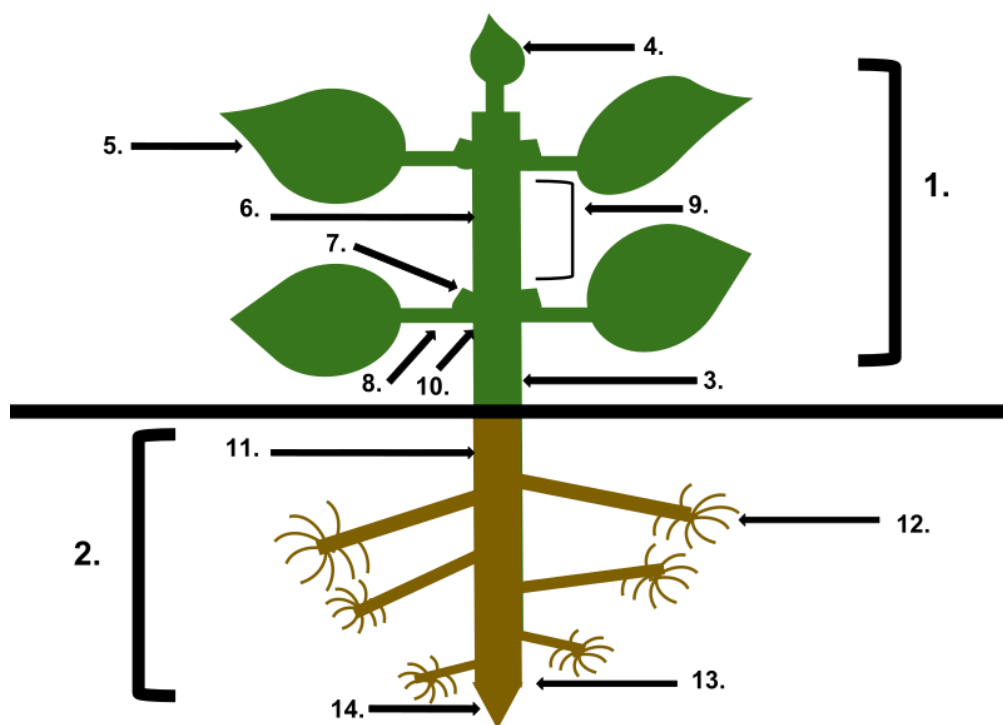


Figura 7: Anatomía de una planta. 1. El Sistema de brotes. 2. El Sistema Raíces. 3. Hipocótilo. 4. Brote terminal. 5. Lámina de la hoja. 6. El Internodo. 7. Brote axilar. 8. Nodo. 9. Tallo. 10. Petiole. 11. Raíz. 12. Pelos de raíz. 13. Punta de la raíz. 14. Tapa de la raíz.

https://en.wikipedia.org/wiki/Plant_anatomy#/media/File:Plant_Anatomy.svg

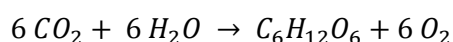
6.3.2 Fisiología de las plantas

La fisiología de las plantas es un tema muy amplio que abarca procesos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración, la nutrición de las plantas, las funciones hormonales de las plantas, los tropismos, el fotoperiodismo, la fotomorfogénesis, los ritmos circadianos, la fisiología del estrés

ambiental, la germinación de las semillas, la inactividad, la función estomática y la transpiración. Aquí nos centraremos en los procesos fisiológicos más importantes y en cómo se ven afectados por las condiciones de crecimiento.

Fotosíntesis

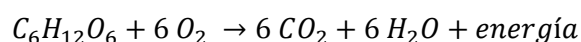
Todas las plantas verdes generan su propia comida usando la fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso por el cual las plantas son capaces de utilizar la luz para producir energía y carbohidratos a través de la fijación de CO_2 :



Aunque la fotosíntesis se produce en todas las partes verdes de una planta, el sitio principal para este proceso es la hoja. Pequeños orgánulos llamados cloroplastos contienen clorofila, un pigmento que utiliza la energía de la luz solar para crear moléculas de azúcar de alta energía como la glucosa. Una vez creadas, las moléculas de azúcar se transportan por toda la planta donde se utilizan para todos los procesos fisiológicos como el crecimiento, la reproducción y el metabolismo. La fotosíntesis requiere luz, dióxido de carbono y agua.

Respiración

El proceso de respiración en las plantas implica el uso de los azúcares producidos durante la fotosíntesis más el oxígeno para producir energía para el crecimiento de las plantas:



Mientras que la fotosíntesis tiene lugar sólo en las hojas y tallos, la respiración se produce en todas las partes de la planta. Las plantas obtienen el oxígeno del aire a través de las estomas, y la respiración tiene lugar en las mitocondrias de la célula en presencia de oxígeno. La respiración de la planta ocurre 24 horas al día, pero la respiración nocturna es más evidente ya que el proceso de fotosíntesis cesa. Durante la noche, es muy importante que la temperatura sea más fresca que durante el día porque esto reduce la tasa de respiración, y así permite a las plantas acumular glucosa y sintetizar otras sustancias a partir de ella que son necesarias para el crecimiento de la planta. Las altas temperaturas nocturnas provocan altas tasas de respiración, lo que podría resultar en daños en las flores y en un pobre crecimiento de la planta.

Osmosis y plasmólisis

La ósmosis es el proceso por el cual el agua entra en las raíces de la planta y se desplaza a sus hojas (Figura 8). En la mayoría de los suelos, pequeñas cantidades de sales se disuelven en grandes cantidades de agua. Por el contrario, las células de las plantas contienen menores cantidades de agua en las que se concentran sales, azúcares y otras sustancias. Durante la ósmosis, las moléculas de agua intentan igualar su concentración a ambos lados de las membranas celulares. Así, cuando el agua se mueve desde el suelo, donde es más abundante, "busca" diluir la solución en las células. El agua que entra en una célula se almacena en una gran vacuola central. Cuando una célula se vuelve turgente (totalmente inflada) la velocidad de absorción de agua se reduce. La turgencia de la célula da firmeza a los tejidos llenos de agua. La diferencia entre las hojas de lechuga crujientes y marchitas ilustra la naturaleza de las células turgentes y no turgentes (flácidas). La mayoría de las especies de plantas se

marchitan en suelos en los que se han acumulado cantidades importantes de sales, incluso cuando hay agua suficiente. Esos suelos salinos tienen un contenido de agua inferior al de las células de las raíces, por lo que éstas pierden agua al invertirse la dirección del flujo osmótico. Este proceso se denomina plasmólisis. Una célula comienza a encogerse sin el agua interna adecuada. Después de una pérdida de agua prolongada, la célula comienza a colapsar sin ningún tipo de agua interna de apoyo. El colapso celular completo es raramente reversible. Cuando las células comienzan a colapsar por la pérdida de agua, la planta suele estar condenada porque sus células mueren.

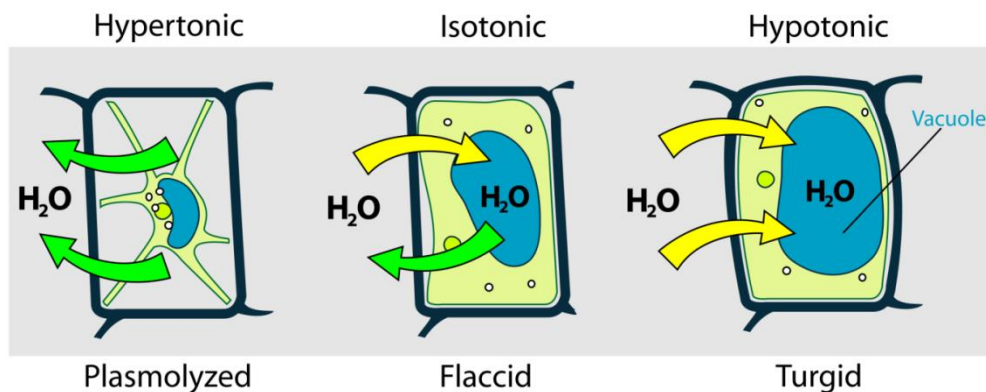


Figura 8: Presión de la turgencia en las células de la planta

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turgor_pressure_on_plant_cells_diagram.svg

Transpiración

La transpiración es la pérdida de agua de una planta en forma de vapor de agua. Esta agua es reemplazada por la absorción adicional de agua a través de las raíces, dando lugar a una columna continua de agua dentro de la planta. El proceso de transpiración proporciona a la planta enfriamiento por evaporación, nutrientes, entrada de dióxido de carbono y agua para proporcionar la estructura de la planta. Cuando una planta está transpirando, sus estomas están abiertos, permitiendo el intercambio de gases entre la atmósfera y la hoja. Las estomas abiertas permiten que el vapor de agua salga de la hoja, pero también permiten que entre el dióxido de carbono (CO_2), necesario para la fotosíntesis. La temperatura influye en gran medida en la tasa de transpiración. A medida que la temperatura del aire aumenta, la capacidad de retención de agua de ese aire aumenta bruscamente. Por lo tanto, el aire más caliente aumentará la fuerza motriz de la transpiración, mientras que el aire más frío la disminuirá.

Fototropismo

El fototropismo es una respuesta direccional que permite a las plantas crecer hacia, o en algunos casos lejos de, una fuente de luz. El fototropismo positivo es el crecimiento hacia una fuente de luz; el fototropismo negativo es el crecimiento lejos de la luz. Los brotes, o las partes de las plantas que están por encima del suelo, generalmente muestran un fototropismo positivo. Esta respuesta ayuda a las partes verdes de la planta a acercarse a una fuente de energía lumínica, que luego puede ser utilizada para la fotosíntesis. Las raíces, por otro lado, tenderán a crecer lejos de la luz. La hormona que controla el fototropismo es la auxina. Su principal función es estimular el aumento de la longitud de las células, especialmente cerca del tallo y las puntas de las raíces. En los tallos iluminados desde arriba, las células experimentan iguales tasas de alargamiento, lo que resulta en un crecimiento vertical. Pero cuando se iluminan desde un lado, los tallos cambian de dirección porque la auxina se acumula en el lado

sombreado, haciendo que las células de allí crezcan más rápido que las que están hacia la luz. Por lo tanto, el fototropismo puede hacer que las plantas crezcan altas y delgadas al estirarse y doblarse para encontrar una fuente de luz adecuada.

Fotoperiodismo

El fotoperiodismo es la regulación de la fisiología o el desarrollo en respuesta a la longitud del día, que permite a algunas especies de plantas florecer - cambiar al modo de reproducción - sólo en ciertas épocas del año. Las plantas generalmente se clasifican en tres categorías de fotoperiodo: plantas de día largo, plantas de día corto y plantas de día neutro. El efecto del fotoperiodismo en las plantas no se limita a cuándo van a florecer. También puede afectar el crecimiento de las raíces y los tallos, y la pérdida de hojas (abscisión) durante las diferentes estaciones. Las plantas de día largo generalmente florecen durante los meses de verano cuando las noches son cortas. Ejemplos de plantas de días largos son las coles, lechugas, cebollas y espinacas. Por otro lado, las plantas de día corto florecen durante las estaciones que tienen períodos más largos de noche. Requieren una cantidad continua de oscuridad antes de que pueda comenzar el desarrollo de las flores. Las fresas son plantas de día corto. La floración de algunas plantas, llamadas plantas de día, no está conectada a un fotoperíodo en particular. Entre ellas se incluyen los chiles, los pepinos y los tomates. Los cultivadores comerciales pueden aprovechar el conocimiento sobre el fotoperíodo de una planta manipulándola para que florezca antes de que lo haga de forma natural. Por ejemplo, se puede obligar a las plantas a florecer exponiéndolas o restringiendo su acceso a la luz, y luego se las puede manipular para que produzcan frutos o semillas fuera de su temporada habitual ([Rauscher 2017](#)).

6.3.3 Requerimientos de cultivo

Los principales factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas son: luz, agua, dióxido de carbono, nutrientes (ver Capítulo 5), temperatura y humedad relativa. Estos afectan las hormonas de crecimiento de la planta, haciendo que la planta crezca más rápido o más lentamente.

Luz

La transmisión de la luz, en la cantidad y calidad apropiadas, es crucial para una óptima fotosíntesis, crecimiento y rendimiento. El sol produce fotones con un amplio rango de longitudes de onda (Figura 9): UVC 100-280 nanómetros (nm), UVB 280-315 nm, UVA 315-400 nm, radiación visible o fotosintéticamente activa (PAR) 400-700 nm, rojo lejano 700-800 nm, e infrarrojo 800-4000 nm. Dentro del rango visible del espectro, las bandas de onda pueden dividirse en colores: azul 400-500 nm, verde 500-600 nm, y rojo 600-700 nm.

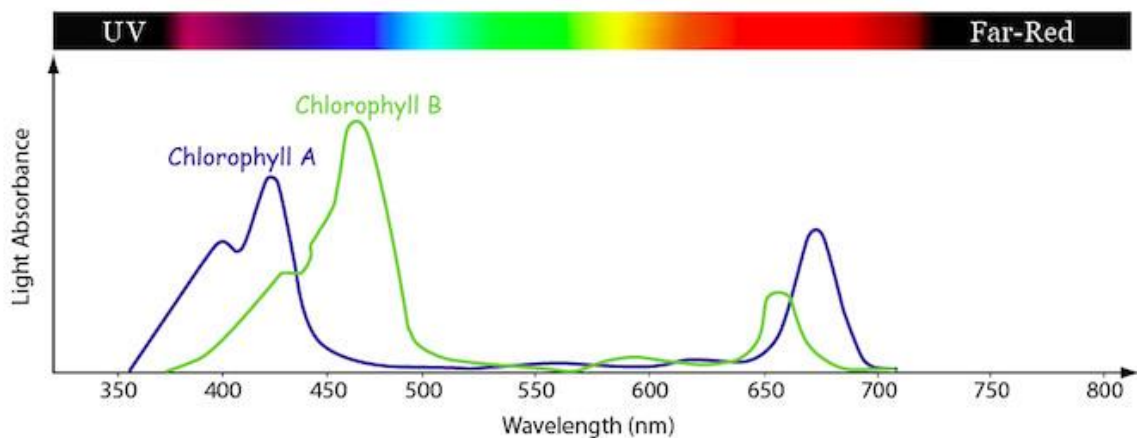


Figura 9: Espectro de absorción de la clorofila
<https://www.flickr.com/photos/145301455@N07/29979758460>

Hay dos tipos diferentes de clorofila - la clorofila a y la clorofila b. La clorofila a es el pigmento fotosintético más común y absorbe longitudes de onda azules, rojas y violetas en el espectro visible. Participa principalmente en la fotosíntesis oxigenada en la que el oxígeno es el principal subproducto del proceso. La clorofila b absorbe principalmente la luz azul y se utiliza para complementar el espectro de absorción de la clorofila a ampliando el rango de longitudes de onda de luz que un organismo fotosintético es capaz de absorber. Ambos tipos de clorofila funcionan en conjunto para permitir la máxima absorción de la luz en el espectro del azul al rojo.

Las respuestas de las plantas a la luz han evolucionado para ayudar a las plantas a aclimatarse a una amplia variedad de condiciones de luz. Todas las plantas responden de manera diferente a las condiciones de luz alta y baja, pero algunas especies están adaptadas para funcionar de manera óptima bajo el pleno sol, mientras que otras prefieren más sombra. En la oscuridad, las plantas respiran y producen CO₂. A medida que la intensidad de la luz aumenta, la tasa de fotosíntesis también aumenta, y a una cierta intensidad de luz (el punto de compensación de la luz), la tasa de respiración es igual a la tasa de fotosíntesis (no hay absorción neta o pérdida de CO₂). Además de la intensidad de la luz, el color de la luz también influye en la tasa de fotosíntesis. Las plantas son capaces de utilizar longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm para la fotosíntesis. Esta banda de onda se llama radiación fotosintéticamente activa (PAR) ([Davis 2015](#)).

La cantidad de luz disponible para las plantas es muy variable en todo el mundo y a través de las estaciones. Por ejemplo, a bajas elevaciones solares la luz debe pasar a través de un mayor volumen de la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre, lo que provoca cambios en el espectro, ya que la atmósfera filtra proporcionalmente más de la longitud de onda más corta de la luz, por lo que filtra más UV que el azul, y más azul que el verde o el rojo. Los cambios en la composición espectral con la estación y la ubicación influyen en las respuestas de la luz de las plantas ([Davis 2015](#)).

Agua

La disponibilidad de muchos nutrientes depende del pH del agua. En general, el rango de tolerancia para la mayoría de las plantas es de pH 5,5-7,5. Si el pH se sale de este rango, las plantas experimentan un bloqueo de nutrientes, lo que significa que aunque los nutrientes están presentes en el agua, las plantas no pueden utilizarlos. Esto es especialmente cierto para el hierro, el calcio y el magnesio. Sin

embargo, hay pruebas de que el bloqueo de nutrientes es menos común en los sistemas acuapónicos maduros que en la hidroponía, porque la acuaponía es un ecosistema entero, mientras que la hidroponía es un sistema semi-estéril. En consecuencia, en los sistemas acuapónicos se producen interacciones biológicas entre las raíces de las plantas, las bacterias y los hongos que pueden permitir la absorción de nutrientes incluso a niveles superiores al pH 7,5. Sin embargo, lo mejor es tratar de mantener un pH ligeramente ácido (6-7), pero comprender que un pH más alto (7-8) también puede funcionar ([Somerville et al. 2014c](#)).

La mayoría de las plantas necesitan altos niveles ($> 3\text{mg/L}$) de oxígeno disuelto (DO) en el agua. Este oxígeno facilita a la planta el transporte de nutrientes a través de las superficies de sus raíces y su internalización. Sin él, las plantas pueden experimentar la putrefacción de las raíces, donde éstas mueren y crecen los hongos. Además, muchos patógenos de las raíces de las plantas operan a bajos niveles de oxígeno disuelto, por lo que si el agua tiene poco oxígeno, puede dar a estos patógenos la oportunidad de atacar las raíces ([Pantarella 2012](#)).

El rango ideal de temperatura del agua para la mayoría de las hortalizas es de 14-22 °C, aunque las temperaturas óptimas de crecimiento varían entre las diferentes especies de plantas (ver Capítulo 7). En general, es la temperatura del agua la que tiene el mayor efecto sobre las plantas, más que la temperatura del aire. Las bacterias y otros microorganismos que habitan en los sistemas acuapónicos también tienen un rango de temperatura preferido. Por ejemplo, las bacterias de nitrificación que convierten el amoníaco en nitrato prefieren una temperatura media de aproximadamente 20 °C ([Pantarella 2012](#); [Somerville et al. 2014c](#)).

Dióxido de carbono (CO_2)

Durante la fotosíntesis, las plantas usan CO_2 para hacer comida, y como resultado liberan oxígeno. El aumento de las concentraciones de CO_2 incrementa la fotosíntesis, estimulando el crecimiento de las plantas. El aire fresco contiene CO_2 en aproximadamente 0,037%, pero en un invernadero o sala de cultivo bien cerrada, el CO_2 ambiental puede agotarse rápidamente. Por ejemplo, en un invernadero de plástico, los niveles de CO_2 pueden reducirse a menos del 0,02 % sólo 1-2 horas después del amanecer. A niveles inferiores al 0,02%, el crecimiento de las plantas se verá muy limitado, y a niveles inferiores al 0,01%, las plantas dejarán de crecer por completo. Al aumentar los niveles de CO_2 a 0,075-0,15%, los cultivadores pueden esperar un aumento del 30-50% en los rendimientos sobre los niveles de CO_2 del ambiente, y el tiempo para la fructificación y la floración puede reducirse en 7-10 días. Sin embargo, los niveles excesivos de enriquecimiento de CO_2 pueden tener efectos adversos. Los niveles por encima del 0,15% se consideran un desperdicio, mientras que los niveles por encima del 0,5% son perjudiciales. Los niveles excesivos provocarán el cierre de las estomas de las hojas de la planta, deteniendo temporalmente la fotosíntesis, y dado que las plantas ya no son capaces de transpirar el vapor de agua adecuadamente cuando las estomas están cerrados, las hojas pueden quemarse.

Temperatura

La temperatura es el principal factor ambiental que influye en los procesos de crecimiento vegetativo de las plantas desde las etapas iniciales de desarrollo hasta la formación de las flores. Cada especie de planta tiene su propia gama de temperatura óptima. Las plantas "buscan" alcanzar su temperatura óptima, y un equilibrio entre la temperatura del aire, la humedad relativa y la luz es importante en esto. Si los niveles de luz son altos, la planta se calentará, lo que dará lugar a una diferencia entre la temperatura de la planta y la temperatura del aire. Para enfriarse, la tasa de transpiración de la planta debe aumentar. Las temperaturas muy bajas o altas en el entorno de crecimiento pueden ser perjudiciales para varios procesos metabólicos como la absorción de nutrientes, la formación de

clorofila y la fotosíntesis. En general, se sabe que un aumento o disminución de la temperatura por encima o por debajo del nivel óptimo altera varios procesos fisiológicos de las plantas y daña las células vegetales, alterando así el crecimiento.

Humedad relativa

La humedad relativa (HR) es la cantidad de vapor de agua presente en el aire expresada como un porcentaje de la cantidad necesaria para la saturación a la misma temperatura. La humedad relativa influye directamente en las relaciones hídricas de una planta e indirectamente afecta al crecimiento de las hojas, la fotosíntesis y la aparición de enfermedades. Bajo una HR alta la tasa de transpiración se reduce, la presión de la turgencia es alta, y las células de las plantas crecen. Cuando la HR es baja, la transpiración aumenta, causando déficits de agua en la planta que pueden resultar en la marchitez de la planta. Los déficits de agua causan el cierre parcial o total de las estomas, bloqueando así la entrada de dióxido de carbono e inhibiendo la fotosíntesis. La incidencia de plagas y enfermedades de insectos es elevada en condiciones de alta humedad, y la elevada HR también favorece la fácil germinación de esporas de hongos en las hojas de las plantas.

6.4 Prácticas generales de cultivo

La plantación escalonada permite la cosecha y el trasplante continuos de vegetales. Es mejor tener un exceso de plantas listas para entrar en el sistema, ya que esperar a que las plántulas estén listas para el trasplante es una fuente de retraso en la producción. La programación de los cultivos se trata con más detalle en el capítulo 7.

6.4.1 Trasplantes a partir de semillas

La recolección de semillas de plantas en crecimiento es una importante estrategia sostenible y de ahorro de costos, excepto cuando se cultivan plantas híbridas F1 (véase más abajo). Las semillas sólo deben recogerse de las plantas maduras, ya que las semillas de las plantas jóvenes no germinarán y las plantas viejas ya habrán dispersado sus semillas. La recolección de semillas de varias plantas diferentes ayudará a conservar la diversidad genética y las plantas sanas. Hay dos categorías principales de semillas: vainas de semillas secas y vainas de semillas húmedas. Las vainas de semillas secas incluyen la albahaca, la lechuga y el brócoli. Las semillas de albahaca pueden cosecharse durante toda la temporada de crecimiento, mientras que la lechuga y el brócoli sólo pueden cosecharse después de que la planta esté completamente madura y ya no pueda utilizarse como verdura. Las cabezas de las semillas deben ser cortadas de la planta y almacenadas en una gran bolsa de papel durante 3-5 días en un lugar fresco y oscuro, y luego se agitan ligeramente para liberar las semillas. Después de pasar el contenido de la bolsa a través de un tamiz, las semillas deben colocarse en una bolsa de papel para su almacenamiento ([Somerville et al. 2014a](#)).

Las vainas de semillas húmedas incluyen pepinos, tomates y pimientos. Las semillas se desarrollan dentro del fruto, normalmente recubiertas por un saco de gel que impide la germinación de las semillas. Cuando los frutos están listos para ser cosechados, lo que suele indicarse por un color fuerte y vibrante, se debe retirar el fruto de la planta y recoger las semillas con una cuchara. Una vez que se haya lavado el gel con agua y un paño liso, las semillas deben colocarse a la sombra para que se sequen y se volteen de vez en cuando, antes de guardarlas en una bolsa de papel ([Somerville et al. 2014a](#)).

La mayoría de los trasplantes de hortalizas comerciales se producen a partir de semillas híbridas F1, que se crean por medio de la polinización controlada de dos plantas parentales genéticamente distintas. Se prefiere la semilla F1 porque la mayoría de las plantas tendrán las mismas características y producirán la misma calidad y cantidad de frutos. Las semillas F1 también producen plantas con flores y frutos más grandes y vigorosos. Por lo tanto, los híbridos son más robustos y más capaces de superar condiciones de crecimiento adversas. Sin embargo, las semillas guardadas de las plantas híbridas F1 no producirán plantas fieles al tipo parental ([Rorabaugh 2015](#)).

Las semillas pueden plantarse en bandejas de propagación de poliestireno llenas de medios de cultivo como lana de roca, vermiculita o perlita. Para el cultivo comercial, las semillas se suelen iniciar en bloques de lana de roca o de coco, que son cubos de arranque de dos centímetros y medio con un pequeño agujero en la parte superior de cada cubo en el que se coloca la semilla. Los cubos de arranque pueden entonces trasplantarse a bloques más grandes que tengan un agujero de 2,5 cm para que el cubo de arranque encaje en ellos, minimizando así la alteración de las raíces ([Rorabaugh 2015](#)).

Las bandejas de propagación deben permitir una distancia adecuada entre las plántulas para favorecer un buen crecimiento sin competencia por la luz. Las bandejas deben colocarse en una zona sombreada y los plantones deben regarse cada día. Demasiada agua aumenta la amenaza de infecciones por hongos. Después de la germinación y la brotación, y cuando aparecen las primeras hojas, las plántulas pueden endurecerse colocándolas bajo una luz solar cada vez más intensa durante unas horas cada día. Las plántulas deben crecer durante al menos dos semanas después de la aparición de la primera hoja para asegurar un adecuado crecimiento de las raíces. Se pueden fertilizar una vez por semana con un fertilizante orgánico suave con alto contenido de fósforo a fin de fortalecer sus raíces ([Somerville et al. 2014c](#)).

Las plántulas deben trasplantarse al sistema cuando se haya logrado un crecimiento adecuado y las plantas sean suficientemente fuertes. Debe evitarse trasplantar las plántulas a mediodía, porque las raíces de las plantas son sumamente sensibles a la luz solar directa y las hojas pueden sufrir estrés hídrico debido a las nuevas condiciones de crecimiento. Se recomienda plantar al atardecer para que las jóvenes plántulas tengan una noche para aclimatarse a su nuevo entorno ([Somerville et al. 2014c](#)).



Figura 10: Plántulas que germinan en cubos de arranque de lana de roca
https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hydroponics#/media/File:Hydroponic_Farming.jpg

Los trasplantes deben apoyarse en un vaso colador que contenga de 3 a 4 centímetros de grava o medio de cultivo, y el resto del vaso colador debe llenarse con una mezcla de grava y medio de retención de la humedad. El medio ayuda a retener el agua porque las raíces de la planta joven apenas tocan el flujo de agua en el tubo de cultivo. Después de una semana, las raíces se habrán extendido a través de la taza de red y dentro del tubo, y tendrán pleno acceso al agua que fluye a lo largo del fondo. Los agujeros de plantación en el tubo de cultivo deben coincidir con el tamaño de las copas de red, y debe haber un espacio adecuado entre el centro de cada agujero de la planta para acomodar las plantas cultivadas ([Somerville et al. 2014b](#)).



Figura 11: Vaso colador usado para plantar en un Sistema NFT

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hydroponics#/media/File:2009-03-30_Lettuce_roots.jpg



Figura 12: Trasplantando cebollas en un sistema DWC

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hydroponics#/media/File:Hydroponic_onions_nasa.jpg

6.4.2 Trasplantes a partir de esquejes

Los esquejes son porciones del tallo, raíz, hoja o el brote de la hoja que se extraen de una "planta madre". Estas porciones son inducidas a formar raíces y brotes por medios químicos, mecánicos y/o ambientales. Las plantas resultantes serán clones de la planta madre con exactamente la misma composición genética. Por ejemplo, se pueden quitar las ventosas de la planta de tomate, los extremos cortados se colocan en agua, y las raíces se formarán en unos pocos días o una semana. El material de la planta madre debe estar libre de enfermedades y plagas, y el material seleccionado para los esquejes debe estar en el estado fisiológico adecuado para que las raíces y los brotes se desarrollen fácilmente. Los trasplantes de esquejes pueden ser cultivados usando un medio agregado en bandejas de tapones. La lana de roca también es un medio adecuado para enraizar esquejes. Todas las hojas, excepto las 4 o 5 superiores, deben ser removidas para reducir la pérdida de agua. Dado que los esquejes inicialmente no tienen raíces, la nebulización se suele utilizar en los invernaderos para mantener un entorno húmedo y reducir la pérdida de agua mientras se forman las raíces ([Rorabaugh 2015](#)).

En algunas especies, el desarrollo de las raíces es promovido por la hormona auxina que está naturalmente presente en el esqueje. Otras especies necesitan ser tratadas con un compuesto de raíces, una preparación de auxina sintética. El uso del "calor de fondo" proporcionado por medio de cables eléctricos, alfombras eléctricas o tubos de agua caliente que corren por debajo de las camas o bandejas que contienen los esquejes, también acelerará el desarrollo de las raíces. No se añaden nutrientes al agua hasta que las raíces se han formado. La producción de esquejes de hortalizas requiere mucha mano de obra, por lo que se suelen utilizar semillas en su lugar ([Rorabaugh 2015](#)).

6.4.3 Trasplantes mediante injertos

El injerto es una técnica para conectar dos partes de plantas previamente separadas, de manera que la planta resultante viva y crezca como una sola. La "cepa" es la parte inferior del injerto incluyendo las raíces, mientras que el "vástago" es la parte superior del injerto incluyendo el brote y los brotes latentes de los cuales crecerán nuevos tallos, hojas, etc. El injerto se utiliza ampliamente en la producción comercial de trasplantes de tomate. Si bien es muy intensivo en mano de obra, hay varias razones para utilizarlo, como el mantenimiento de clones que no pueden ser fácilmente mantenidos por otros métodos asexuales, y la creación de formas de crecimiento especializadas. Los cultivadores profesionales de hortalizas hidropónicas también están utilizando actualmente plantas injertadas, no sólo para la protección contra los patógenos, sino también para aumentar el rendimiento de muchos cultivos de hortalizas de invernadero, incluidos los tomates, con cepas de raíces vegetativas de gran potencia que pueden sostener dos cabezas. El portainjerto y el vástago deben ser compatibles (por lo general de la misma familia o género), y ambos deben estar en la etapa fisiológica adecuada para promover la fusión de las dos partes en una sola ([Rorabaugh 2015](#)).

6.5 Fertirrigación

La fertirrigación es el uso de fertilizantes en la combinación, concentración y pH adecuados. La nutrición mineral es crítica para el crecimiento óptimo de las plantas. Las condiciones nutricionales óptimas pueden variar entre las diferentes especies de plantas, para la misma especie de plantas en diferentes momentos de su ciclo de vida, para la misma especie de plantas en diferentes épocas del año y para la misma especie de plantas en diferentes condiciones ambientales. Incluso los sistemas acuapónicos equilibrados pueden experimentar deficiencias de nutrientes. Los alimentos para peces no tienen necesariamente las cantidades adecuadas de nutrientes para las plantas, y generalmente tienen bajos valores de hierro, calcio y potasio (véase el Capítulo 5). Por lo tanto, pueden ser necesarios fertilizantes suplementarios para las plantas, en particular cuando se cultivan hortalizas frutales o con una gran demanda de nutrientes. Los fertilizantes sintéticos son a menudo demasiado duros para la acuicultura y pueden alterar el equilibrio del ecosistema. En general, se añade hierro en forma de hierro quelado para alcanzar concentraciones de unos 2 mg/litro. El calcio y el potasio se añaden cuando se amortigua el agua hasta el pH correcto. Se añaden como hidróxido de calcio o hidróxido de potasio, o como carbonato de calcio y carbonato de potasio. La elección del tampón depende del tipo de planta que se cultiva: las hortalizas de hoja pueden necesitar más calcio, mientras que las plantas frutales pueden necesitar más potasio ([Somerville et al. 2014c](#)).

Cualquier solución de nutrientes hidropónicos comienza con el agua, por lo que es esencial comenzar con el análisis de laboratorio de una muestra. Las tres cosas principales que hay que tener en cuenta son la alcalinidad, la conductividad eléctrica (CE) y la concentración de elementos específicos. La alcalinidad, que es una medida de la capacidad del agua para neutralizar el ácido, se suele expresar en mg/L de equivalentes de carbonato de calcio (CaCO_3). Los valores de alcalinidad pueden variar desde

cerca de 0 (en agua muy pura o tratada por ósmosis inversa) hasta más de 300 mg/L de CaCO_3 . Cuanto mayor sea la alcalinidad del agua, más tenderá el pH a aumentar en la solución de nutrientes. La alcalinidad de la fuente de agua es un número mucho más importante que el pH: el pH es simplemente una instantánea de una sola vez de cuán ácida o básica es el agua, mientras que la alcalinidad es una medida de su efecto duradero sobre el pH. Sólo una vez que se conoce la alcalinidad del agua será posible seleccionar una estrategia de fertilización adecuada. Dependiendo de la alcalinidad, puede ser necesario elegir una formulación con una mayor proporción de formas de nitrógeno ácido (amonio o urea) o añadir ácido para neutralizar la alcalinidad y contrarrestar el aumento del pH ([Mattson y Peters 2014](#)).

La CE es una medida del total de sales disueltas, incluyendo tanto los elementos esenciales como los contaminantes no deseados (como el sodio). La EC es, por lo tanto, una medida aproximada de la pureza de la fuente de agua. La EC debería ser idealmente menor de 0,25 mS/cm para sistemas cerrados. El análisis del agua en el laboratorio también indicará qué elementos esenciales y contaminantes específicos se encuentran en el agua. La concentración de elementos esenciales debe tenerse en cuenta al preparar una receta de solución de nutrientes (véase más abajo). El agua del grifo a menudo puede contener niveles significativos de Ca, Mg, S y P. El sodio y el cloruro (sal de mesa) son contaminantes comunes en algunas aguas; lo ideal es que sean inferiores a 50 y 70 mg/L, respectivamente ([Mattson y Peters 2014](#)).

Los nutrientes minerales están disponibles en forma de líquidos o como concentrados en polvo que luego se diluyen con agua. Los nutrientes están disponibles en diferentes fórmulas que, cuando se mezclan, proporcionan todos los elementos esenciales. Por lo general, los compuestos que contienen calcio se mantienen separados de los compuestos de fosfato y sulfato, porque en altas concentraciones el calcio se combinará con los fosfatos y sulfatos para formar precipitados insolubles. Una solución típica de nutrientes se dividirá en 3 tanques: un tanque de calcio/hierro, el macro/micro tanque que contiene todos los demás nutrientes, y un tanque de ácido que se mantiene separado para poder ajustar el pH de forma individual ([Rorabaugh 2015](#)).

El cultivador comenzará con una receta de solución de nutrientes - una lista de compuestos inorgánicos y sus concentraciones finales en mg/L (miligramo por litro) o mMol (milimol). La receta debe tener en cuenta la planta que quiere cultivar, la ubicación regional y las condiciones ambientales, y la época del año. La Tabla 3 muestra una receta de solución de nutrientes para el cultivo de tomates en Las Vegas durante el invierno. En las semanas 0-6 la receta es más alta en nitrógeno, calcio y magnesio para asegurar una buena estructura y crecimiento vegetativo. En las semanas 6-12 el nitrógeno se reduce y el potasio aumenta para mejorar la floración (reproducción). A partir de la semana 12 la receta está diseñada para mantener un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo ([Rorabaugh 2015](#)).

Tabla 3: Ejemplo de una receta de solución de nutrientes utilizada por Sunco Ltd., Las Vegas NV, para los tomates durante el invierno (de [Rorabaugh 2015](#)).

Nutriente (mg/L)	Semana 0-6	Semana 6-12	Semana 12+
N	224	189	189
P	47	47	39

K	281	351	341
Ca	212	190	170
Mg	65	60	48
Fe	2.0	2.0	2.0
Mn	0.55	0.55	0.55
Zn	0.33	0.33	0.33
Cu	0.05	0.05	0.05
B	0.28	0.28	0.28
Mo	0.05	0.05	0.05

[HydroBuddy](#) es un programa de código abierto para el cálculo de soluciones de nutrientes para la hidroponía. El programa permite encontrar la cantidad de sales necesarios para la preparación de una solución de nutrientes con una composición determinada o, por el contrario, determinar las concentraciones de nutrientes dentro de una solución a partir de un peso fijo determinado de sales. Aunque la base de datos contiene formulaciones predefinidas, el programa puede personalizarse para permitir la adición de otros preparados.

6.6 Sistemas de control de los invernaderos

Los sistemas de control incluyen los de iluminación, calefacción, refrigeración, humedad relativa y enriquecimiento de dióxido de carbono. Si bien es útil tener un entorno totalmente controlado, el cultivo acuapónico también puede prosperar sin él, o con sólo algunos de los parámetros controlados.

6.6.1 Luz

La máxima transmisión de luz, de la cantidad y calidad apropiadas (PAR, 400-700 nm), es crucial para una óptima fotosíntesis, crecimiento y rendimiento. Si hay demasiada luz en el verano, se puede rociar pintura de sombra o lavado blanco en el exterior del invernadero. Esto se desgastará al final de la temporada de crecimiento, o puede ser lavado. Los paños de sombra de tela externa hechos de varios grados de tamaño de malla para excluir cantidades específicas de luz (por ejemplo, 30%, 40%, 50% de sombra) pueden ser colocados en el exterior del invernadero o colgados dentro de él. Si hay muy poca luz durante el invierno, las cubiertas blancas reflectantes del suelo pueden aumentar significativamente los niveles de luz en el dosel de las plantas ([Rorabaugh 2015](#)).

Se pueden utilizar luces artificiales para prolongar la temporada de cultivo de invierno. En los invernaderos se utilizan varias tecnologías de luz diferentes, pero el tipo más común son los diodos emisores de luz (LED). A diferencia de todos los demás sistemas de iluminación artificial, los LED no contienen vidrio ni componentes gaseosos: todos los componentes son de estado sólido. Por lo tanto, son menos frágiles que otros tipos de lámparas y pueden ubicarse en lugares donde otras lámparas pueden resultar dañadas y suponer un riesgo para la salud y la seguridad. Sin embargo, un posible impacto negativo del uso de la iluminación LED en los invernaderos es la falta de calor radiante que

producen, lo que reduce el ahorro general de energía al haber una mayor demanda de calefacción ([Davis 2015](#)).

Los LEDs están ahora disponibles con casi cualquier longitud de onda entre 200 y 4000 nm. Las ventajas de los LED son: i) su alta eficiencia (producción de energía lumínica/energía eléctrica) en comparación con otras fuentes de iluminación; ii) que la luz emitida es direccional, lo que reduce la cantidad de luz parásita y garantiza que la máxima cantidad de luz llegue al cultivo; y iii) que el espectro general puede modificarse para diferentes aplicaciones cambiando el número y los colores de los LED instalados en una unidad de iluminación. Así pues, los LED ofrecen la posibilidad de optimizar los tratamientos lumínicos que permiten mejorar las cualidades específicas de las plantas o controlar la morfología y el tiempo de floración de las plantas. Para producir plantas sanas, se necesita tanto luz roja como azul. La luz roja se utiliza con mayor eficacia para impulsar la fotosíntesis, pero en general se encuentra que las plantas crecen más eficazmente cuando alguna luz azul está contenida dentro del espectro de luz, porque ayuda a promover la absorción de CO₂ por las estomas. Sin embargo, las respuestas estomatales a la luz difieren entre las especies, por lo que no todas las especies se beneficiarán por igual tras la adición de la luz azul. En la lechuga, por ejemplo, se ha descubierto que las tasas de crecimiento disminuyen a medida que aumenta la luz azul ([Davis 2015](#)).

Hay casos en que la adición de colores de luz puede proporcionar beneficios adicionales. Se ha demostrado que la inclusión de luz verde aumenta la acumulación de biomasa fresca y seca en las plantas de lechuga cuando la luz verde reemplaza parte de la luz azul o roja de la mezcla. La luz verde también puede penetrar más profundamente en el dosel de la planta, y por lo tanto impulsar más la fotosíntesis. La luz roja lejana es importante para el desarrollo de la planta y el rendimiento durante toda la vida de un cultivo. Si bien puede inhibir la germinación de las semillas de lechuga, puede sin embargo aumentar el área de las hojas, permitiendo potencialmente una mayor captura de luz y tasas de crecimiento. Por otra parte, durante las últimas etapas del desarrollo de los cultivos, causará estiramientos y empalmes. La zona en la que la luz roja lejana puede tal vez utilizarse con mayor eficacia es la del control del tiempo de floración ([Davis 2015](#)).

Los LEDs también ofrecen la oportunidad de iluminar los cultivos de forma no tradicional. Los LED son fuentes de luz fría y, como tales, pueden colocarse cerca de los cultivos o dentro de un dosel para iluminar las hojas que normalmente recibirían poca luz natural o suplementaria. Al añadir luz a las hojas que normalmente se encuentran en la región sombreada del dosel, las plantas pueden utilizar la luz de manera más eficiente. Esto significa que la "interluminación" tiene el potencial de aumentar los rendimientos más que la misma cantidad de luz añadida en la parte superior del dosel. Se ha encontrado que la luz azul entrecortada tiene resultados mixtos en los rendimientos de las plantas de pepino y los tomates ([Davis 2015](#)).

La manipulación espectral también puede utilizarse para mejorar la pigmentación. La luz azul es importante para impulsar la síntesis de la antocianina, que es uno de los tipos de compuestos que causan la pigmentación roja. La luz también es importante para regular la biosíntesis de muchos de los compuestos que funcionan para alterar directamente el sabor y el aroma de las hojas, los frutos y

las flores. La exposición a la luz UVB se ha relacionado con el aumento del aceite y el contenido volátil en una serie de especies de hierbas, como el toronjil y la albahaca ([Davis 2015](#)).

En la mayoría de las investigaciones se considera la influencia de la calidad de la luz en la calidad de la cosecha durante el período de crecimiento de la misma, pero más recientemente también se ha considerado el efecto de los tratamientos de luz posteriores a la cosecha. Los tratamientos de los cultivos después de la cosecha ofrecen la posibilidad de mejorar la calidad de los cultivos durante el transporte para retrasar el inicio de la senescencia, con lo que se prolonga el período de conservación. Se comprobó que la exposición a dos horas de luz roja de baja intensidad retrasa la senescencia de las hojas de albahaca durante dos días durante el almacenamiento en 20 °C en la oscuridad ([Davis 2015](#)).

Por consiguiente, la reacción de las plantas a los diversos colores del espectro de la luz puede utilizarse para manipular las plantas para satisfacer diferentes necesidades, entre ellas las siguientes:

- *La luz ultravioleta puede utilizarse para acortar los entrenudos*
- *La luz azul y ultravioleta puede utilizarse para aumentar la tolerancia de la planta al estrés antes del trasplante*
- *La luz azul puede utilizarse para estimular el crecimiento vegetativo y evitar que las plantas de días más cortos florezcan durante sus etapas de propagación*
- *La luz roja puede ser usada para inducir la floración y alargar los entrenudos para producir plantas con tallos más largos y flores más grandes.*
- *La luz roja lejana puede utilizarse para controlar el fotoperiodismo de las plantas*

Los luxómetros se utilizan ampliamente en la horticultura para medir la intensidad de las lámparas de sodio de alta presión (*high pressure sodium lamps* HPS). Los luxómetros han sido diseñados para tener la misma sensibilidad a las diferentes regiones del espectro electromagnético que el ojo humano, que es más sensible a la luz verde. Sin embargo, para muchas de las lámparas LED de horticultura, especialmente las que tienen predominantemente LEDs rojos y azules, los espectros de emisión caen en regiones en las que los luxómetros son relativamente insensibles, y proporcionan estimaciones muy bajas incluso cuando la intensidad real de estos espectros es alta. La medición de la luz más adecuada para su uso con las plantas es la irradiación de fotones PAR (también llamada densidad de flujo fotónico fotosintético, PDFD). La irradiación fotográfica PAR indica el número de fotones que inciden en una superficie, medido en micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Debido a que la fotosíntesis se mide en unidades similares ($\mu\text{mol [CO}_2\text{] m}^{-2} \text{s}^{-1}$), el uso de la irradiación fotónica PAR permite hacer comparaciones directas entre la cantidad de luz y la cantidad de fotosíntesis ([Davis 2015](#)).



Figura 13: Creciendo bajo la luz

UVhttps://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Aquaponics#/media/File:Light_on_Aquaponics.jpg

6.6.2 Temperatura y humedad

Los dispositivos de calefacción mantendrán la temperatura dentro del rango óptimo durante los períodos de clima frío. El material aislante (cortinas de tela o película) puede colocarse sobre el cultivo o cerca del techo para retener el calor cerca del cultivo. El material aislante utilizado durante la noche puede ser el mismo que el utilizado para la sombra durante el día ([Rorabaugh 2015](#)).

Las altas temperaturas pueden ser perjudiciales para el crecimiento de las plantas, especialmente si hay poca disponibilidad de luz. Las altas temperaturas pueden causar problemas como tallos delgados y débiles, tamaño reducido de las flores, retraso de la floración y/o polinización/fertilización y cuajado de los frutos deficientes, y aborto de las flores y los capullos/frutos. Los sistemas de ventilación pasiva incluyen paños de sombra o pintura de sombra/lavado blanco que, además de regular la intensidad de la luz, pueden ayudar a enfriar el invernadero. Los respiraderos de cresta en el techo de un invernadero permiten que el aire interior caliente se escape. El área de las rejillas de ventilación debe ser el 25% de la superficie del suelo. Las paredes laterales enrollables pueden utilizarse en invernaderos de cristal flexible (película de polietileno) para permitir un flujo natural de aire horizontal sobre las plantas. Al igual que con las rejillas de ventilación, el área de las rejillas de ventilación de las paredes laterales debe ser el 25% de la superficie del suelo. Las almohadillas enfriadas por agua en la parte superior de las torres de refrigeración pueden utilizarse para enfriar el aire circundante que luego cae, desplazando así el aire más caliente hacia abajo. Los diseños recientes de invernaderos pueden incluir un techo que se retrae completamente para la ventilación natural. Esto permite que las plantas cultivadas en invernaderos se adapten a las condiciones exteriores ([Rorabaugh 2015](#)).

Los sistemas de enfriamiento activo implican el "enfriamiento por evaporación" de ventiladores y almohadillas, en el que el aire del exterior es arrastrado a través de almohadillas húmedas y porosas (normalmente de papel de celulosa). El calor del aire entrante evapora el agua de las almohadillas,

enfriando así el aire. El enfriamiento por evaporación también ayudará a aumentar la humedad relativa del invernadero. Alternativamente, los sistemas de nebulización también utilizan el enfriamiento por evaporación, pero incorporan una dispersión de gotas de agua que se evaporan y extraen el calor del aire. Este sistema da una mejor uniformidad ya que la nebulización se distribuye en todo el invernadero, y no sólo cerca de un extremo de la almohadilla como en el sistema de ventilador y almohadilla. Cuanto más pequeño es el tamaño de las gotas, más rápido se evapora cada gota, y por lo tanto más rápido es el ritmo de enfriamiento. La humedad relativa puede aumentarse haciendo funcionar las almohadillas de refrigeración o empañando, y puede disminuirse haciendo funcionar los calentadores o simplemente ventilando ([Rorabaugh 2015](#)).

6.6.3 Dióxido de carbono (CO₂)

La tasa de fotosíntesis depende de la disponibilidad de dióxido de carbono. La ventilación puede proporcionar suficiente CO₂ durante la primavera, el verano y el otoño, pero en invierno, o en cualquier momento en los climas fríos, dará lugar a que el aire frío sea introducido en el invernadero. La calefacción será entonces necesaria para mantener la temperatura adecuada, lo que puede llegar a ser antieconómico. Por lo tanto, la generación de CO₂ es una forma efectiva de aumentar los niveles en el invernadero durante el invierno o en climas fríos. Los generadores de CO₂ pueden quemar varios tipos de combustible, incluyendo gas natural (el más económico) o propano. Los generadores de llama abierta también producen calor y vapor de agua como subproductos. Por lo tanto, los cultivadores hidropónicos a veces usan generadores de CO₂ en el invierno, cuando la producción de calor extra es bienvenida, y CO₂ embotellado y dosificadores en el verano, ya que no producen calor o humedad extra. Como el CO₂ es liberado por las plantas a través de la respiración durante la noche, no es raro que los niveles se acumulen entre el 0,045% y el 0,070% en el invernadero por la mañana. Ajustar el temporizador para comenzar a dosificar el CO₂ una hora después de que se encienden las luces, con la última dosis una hora antes de que se apaguen las luces, es la forma más económica de proporcionar CO₂ suplementario. Para mantener el CO₂ en niveles óptimos, es mejor dosificar por períodos cortos de tiempo en volúmenes más altos que dosificar por períodos más largos de tiempo en volúmenes bajos ([Rorabaugh 2015](#)). En la acuicultura, las peceras suelen estar en la misma habitación que el componente hidropónico. La respiración de los peces eleva los niveles de CO₂ del agua del sistema, y el CO₂ también entra en la atmósfera. Por lo tanto, las entradas adicionales de CO₂ no son necesarias, o son muy bajas ([Körner et al. 2014](#)).

6.6.4 Circulación del aire

Una de las razones para tener un invernadero es crear un "ambiente controlado" para todas las plantas. Sin embargo, especialmente durante las épocas en que los sistemas de calefacción y refrigeración no están en funcionamiento, pueden desarrollarse bolsas de alta o baja temperatura, humedad relativa o dióxido de carbono que pueden ser menos que óptimos para el crecimiento de las plantas o el desarrollo de las flores/frutas. Se pueden colocar ventiladores de flujo de aire horizontal (HAF) en las vigas del invernadero para hacer circular el aire por encima del cultivo. Esto ayuda a reducir al mínimo las bolsas de aire caliente o frío y la humedad alta o baja o el dióxido de carbono. Los ventiladores HAF pueden utilizarse junto con sistemas de calefacción de aire caliente para hacer circular el aire caliente por todo el invernadero ([Rorabaugh 2015](#)).

6.6.5 Sistemas de control ambiental

Los sistemas de control ambiental pueden ser muy simples o muy complejos. Los sistemas más sencillos implican enrollar manualmente un respiradero lateral, abrir un respiradero de techo o una puerta, o encender un calentador o enfriador. Los controladores sencillos operan desde un termostato en el invernadero y automáticamente fijarán los rangos de temperatura del día y la noche, abrirán y cerrarán las ventilaciones, y encenderán o apagarán los calentadores y los refrigeradores. Los controladores de paso también controlarán automáticamente 1 ó 2 etapas de calentamiento, según el número de calentadores, y controlarán varias etapas de enfriamiento utilizando ventiladores de enfriamiento y bomba(s) para mojar las almohadillas. Los sistemas de control ambiental más complejos utilizan computadoras sofisticadas que funcionan a partir de un sensor de temperatura en el invernadero y establecen automáticamente los rangos de temperatura diurna y nocturna, controlan el equipo de calefacción, incluidas las calderas, la calefacción de la zona de la raíz, las cortinas de retención de calor, etc., controlan otros equipos, incluidos los ventiladores HAF, los extractores, los respiraderos, las bombas de almohadillas, los sistemas de nebulización, etc., controlan la humedad relativa y controlan las cortinas de sombra y la iluminación artificial en función de las necesidades de luz. Las computadoras sofisticadas también pueden supervisar una estación meteorológica externa y utilizar los datos recogidos (luz, temperatura, humedad relativa, lluvia y viento) para controlar las condiciones internas del invernadero. También pueden hacer funcionar el sistema de fertirrigación utilizando automáticamente la cantidad de luz (por ejemplo, X ml de solución/Y cantidad de luz), y controlando el tiempo de riego, la duración del mismo, el pH y la CE de la solución de nutrientes, y la nebulización ([Rorabaugh 2015](#)).

6.7 Referencias

- Davis, P. 2015. [Lighting: The Principles](#). Agriculture and Horticulture Development Board Technical Guide.
- Drzal, M.S., Keith Cassel, D. y Fonteno, W.C. 1999. [Pore fraction analysis: A new tool for substrate testing](#). *Acta Horticulturae* 481, 43-54.
- Körner, O., Gutzmann, E. y Kledal, P.R. 2014, [Modelling the symbiotic effects in aquaponics](#). European Aquaculture Society conference, Donastia/San Sebastian, Spain, October 2014.
- Lee, S. y Lee, J. 2015. [Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of food production methods](#). *Scientia Horticulturae* 195, 206-215.
- Lennard, W.A. y Leonard, B.V. 2006. [A comparison of three different hydroponic sub-systems \(gravel bed, floating and nutrient film technique\) in an aquaponics test system](#). *Aquaculture International* 14 (6), 539-550.
- Li, Q., Li, X., Tang, B. y Gu, M. 2018. [Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture](#). *Horticulturae* 4 (4), 35.
- Mattson, N. y Peters, C. 2014. [A Recipe for Hydroponic Success](#). Inside Grower.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P. y Borin, M. 2018. [Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review](#). *Italian Journal of Agronomy* 13: 1012.

- Pantanella, E. 2012. [*Aquaponic System Design Parameters: Basic System Water Chemistry*](#). Aquaponic Solutions.
- Pantanella, E., Cardarelli, M. y Colla, G. 2012. [*Yields and nutrient uptake from three aquaponics sub-systems \(floating, NFT and substrate\) under two different protein diets*](#). World Aquaculture Society Meeting, Prague, 1-5 Sept 2012.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A. y Bar-Tal, A. 2002. [*Substrates and their analysis*](#). In Passam, H. y Savvas, D. (eds.) *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, pp. 25-105.
- Resh, H.M. 2013. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th edition). Newconcept Press, Mahwah, SA.
- Rorabaugh, P.A. 2015. [*Introduction to Controlled Environment Agriculture and Hydroponics*](#). Controlled Environment Agriculture Center, University of Arizona, Tucson.
- Somerville et al. 2014b. Design of aquaponics units. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 35-74.
- Somerville et al. 2014c. Plants in aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 83-102.
- Somerville et al. 2015a. Additional topics on aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 141-155.

7. VARIEDADES DE PLANTAS

7.1 Introducción

Se han cultivado más de 150 diferentes vegetales, hierbas y flores con éxito en sistemas acuapónicos. Las plantas adaptadas a los sistemas acuapónicos suelen crecer rápidamente, tener sistemas de raíces poco profundos y tienen una baja demanda de nutrientes, como las verduras de hoja y las hierbas. Las hortalizas frutales, como los tomates, los pepinos y los pimientos, también se desarrollan bien, pero tienen una mayor demanda de nutrientes y son más apropiadas para los sistemas establecidos con poblaciones de peces adecuadas. Pero hay algunas plantas que no crecen bien, algunas que no tienen sentido en términos económicos, y algunas que probablemente no funcionarán bien debido a las restricciones de espacio. Los cultivos de raíces, como las patatas, las batatas, los nabos, las cebollas, el ajo y las zanahorias, suelen funcionar mejor en la cultivo tradicional, aunque pueden cultivarse con éxito en lechos profundos ([Somerville et al. 2014a](#)).

Hay algunos cultivos que requieren una mayor inversión, y si la intención es cultivar un producto comercializable con ánimo de lucro, su cultivo no es rentable. Los rábanos entran en esta categoría, dado su precio de mercado relativamente bajo, al igual que algunas lechugas y verduras de hoja cuando sus homólogos cultivados en el suelo están en temporada. Sin embargo, es muy posible que haya mercados especializados que paguen precios superiores a la media por las hortalizas fuera de temporada, por cultivos que no se producen fácilmente en la zona o por la novedad de las hortalizas cultivadas con métodos hidropónicos y acuapónicos.

Los sistemas acuapónicos son espacios finitos. Por lo general, esto descarta el cultivo de árboles frutales y de nueces, así como la mayoría de las plantas de tipo arbustivo, aunque en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich se han cultivado con éxito plátanos y papayas. El sistema no sólo requeriría un enorme depósito o tanque para albergar el sistema de raíces, sino que la cantidad de espacio necesario para acomodar la planta misma también tendría que ser muy grande. Los calabacines y los melones entran en esta categoría, al igual que los tomates en racimo que necesitan enrejado o alguna otra estructura para su cultivo. Si bien hay cientos de operaciones hidropónicas exitosas en el cultivo de tomates, éstas son típicamente en grandes invernaderos. De manera similar, los pepinos pueden hacerlo razonablemente bien, pero la mayoría de las especies no lo hacen porque requieren un sistema de espaldera para sus frutos pesados y muchos metros cuadrados de espacio por planta para sus vides y follaje. Otros cultivos de vid que pueden superar su espacio y ser un drenaje de nutrientes son los guisantes, los guandú, las nasturtias y el lúpulo. Aunque todos ellos pueden cultivarse en un sistema de hidrocultivo, requieren mucho trabajo. La altura de las luces de cultivo debe ser ajustada regularmente, los niveles de nutrientes deben ser ajustados de acuerdo a la etapa de crecimiento de la planta, el enrejado necesita una inspección constante y la provisión de soportes adicionales, y se debe realizar una poda frecuente para cultivar con éxito los cultivos de vid en un sistema hidropónico/acuapónico. Por término medio, las plantas pueden cultivarse con la siguiente densidad ([Somerville et al. 2014b](#)):

- Plantas de hojas – 20-25 plantas/m²
- Plantas frutales – 4 plantas/m²

Estas cifras son sólo promedios, y existen muchas variables según el tipo de planta, por lo que sólo deben utilizarse como guía. Cuando se construye una nueva granja, la elección del cultivo influye en las ventas, el espacio y la técnica. Hay dos tipos de sistema de cultivo: el monocultivo (o monocultivo) es un sistema con un solo tipo o variedad de planta; el policultivo (o policultivo) es un sistema con diferentes tipos y variedades de plantas. La elección entre una variedad de cultivos o un solo tipo de planta debe hacerse teniendo en cuenta la logística, las ventas, la experiencia y la lucha contra las plagas. La mayor ventaja a favor del monocultivo es la simplicidad. Puede superar al policultivo en cuanto a facilidad de venta, y es más fácil para los nuevos agricultores en cuanto a los gastos generales de logística. Si usted está cultivando un solo cultivo, sólo tendrá que preparar y enviar su producto de una sola manera. Sin embargo, el monocultivo abre la posibilidad de agotar la demanda y, si se combina con un control de plagas deficiente, corre el riesgo de perder todo el rendimiento de una sola vez. El policultivo ofrece a los agricultores la posibilidad de satisfacer una variedad de demanda, y es inherentemente más robusto y resistente a los brotes de plagas ya que hay menos posibilidades de que toda la operación se vea comprometida. Sin embargo, debe evitarse que los miembros de una misma familia sean susceptibles a las mismas enfermedades bacterianas, fúngicas y virales, y que compartan plagas comunes. Los tomates, los pimientos y las berenjenas, por ejemplo, pertenecen a la misma familia (*Solanaceae*), al igual que las coles, el pak choi, las hojas de mostaza y la col rizada (*Cruciferae* o *Brassicaceae*). Un conjunto de cultivos para el policultivo requiere cultivos con preferencias superpuestas de pH y temperatura.

El policultivo también puede implicar el uso de plantas de compañía. La plantación de plantas de compañía es un método de cultivo intercalado en pequeña escala muy común en la horticultura orgánica y biodinámica, y se basa en la observación de que la asociación de diferentes plantas puede tener un efecto mecánico, repelente o disuasorio contra las plagas. El grado de éxito depende del nivel de infestación de la plaga, la densidad de los cultivos, la relación entre los cultivos y las plantas beneficiosas, y los tiempos específicos de plantación. Por lo tanto, la plantación de acompañamiento puede utilizarse en combinación con otras estrategias dentro de un protocolo de manejo integrado de plantas y plagas (véase el capítulo 8) para obtener plantas más sanas en un sistema acuapónico ([Somerville et al. 2014a](#)). Algunas plantas también son incompatibles con otras. Por ejemplo, los miembros de la familia de la col se benefician de una serie de acompañantes, como las hierbas aromáticas, las espinacas y las hierbas, pero son incompatibles con las fresas y los tomates.

Las tasas de producción anual de las plantas en los sistemas acuapónicos varían según las especies cultivadas. La lechuga se ha cultivado a diferentes densidades (16 a 44 plantas/m²) y longitudes de cultivo (21-28 días), principalmente en sistemas de balsa flotante, lo que da lugar a rendimientos que van de 1,4 a 6,5 kg/m². La albahaca es otro cultivo ampliamente probado, con densidades de 8 a 36 plantas/m² que produce rendimientos de 1,4 a 4,4 kg/m² para ciclos de cultivo de 28 días. Los cultivos de temperatura cálida también han demostrado ser muy productivos, como la espinaca de agua, que produjo rendimientos de 33 a 37 kg/m² en 28 días a una densidad de 100 plantas/m², mientras que el quimbombó produjo rendimientos de 2,5 y 2,8 kg/m² en menos de tres meses a densidades de 2,7 y 4 plantas/m² respectivamente. Las hierbas especiales y culinarias como el hinojo marino (*Salicornia*) y la salchicha (*Salsola*) dieron rendimientos de 7 kg m² en 110 días y 5 kg m² en 28 días respectivamente ([Thorarinsdottir 2015](#)).

Las hortalizas se dividen en tres categorías basadas en su demanda general de nutrientes. Entre las plantas de baja demanda de nutrientes se incluyen las de hoja verde y las hierbas, como la lechuga, acelga, rúcula, albahaca, menta, perejil, cilantro, cebollino, pak choi y berro, y legumbres como los guisantes y las alubias. En el otro extremo del espectro se encuentran las plantas con alta demanda de nutrientes, a veces llamadas "hambrientas de nutrientes". Entre ellas se encuentran las frutas botánicas, como tomates, berenjenas, pepinos, calabacines, fresas y pimientos. Las plantas con demanda media de nutrientes son miembros de la familia de la col, como la col rizada, la coliflor, el brócoli y el colinabo ([Somerville et al. 2014a](#)).

Los sistemas acuapónicos deben ser equilibrados. Los peces (y, por lo tanto, el alimento de los peces) necesitan suministrar nutrientes adecuados para las plantas, y las plantas necesitan filtrar el agua para los peces. Las hortalizas frutales requieren aproximadamente un tercio más de nutrientes que las hortalizas de hoja para apoyar el desarrollo de las flores y los frutos ([Somerville et al. 2014b](#)):

- Plantas de hoja – 40-50 g de pienso/m²/día
- Plantas frutales – 50-80 g pienso/m²/día

7.2 Selección de plantas

Esta sección abarca algunas de las especies de plantas que más comúnmente se cultivan en los sistemas acuapónicos. Se proporcionan detalles sobre las condiciones ideales de cultivo, la duración del ciclo de cultivo, las plagas y enfermedades comunes y las recomendaciones para la cosecha y el almacenamiento. En los semilleros se pueden obtener muchas variedades de hortalizas. Si bien tanto las variedades de campo como las de invernadero pueden cultivarse en un invernadero, es ventajoso utilizar variedades de invernadero siempre que sea posible, ya que a menudo se han criado para obtener un rendimiento muy elevado en condiciones ambientales controladas ([Resh 2013](#)).

7.2.1 Verduras de hoja verde

7.2.1.1 Lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa*) ocupa relativamente poco espacio y tiene un ciclo de crecimiento corto cuando está sana: 5-6 semanas desde el trasplante, o 9-11 semanas desde la semilla. Puede ser cultivada en sistemas de cama media, NFT y DWC con 20-25 cabezas/m². Muchas variedades pueden cultivarse en sistemas acuapónicos, incluyendo la lechuga iceberg, que es ideal para condiciones más frías, la lechuga romana, que es lenta para empernarse, y la lechuga de hojas sueltas, que no tiene cabeza y puede ser sembrada directamente en cama con sustrato y cosechada recogiendo hojas individuales sin recoger toda la planta. Las plagas y enfermedades más comunes que afectan a la lechuga son los áfidos, los minadores de hojas y el moho.

Las condiciones de crecimiento ideales para la lechuga:

- La temperatura: 15-22°C
- pH: 5.8-7.0

Las semillas tardan entre 3 y 7 días en germinar a 13-21°C. La fertilización suplementaria con fósforo durante la segunda y tercera semana de crecimiento favorece el buen crecimiento de las raíces y reduce el estrés en el trasplante. El endurecimiento de las plantas, mediante la exposición de las plántulas a temperaturas más frías y a la luz directa del sol durante 3 a 5 días antes del trasplante, también da lugar a mayores tasas de supervivencia. Las plántulas pueden ser trasplantadas a la unidad hidropónica después de 3 semanas, cuando las plantas tienen 2-3 hojas verdaderas. Cuando trasplante la lechuga en clima cálido, coloque una sombrilla ligera sobre las plantas durante 2-3 días para evitar el estrés hídrico (Somerville *et al.* 2014c).

Para el crecimiento de la cabeza, la temperatura del aire debería ser de 3-12°C durante la noche y una temperatura diurna de 17-28 °C. El crecimiento generativo es afectado por el fotoperíodo y la temperatura: la luz del día prolongada y las condiciones cálidas (>18°C) en la noche causan “*bolting*” (dónde la planta deja de crecer y empieza a producir semillas). Las temperaturas del agua por encima de 26°C también pueden causar *bolting* y el amargor de las hojas. Algunas variedades son más tolerantes al calor que otras. Cuando las temperaturas del aire y del agua aumentan durante la estación, utilice variedades resistentes a *bolting* (verano). Si crece en camas con sustrato, plante nuevas lechugas donde estarán parcialmente sombreadas por plantas más altas. Para lograr una lechuga crujiente y dulce, cultiven las plantas a un ritmo rápido manteniendo altos niveles de nitrato. La planta tiene una baja demanda de nutrientes, aunque las mayores concentraciones de calcio en el agua ayudan a prevenir la quemadura de las puntas en verano. Si bien el pH ideal es de 5,8-6,2, la lechuga sigue creciendo bien con un pH de hasta 7, aunque podrían aparecer algunas deficiencias de hierro debido a la reducida biodisponibilidad de este nutriente por encima de la neutralidad (Somerville *et al.* 2014c).



Figura 1: Producción hidropónica de diferentes cultivares de lechuga

<https://www.maxpixel.net/Natural-Lettuce-Fresh-Healthy-Raw-Food-Green-1239155>

La cosecha puede comenzar tan pronto como las cabezas o las hojas sean lo suficientemente grandes para comer. La lechuga debe ser cosechada temprano en la mañana cuando las hojas están crujientes y llenas de humedad, y rápidamente enfriada. Las cosechas suaves y las temperaturas frías y constantes prolongan la vida útil. Las técnicas de cosecha pueden afectar a la vida útil si la lechuga se manipula bruscamente, se golpea o se aplasta durante el proceso. Esto hace que el producto sea mucho más vulnerable a la putrefacción y las enfermedades posteriores a la cosecha ([Storey 2016f](#)).

La lechuga se puede cosechar rápidamente como un lote tomando la cabeza entera, usando un cuchillo de cosecha para cortar cada cabeza donde se encuentra con la superficie del sistema. Algunos cultivadores cosechan toda la planta, incluyendo las raíces, lo que puede prolongar la vida útil. Con tanta transpiración y humedad, la lechuga puede ser difícil de almacenar durante más de unos pocos días antes de que empiece a marchitarse y descomponerse. Puede mantenerse fresca hasta tres semanas si se almacena en 0°C , pero no debe permitirse que se congele, ya que esto causará que la epidermis de la hoja se separe de los otros tejidos, y la hoja se descompondrá rápidamente. La lechuga requiere de humedad para evitar que se seque, pero la condensación o la humedad pesada en las hojas es perjudicial. Lo mejor que pueden hacer los productores para evitar la condensación es mantener las temperaturas muy constantes ([Storey 2016f](#)).



Figura 2: Producción hidropónica de lechugas utilizando canales NFT

<https://www.maxpixel.net/Organic-Greenhouse-Farming-Hydroponic-Cucumber-2139526>

El procesado debe ser mínimo. La única tarea absolutamente necesaria es recortar las hojas secas, enfermas o que afectan a la estética del cultivo. Preferiblemente no se debe lavar la lechuga antes de su entrega, aunque algunos cultivadores utilizan un remojo de agua fría pensando de que alarga la vida útil cerrando los estomas ([Storey 2016f](#)).

7.2.1.2 Acelga

La acelga (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris*) es fácil de cultivar en camas con sustrato, canales NFT y sistemas DWC. Es un cultivo bastante resistente, ocasionalmente susceptible al problema de los áfidos y el oídio, y aunque las temperaturas altas o bajas afectarán el sabor, el cultivo es en general muy tolerante a las condiciones de estrés.

Condiciones de cultivo ideales para la acelga:

- La temperatura: 16-24°C y tolerante a las heladas
- pH: 6.0-7.5

La acelga es un alimentador de nitrato moderado, y requiere concentraciones más bajas de potasio y fósforo que los vegetales frutales. Debido a su alto valor de mercado, su rápida tasa de crecimiento y su contenido nutricional, la acelga se cultiva frecuentemente en sistemas acuapónicos comerciales. Aunque tradicionalmente es un cultivo de finales de invierno/primavera, también crece bien a pleno sol durante las estaciones de verano suaves, aunque se recomienda el uso de una red de sombreado cuando las temperaturas superan 26°C ([Somerville et al. 2014c](#)).

La acelga es más fácil de cultivar a partir de una semilla, y germina en 4-5 días a 25-30°C. Las semillas producen más de una plántula, por lo que se requiere un adelgazamiento a medida que las plántulas comienzan a crecer. Las plántulas pueden ser trasplantadas a 15-20 plantas/m². A medida que las plantas se vuelven senescentes durante la temporada, las hojas más viejas pueden ser removidas para fomentar un nuevo crecimiento ([Somerville et al. 2014c](#)). La acelga se puede cosechar 4-5 semanas después de ser trasplantada, y rinde bien. Los cultivadores deben cosechar sólo parcialmente, dejando el 30% del follaje para que la planta pueda realizar la fotosíntesis para la siguiente cosecha. Las hojas más grandes deben ser cortadas lo más cerca posible de la base de la planta. Cosechar por la mañana o por la noche puede ayudar a mantener la acelga fresca, y se mantendrá durante más de una semana sin empezar a marchitarse si se trata correctamente. La acelga dura más tiempo cuando se almacena sin lavar en recipientes o bolsas selladas a temperaturas frescas, lo que reduce drásticamente la respiración y la descomposición ([Storey 2016b](#)).

7.2.1.3 Col rizada

El cultivo de la col rizada (*Brassica oleracea*) en los sistemas acuapónicos puede ser una opción simple y rentable. El cultivo crece relativamente rápido con un ciclo de seis semanas desde el trasplante hasta la cosecha, o puede ser cosechado parcialmente, dejando un 30% para volver a crecer para el siguiente cultivo.

Condiciones de crecimiento ideales para la col rizada:

- Temperatura: 8-29°C
- pH: 6.0-7.5

La col rizada es un cultivo de clima fresco, y muchos cultivadores incluso aplican temperaturas más frescas (hasta 5°C) a propósito para obtener un sabor más suave y mejorado. Afortunadamente, la col

rizada es otro cultivo que, cuando se cultiva en interiores, es blanco de sólo unas pocas plagas como los áfidos y algo de moho polvoriento ([Storey 2016p](#)).

7.2.1.4 Pak choi

El pak choi (*Brassica chinensis*), también conocido como bok choy o repollo chino, viene en una gama de tamaños, incluyendo variedades grandes como el Joi Choi y variedades más pequeñas como el Shanghai Green Pak Choy, que ofrecen cabezas más compactas y tiernas con un sabor delicado. Tatsoi (*Brassica narinosa*, también llamada mostaza de pico ancho) tiene las mismas hojas gruesas y venas ligeras que el pak choi y puede cultivarse en condiciones similares. La col de Napa (*Brassica rapa pekinensis*) es otro miembro de la Brassica que, si bien tiene un aspecto diferente al pak choi y al tatsoi, comparte el mismo rango de pH y EC del pak choi, y sabe mejor cuando se cultiva a temperaturas más frescas ([Storey 2016i](#)).

Condiciones de cultivo ideales para el pak choi:

- La temperatura: 13-23°C
- pH: 6.0-7.5

Aunque el pak choi es típicamente más suave en temperaturas frescas, es bastante tolerante a la temperatura, lo que hace que se adapte fácilmente a muchos sistemas hidropónicos y acuapónicos. Las deficiencias en el pak choi pueden ser difíciles de identificar, ya que los síntomas más evidentes como la clorosis entre las venas, el ardor o el bronceado no son comunes. Las deficiencias se caracterizan por el retraso en el crecimiento, la formación de ventosas y un cierto amarillamiento. Plante el pak choi a partir de la semilla y trasplante tan pronto como haya hojas verdaderas en la planta; esto ocurrirá típicamente en unas cuatro semanas. Aunque los rendimientos más altos se producen a las seis semanas del trasplante, el pak choi puede crecer en rotaciones más cortas de cuatro semanas ([Storey 2016i](#)).



Figura 3: Pak choi creciendo en el sistema NFT en las granjas de Lufa

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27515408>

7.2.1.5 Repollo

El repollo (que comprende varios cultivares de *Brassica oleracea*) es un cultivo que no requiere mucha intervención. Las medidas generales de control de plagas que utilizan un plan de manejo integral de plagas (MIP) suelen mantener a raya a las plagas, y el repollo no necesita una poda o capacitación adicional. Las cabezas crecen grandes (3,5 kg no es raro), por lo que los agricultores pueden obtener una cosecha bastante grande de un espacio pequeño.

Condiciones de crecimiento ideales para el repollo:

- La temperatura: 15-20°C (pero tolerante a las heladas)
- pH: 6.0-7.2

La col es vulnerable a plagas comunes como los áfidos, así como a enfermedades por hongos como la pierna negra y la podredumbre negra. Estas últimas suelen deberse a que la corona de la planta se mantiene húmeda. Aparte de las plagas y enfermedades, el problema más común en el cultivo de la col es la rotura, cuando la cabeza se agrieta y se parte. Esto parece poco atractivo para los consumidores y puede atrapar la suciedad y las enfermedades. La división puede evitarse manteniendo las condiciones de crecimiento constantes, y cosechando en el momento adecuado ([Storey 2016k](#)).

Los repollos crecen mejor en lechos con sustrato porque alcanzan dimensiones significativas y pueden ser demasiado grandes y pesados para balsas o tubos de cultivo. Como planta exigente en cuanto a nutrientes, no es adecuada para unidades acuapónicas recién establecidas (de menos de cuatro meses de edad). No obstante, debido al gran espacio necesario (4 a 8 plantas m²), los cultivos de coles

consumen menos nutrientes por metro cuadrado que otras hortalizas de hoja (lechuga, espinacas, rúcula, etc.). A la col le gusta el pleno sol y crece mejor cuando las cabezas maduran a temperaturas más frescas, por lo que deben cosecharse antes de que las temperaturas diurnas alcancen los 23-25°C. Las altas concentraciones de fósforo y potasio son esenciales cuando las cabezas comienzan a crecer. Puede ser necesaria la integración con fertilizantes orgánicos suministrados ya sea en las hojas o en los sustratos para suministrar a las plantas niveles adecuados de nutrientes ([Somerville et al. 2014c](#)).

Para obtener las mejores tasas de germinación, las plántulas deben mantenerse un poco más calientes que los cultivos maduros (18-29°C). La escarificación de las semillas también puede aumentar la tasa de germinación. Después de ser plantadas, las semillas germinarán en 4-7 días, y las plántulas estarán listas para ser trasplantadas 4-6 semanas más tarde cuando tengan 4-6 hojas y una altura de 15 cm. Es importante dejar suficiente espacio para que cada cabeza crezca hasta el tamaño deseado. En caso de temperaturas diurnas superiores a 25°C, se debe utilizar una red de sombreado de 20 por ciento de luz para evitar que la planta se atasque. Dependiendo del tipo de col y del tamaño de la cabeza deseada, el cultivo estará listo para la cosecha 45-70 días después del trasplante. Se debe cosechar cuando la cabeza esté firme y sea lo suficientemente grande para el mercado, cortando la cabeza del tallo con un cuchillo afilado y desechando las hojas exteriores ([Somerville et al. 2014c](#)).

7.2.1.6 Hojas de mostaza

Las hojas de mostaza (*Brassica juncea*) son otro miembro de la familia de las brásicas (un pariente de la col rizada y el repollo).

Las condiciones de crecimiento ideales para las hojas de mostaza:

- La temperatura: 10-23°C
- pH: 6.0-7.5

Las hojas de mostaza se pueden manejar de manera similar a la col rizada - cultivadas a partir de semillas, que tardan 4-7 días en germinar, las plántulas estarán listas para ser trasplantadas a las 2-3 semanas (3-4 semanas desde la plantación de la semilla). Después de 4-6 semanas de crecimiento, las plantas deben ser cosechadas parcialmente, tomando sólo el 30% de la planta y dejando el resto para seguir creciendo ([Storey 2016g](#)).

7.2.1.7 Nasturtium

El nasturtium (*Tropaeolaceae tropaeolum*) es una planta tierna nativa de América del Sur. A diferencia de muchas plantas de cultivo, tanto las hojas como las flores son comestibles y tienen un sabor picante similar al de la mostaza o el berro. Las nasturtias son fáciles de cultivar en sistemas hidropónicos por sus hojas. Sin embargo, si los cultivadores están optimizando la producción de flores, pueden necesitar ajustar las proporciones de nutrientes y la luz para iniciar la floración. También puede ser necesario controlar la proporción de nitrógeno y potasio para iniciar la etapa vegetativa y fructífera, y cambiar el sistema de una mezcla de verduras a una mezcla de fresas cuando tienen aproximadamente la mitad de su tamaño maduro para iniciar las flores. Esto le da al cultivo la oportunidad de establecer raíces y tejido fotosintético, de modo que cuando florezcan sean capaces de producir más. La capuchina sufre

de las típicas plagas como los áfidos y los ácaros araña. Puede obtenerse en dos variedades diferentes: una variedad de vid y una variedad de arbusto ([Storey 2017b](#)).

Condiciones de cultivo ideales para la capuchina:

- Temperatura: 13-23°C
- pH: 6.1-7.8

Las capuchinas son amantes de la luz, pero funcionan mejor con un bajo estrés por calor. Las semillas pueden germinar en 13-18°C, y las plantas adultas lo hacen mejor a 21°C. El cultivo de flores se desarrolla bien en sistemas de baja conductividad eléctrica (CE) como los optimizados para verduras de hoja o fresas. Las semillas de capuchina tardan de 7 a 10 días en germinar en las condiciones adecuadas y están listas para ser trasplantadas tan pronto como aparecen las hojas verdaderas, lo que suele ser de 2 a 3 semanas desde la germinación. Las plantas producirán flores 5-6 semanas después, pero si el cultivador sólo está interesado en las hojas, éstas pueden ser cosechadas antes. Algunos cultivadores prefieren cultivar las nasturtias a una alta densidad y cosechar las hojas mientras aún son muy jóvenes ([Storey 2017b](#)).

7.2.2 Hierbas

Las hierbas suelen ser más rentables que las verduras de hoja. Diferentes hierbas tienen diferentes necesidades, y la falta de comprensión de esto puede reducir la vida útil o incluso arruinar el producto antes de que pueda ser utilizado. Los consejos para mantener las hierbas frescas después de la cosecha incluyen ([Storey 2016a](#)):

- Manténgalo fresco, pero no demasiado fresco

Las tasas de respiración disminuyen cuando los productos se mantienen frescos, ya que los estomas se cierran y el intercambio de gases disminuye. Cosechar durante un “momento fresco” del día también ayudará. Algunas hierbas, como la albahaca, son sensibles al enfriamiento y pueden dañarse. La albahaca no debe mantenerse por debajo de 13°C, por ejemplo, pero puede alcanzar una vida útil de 12 días en 15°C.

- Sea consistente

Las fluctuaciones de temperatura y humedad son en gran medida responsables de las enfermedades y la descomposición. Éstos pueden evitarse reduciendo el número de veces que el producto se traslada de un lugar a otro, y manteniendo constante la temperatura de los refrigeradores y los vehículos de transporte.

- Disminuir los daños a las plantas

La producción de etileno aumenta por las heridas, y acelera la tasa de deterioro. El uso de tijeras de podar cuando se cosechan las hierbas, en lugar de desgarrarlas, ayudará a evitar esto.

- Una talla no sirve para todos

Las prácticas de recolección y envasado deben ser específicas para la hierba y su edad, ya que las necesidades varían mucho. La mayoría de las hierbas comúnmente utilizadas difieren en su origen, necesidades y ciclos de vida. Esto significa que cada hierba debe tratarse de manera diferente para aumentar su vida útil.

- El envasado debe equilibrar la pérdida de agua con la descomposición

Las hierbas tiernas como la albahaca o el cebollino pierden menos agua cuando se envasan en bolsas de plástico, pero la condensación aumenta las tasas de descomposición.

- Controlar la exposición a la luz

El hecho de que se almacene bajo la luz o en la oscuridad puede influir en la tasa de decaimiento, dependiendo de la hierba.

7.2.2.1 Cilantro

Si bien el cilantro (*Coriandrum sativum*) es un cultivo fácil para los jardineros de tierra, los cultivadores de interior y los hidropónicos pueden no obtener la mayor eficiencia en el uso del espacio de este cultivo, ya que tiene un ciclo de crecimiento comparativamente largo y un rendimiento limitado. Por otra parte, es de bajo mantenimiento, y si los cultivadores están seguros de que pueden obtener un buen precio, entonces el cilantro puede seguir siendo un buen cultivo. Como es de pequeña talla, el cilantro puede cultivarse en casi cualquier sistema hidropónico, siempre que los rangos de pH y CE sean apropiados ([Storey 2017a](#)).

Condiciones de cultivo ideales para el cilantro:

- Temperatura: 5-23°C
- pH: 6.5-6.7

El cilantro puede ser un cultivo difícil de cultivar, ya que se desprende muy fácilmente, especialmente en condiciones de calor. Prefiere las temperaturas más frescas (5-23°C) y pocas sales. La preferencia por las temperaturas frescas se extiende también a la germinación; las temperaturas de 15-20°C darán como resultado las mejores tasas de germinación. Si se desencadena el empernado, lo que hace que el sabor de la hierba sea más amargo, se deben recortar los pernos y ajustar las condiciones ambientales. Los cultivadores pueden comprar semillas de lenta germinación para reducir al mínimo la posibilidad de que se pierdan las cosechas. Dos de las enfermedades más comunes del cilantro en hidroponía son la mancha bacteriana en las hojas y el oídio. El cilantro también es vulnerable al *Pythium*, que puede llegar a ser problemático en sistemas con una aireación inadecuada alrededor de las raíces ([Storey 2017a](#)).

Las semillas de cilantro germinan en 7-10 días, con las hojas listas para cosechar 40-48 días después. Desde la semilla hasta la cosecha, el cilantro tarda 50-55 días. El cilantro puede ser cosechado total o parcialmente, requiriendo muy poco mantenimiento como el recorte. Si se utiliza una cosecha parcial, la primera cosecha tendrá lugar a las 5 semanas después del trasplante y la segunda a las 8 semanas después del trasplante. La segunda cosecha será más baja que la primera. El cilantro puede envasarse

de varias maneras dependiendo del agricultor y, lo que es más importante, de la preferencia del mercado ([Storey 2017a](#)).

7.2.2.2 Menta

Hay docenas de tipos de menta, pero las principales variedades son la menta *spearmint* o hierbabuena (*Mentha spicata*), la menta *peppermint* o bergamota (*Mentha x piperita*) y la menta *pennyroyal* o poleo (*Mentha pulegium*); algunas de las otras mentas como la menta de limón (*Monarda citriodora*) en realidad no son menta en absoluto. La menta es uno de los cultivos más fáciles de cultivar. Es fácil de plantar, crece rápidamente y es fácil de cosechar.

Las condiciones de crecimiento ideales para la menta:

- La temperatura: 19-21°C
- pH: 6.5-7.0

La menta es tolerante a un EC bajo y a cierta variación de temperatura, aunque no le va bien cuando el calor sube por encima de 26°C. Lucha menos contra las plagas que muchas de las hierbas, aunque la marchitez del verticillium y el oídio pueden ser problemáticos. La menta puede crecer de la semilla, pero el uso de esquejes o portainjertos es mucho más rápido, especialmente a escala comercial. Los esquejes de tallo se pueden hacer quitando ramitas verdes sanas y poniéndolas en agua. Las raíces se formarán y las plantas crecerán hasta su madurez en unas pocas semanas. La menta se puede cosechar cortando unos 5 centímetros de la superficie del sistema. Una segunda cosecha estará lista en sólo 2-3 semanas, una vez que haya crecido a unos 20 centímetros ([Storey 2016m](#)).

7.2.2.3 Albahaca

Debido a la mayor captación de nitrógeno, la albahaca (*Ocimum basilicum*) es una planta ideal para la acuaponía, y puede crecer en camas con sustrato, NFT y sistemas DWC. Sin embargo, si la menta es una de las hierbas más fáciles de cultivar, entonces las hierbas leñosas como la albahaca están en el otro extremo de la escala. Aunque la albahaca no es muy exigente en términos de agua y pH, requiere de una poda (ver abajo) para lograr un rendimiento completo, y crece mejor a altas temperaturas que pueden ser difíciles de igualar con otros cultivos, por lo que puede ser mejor cultivarla como un monocultivo. Se han probado muchos cultivares de albahaca en sistemas acuapónicos, entre ellos la albahaca genovesa (albahaca dulce), la albahaca limón y la albahaca pasión púrpura.

Condiciones de cultivo ideales para la albahaca:

- La temperatura: 18-30°C, óptima 20-25°C
- pH: 5.5-6.5

Las semillas de albahaca necesitan una temperatura razonablemente alta y estable para iniciar la germinación (20-25°C), y deben germinar en 6 o 7 días. Las plántulas deben ser trasplantadas al sistema acuapónico cuando tengan 4-5 hojas verdaderas. Una vez trasplantadas, la albahaca crece mejor en condiciones de calor a mucho calor, con plena exposición al sol. Sin embargo, las hojas de mejor calidad se obtienen mediante el uso de un ligero sombreado. Si las temperaturas exceden de

27°C las plantas necesitarán ser ventiladas o cubiertas con redes de sombreo (20%) para prevenir quemaduras en las puntas. La albahaca puede verse afectada por diversas enfermedades fúngicas, como la marchitez por *Fusarium*, el moho gris y la mancha negra, en particular en condiciones de temperaturas subóptimas y alta humedad. La ventilación del aire y las temperaturas del agua superiores a 21°C ayudan a reducir el estrés de las plantas y la incidencia de enfermedades ([Somerville et al. 2014c](#)).

La forma de las hojas de la albahaca hace que atrapen agua y la retengan, por lo que es muy importante controlar la condensación. La humedad en el invernadero debe mantenerse entre el 40-60%. La albahaca es muy sensible, por lo que requiere un buen flujo de aire pero no una corriente de aire. Crece bien con 10-12 horas de luz, pero si se complementa la luz, se aumenta el rendimiento. Las hojas moribundas deben ser removidas, ya que tienden a pegarse a las otras hojas y las dañan, o crecen los hongos. Las plantas que son de punta o de arriba deben ser podadas usando tijeras afiladas en lugar de pellizcarlas, ya que se corre el riesgo de dañar o arrancar un tallo entero. Si el crecimiento en el extremo del tallo es demasiado pesado, se separará de la base de la raíz principal y se volverá amargo. El amargor de la albahaca puede eliminarse cosechando antes de que se atornille para florecer, desechando cualquier crecimiento viejo/resistente y eliminando los tallos rotos ([Storey 2016e](#)).



Figura 4: Albahaca creciendo en un sistema NFT

<https://www.goodfreephotos.com/public-domain-images/plants-in-the-green-house.jpg.php>

La albahaca se ha criado para ser una planta de tallo único que crece hacia arriba (crecimiento apical). Para la mayoría de los cultivadores, una planta más tupida es mejor. Una planta podada se ve mejor, rinde más y puede ser más fácil de transportar dependiendo del método de cultivo. Para cambiar la

forma en que crece la albahaca, los cultivadores pueden activar un tipo de crecimiento secundario que se mueve hacia afuera y hacia arriba en lugar de directamente hacia arriba (crecimiento lateral). Una planta joven de albahaca (de 12 a 25 centímetros de altura) tiene brotes laterales en el lado del tallo que sólo crecerán si el tallo principal se daña mucho o se quita. Esto significa que si los cultivadores cortan el tallo justo por encima de esas yemas laterales (1 centímetro más o menos), se desencadenará el crecimiento de las yemas. Al podar la albahaca de esta manera, los cultivadores pueden aumentar la producción de esa rama y controlar la forma de la planta. La planta debe ser cortada por encima del segundo par de brotes para que el crecimiento se abanique y no detenga el flujo de aire o la penetración de la luz. Una poda correcta resultará en un aumento de la producción en cada una de las tres primeras cosechas (alrededor de las semanas 5, 8 y 11) ([Storey 2016e](#)).

La cosecha de hojas comienza cuando las plantas alcanzan los 15 cm de altura y continúa durante 30-50 días. La albahaca debe ser manejada con cuidado, ya que los moretones pueden aumentar la tasa de deterioro. No debe ser almacenada en un refrigerador, donde la temperatura se mantiene generalmente en 5-7°C, ya que es un cultivo de clima cálido y no tiene la maquinaria celular para hacer frente a esas temperaturas, y se descompondrá rápidamente. Para prolongar su vida útil, debería almacenarse por encima de 13°C (preferiblemente a una temperatura de 16°C). A esta temperatura, puede alcanzar una vida útil de 12 días. Si los cultivadores empacan la albahaca en bolsas o cartones que reducen la pérdida de humedad (plástico con poco o ningún intercambio de aire), la temperatura de almacenamiento deberá mantenerse constante para evitar la condensación ([Storey 2016e](#)).

7.2.2.4 Cebollino

El cebollino (*Allium schoenoprasum*) es un cultivo resistente que sobrevivirá a una amplia gama de temperaturas e incluso puede pasar sin agua durante un tiempo sin que afecte a su calidad. El cebollino también es bastante resistente a las plagas, rara vez se infecta con enfermedades y rara vez es blanco de las plagas de insectos. Los problemas más comunes en los sistemas hidropónicos son los virus y los mosquitos de hongos ([Storey 2016n](#)).

Condiciones de cultivo ideales para el cebollino:

- Temperatura: 18-26°C
- pH: 6.1 a 6.8

Los cebollinos se propagan rápidamente desde las raíces, y pueden ser plantados por división. Rara vez los cultivadores necesitarán usar semillas para cultivar plántulas de cebollinos, a menos que no se encuentren plantas maduras de cebollinos en ningún lugar. Si los cebollinos crecen a partir de semillas, las plántulas estarán listas para ser trasplantadas unas 4 semanas después, y listas para ser cosechadas 3-4 semanas después. Cuando se plantan de raíz, los cebollinos se establecerán dentro de 2-3 semanas y crecerán más gruesos con cada cosecha. El cebollino debe ser cosechado cada dos o tres semanas recortando hasta unos 2,5-5 centímetros por encima de la corona ([Storey 2016n](#)).

7.2.2.5 Perejil

Perejil (*Petroselinum crispum*) crece bien en camas con sustrato, sistemas NFT y DWC, y es común en las unidades comerciales de acuaponía debido a su alto valor de mercado. Las variedades de hojas grandes como la hoja plana italiana (*P. crispum* var. *neapolitanum*) crecen particularmente bien. Las plagas del perejil son raras, pero los cultivadores pueden ver áfidos o trips.

Condiciones de crecimiento ideales para el perejil:

- La temperatura: 15-25°C; muy resistente al frío
- pH: 6.0-7.0

El perejil es una hierba bienal que tradicionalmente se cultiva como anual. La mayoría de las variedades crecerán durante un período de dos años si la temporada de invierno es suave con una helada mínima a moderada. En el primer año las plantas producen hojas, mientras que en el segundo enviarán tallos de flores para la producción de semillas. El perejil disfruta de pleno sol hasta ocho horas al día. Se requiere un sombreado parcial cuando las temperaturas superan 25°C ([Somerville et al. 2014c](#)).

El perejil viene como una semilla asequible y germina dentro de 8-10 días con buena humedad y una temperatura de 20-25°C. Si las semillas no son frescas, la germinación puede tardar hasta 5 semanas. Para acelerar la germinación, las semillas pueden ser remojadas en agua caliente (20-23°C) durante 24-48 horas para ablandar las cáscaras de las semillas. Las plántulas emergentes tendrán la apariencia de hierba, con dos hojas de semillas estrechas opuestas entre sí. Las plántulas están listas para ser trasplantadas después de 5-6 semanas cuando muestran sus verdaderas hojas. Se pueden plantar a 10-15 plantas/m². La primera cosecha suele ocurrir 20-30 días después del trasplante, una vez que los tallos individuales de las plantas tienen al menos 15 cm de largo. Cosechar primero los tallos exteriores ya que esto fomentará el crecimiento a lo largo de la temporada ([Somerville et al. 2014c](#)). Alternativamente, el perejil puede cosecharse varias veces, utilizando tijeras o un cuchillo de cosechar para cortar el cultivo hasta 5 centímetros de la superficie del sistema. Otra cosecha puede realizarse unas 3 semanas después. Se debe iniciar un nuevo ciclo después de la segunda cosecha ([Storey 2016a](#)).

7.2.2.6 Hinojo

El hinojo (*Foeniculum vulgare*) rara vez tienen problemas con las plagas si se mantiene sano, aunque las infestaciones de áfidos podrían afectar al cultivo.

Condiciones de crecimiento ideales para el hinojo:

- La temperatura: 16-21°C
- pH: 6.4-6.8

El hinojo prefiere un EC más bajo y un pH moderado. Aunque a menudo demuestra ser tolerante al calor y al frío, no es tolerante a las heladas. El hinojo tiene un rango más amplio de tasas de germinación, de alrededor del 60% al 90%. Las semillas tardan de 1 a 2 semanas en germinar y suelen estar listas para ser trasplantadas de 3 a 5 semanas después. Desde el trasplante, necesita alrededor de 6-8 semanas para alcanzar el tamaño de la cosecha. Los bulbos pueden ser cosechados tan pronto

como el cultivador quiera, pero de 250 g a 500 g de bulbos son estándar en la mayoría de los mercados. El hinojo puede ser cosechado dos veces (una vez sólo para las verduras, una vez para el bulbo y las verduras juntas) si hay un mercado para las verduras. Al igual que con la acelga y la col rizada, sólo el 70% de las hojas deben ser retirados en la primera cosecha ([Storey 2016d](#)).

7.2.3 Cultivos frutales

La poda es importante para los cultivos frutales que crecen en los sistemas acuapónicos. Sin una poda regular, puede producirse un crecimiento excesivo, lo que es muy difícil de manejar. Los sistemas radiculares de las plantas acuapónicas no son tan fuertes como los de las plantas que crecen en el suelo porque las raíces no tienen que extenderse en busca de nutrientes, y las plantas de los sistemas acuapónicos no son capaces de soportar cargas pesadas debido al deficiente anclaje de las raíces. La poda también es importante para la producción en invernadero porque, debido al mayor costo por pie cuadrado, los cultivadores necesitan utilizar la zona de manera muy eficiente. Por lo tanto, la poda permite una plantación de alta densidad y una mejor calidad de los productos.

7.2.3.1 Tomates

Los tomates (*Solanum lycopersicum*) crecen típicamente en uno de dos sistemas, dependiendo de la variedad. Las variedades arbustivas (determinadas - producción estacional) son especialmente comunes en las *heirloom* (tomates no híbridas) y pueden ser más difíciles de manejar. Los tomates de arbusto tienden a extenderse a lo largo del suelo de un invernadero, haciendo que el enrejado sea difícil o incluso imposible. Como resultado, los cultivadores pueden tener problemas para alcanzar la fruta, podar las plantas y manejar el invernadero. Las variedades de vid (indeterminadas - producción continua de ramas florales) son preferibles para la mayoría de los cultivadores, ya que las plantas pueden ser podadas a un solo "líder" y enrejadas. Esto hace que las plantas sean más accesibles y mucho más rápidas para cosechar y podar. Una configuración típica de cubo de Bato y tomate (véase 9.2.4) incluye dos plantas por cubo, con cubos separados por 60-90 centímetros. Si se cultivan como plantas individuales (como en un sistema de losa), los tomates pueden ser podados a dos puntos de crecimiento por planta. Los tomates son propensos a muchas plagas y enfermedades, las más comunes son la marchitez por *Verticillium*, *Fusarium*, nematodos, ácaros araña, pulgones, ahogamiento (*damping off*), y el virus del mosaico. Cuando compre tomates o semillas, busque la etiqueta "VFN" que indica la resistencia a *Verticillium*, *Fusarium*, y nematodos ([Storey 2017c](#)).

Condiciones de cultivo ideales para los tomates:

- La temperatura: 13-26°C
- pH: 5.5-6.5

Los tomates, como cultivo frutal, son hambrientos de nutrientes (ver Tabla 1). Les gusta el calor, y crecerán bien en el mismo ambiente que los cultivos como el quimbombó o la albahaca. Una desventaja de los tomates es que su sabor está particularmente influenciado por el medio en el que crecen. Por lo tanto, es necesario asegurar que el medio de cultivo se mantenga en una proporción

adecuada. Debido a que los tomates son un cultivo tan común, hay una abundancia de datos sobre la solución de problemas y deficiencias. Las deficiencias comunes de las plantas de tomate son el fósforo y el magnesio ([Storey 2017c](#)).

Tabla 1: Composiciones recomendadas de soluciones de nutrientes adaptadas a la fase de crecimiento de los tomates en cultivos sin suelo (de Raviv y Lieth 2007)

Fase de crecimiento	N	P	K	Ca	Mg
	(mg L ⁻¹)				
Trasplante	80-90	30-40	120-140	180-220	40-50
Floración y antesis ¹	120-150	30-40	180-220	230-250	40-50
Maduración y cosecha de frutos	180-200	30-40	230-250	180-220	40-50
Recolección de fruta	120-150	30-40	180-220	180-220	40-50

Las semillas germinarán en 4-6 días en 20-30°C. Las estacas o soportes de las plantas deben ser colocados antes del trasplante para prevenir el daño a las raíces. Las plántulas pueden ser trasplantadas al sistema acuapónico 3-6 semanas después de la germinación cuando las plántulas tienen 10-15 cm de altura y cuando las temperaturas nocturnas están constantemente por encima de 10°C. Los tomates pueden cultivarse en cama con sustrato, evitando las condiciones de encharcamiento alrededor del cuello de la planta para reducir cualquier riesgo de enfermedades. Dada su elevada demanda de nutrientes, especialmente de potasio, el número de plantas por unidad debe planificarse en función de la biomasa de peces para evitar las deficiencias de nutrientes. Los tomates prefieren las temperaturas cálidas, con exposición total al sol. La temperatura óptima durante el día es de 22-26°C, mientras que las temperaturas nocturnas de 13-16°C favorecen el cuajado ([Somerville et al. 2014c](#)).

La poda es crucial para la producción de tomates, ya que asegura la utilización adecuada de la energía para el crecimiento de los frutos y el tallo principal. Una vez que las plantas de tomate tienen alrededor de 60 cm de altura, el método de cultivo (arbusto o tallo único) puede determinarse mediante la poda de las ramas superiores innecesarias. Las variedades arbustivas pueden dejarse crecer como arbustos dejando 3-4 ramas principales y eliminando todas las ventosas auxiliares para desviar el nutriente a los frutos. Los tomates en racimos pueden crecer hasta una altura de 4 metros, mientras que 2 metros es una altura normal. La poda es necesaria para los tomates de enredadera, ya que el 50 % del rendimiento del tomate se reduce sin poda y sin enrejado. Tanto las variedades de arbusto como las de vid deben crecer con un solo tallo (el doble en caso de alto vigor de la planta) eliminando todas las ventosas auxiliares. El mejor método es la eliminación manual de las ventosas de 2 a 2,5 mm de longitud una vez por semana. Con este tamaño, las ventosas pueden romperse fácilmente sin dañar el tallo principal. En las variedades de arbustos, la punta apical del tallo único debe cortarse tan pronto como la planta alcance 7-8 ramas florales para favorecer la fructificación. Los tomates se apoyan en

¹ La antesis es el periodo de floración de una planta, desde la apertura del botón floral

soportes que pueden estar hechos de estacas (variedades arbustivas) o atados a cuerdas verticales de plástico/nylon que se fijan a alambres de hierro tirados horizontalmente por encima de las unidades de la planta (variedades de vid). También es importante quitar las hojas de los 30 cm inferiores del tallo principal para favorecer una mejor circulación del aire y reducir la infección por hongos. La mejor manera de quitarlas es doblarlas primero hacia arriba y luego tirarlas hacia abajo para evitar que se pele la piel del tallo. Eliminar las hojas que cubren cada rama de la fruta poco antes de la maduración para favorecer el flujo de nutrición a los frutos y acelerar la maduración ([Singh y Dunn 2017](#); [Somerville et al. 2014c](#)).

Los tomates normalmente son polinizados por el viento o por abejas cuando crecen en el exterior. En los invernaderos, sin embargo, el movimiento del aire es insuficiente para que las flores se polinicen a sí mismas. La polinización se puede llevar a cabo manualmente o mediante abejorros (*Bombus* sp.). Es importante mantener los niveles correctos de población de abejorros, ya que la superpoblación puede dar lugar a que las abejas sobrecarguen las flores de tomate. Para la polinización manual, la vibración de los racimos de flores de tomate es esencial. Esto puede hacerse golpeando las flores con un palo, los dedos o un vibrador eléctrico como un cepillo de dientes eléctrico. La polinización debe hacerse mientras las flores están en un estado receptivo, lo que se indica por sus pétalos curvados hacia atrás. Las plantas deben ser polinizadas al menos cada dos días, ya que las flores permanecen receptivas durante unos 2 días. La polinización debe hacerse entre las 11:00 am y las 3:00 pm en condiciones soleadas para obtener mejores resultados. Si la polinización se ha hecho correctamente, se desarrollarán pequeños frutos en forma de perlas en una semana más o menos. A esto se le llama conjunto de frutos. Cuando las plantas jóvenes producen sus primeros armazones, polinizan cada día hasta que los frutos son visibles. Es importante que el fruto se fije en estos primeros armazones, ya que esto hace que la planta entre en un estado reproductivo, lo que favorece una mayor producción de flores y frutos a medida que la planta envejece. Después de que los primeros armazones se han fijado, la polinización se puede hacer cada dos días. Las investigaciones han demostrado que una humedad relativa del 70% es óptima para la polinización, el cuaje y el desarrollo de los frutos ([Resh 2013](#)).

El tiempo de crecimiento es de 50-70 días hasta la primera cosecha, y la fructificación continúa durante 90-120 días en las variedades de arbustos y hasta 8-10 meses en las variedades de vid. Para obtener el mejor sabor, coseche los tomates cuando estén firmes y con todo su color. Los frutos seguirán madurando si se recogen medio maduros y se llevan al interior. Las frutas pueden mantenerse fácilmente durante 2 a 4 semanas en 5-7°C bajo una humedad relativa de 85 a 90 por ciento ([Somerville et al. 2014c](#)).

7.2.3.2 Pimientos

Los pimientos (*Capsicum annuum*) prefieren las condiciones cálidas y la exposición al sol. Al igual que otras plantas frutales, el nitrato favorece el crecimiento vegetativo original (rango óptimo 20-120 mg/litro), pero se necesitan concentraciones más altas de potasio y fósforo para la floración y la fructificación ([Somerville et al. 2014c](#)).

Condiciones de crecimiento ideales para los pimientos:

- Temperatura: 19-23°C
- pH: 5.5-6.5

Tabla 2: Composiciones recomendadas de la solución de nutrientes adaptadas a la fase de crecimiento de los pimientos en el cultivo sin suelo (de Raviv y Lieth 2007)

Fase de crecimiento	N	P	K
	(mg L ⁻¹)		
Desde trasplante hasta floración	50-60	50-60	75-80
Antesis hasta crecimiento fruta	80-100	80-100	100-120
Maduración y cosecha de frutos	100-120	100-120	140-160
Recolección de fruta	130-150	130-150	180-200

Las semillas germinarán en 8-12 días en 22-30°C. Las plántulas pueden ser trasplantadas tan pronto como la temperatura nocturna se establezca por encima de 10°C, y cuando tengan 6-8 hojas verdaderas. Las plantas tupidas y de alto rendimiento deben ser apoyadas con estacas o cuerdas verticales que cuelgan de alambres de hierro tirados horizontalmente por encima de los cubos. Se deben recoger las primeras flores que aparecen en la planta para estimular el crecimiento de la planta, y el número de flores debe reducirse en caso de un excesivo cuajado de los frutos para favorecer el crecimiento de los frutos hasta alcanzar el tamaño adecuado ([Somerville et al. 2014c](#)).

Debido a las pautas de crecimiento únicas de un pimiento, la poda es esencial para asegurar una cosecha exitosa. La poda reducirá el costo de producción, aumentará el rendimiento y reducirá la susceptibilidad a las enfermedades. La poda del pimiento dulce es diferente de la del tomate porque los pimientos no producen brotes laterales como los tomates. Después del pellizco (eliminación de la punta de la planta), los dos nodos superiores comienzan a crecer. El objetivo principal de la poda del pimiento dulce es desarrollar un marco vegetativo fuerte para apoyar el crecimiento y el peso del fruto durante la producción. Estos son los pasos para la poda del pimiento dulce ([Singh y Dunn 2017](#)):

1. Eliminar el punto de crecimiento o el extremo del tallo después de los primeros 40 cm
2. Tratar cada uno de los dos tallos como un individuo y alternar entre quitar el brote lateral interno y externo de cada tallo principal
3. Retire el brote lateral cuando tenga 50 mm de largo
4. En cada tallo individual, quite los racimos de flores alternas. La carga pesada de fruta en una planta puede llevar a una menor calidad de la fruta y puede causar desórdenes fisiológicos como la putrefacción del extremo de la flor
5. Quitar completamente cualquier hoja amarilla del invernadero

El tiempo de crecimiento es de 60 a 95 días. Al igual que los tomates, los pimientos también necesitan ser polinizados manualmente o introduciendo una colmena de abejorros en el invernadero. En el caso de los pimientos rojos dulces, los frutos verdes deben dejarse en la planta hasta que maduren y se vuelvan rojos. La cosecha debe comenzar cuando los pimientos alcanzan el tamaño comercial y

continuar durante toda la temporada para favorecer la floración, el cuajado y el crecimiento de los frutos. Los pimientos pueden almacenarse fácilmente frescos durante 10 días en 10°C con una humedad del 90 al 95% ([Somerville et al. 2014c](#)).

7.2.3.3 Pepino

El pepino (*Cucumis sativus*) se presenta en tres razas sexuales: una mezcla mitad y mitad de flores masculinas y femeninas (monoicas); una mezcla 70/30 de flores femeninas a masculinas (ginecológicas); y plantas con flores enteramente femeninas (partenocárpicas). Plantar sólo plantas de flores femeninas asegurará un fruto floreciente con cada planta y, por lo tanto, un cultivo que puede dar frutos sin polinización. Sin embargo, el polen transmitido por las abejas y otros polinizadores puede corromper las plantas partenocárpicas, por lo que será necesario mantener a los posibles polinizadores fuera del invernadero ([Valdez 2017a](#)). Los pepinos pueden cultivarse en unidades de lechos con sustrato, ya que tienen una gran superficie de raíces, y en balsas flotantes de DWC, aunque en los tubos de cultivo podría haber un riesgo de obstrucción debido al excesivo crecimiento de las raíces ([Somerville et al. 2014c](#)).

Condiciones de crecimiento ideales para los pepinos:

- Temperatura: 24-27°C
- pH: 5.5-6.5

Los pepinos requieren grandes cantidades de nitrógeno y potasio, por lo que la decisión sobre el número de plantas a cultivar debe tener en cuenta los nutrientes disponibles en el agua y la biomasa de peces. Crecen mejor con días largos, calurosos y húmedos, con amplio sol y noches cálidas. Las temperaturas óptimas de crecimiento son 24-27°C durante el día, con 70-90 % de humedad relativa, y una temperatura nocturna de 18-20°C. Son altamente susceptibles a las heladas. La luz solar plena y una temperatura del sustrato de alrededor de 21°C también son óptimas para la producción. Una mayor concentración de potasio favorecerá un mayor cuajado y rendimiento de los frutos ([Somerville et al. 2014c](#)).

Las semillas germinarán después de 3 a 7 días a una temperatura de 20-30°C. Las plántulas pueden ser trasplantadas a las 2-3 semanas cuando hayan desarrollado 4-5 hojas. Una vez trasplantados, los pepinos pueden empezar a producir frutos después de 2-3 semanas. En condiciones óptimas, las plantas pueden ser cosechadas 10-15 veces. Cosechar cada pocos días evitará que los frutos se vuelvan demasiado grandes, y favorecerá el crecimiento de los siguientes. Las plantas de pepino crecen muy rápidamente y es una buena práctica limitar su vigor vegetativo y desviar los nutrientes a los frutos cortando sus puntas apicales cuando el tallo tiene dos metros de largo; la eliminación de las ramas laterales también favorece la ventilación. Se puede lograr un mayor alargamiento de la planta dejando sólo los dos brotes más lejanos que salen del tallo principal. Se alienta a las plantas a aumentar la producción mediante la recolección regular de frutos de tamaño comercializable. Las plantas de pepino necesitan apoyo para su crecimiento, lo que también les proporcionará una aireación adecuada para prevenir enfermedades foliares como el oídio y el moho gris. Debido a la alta incidencia de plagas en las plantas de pepino, es importante aplicar estrategias adecuadas de MIP (véase el

capítulo 8) e intercalar las unidades vegetales menos afectadas por los tratamientos utilizados ([Somerville et al. 2014c](#)).

7.2.3.4 La berenjena

La berenjena (*Solanum melongena*) es un cultivo codicioso, que prospera a altas temperaturas y requiere mucho espacio entre cada planta. Puede ser difícil regular las temperaturas para mantener a las berenjenas contentas mientras se cultivan otros cultivos en el mismo entorno, por lo que es mejor cultivarlas como un monocultivo para evitar los malabares del control climático ([Valdez 2017a](#)).

Condiciones de cultivo ideales para la berenjena

- Temperatura: 22-26°C
- pH: 5.5-7.0

La berenjena tiene altos requerimientos de nitrógeno y potasio, por lo que se requiere una cuidadosa elección del manejo del número de plantas a cultivar para evitar los desequilibrios de nutrientes. Disfruta de temperaturas cálidas con plena exposición al sol, y una humedad relativa del 60-70 por ciento. Las temperaturas nocturnas ideales son 15-18°C. Las plantas de berenjena son muy susceptibles a las heladas ([Somerville et al. 2014c](#)).

Las semillas germinarán en 8-10 días con temperaturas cálidas (26-30°C) y las plántulas pueden ser trasplantadas en primavera, cuando las temperaturas están subiendo, cuando tienen 4-5 hojas. Hacia el final del verano, se deben pellizcar las nuevas flores para favorecer la maduración de los frutos existentes. Al final de la temporada, las plantas pueden ser drásticamente podadas a 20-30 cm dejando sólo tres ramas. Este método interrumpe el cultivo sin retirar las plantas durante el invierno, y permite a la planta reiniciar la producción después. Las plantas pueden crecer sin podar, y el manejo de las ramas puede facilitarse con estacas o cuerdas verticales. El tiempo de crecimiento es de 90-120 días. Al igual que los tomates y los pimientos, las berenjenas también necesitan ser polinizadas manualmente o introduciendo una colmena de abejorros en el invernadero. La cosecha debe comenzar cuando los frutos tengan 10-15 cm de largo, usando un cuchillo afilado para cortar el fruto de la planta, dejando al menos 3 cm de tallo adherido al fruto. La piel debe ser brillante; la piel opaca y amarilla es un signo de que el fruto está demasiado maduro. El retraso en la cosecha hace que los frutos no se puedan comercializar debido a la presencia de semillas en su interior. Las plantas pueden producir de 10 a 15 frutos para un rendimiento total de 3 a 7 kilos ([Somerville et al. 2014c](#)).

7.2.3.5 Fresas

La fresa de jardín (o simplemente fresa; *Fragaria × ananassa*) es una especie híbrida ampliamente cultivada del género *Fragaria*, conocida colectivamente como fresas. Las fresas son diferentes de otros cultivos. Viven durante mucho tiempo, pero también son susceptibles a muchas enfermedades. La podredumbre de la corona o del corazón es una enfermedad fúngica que es especialmente común en las fresas. La corona de la planta es la región donde las raíces se convierten en el tallo, por lo que es importante asegurarse de que la corona se mantenga fuera de la zona húmeda. Los ácaros también pueden ser un problema. Las diferentes variedades tienen diferentes preferencias ambientales y

diferentes plazos de fructificación: una variedad puede tardar un mes en empezar a dar frutos después de la plantación, mientras que otra puede necesitar varios meses. Algunas variedades también sólo dan frutos durante una parte del año, incluso en interiores. Las variedades de porte constante o de día neutro son las mejores para los cultivadores de interior ([Storey 2016](#)).

Condiciones de cultivo ideales para las fresas:

- La temperatura: 18-20°C
- pH: 5.5 a 6.0

Tabla 3: Composiciones recomendadas para soluciones nutritivas durante cada fase de crecimiento para fresas en cultivo sin suelo (de Raviv y Lieth 2007)

Fase crecimiento	N	P	K	Ca	Mg
	(mg L ⁻¹)				
Trasplante	55-60	20-25	45-60	60-70	35-40
Antesis y primera tanda de fruta	70-85	20-25	70-90	100	45
Segunda tanda fruta	80-85	25-30	80-90	100	45
Tercera tanda fruta	80-85	25-30	80-90	100	45
Cuarta tanda fruta	55-60	20-25	55-60	80	35

Es mejor cultivar fresas a partir de un rizoma en lugar de una semilla. El crecimiento vegetativo (estolones) tiende a ser mucho más rápido que la reproducción sexual (semillas), por lo que se puede reducir el tiempo entre la plantación y la producción en meses o años mediante el uso de portainjertos. En un sistema sano, el portainjertos de fresa tendrá un nuevo crecimiento que brotará en menos de una semana, con las primeras flores a las dos semanas aproximadamente, pero es importante pellizcar los brotes durante 4 a 6 semanas para mantener los recursos de la planta dirigidos al crecimiento vegetativo, lo que le dará a la planta la capacidad de obtener mayores rendimientos más adelante. Si se permite que las flores se desarrollen, el fruto se forma y madura en unas dos semanas, aunque esto variará según la variedad y el entorno de crecimiento. En el exterior, los productores pueden confiar en los polinizadores naturales como las abejas, las moscas y los pájaros para que difundan el polen de las partes masculinas a las partes femeninas de las plantas de fresa. En el interior, los productores tendrán que albergar una colmena o polinizar a mano. La polinización manual puede hacerse con un pincel. Alterando ligeramente el centro de las flores, una tras otra, esto esparcirá el polen de flor en flor. La polinización manual puede llevar de 10 a 30 segundos por planta, lo que puede llevar mucho tiempo a gran escala, por lo que puede ser más económico utilizar abejas en su lugar ([Storey 2016](#)).

La poda de la fresa consiste en la poda de las hojas, las flores y la corona, y la eliminación de los estolones. La poda de hojas consiste en la eliminación de las hojas viejas que empiezan a ponerse amarillas. Estas hojas también impiden la circulación del aire y la interceptación de la luz en el dosel, lo que aumenta las posibilidades de desarrollo de la enfermedad. El crecimiento de los estolones durante el período de producción es innecesario y un desperdicio de carbohidratos, que pueden utilizarse para la producción de flores. Por lo tanto, la poda de corredores también es importante para

la producción de fruta de buena calidad. La poda de flores en la fresa se hace para promover el crecimiento vegetativo o para promover la producción de frutos grandes. Cuando las plantas se inician a partir de los corredores, las plantas necesitan establecer una gran corona. Para el desarrollo de la corona, se eliminan las flores desarrolladas durante el crecimiento temprano, de modo que los azúcares producidos por la fotosíntesis se asignan al crecimiento vegetativo. El tamaño de los frutos es inversamente proporcional al número de flores. Si se produce un gran número de flores pequeñas, es probable que la producción de frutos sea pequeña, por lo que la poda de flores es necesaria para la producción de frutos de buena calidad. La poda de corona también es importante para la inducción del botón floral en la fresa cuando las plantas son demasiado vegetativas. Durante la producción de invierno, la poda de corona es necesaria para mantener una densidad adecuada de la corona en la producción de fresas en invernadero ([Singh y Dunn 2017](#)).

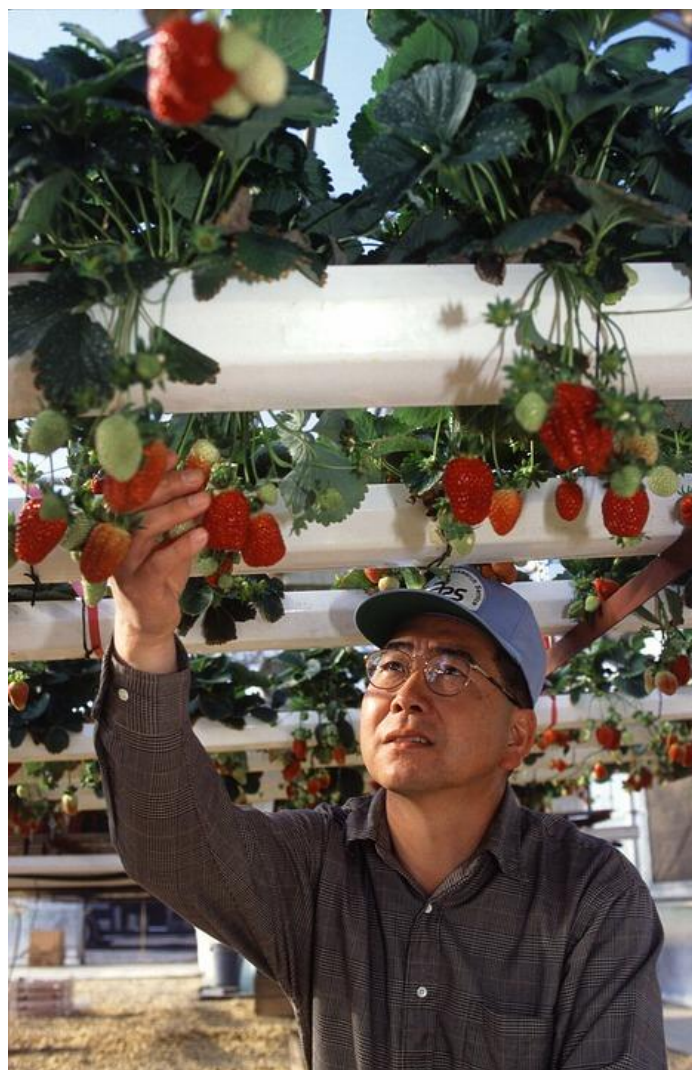


Figura 5: Fresas creciendo en canales NFT

<https://www.maxpixel.net/Produce-Strawberries-Hydroponic-Farming-Growing-621914>

7.2.4 Selección de cultivos para diferentes sistemas

El diseño del lecho de cultivo influye en la elección de las plantas. En las unidades con sustrato, siempre que tengan la profundidad adecuada (por lo menos 30 cm), es una práctica común cultivar un policultivo de verduras de hoja, hierbas y hortalizas frutales al mismo tiempo. El policultivo en superficies pequeñas también puede aprovechar la plantación de acompañamiento para el control de plagas y enfermedades, y una mejor gestión del espacio, porque las especies tolerantes a la sombra pueden crecer debajo de plantas más altas. Las prácticas de monocultivo son más frecuentes en las unidades comerciales de NFT y DWC, porque el cultivador se ve restringido por el número de agujeros en los tubos y balsas en los que plantar hortalizas. Utilizando unidades NFT, podría ser posible cultivar las hortalizas de fruto más grande, como los tomates, pero estas plantas necesitan tener acceso a cantidades copiosas de agua para asegurar un suministro suficiente de nutrientes y evitar el estrés hídrico. La marchitez en las plantas frutales puede ocurrir casi inmediatamente si se interrumpe el flujo, con efectos devastadores para toda la cosecha. Las plantas frutales también deben plantarse en tubos de cultivo más grandes, idealmente con fondos planos, y colocarse a una distancia mayor que las hortalizas de hoja. Esto se debe a que las plantas frutales crecen más y necesitan más luz para madurar sus frutos, y también porque hay un espacio limitado para las raíces en los tubos. Por otra parte, es más probable que los grandes cultivos de bulbos y/o raíces, como el colinabo, las zanahorias y los nabos, se cultiven en cama con sustrato porque las unidades de DWC y NFT no proporcionan un buen entorno de crecimiento y un apoyo adecuado para las plantas ([Somerville et al. 2014a](#)).

La selección de plantas para el cultivo en aguas profundas (DWC) o sistemas de balsa requiere la consideración de una serie de factores importantes ([Valdez 2017b](#)):

s

1) Peso - Las balsas suelen ser bastante duraderas y asequibles, pero sólo pueden soportar un peso limitado. Los mejores cultivos para el cultivo en aguas profundas son pequeños y ligeros. La lechuga, por ejemplo, es un cultivo popular de DWC y el tamaño perfecto para caber en las balsas. Los cultivos más grandes, como los tomates, crecen en la parte superior. Sin el anclaje de las raíces que proporciona un medio denso, las plantas pesadas pueden caerse o romperse en los tallos.

2) Huella (volumen) - Los sistemas de DWC funcionan en un solo plano horizontal, ya que normalmente son demasiado pesados para apilarlos. Esto significa que hay una relación de volumen a área de crecimiento de 1:1, por lo que es necesario llenar el plano horizontal de manera eficiente eligiendo plantas que puedan crecer a densidades de plantación más altas (es decir, verdes frondosas).

3) Respetuoso con el agua - Las plantas y hierbas amantes de la sequía como el orégano y el romero que prefieren "pies secos" no funcionan bien en los sistemas de DWC. Por otro lado, las plantas sedientas como la lechuga prosperarán en los sistemas de cultivo de agua profunda.

Los cubos Bato (o cubos "holandeses") son una variación de la técnica de cama con sustrato que utiliza una serie de pequeñas camas con sustrato en cubos. Un sistema de cubos Bato se establece típicamente con cubos escalonados en un banco o en el suelo, con la línea de alimentación llevando el agua a los cubos desde arriba, y la línea de drenaje (o línea de retorno) llevando el agua desde abajo. Los tres medios más comunes utilizados en los sistemas de cubos Bato son la perlita, la arcilla

expandida y el coco de coco. Estos pueden ser utilizados por sí mismos o juntos en diferentes proporciones ([Valdez 2017a](#)).

Los cultivos más populares para los cubos Bato son los grandes y/o los cultivos de vid como los tomates, los pepinos, los pimientos y la berenjena. Los cultivos de enredadera crecen en "líderes" que enredan hacia arriba o hacia afuera dependiendo del enrejado. Por lo tanto, muchos de estos cultivos pueden ser enrejados y formados hacia arriba, creando filas de plantas altas y hacia fuera, que son fáciles de acceder y monitorear. La selección de cultivos para un sistema Bato requiere las siguientes consideraciones ([Valdez 2017a](#)):

1) Resistencia a las enfermedades - Los cubos de Bato pueden ahorrar mucho espacio pero agrupan los cultivos, creando una vulnerabilidad a las enfermedades. Las plantas más resistentes significan menos riesgo y problemas.

2) Huella y estilo de la planta - Las plantas elegidas para crecer en los cubos Bato tendrán una influencia en el espacio, el mantenimiento y las estrategias de cosecha. Dado que los cubos Bato se colocan en planos horizontales, en bancos o en el suelo, es importante que los cultivadores aprovechen al máximo el volumen de espacio por encima de los cubos. Los cultivos de vid permiten a los cultivadores hacer eso.



Figura 6: Cubos Bato (derecha) que se están usando para crecer fresas en la granja urbana de la Universidad del Distrito de Columbia en Beltsville (<https://www.flickr.com/photos/usdagov/32245870463>)

Las mejores plantas para los cubos de Bato son:

- Tomates - dejar 60-90 centímetros entre los cubos. Dos plantas por cada cubo Bato darán el máximo de producción para el material invertido. El cultivo de vid puede crecer hasta seis o incluso doce metros de altura en un invernadero.
- Pimientos - dejar 30-50 centímetros entre los cubos
- Pepinos - dejar 60-80 centímetros entre los cubos
- Berenjena - dejar 20-40 centímetros entre los cubos

7.3 Programación de cultivos

Plantar todos los cultivos en una granja al mismo tiempo resulta en olas de producción en lugar de una producción continua. La producción continua es lo que los agricultores necesitan para satisfacer la demanda semanal o incluso quincenal, al tener siempre cultivos maduros en la granja. Un programa de plantación y cosecha que tenga en cuenta los ciclos de vida de cada cultivo es una herramienta útil para lograrlo ([Storey 2016c](#)):

- Las verduras de hoja como la acelga, la lechuga y el repollo tienen un ciclo de 4 a 6 semanas desde el trasplante hasta la cosecha
- Las hierbas rápidas como el cebollino y la menta tienen un ciclo de 3 a 4 semanas entre cosechas.
- El cilantro, el perejil y la albahaca tienen un ciclo de 5 semanas cuando las condiciones son adecuadas.
- Los cultivos frutales como las fresas y los tomates producen continuamente. Por lo tanto, todos pueden ser plantados al mismo tiempo

También es importante considerar el efecto de la recolección de las plantas en todo el ecosistema de la unidad acuapónica. Si se cosecharan todas las plantas a la vez, el resultado sería un sistema desequilibrado sin suficientes plantas para limpiar el agua, lo que daría lugar a picos de nutrientes. Algunos agricultores utilizan esta técnica, pero debe corresponderse con una gran cosecha de peces o una reducción de la ración de alimento. Sin embargo, se recomienda utilizar un ciclo de cosecha y replantación escalonado. La presencia de demasiadas plantas que crecen de forma sincronizada daría lugar a que los sistemas sean deficientes en algunos nutrientes hacia el período de cosecha, cuando la absorción es máxima. Al tener plantas en diferentes etapas de crecimiento - algunas plántulas y algunas plantas maduras - la demanda general de nutrientes será siempre la misma. Esto asegurará una química del agua más estable, y también proporcionará una producción más regular ([Somerville et al. 2014a](#)).

Aunque los cultivadores de interior disfrutan de los beneficios de las cosechas durante todo el año, todavía pueden perder un tiempo precioso cuando su sistema está vacío entre los ciclos de cultivo (tiempo de inactividad). A fin de reducir al mínimo el tiempo de inactividad, las plántulas deben estar listas para trasplantarlas al sistema acuapónico cuando el cultivo anterior esté listo para la cosecha. Esto se puede hacer calculando el número de días de antelación en que deben germinar las nuevas

semillas para que estén listas para entrar en el sistema el día que esté listo para plantar. Utiliza un calendario o un gráfico de Gantt y sigue estos pasos ([Godfrey 2018](#)):

1 - Marcar el día de la cosecha

2 - Sumar el tiempo de germinación y el tiempo de propagación de su cultivo. Esto le dará el número de días antes de la cosecha en los que debería comenzar a germinar las semillas para el siguiente ciclo de cultivo. Cuente hacia atrás en el calendario, y marque el día en que debe germinar sus semillas y el día en que debe pasarlas a la propagación. El día en que se trasplantan al sistema debe caer en el día inmediatamente posterior a la cosecha del ciclo anterior. Dependiendo del tamaño del sistema, puede cosechar y trasplantar en el mismo día. Si tiene una granja grande, puede tardar unos días en cosechar.

Las condiciones ambientales y la variedad de los cultivos influirán en el momento de la cosecha. La Figura 7 muestra un calendario de cultivo hipotético para una variedad de lechuga en la que se cosecha toda la planta (en contraposición a una variedad de corte y vuelta). Al tiempo de germinación de cinco días le sigue un tiempo de propagación de 16 días, momento en el que las plántulas están listas para ser trasplantadas a la unidad acuapónica. Después de otros nueve días de crecimiento, las lechugas están listas para ser cosechadas. El segundo ciclo de cultivo se programa de manera que las plántulas estén listas para ser trasplantadas a la unidad acuapónica el mismo día que se cosecha el primer ciclo, con lo que se reduce al mínimo el tiempo de inactividad.

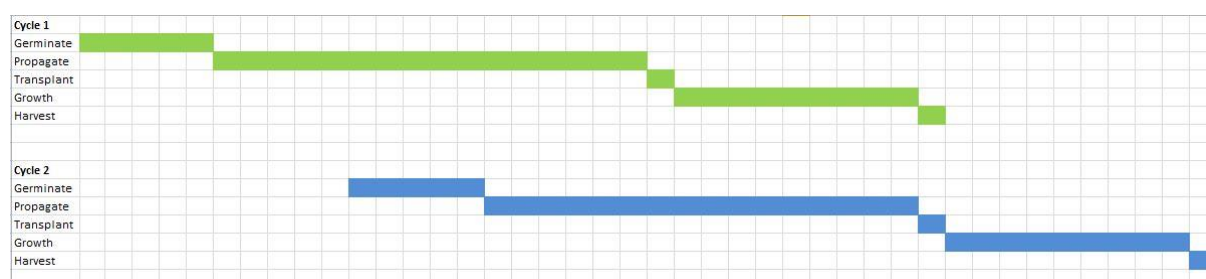


Figura 7: Un hipotético programa de cultivo de lechuga

El uso de ciclos de cultivo superpuestos, como en el ejemplo anterior, produce una pequeña cosecha cada semana, en lugar de una grande cada cinco semanas. Esta es una estrategia obvia a utilizar para un agricultor con un contrato que establece que se comprometen a entregar una cierta cantidad de producto cada semana. Los pasos para crear un plan de programación efectivo son los siguientes ([Godfrey 2018](#)):

1. Hacer un plan de trabajo para la cosecha - Si va a cosechar por sí mismo, asegúrese de que tiene suficiente tiempo para cosechar todo lo que necesita para tenerlo listo a tiempo para la venta.

2. Conozca sus variedades - Cada cultivo tiene un ciclo de tiempo diferente, así que asegúrese de leer sobre los requerimientos únicos del cultivo. Esto informará todas sus decisiones, desde la germinación hasta la cosecha y la entrega. Además, considere qué tipo de cosecha requerirá la planta. Por ejemplo, la lechuga probablemente se cosechará completamente, lo que significará que tendrá que volver a

plantarla antes que si se cultiva algo como la albahaca, en la que se podría cosechar el mismo ciclo de cultivo varias veces.

3. Elija su técnica de cosecha - La forma de cosechar debe estar determinada por su tipo de cultivo; algunos cultivos le permiten utilizar la cosecha de corte y vuelta mientras que otros son más adecuados para una cosecha completa. Una cosecha de tipo "cortar y volver a cosechar" probablemente llevará más tiempo que una técnica de cosecha completa, porque estará cortando la misma planta varias veces en lugar de cosechar todo de una sola vez.

4. Cuanto más grande sea el sistema, más tiempo tomará la cosecha. Esa es una regla general, incluso si tienes empleados trabajando para ti. La mano de obra es uno de los mayores costes de las granjas de interior, y porque las cosas sólo toman mucho tiempo. Asegurar de que cuando planifique el calendario, tenga en cuenta el tamaño del sistema; tome notas sobre el tiempo promedio que lleva hacer las cosechas, y factorícelo en sus cálculos de calendario de cosecha. Esto también informará su decisión sobre el tamaño de las secciones de su granja que designará para cada ciclo de cultivo superpuesto

5. Piensa en sus clientes. Si el mercado no lo quiere, no lo haga crecer. Si su mercado lo quiere, y usted puede cultivarlo bien, entonces presupueste mucho tiempo y recursos para conseguirles lo que quieren cuando lo quieran.

7.4 Referencias

- Godfrey, M. 2018. [*How to Minimize Downtime Between Hydroponic Crop Cycles*](#). Upstart University.
- Raviv, M. y Lieth, J.H. 2007. *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier.
- Resh, H.M. 2013. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th edition). Newconcept Press, Mahwah, SA.
- Singh, H. y Dunn, B. 2017. [*Pruning Hydroponic Crops*](#). Oklahoma Cooperative Extension Service.
- Somerville, C. et al. 2014a. Plants in aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 83-102.
- Somerville, C. et al. 2014b Management and troubleshooting. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 123-139.
- Somerville et al. 2014c. Appendix 1 – Vegetable production guidelines for 12 common aquaponics plants. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. [*Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 169-181.
- Storey, A. 2016a. [*Best Conditions and Methods for Growing Parsley in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016b. [*Everything You Need to Know About Growing Chard Without Soil*](#). Upstart University.

- Storey, A. 2016c. [*Farmer Tip #1 – How to Make a Planting Schedule*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016d. [*Get the Scoop on How to Grow Fennel in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016e. [*Growing or Selling Basil? Read this First*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016f. [*Harvesting and Handling Lettuce for a Longer Shelf Life*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016g. [*Get the Tips and Guidelines on Growing Mustard Greens*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016h. [*Growing Oregano in Hydroponics? Read This First!*](#) Upstart University.
- Storey, A. 2016i. [*Here's What You Need to Know About Growing Bok Choy in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016j. [*How to Grow Classic Rosemary in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016k. [*How to Grow Hydroponic Cabbage: The Beginner's Guide*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016l. [*How to Grow Hydroponic Strawberries*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016m. [*How to Grow Mint in Hydroponics – All You Need to Know*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2016n. [*So You Want to Grow Chives? Read this First!*](#) Upstart University.
- Storey, A. 2016o. [*10 Tips for Farmers on the Post-harvest Care of Herbs*](#). Bright Agrotech.
- Storey, A. 2016p. [*The Beginner's Guide to Growing Kale in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2017a. [*Are You Growing Cilantro in Hydroponics? Read This First!*](#) Upstart University.
- Storey, A. 2017b. [*Everything You Need to Know About Growing Nasturtiums in Hydroponics*](#). Upstart University.
- Storey, A. 2017c. [*The Beginner's Guide to Hydroponic Tomatoes*](#). Upstart University.
- Thorarinsdottir, R. (ed.) 2015. [*Aquaponic Guidelines*](#). EU Lifelong Learning Programme.
- Valdez, J. 2017a. [*The Best Plants for Bato Buckets*](#). Upstart University.
- Valdez, J. 2017b. [*The Best Plants for Raft Systems \(DWC\)*](#). Upstart University.

8. MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS

8.1 El concepto de manejo integrado de plagas (MIP)

Muchos organismos nacionales e intergubernamentales han decidido que el paradigma aprobado oficialmente para la protección de los cultivos es el "manejo integrada de plagas" (MIP). Por ejemplo, una Directiva de la Unión Europea (UE) ([El Parlamento Europeo y el Consejo de Europa 2009](#)) ha obligado a todos los cultivadores profesionales de plantas de la Unión a aplicar los principios generales del MIP desde 2014. El MIP es una estrategia basada en el ecosistema que se centra en la prevención a largo plazo de las plagas o sus daños mediante una combinación de técnicas como el control biológico, la manipulación del hábitat, la modificación de las prácticas culturales y el uso de variedades resistentes ([Tang et al. 2005](#)). Aunque se entiende que la acuicultura es más resistente a los patógenos en comparación con la producción hidropónica convencional ([Gravel et al. 2015](#)), no obstante es imposible evitar las plagas y enfermedades. Los cultivos saludables son ante todo consecuencia de unas buenas condiciones de crecimiento y de la elección de una variedad vegetal apropiada, que permita a las plantas alcanzar su alto potencial productivo, y no el resultado de una protección vegetal química y biológica. Una mayor diversidad microbiana mejora la resistencia de las plantas en la rizosfera contra las enfermedades de las raíces, así como una mayor absorción de nutrientes por el cultivo. Por lo tanto, es esencial una nutrición óptima de las plantas, unas condiciones ambientales adecuadas en el sistema de cultivo y unas técnicas de cultivo inteligentes. La gestión de las plagas y los patógenos debe reducir al mínimo la aplicación de productos biológicos y químicos.

Según la [Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación \(FAO\)](#), el manejo integrado de plagas (MIP) se define como *"un sistema de manejo de plagas que, en el contexto del medio ambiente asociado y de la dinámica de la población de las especies de plagas, utiliza todas las técnicas y métodos adecuados de la forma más compatible posible y mantiene las poblaciones de plagas a niveles inferiores a los que causan daños económicos"* (FAO 2018). La protección integrada de cultivos y la lucha contra las plagas comprenden medidas preventivas, el uso de enfoques basados en las barreras (por ejemplo, los agrotexiles), los métodos basados en la biotecnología (por ejemplo, el fitomejoramiento), la lucha biológica contra las plagas mediante el uso de enemigos naturales y la aplicación controlada de productos químicos que se permiten en la agricultura orgánica. El MIP es, por lo tanto, una forma rentable, ambientalmente racional y socialmente aceptable de manejar las plagas y enfermedades.

Tanto en la hidroponía convencional como en la acuicultura, los encargados de los cultivos tienen que hacer frente a diferentes tipos de amenazas biológicas. Las plagas de insectos no sólo son problemáticas por los daños directos que causan a la planta, sino también porque a menudo actúan como portadores (vectores) de enfermedades bacterianas o virales. Tanto los insectos como las enfermedades se benefician de las condiciones climáticas controladas en los invernaderos: están protegidos de la lluvia, el viento y las fuertes fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, estas condiciones ambientales también permiten un uso eficaz de los organismos beneficiosos contra los insectos. Las diferentes estrategias de gestión deberían contribuir a reducir al mínimo el uso de plaguicidas y a mejorar la salud de las plantas. Si bien el control biológico de plagas forma parte del

manejo integrado de plagas (MIP), existen algunas diferencias entre el concepto general de MIP y el control biológico de plagas (CBP) (Tabla 1).

Tabla 1: Manejo integrado de plagas (MIP) frente a la agricultura orgánica

	Manejo integrado de plagas (MIP)	Directrices para la agricultura orgánica
Métodos preventivos	<ul style="list-style-type: none"> • higiene de los cultivos (eliminación de malas hierbas, desinfección de habitaciones, etc.) • barreras físicas contra las plagas (redes, etc.) • uso de plántones fuertes y resistentes • medidas de higiene en la entrada • restringiendo el número de visitantes 	
Uso de insectos beneficiosos contra las plagas (Control biológico de plantas (BPC))	<ul style="list-style-type: none"> • Larva de mariquita contra los áfidos • El parasitoide de la mosca (<i>Encarsia formosa</i>) contra la mosca blanca • Los mosquitos (<i>Aphidoletes aphidimyza</i>) contra los áfidos • Nematodos entomopatógenos • Bacterias y hongos entomopatógenos 	
Control químico	<p>El uso de plaguicidas sintéticos no tóxicos para los peces* podría utilizarse en condiciones controladas, pero sólo como último recurso, por ejemplo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pimetrozina contra los pulgones, mosca blanca - Clofentezina contra los ácaros - El fosetilaluminio contra el moho lanoso <p>El uso de los pesticidas naturales listados en el BPC también es posible</p> <p>* TER (Toxicity Exposure Ratio) = CL50 aguda (mg agente/litro)/PEC (Predicted Environmental Concentration) > 100 para peces, y > 10 para invertebrados acuáticos.</p>	<p>Uso de pesticidas naturales, como</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aceites* (aceite de hinojo contra el moho) - Bicarbonato de potasio* contra el moho, la leveilla y la fiebre aftosa (<i>Oidium, Leveillula, Sphaerotheca</i>) - Azufre* contra el oídio, la leveilla y la fiebre aftosa (<i>Oidium, Leveillula, Sphaerotheca</i>) - Lecitina* contra el oídio (<i>Erysiphe</i>)

Fuente: FiBL – Betriebsmittelliste 2019 für den biologischen Landbau in der Schweiz

Comprobar la seguridad de los peces antes de utilizar cualquier tipo de fitofármacos, agentes de control biológico o insecticidas y fungicidas de origen vegetal.

A diferencia de la hidroponía convencional, los sistemas acuapónicos son ecosistemas independientes con zonas (o compartimentos) diferentes. Además de los cultivos objetivo

(peces y plantas), el sistema también alberga una amplia gama de comunidades de microorganismos distintos (Schmautz *et al.* 2017), y pequeños insectos y arañas con un efecto beneficioso, neutro o perjudicial para el cultivo. Los sistemas acuapónicos también suelen presentar una alta densidad de peces y plantas en un solo lugar, lo que facilita la rápida propagación de enfermedades o plagas en todo el sistema. A diferencia de los sistemas de cultivo convencionales, en los que el uso de plaguicidas químicos forma parte de la rutina diaria, esos métodos no son adecuados para la acuaponía (Bittsánszky *et al.* 2015). Las consecuencias de una infección grave por enfermedad o de una infestación de plagas se agravan, ya que las pérdidas o la eliminación de plantas o peces alterarán el equilibrio entre los peces, las plantas y la química del agua. El uso de productos químicos debe considerarse muy cuidadosamente. El aporte de productos químicos orgánicos o inorgánicos podría ser fatal para los animales acuáticos, así como para el equilibrio microbiológico del sistema. Por lo tanto, es mejor abstenerse de utilizar productos químicos que arriesgarse a consecuencias fatales para todo el sistema de acuicultura.

La respuesta del MIP a las enfermedades y/o plagas en la acuicultura se ve por lo tanto limitada por: i) la combinación de peces, plantas y bacterias, ya que los peces pueden ser sensibles a los tratamientos de las plantas y viceversa, y las bacterias pueden ser sensibles tanto a los tratamientos de los peces como a los de las plantas; y ii) el deseo de mantener un estado libre de productos químicos u orgánicos.

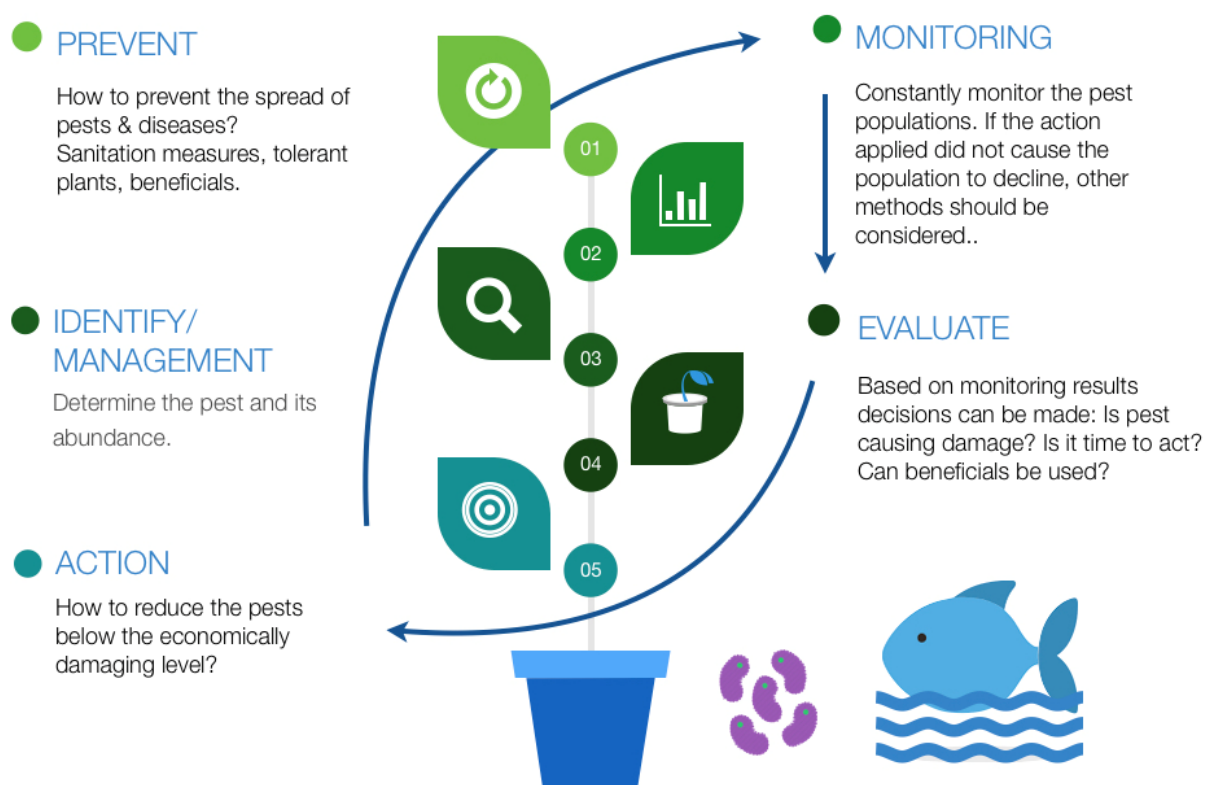


Figura 1: El programa de MIP de cinco pasos en la acuaponía.

8.2 Métodos de prevención en la lucha integrada contra las plagas

La buena salud de las plantas no es sólo la ausencia de enfermedades y plagas. Para un crecimiento saludable se requieren buenas técnicas de cultivo con una nutrición adecuada, calidad de agua, condiciones climáticas e higiene de la producción. Para lograr una gestión sostenible de la protección vegetal, es esencial comprender cómo reducir al mínimo el riesgo de enfermedades y plagas de las plantas. La prevención es la parte más importante de la gestión integrada de plagas (Tabla 2).

Tabla 2: Medidas de prevención de enfermedades de las plantas en la acuicultura.

Medida de control	Ejemplos de acciones
Higiene de las condiciones de cultivo	Respetar las normas de saneamiento, ropa específica, espacio separado para la germinación de las plantas, evitar el desarrollo de algas
Tratamiento físico del agua	-tratamientos UV -tratamiento térmico
Barreras físicas contra los insectos vectores	-redes -trampas
Respeto de las buenas prácticas agrícolas	- utilización de variedades de cultivos tolerantes y resistentes - suministro adecuado de nutrientes - la distribución correcta de las plantas - la supervisión regular
Gestión de las condiciones ambientales	La regulación de la humedad y la temperatura es fundamental para la prevención de las enfermedades fúngicas y bacterianas en los cultivos cubiertos. Manipular la calefacción, la ventilación, la sombra, el suplemento de luces, la refrigeración y el empañamiento para encontrar las condiciones óptimas que permitan tanto la producción de plantas como el control de enfermedades
Apoyar la comunidad natural de organismos supresores de enfermedades	- microorganismos beneficiosos - insectos beneficiosos - los extractos de compost

8.2.1 Higiene de las condiciones de cultivo

Antes de comenzar con la acuaponía (o cualquier otro cultivo) en un invernadero es necesario limpiar y desinfectar el interior y todas las herramientas. En primer lugar, todo el material vegetal, las placas, las cubiertas del suelo, etc. deben ser removidas. Las películas de cubierta plástica del invernadero de más de 3-4 años tienden a estar sucias y menos translúcidas, y por lo tanto no son óptimas para el crecimiento de las plantas. Cada año el exterior del invernadero debe ser lavado para mejorar el nivel de luz para los cultivos. Antes de desinfectar un invernadero, todas las superficies deben estar limpias y libres de materia orgánica. Los desinfectantes sostenibles son el agua, la humedad del agua, el alcohol (70%), el peróxido, los ácidos orgánicos, etc. También se recomienda desinfectar las herramientas de trabajo como los cuchillos. Un invernadero limpio proporciona las mejores condiciones de partida para plantones sanos y fuertes. La desinfección antes de entrar en un invernadero, como el uso de técnicas de lavado de manos y la desinfección de los zapatos con alfombras desinfectantes, es indispensable. La limpieza de los invernaderos vacíos, los sistemas de riego, los contenedores de plantas y el equipo de cosecha con una solución desinfectante también son factores importantes para garantizar la seguridad alimentaria. También deben utilizarse prendas de protección y cubiertas para el calzado.

8.2.2 Variedades de cultivos tolerantes y resistentes

La resistencia de las plantas a los insectos es uno de los varios métodos de control del cultivo. Los métodos de control entrañan la utilización de prácticas agronómicas para reducir la abundancia de plagas de insectos y los daños por debajo de lo que habría ocurrido si no se hubiera utilizado esa práctica. En el MIP, la resistencia de las plantas a los insectos se refiere al uso de variedades de cultivos resistentes para suprimir los daños de las plagas de insectos. La resistencia de las plantas está destinada a utilizarse conjuntamente con otras tácticas de control directo. El desarrollo de variedades de cultivos tolerantes y resistentes es notable, y los catálogos de semillas deben estudiarse cuidadosamente para elegir variedades que sean resistentes a las enfermedades. En algunos cultivos, como los tomates, los pepinos, los pimientos o las berenjenas (figuras 3 y 4), el injerto permite obtener muy buenos resultados. Con un poco de práctica, es posible hacer el injerto por uno mismo. En Internet se pueden consultar manuales como el de [Kleinhenz et al. \(2011\)](#), así como tutoriales que describen la técnica de injerto.



Figura 3: Plántulas de tomate injertadas
(Photo ZHAW)



Figura 4: Infección por *Botrytis* en el tallo de la lechuga
(Photo ZHAW)

8.2.3 Espacios adecuados entre plantas

El espaciamiento apropiado de las plantas es un desafío en cualquier cultivo de invernadero, ya que todos los cultivos comienzan muy pequeños y crecen y se desarrollan extensamente. La alta densidad de plantación aumenta la competencia por la luz, debilita el vigor de la planta e invita a las plagas y enfermedades a establecerse. La poda periódica es esencial.

8.2.4. Suministro adecuado de nutrientes

Diferentes cultivos requieren diferentes regímenes de fertilización. Un ejemplo famoso es el cultivo del tomate en hidroponía convencional con más de cinco recetas de nutrición diferentes ([Raviv y Lieth 2007](#)); sin embargo, esto no puede hacerse en acuaponía, debido a la recirculación. Por otra parte, los cultivos con períodos de cultivo cortos y menos dependientes de las fases vegetativas y generativas suelen recibir un suministro uniforme de nutrientes durante todo el ciclo de crecimiento. El suministro incorrecto de nutrientes fomenta la infestación de plagas y enfermedades. Por ejemplo, unos niveles de nitrógeno demasiado altos hacen que los tejidos de las plantas sean más succulentos y que las plagas puedan

penetrar más fácilmente. Hay dos formas principales de regular los niveles de nutrientes en la acuaponía:

- añadiendo fertilizante soluble según las necesidades de nutrientes del cultivo (Resh 2013, véase también los capítulos 5, 6 y 9)
- regulando la nutrición de acuerdo con la concentración de sal en el agua (nivel CE). Este método supone que la proporción entre los diferentes nutrientes (sales) es estable.

Los niveles de EC entre 0,5 - 1,5 mS/cm se aplican normalmente en la acuaponía ([Vermeulen y Kamstra 2012](#)). Si la concentración de sal excede los 2,5 mS/cm, se debe añadir agua dulce. Concentraciones demasiado altas de sal en el agua provocan trastornos fisiológicos, que dan lugar a la necrosis de la superficie de las hojas o de los márgenes de las mismas. Este tipo de daño crea acceso para las enfermedades secundarias de las plantas. Se incluye más información en los capítulos 5 y 6.

8.2.5 Monitoreo

Los programas de MIP trabajan para monitorear las plagas y enfermedades e identificarlas con precisión, de modo que se puedan tomar las decisiones de control apropiadas en conjunto con los umbrales de acción. El monitoreo y la identificación eliminan la posibilidad de que se usen plaguicidas cuando realmente no se necesitan, o que se use el tipo de plaguicida equivocado. Por lo tanto, es fundamental la vigilancia regular de las plagas y enfermedades. Debe registrarse toda decoloración o deformación de las hojas y la aparición de hongos de moho en las hojas o en los frutos (véase también más abajo). Dado que es difícil diagnosticar las enfermedades o plagas de hongos, se recomienda ponerse en contacto con los asesores de protección fitosanitaria.

8.2.6 Defensa física

La salud de las plantas puede beneficiarse enormemente si se previenen o limitan las lesiones causadas por las plagas de artrópodos desde el principio. Las estrategias de control físico incluyen métodos para excluir las plagas o limitar su acceso a los cultivos, perturbar el comportamiento de las plagas o causar una mortalidad directa ([Vincent et al. 2009](#)). Los métodos de lucha física pueden clasificarse en activos y pasivos ([Vincent et al. 2009](#)). Los métodos activos implican la eliminación de plagas individuales a mano, la poda de tejidos de plantas infestadas y la eliminación de plantas muy infestadas. Los métodos pasivos suelen incluir el uso de un dispositivo o herramienta para excluir o eliminar las plagas de un cultivo. Normalmente, estos dispositivos sirven de barreras entre las plantas y las plagas de insectos, protegiendo así a las plantas de lesiones y daños. Otras herramientas pasivas incluyen repelentes y trampas. Si bien las trampas se utilizan a menudo para vigilar la abundancia y la distribución de las plagas, muchas están diseñadas como tecnologías de "atraer y matar", que atraen a las plagas de insectos mediante el color, la luz, la forma, la textura o el olor, o una combinación de éstos.

8.2.6.1 Redes

El uso de redes es una forma sencilla de evitar que las plagas entren en contacto con el cultivo. El tamaño de la malla depende de la plaga a la que se dirige:

- 0,15 mm contra los trips
- 0,35 mm para excluir a la mosca blanca y los áfidos
- 0,8 mm para excluir a los minadores de hojas y a los escarabajos
- 20 mm contra los pájaros

Sin embargo, la red también tiene un lado negativo: reduce la luz y aumenta la humedad, y por lo tanto aumenta el riesgo de enfermedades por hongos. Esto es especialmente cierto para las redes con un tamaño de malla de < 2 mm.

8.2.6.2 Trampas

Las trampas pueden utilizarse para vigilar o detectar una población de plagas, para atrapar e identificar la plaga y para reducir la densidad de la plaga local. Se dispone de trampas comerciales para controlar o detectar diversas especies de polillas (trampas con feromonas), moscas blancas y trips (trampas pegajosas), moscas y camisas amarillas, caracoles y babosas, chinches de cama, arañas, cucarachas y muchas otras plagas. Las trampas pegajosas de colores atraen a diferentes plagas. Deben colocarse ligeramente por encima del dosel de las plantas. Las tarjetas adhesivas azules atrapan las etapas adultas de los trips. Las tarjetas adhesivas amarillas se utilizan para las moscas blancas y las mariposas dañinas. Cuando se aplican organismos beneficiosos para el control de plagas, es mejor consultar primero con un experto.

8.2.7 Apoyar la comunidad natural de organismos supresores de enfermedades

Los entornos controlados incluyen tanto los riesgos como las oportunidades para la gestión integrada de plagas. Las condiciones de los invernaderos favorecen a los organismos con mayores necesidades de temperatura y humedad del aire, como las enfermedades fúngicas. Pero estos factores climáticos también estimulan el desarrollo de muchos insectos beneficiosos. El uso de organismos benéficos está bien establecido en la agricultura de invernadero. Las plagas y enfermedades pueden aparecer incluso con la mejor prevención. Uno de los principios de la agricultura integrada y orgánica es que las plantas prosperen en presencia de patógenos o plagas. Esto sólo es posible si los macro o microorganismos beneficiosos apoyan el control de las plagas y enfermedades. Una comunidad natural de organismos supresores de enfermedades puede apoyarse añadiendo agentes biológicos al agua como estimulante de la resistencia de las plantas.

8.2.7.1 Microorganismos beneficiosos

Los microorganismos beneficiosos importantes son:

- *Bacillus amyloliquefaciens* o *Trichoderma harzianum* como prevención contra las enfermedades de las raíces (por ejemplo, *Pythium*) en las primeras fases del cultivo (por ejemplo, la fase de plántulas)
- *Bacillus subtilis* contra la *Rhizoctonia*
- *Gliocladium catenulatum* contra *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia* en pepino, tomate, pimiento y hierbas culinarias

Los productos están disponibles comercialmente en tiendas online o centros de jardinería.

8.2.7.2 Insectos beneficiosos y plantas banqueras

Los insectos benéficos (o enemigos naturales) se utilizan normalmente en la producción orgánica y convencional de hortalizas en invernaderos. Los tipos más extendidos y disponibles comercialmente son:

- Icneumonidos contra los áfidos, mosca blanca y similares
- Los mosquitos (*Aphidoletes aphidimyza*) contra los áfidos
- Ácaros depredadores contra ácaros araña
- Los bichos mirid (*Macrolophus pygmaeus*) contra la mosca blanca

Con este tipo de control de plagas, se pueden evitar los residuos de pesticidas así como la resistencia inducida por los mismos. Sin embargo, el control exitoso de plagas utilizando organismos benéficos puede ser un desafío. Cada insecto benéfico tiene sus propias necesidades individuales. Las flores específicas que atraen a los insectos benéficos (las llamadas plantas banqueras) plantadas cerca o en el invernadero pueden servir de apoyo a los organismos benéficos (Conte *et al.* 2000). Ejemplos de estas plantas son el alforfón (*Fagopyrum esculentum*), el aciano (*Centaurea cyanus*) y el corcho (*Agrostemma githago*).

8.2.7.3 Extractos de compost

Estos también se conocen como "té de abono" y contienen muchos microorganismos beneficiosos. Se elaboran aireando el abono en agua (normalmente durante 24 horas) con el fin de extraer los organismos beneficiosos. El té de compostaje debe aplicarse inmediatamente, ya sea directamente en la zona de las raíces o en las hojas. Una primera aplicación puede hacerse justo después de la siembra, y una segunda antes de la plantación. Las recetas y los métodos de elaboración se pueden encontrar en Internet, por ejemplo aquí: www.soilfoodweb.com.

8.2.8 Si todo lo demás falla ...

A veces las intervenciones con productos químicos pueden estar justificadas, pero en ese caso hay que considerar la posibilidad de establecer reglamentos estrictos. Siempre que sea posible, se deben utilizar primero los plaguicidas botánicos, porque son de origen biológico. Algunos extractos de microorganismos son inocuos para los peces y pueden utilizarse en la acuicultura. Uno de ellos es una toxina del *Bacillus thuringiensis*, que puede utilizarse contra las orugas, los rulos de las hojas u otras larvas de mariposas. La otra es la *Beauveria bassiana*, un hongo que penetra en la piel del insecto y que es eficaz contra varias plagas como termitas, trips, moscas blancas, pulgones y escarabajos. La mayoría de los fungicidas e insecticidas químicos sintéticos, pero también algunos productos permitidos en la agricultura orgánica, son tóxicos y dañan a los organismos acuáticos. Sólo vale la pena considerar una aplicación en plantas jóvenes antes de transplantarlas al sistema acuapónico. Si el control químico es el último recurso, hay que considerar muy cuidadosamente la toxicidad específica para los peces del producto. En el apéndice 2 de "Producción alimentaria acuapónica en pequeña escala" (Somerville *et al.* 2014) se enumera una selección de posibles insecticidas con indicaciones de su toxicidad relativa para los peces. La acuaponía es un ecosistema complejo compuesto por diferentes tipos de bacterias, hongos y organismos superiores con un alto potencial de resistencia a la

potencia natural. Es importante mantener el equilibrio ecológico de este ecosistema mediante medidas de prevención adecuadas, como se ha descrito anteriormente. Esto debería ayudar a reducir al mínimo la necesidad de aplicar métodos directos de gestión de plagas.

8.3 Las plagas y enfermedades más comunes

8.3.1 Identificación de plagas y enfermedades

La identificación adecuada de las plagas y enfermedades es importante. Ya sea que la plaga sea un insecto, un roedor, un hongo fitopatógeno u otro organismo, la identificación correcta hace que el control sea más fácil y eficaz. Un error en la identificación puede conducir a tácticas de control inadecuadas que cuestan tiempo y dinero. También puede dar lugar a riesgos innecesarios para las personas, los peces o el medio ambiente. Para identificar una posible enfermedad, hay que seguir los pasos descritos en las figuras 5 y 6. A veces los síntomas de la enfermedad son similares a los síntomas de deficiencia de nutrientes de las plantas. En caso de duda, se debe consultar a un especialista. Si esto no es posible, se deben describir los síntomas y tomar fotos (que también servirán para futuras referencias). Luego busque en Internet para encontrar fotos y descripciones de los síntomas de la enfermedad que coincidan con los de sus plantas.

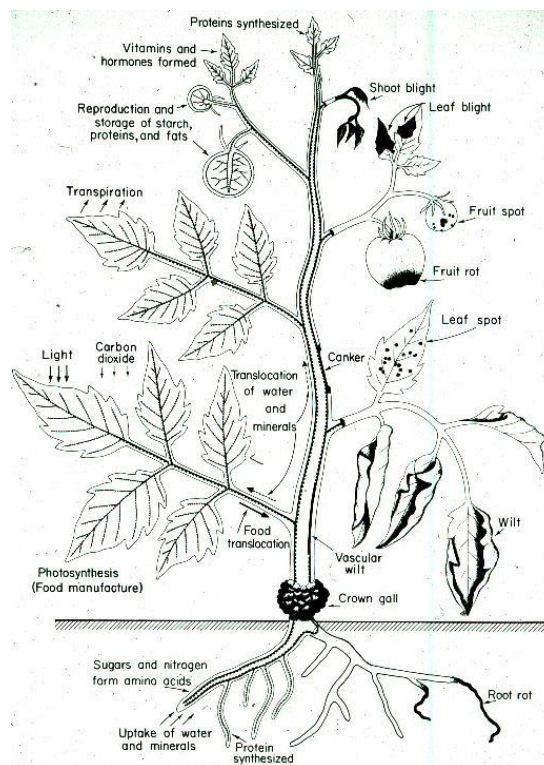


Figura 5: Síntomas de enfermedades en plantas.

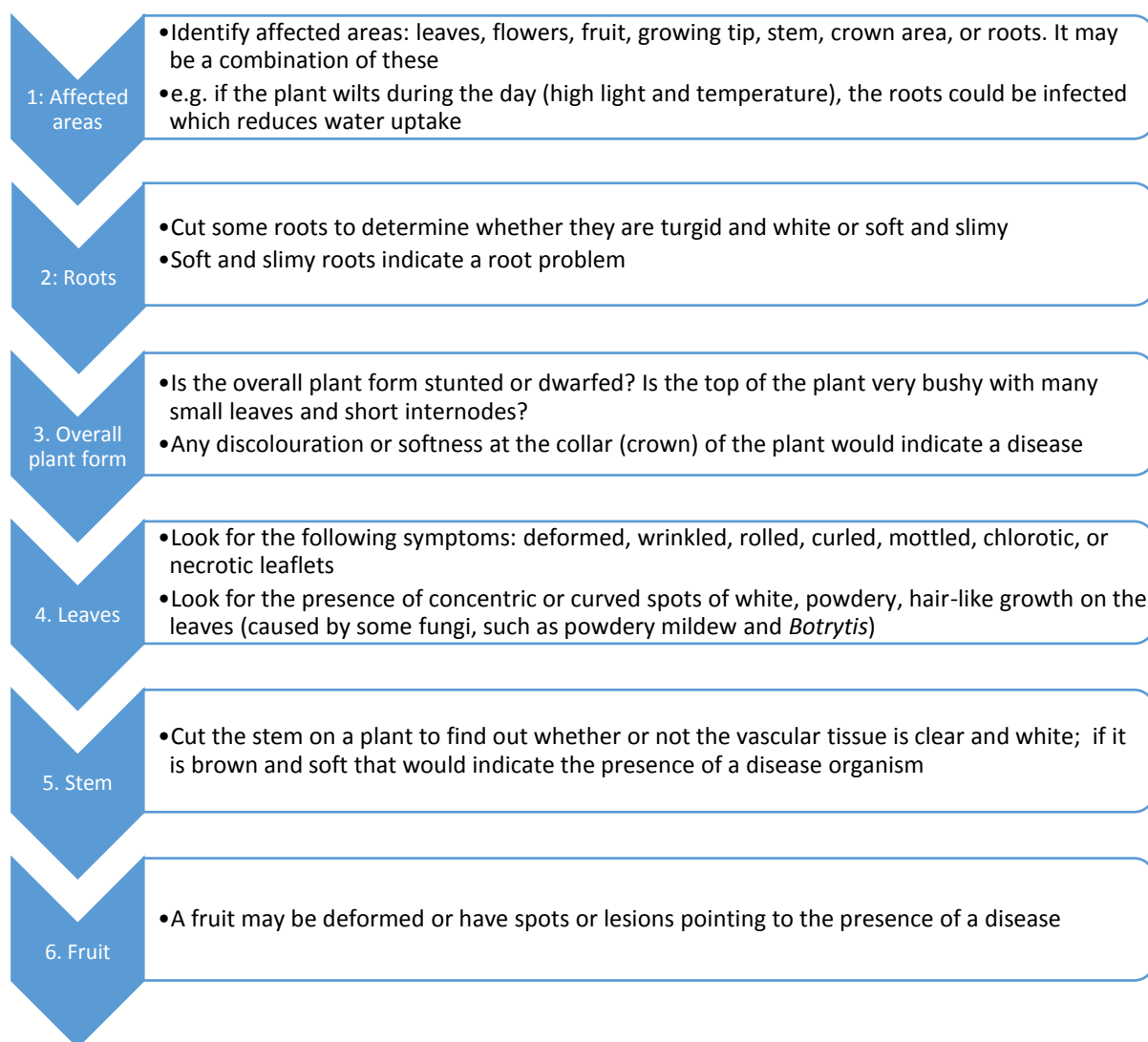


Figura 6: Procedimiento a seguir para identificar enfermedades de las plantas

8.3.2 Enfermedades comunes de las plantas

8.3.2.1 Moho gris (*Botrytis*)

Es la enfermedad fúngica más frecuente en lechugas, berenjenas, tomates y pepinos (Figura 7) cuando los niveles de humedad son demasiado altos y hay una mala circulación de aire. Mantener los niveles óptimos de humedad mediante la ventilación y la regulación de la temperatura. En general, una humedad relativa del 75% es buena para la mayoría de los cultivos y no es demasiado húmeda, lo que favorece las enfermedades. Quitar las hojas bajas y amarillas ayudará a mantener la humedad baja cerca de la base de la planta y permitirá que el aire circule. Haga una rotura o corte limpio en la base del peciolo de la hoja (donde la hoja se une al tallo). La *botritis* también afectará a los frutos, los tallos y las hojas. Corte la fruta durante la cosecha con tijeras de podar o un cuchillo afilado para favorecer la rápida cicatrización de la herida. Después de la floración, quite las flores muertas que no hayan cuajado, ya que a menudo la *Botrytis* invade rápidamente estos tejidos muertos.

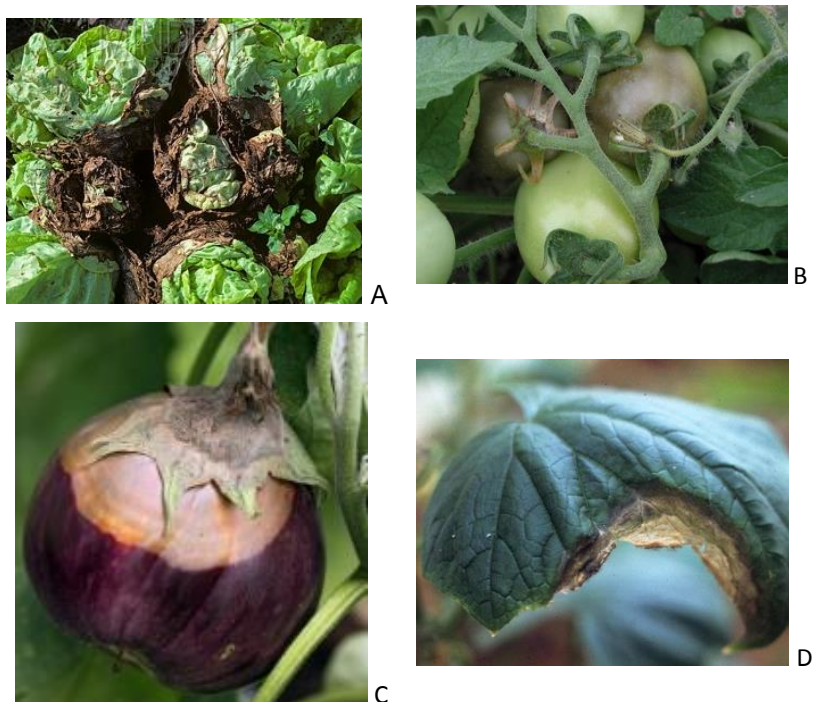


Figura 7: Síntomas de infección por *Botrytis* en hojas de lechuga (A), tomate (B), berenjena (C) y pepino (D)

8.3.2.2 Putrefacción del tallo (*Sclerotinia*)

Este hongo infecta el tallo de las berenjenas, la lechuga (Figura 8) y los tomates. Trátelo como a *Botrytis*. La sanidad y la ventilación adecuadas ayudan a prevenir esta enfermedad.



Figura 8: Síntomas de la putrefacción del tallo en la lechuga

8.3.2.3 Moho polvoroso (orden Erysiphales)

Las enfermedades del moho polvoroso son causadas por muchas especies diferentes de hongos del orden de los *Erisifales*. Es la enfermedad más común en los pepinos y la lechuga (Figura 9). El moho polvoroso es una de las enfermedades de las plantas más fáciles de identificar, ya que sus síntomas

son bastante distintivos. Las plantas infectadas muestran pequeñas manchas blancas de polvo en la superficie superior de la hoja y en los tallos. Las hojas inferiores son las más afectadas, pero el mildiu se propaga rápidamente en cualquier parte de la planta que esté por encima del suelo. A medida que la enfermedad progresa, las manchas se agrandan y se extienden para cubrir toda la superficie de la hoja a medida que se forman grandes cantidades de esporas asexuales, y el mildiu puede extenderse a lo largo de la planta. La sanidad y la ventilación adecuadas ayudan a prevenir esta enfermedad. La mejor prevención es la selección de variedades resistentes o altamente tolerantes.



Figura 9: Síntomas de moho polvoroso en lechuga (izquierda) y pepino (derecha).

8.3.3 Plagas comunes de las plantas

La mayoría de las plagas, como los áfidos, las larvas de orugas y polillas, las cochinillas, los ácaros araña de dos manchas, los trips y las moscas blancas infestan todos los cultivos. Sin embargo, algunas son más agresivas en ciertos cultivos que en otros. Coloque trampas adhesivas amarillas en los cables aéreos o en las cuerdas de soporte a unos 300 mm por encima de la parte superior de la planta para atrapar y vigilar la presencia de estas plagas.

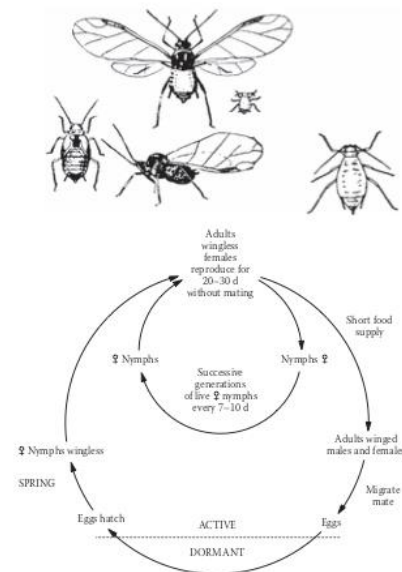
8.3.3.1 Pulgones

Estas plagas están casi siempre presentes. Son verdes, marrones o negras, dependiendo de la especie (Figura 10). Hay formas aladas y sin alas. Una característica destacada de su infestación en las plantas es la presencia de "melaza" excretada de sus abdómenes al chupar las plantas, lo que causa la pegajosidad de las hojas y partes de las plantas. A menudo los mohos de hollín (hongos) infectan las hojas como un organismo secundario, creando una película negra en las hojas.



Arriba – Figura 10: Pulgones verdes sobre una hoja

Derecha – Figura 11: Ciclo de vida de los áfidos (Dibujo de J.R. Baker, North Carolina Agricultural Extension Service)



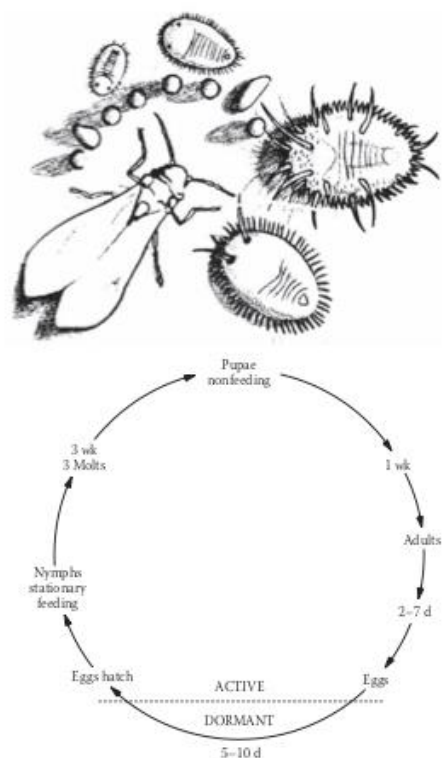
8.3.3.2 Moscas blancas (familia *Aleyrodidae*)

Las moscas blancas son pequeños hemipteranos que se alimentan típicamente del envés de las hojas de las plantas (Figura 12). Se han descrito más de 1550 especies. Esta es una de las plagas más problemáticas asociadas a los tomates. Estos insectos se pueden identificar por sus alas y cuerpo blancos. Son más frecuentes en el envés de las hojas, y vuelan rápidamente cuando se les molesta. Hay insectos beneficiosos así como pesticidas disponibles para su control.



Arriba – Figura 12: Mosca blanca

Derecha – Figura 13: Ciclo de vida de la mosca blanca (Dibujo de J.R. Baker, North Carolina Agricultural Extension Service)



8.3.3.3. Araña de dos puntos o araña roja (*Tetranychus urticae*)

Los ácaros están relacionados con las arañas y las garrapatas (Figura 14). Tienen cuatro pares de patas, en contraste con los insectos que sólo tienen tres pares de patas. Los ácaros araña de dos manchas tienen, como su nombre lo indica, dos manchas de color oscuro en su cuerpo. A medida que chupan las hojas, se forman pequeñas manchas amarillas que eventualmente se unen para dar una apariencia de bronce a las hojas. También producen telarañas en la superficie de las hojas a medida que la infestación aumenta. Si no se controlan cuando el número es manejable, causarán un blanqueo completo y la muerte de las hojas al chupar todo el contenido de las células.

Otros ácaros araña que también dañan los cultivos de invernadero son los ácaros carmín (*Tetranychus cinnabarinus*) y los ácaros anchos (*Polyphagotarsonemus latus*). Estos, sin embargo, no son tan prevalentes como el ácaro de dos manchas y se diferencian en el color. El ácaro carmín es de color rojo brillante, mientras que el ácaro ancho es translúcido y sólo puede verse con una lente de mano. Los ácaros anchos causan deformaciones en las hojas y los frutos.



Figura 14: Araña roja de dos manchas (adulto y huevo)

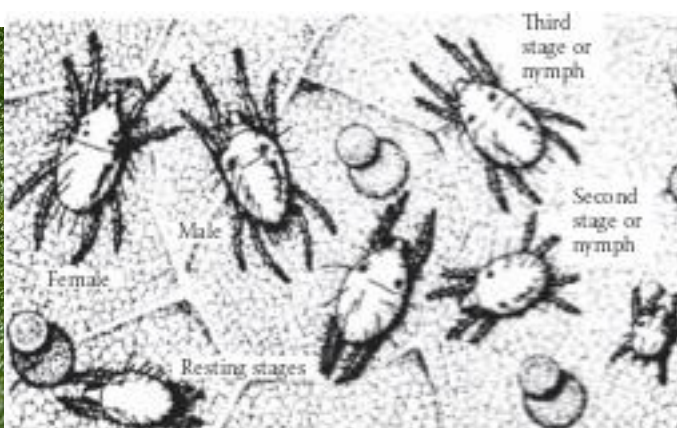


Figura 15: El ciclo de vida de los ácaros araña de dos manchas (Dibujo cortesía de J.R. Baker, Servicio de Extensión Agrícola de Carolina del Norte)

8.3.3.4 Minador de hojas

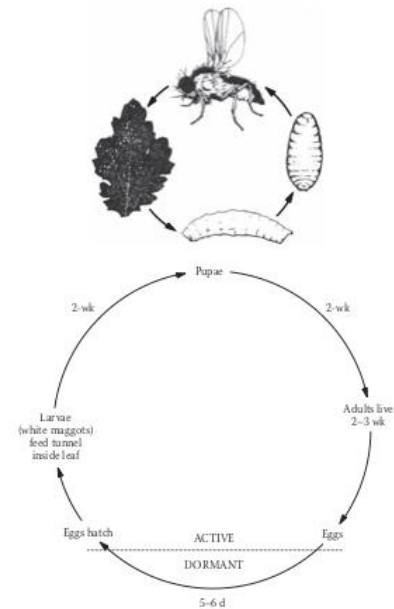
Un minador de hojas es la larva de un insecto que vive y come el tejido de las hojas de las plantas (Figura 16). La gran mayoría de los insectos minadores de hojas son polillas (*Lepidoptera*), moscas sierra (*Symphyta*, parientes cercanos de las avispas) y moscas (*Dípteros*), aunque algunos escarabajos también muestran este comportamiento. Los minadores de hojas adultos depositan huevos en las hojas que se muestran como hinchazones blancas. A medida que las larvas eclosionan, se alimentan de "túneles" a través de la hoja entre la epidermis de la hoja superior e inferior, creando "minas". A medida que la infestación aumenta, las minas se fusionan dando lugar a grandes áreas de daño que eventualmente llevan a la muerte de la hoja. Las larvas maduras caen al suelo (superficie del sustrato) donde pupan (pasan a través de la metamorfosis a los adultos) en 10 días. El ciclo entonces comienza

de nuevo. Las infestaciones pueden reducirse mediante la eliminación de las hojas muy infectadas y cualquier hoja caída del suelo. Si el sustrato se cubre con polietileno blanco para evitar que las larvas entren cuando caen de las hojas, se minimizará la reproducción de los insectos. Esto es particularmente útil si las plantas crecen en macetas o en camas de cultivo. El uso de losas envueltas en plástico restringirá la infestación al romper el ciclo de vida.



Arriba – Figura 16: Daños en una hoja causado por un minador de hojas

Derecha– Figura 17: El ciclo de vida de un minador de hoja típico (Dibujo de J.R. Baker, North Carolina Agricultural Extension Service)



8.3.3.5 Trips (orden Thysanoptera)

Los trips son insectos diminutos y delgados (Figura 18) con alas con flecos y piezas bucales asimétricas únicas. Hay más de 6000 especies de trips chupando la vida de las plantas de todo el mundo. Estos insectos son especialmente atraídos por las flores. Su característica distintiva es la presencia de alas plumosas. Tienen bocas raspantes que raspan la superficie de la hoja y chupan la savia de la planta, causando rayas blancas y plateadas en las hojas. Al igual que las moscas blancas y los pulgones, también son portadoras de virus. Los trips son atraídos por las trampas pegajosas azules.



a)



b)

Figura 18: Daños causados por trips sobre albahaca (a) y una trip ninfa (b)

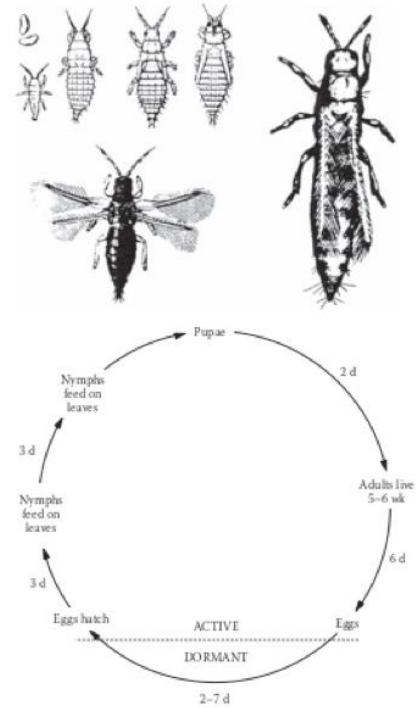


Figura 19: El ciclo de vida de un trip (Dibujo de J.R. Baker, North Carolina Agricultural Extension Service)

8.4 Control biológico de plagas

Los términos "control biológico" y su sinónimo abreviado "biocontrol" se han utilizado en diferentes campos de la biología, sobre todo en la entomología y la patología vegetal. En entomología, se ha utilizado para describir el uso de insectos depredadores vivos, nematodos entomopatógenos o patógenos microbianos para suprimir poblaciones de diferentes plagas de insectos. En fitopatología, el término se aplica al uso de antagonistas microbianos para suprimir enfermedades, así como al uso de patógenos específicos del huésped para controlar las poblaciones de malezas. En ambos campos, el organismo que suprime la plaga o el patógeno se denomina agente de control biológico (ACB).

8.4.1 Enemigos naturales de las plagas

Los parásitos, patógenos y depredadores son los principales grupos utilizados en el control biológico de insectos y ácaros. La mayoría de los parásitos y patógenos, y muchos depredadores, están altamente especializados y atacan a un número limitado de especies de plagas estrechamente relacionadas.

8.4.1.1 Parásitos

Un parásito es un organismo que vive y se alimenta en o sobre un huésped. Los parásitos de los insectos pueden desarrollarse dentro o fuera del cuerpo del huésped. A menudo sólo la etapa inmadura del parásito se alimenta del huésped. Sin embargo, las hembras adultas de ciertos parásitos (como muchas avispas que atacan a los insectos escamosos y a las moscas blancas) se alimentan y matan a sus huéspedes. Aunque aquí se utiliza el término "parásito", los verdaderos parásitos (por

ejemplo, las pulgas y las garrapatas) no suelen matar a sus huéspedes. Las especies útiles en el control biológico, y discutidas aquí, matan a sus huéspedes; se les llama más precisamente "parasitoides". La mayoría de los insectos parásitos son moscas (orden *Dípteros*) o avispas (orden *Himenópteros*). Es importante señalar que estas avispas pequeñas y medianas son incapaces de picar a las personas. Las moscas parásitas más comunes son las típicas *Tachinidae* peludas. Los Tachínidos adultos a menudo se parecen a las moscas domésticas. Sus larvas son gusanos que se alimentan dentro del huésped.

8.4.1.2 Patógenos

Los patógenos naturales son microorganismos que incluyen ciertas bacterias, hongos, nemátodos, protozoos y virus que pueden infectar y matar al huésped. Las poblaciones de algunos áfidos, orugas, ácaros y otros invertebrados se reducen a veces drásticamente por los patógenos naturales, normalmente en condiciones como una humedad elevada prolongada o poblaciones de plagas densas. Algunos patógenos beneficiosos están disponibles comercialmente como plaguicidas biológicos o microbianos. Entre ellos figuran el *Bacillus thuringiensis*, los nematodos entomopatógenos y los virus de la granulosis. Además, algunos subproductos de microorganismos, como las avermectinas y las espinosinas, se utilizan en ciertos insecticidas; pero la aplicación de estos productos no se considera una lucha biológica.

8.4.1.3 Depredadores

Los depredadores matan y se alimentan de varias a muchas presas individuales durante sus vidas. Muchas especies de anfibios, pájaros, mamíferos y reptiles se alimentan extensamente de insectos. Escarabajos depredadores, moscas, crisopas, verdaderos bichos (orden *Hemiptera*) y avispas se alimentan de varias plagas de insectos o ácaros. La mayoría de las arañas se alimentan enteramente de insectos. Los ácaros depredadores se alimentan principalmente de los ácaros araña.

8.4.1.4 Distinguir entre plagas y los enemigos naturales

La identificación adecuada de las plagas, y la distinción entre las plagas y los enemigos naturales, es esencial para un control biológico eficaz. Observen cuidadosamente los ácaros e insectos en sus plantas para ayudar a discernir su actividad. Por ejemplo, algunas personas pueden confundir las larvas de la mosca sírfida con las orugas. Sin embargo, las larvas de mosca sírfida se encuentran alimentándose de pulgones y no masticando la planta misma. Si encuentra ácaros en sus plantas, obsérvelos con una buena lente de mano. Los ácaros depredadores parecen ser más activos que las especies que se alimentan de plantas. En comparación con los ácaros de las plagas, los ácaros depredadores suelen ser más grandes y no se encuentran en grandes grupos.

Tabla 3: Algunas plagas y sus enemigos naturales comunes

Plaga	Enemigo natural					Otros grupos y ejemplos
	Crisopa	Escarabajo hembra	Mosca parásita	Avispa parásita	Ácaro predador	
Áfidos	X	X		X		Hongos entomopatogénicos, escarabajo soldado, larvas de mosca sírfida
Orugas	X		X	X		<i>Bacillus thuringiensis</i> , pájaros, hongos entomopatogénicos, y virus, insectos y avispas depredadores, <i>Trichogramma</i> spp. (avispa parasitaria de huevo), arañas
Mosca blanca gigante	X	X		X		<i>Encarsia hispida</i> , <i>E. noyesi</i> , <i>Entedononecremnus krauteri</i> , <i>Idiopus affinis</i> (avispa parasitaria), larvas de mosca sírfida
Lace bugs	X	X		X		Insectos asesinos e insectos pirata, arañas
Cochinillas	X	X		X		Destruidor de cochinilla, escarabajo hembra
Psílidos	X	X		X		Insectos pirata
Cocoídeos	X	X		X	X	<i>Aphytis</i> , <i>Coccophagus</i> , <i>Encarsia</i> , y <i>Metaphycus</i> spp., avispa parasitaria
Caracol, babosas			X			<i>Rumina decollata</i> (caracol predador), escarabajo de tierra depredador, pájaros, culebras, sapos, y otros vertebrados
Araña roja	X	X			X	Geocoris e insectos pirata diminutos, <i>Feltiella</i> spp. (larvas depredadores de mosca), trips de 6 manchas, <i>Stethorus picipes</i> (destructor de acaro araña, escarabajo hembra)
Trips	X			X	X	insectos pirata diminutos, depredadores de trips
Gorgojo, raíz o suelo				X		<i>Steinernema carpocapsae</i> , <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> (nematodos entomopatogénicos)
Mosca blanca	X	X		X		Geocoris e insectos pirata diminutos, <i>Cales</i> , <i>Encarsia</i> , y <i>Eretmocerus</i> spp., avispas parasitarias, arañas

8.4.2 Ejemplos de agentes biológicos

En el Tabla 4 se muestran algunos agentes de lucha biológica (BCA) disponibles en el mercado contra los fitopatógenos. Los distintos países tienen diferentes reglamentos sobre quién puede utilizar estos productos. Puede ser necesario realizar un examen para poder adquirir estos productos. Además, es posible que no todos estos productos estén disponibles en todos los países.

Tabla 4: Algunos agentes de control biológico (ACB)

Enfermedades de las plantas	ACB	Cultivos
Moho polvoriento	<i>Ampelomyces quisqualis</i>	Fresas, tomate, pimiento, cucurbitáceas
Moho polvoriento, moho gris, moho blanco (<i>Sclerotinia</i>)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> ssp. Plantarum strain D747, <i>Bacillus subtilis</i> strain QST 713	Fresas, tomate, pepino, pimiento, cucurbitáceas, berros, lechugas, espinacas, hierbas aromáticas
Moho blanco (<i>Sclerotinia</i>)	<i>Coniothyrium minitans</i>	Cualquier cultivo
Moho gris, mildiú lanoso, marchitez Fusarium, ahogamiento (<i>damping off</i>)	<i>Gliocladium catenulatum</i>	Fresas, tomate, cucurbitáceas pimiento, berros, lechugas, espinacas, hierbas aromáticas
Criptógama de suelo	<i>Streptomyces</i> K61	Cualquier cultivo
Ahoramiento (<i>damping off</i>)	<i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Trichoderma harzianum</i>	Cualquier cultivo

8.4.2.1 Crisopas verdes comunes (*Chrysoperla carnea*)

Llamada *Crisopera carnea* por la delicada venación alar de los adultos, o el león áfido por el apetito voraz de sus larvas, la *Crisopera carnea* es un depredador activo de muchos artrópodos de cuerpo blando y sus huevos. Varias especies del género *Chrysoperla* se producen en masa en varios países para su utilización tanto en cultivos al aire libre como en cultivos protegidos. La larva del tercer estadio es extremadamente voraz y puede consumir una pupa de pulgón o de mosca blanca en menos de un minuto. Las larvas son caníbales y cuando son jóvenes pueden comer huevos no eclosionados, otras larvas e incluso adultos si el alimento escasea. En presencia de presas mezcladas, las crisopas verdes atacan primero a los áfidos, seguidos por los trips y los ácaros araña. También se sabe que se alimentan de orugas jóvenes y huevos de polilla, cochinillas, escamas de insectos, larvas de mosca blanca y pupas. Las plantas con follaje denso son las más adecuadas para estos depredadores, especialmente cuando hay una propagación uniforme de las presas a través del dosel. Las larvas de lazo son útiles en los cultivos orgánicos donde las restricciones de los plaguicidas requieren un depredador más generalista para controlar muchas especies de plagas. *C. carnea* es más tolerante a la baja humedad que otras especies de crisantemos.



Figura 20: Crisopa predadora en estado larvario (izquierda) y adulto (derecha).



Figura 21: Ciclo de vida de un crisopa (K. Kos, with copyright permission)

8.4.2.2 El parasitoide de mosca blanca *Encarsia formosa*

Encarsia formosa fue descubierta en Inglaterra y utilizada con éxito por primera vez en 1926. En dos años se habían criado 250.000 parasitoides para su uso en viveros de toda Inglaterra, Francia y, posteriormente, en Canadá. Esta especie está ahora disponible comercialmente en muchos países. Las hembras adultas miden 0,6 mm de largo con la cabeza y el tórax negros, el abdomen amarillo y las alas translúcidas. El signo más obvio de la actividad de *Encarsia spp.* es la presencia de "escamas" negras en las hojas. Estas son las etapas pupales del parasitoide y se forman dentro de las pupas de la mosca blanca. Las avispas adultas son atraídas por la "escama" de mosca blanca del huésped (llamada así porque el estado larvario de la mosca blanca es mayormente inmóvil y se asemeja a los insectos de escamas en miniatura) por los compuestos volátiles que desprende la melaza de la mosca blanca. Los adultos se alimentan de la melaza. Por lo general, se pone un solo huevo que pasa por tres estadios larvarios, durante los cuales la escama de mosca blanca permanece blanca y se desarrolla normalmente. Cuando se desarrolla completamente, la escama de mosca blanca se vuelve negra cuando el parasitoide pupa. Las pupas permanecen adheridas a la hoja y el adulto emerge unos 10 días después de un agujero cortado a través del pupario con un "diente" especial. *E. formosa* se introduce en los cultivos como escamas negras pegadas a las tarjetas de las que los adultos emergen unos días después.



Figura 22: *Encarsia formosa* poniendo un huevo sobre la mosca blanca (izquierda) y presencia de "escamas" negras (derecha)

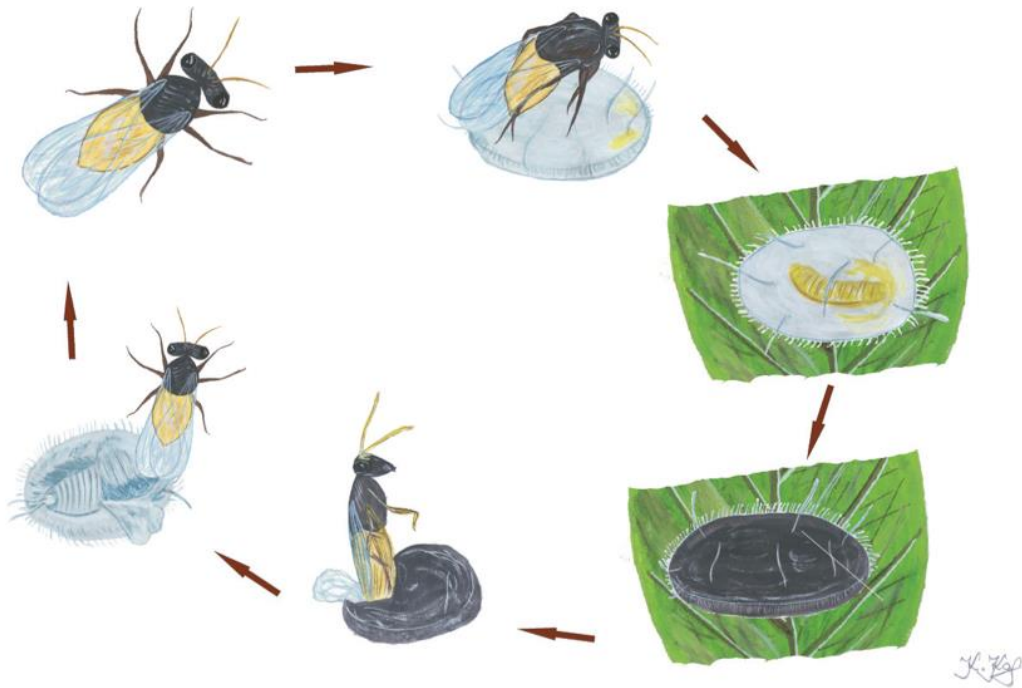


Figura 23: Ciclo de vida sincronizada de *Encarsia formosa* con el ciclo de vida de la mosca blanca (K. Kos, con permiso de copyright)

8.4.2.3 Nematodos entomopatógenos

Los nematodos entomopatógenos también se llaman anguilas o gusanos redondos. Estos diminutos organismos son relativamente simples: simétricos bilateralmente, alargados y cónicos en ambos extremos. Las especies aquí descritas son parasitoides facultativos (es decir, pueden vivir tanto como saprofitos como parasitoides). Aunque se encuentran en la naturaleza, pueden producirse en masa con dietas artificiales mediante un proceso de tipo fermentación en medio líquido y se utilizan comercialmente como agentes de control biológico. A diferencia de los nematodos fitopatógenos, estas especies entomopatógenas tienen bacterias simbióticas en su tracto alimentario. Éstas producen una toxina y es ésta la que es el agente letal. Una vez que el nematodo ha entrado en el

huésped y se alimenta de su hemolinfa (el líquido, análogo a la sangre de los vertebrados, que circula en el interior del cuerpo del artrópodo), defeca un pequeño gránulo que contiene las bacterias patógenas que, en las condiciones de temperatura adecuadas, matará al huésped en sólo 2-3 días. Los nematodos se reproducen entonces en la sopa de bacterias y hemolinfa, dejando el cadáver como larvas infecciosas de tercer estadio. Estas son inusualmente resistentes a las condiciones ambientales adversas y pueden sobrevivir durante varios meses.

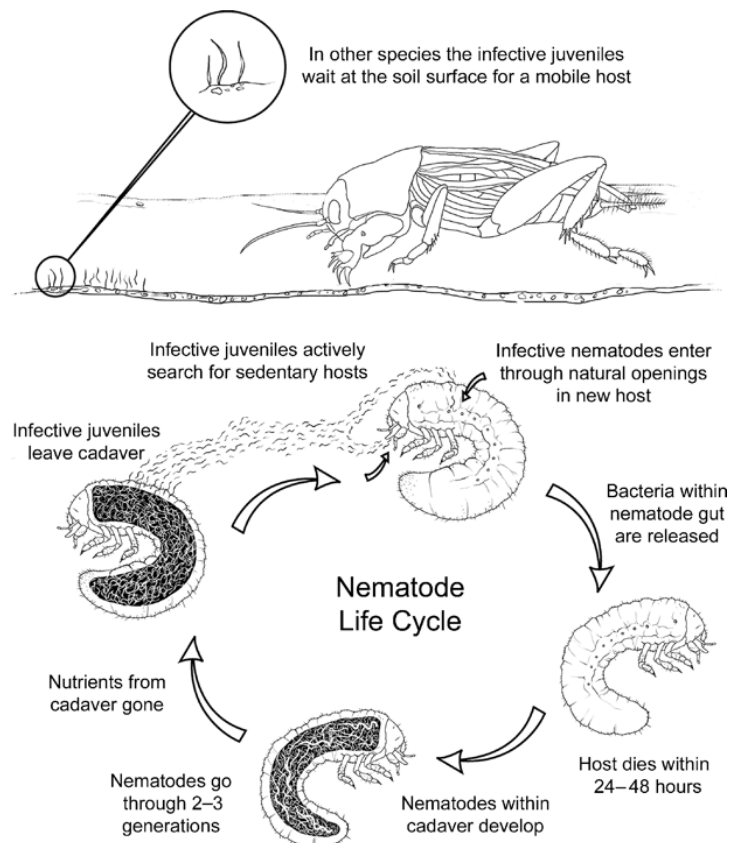


Figura 24: Ciclo de vida de un nematodo esteinernemático o heterorhabditativo (Dibujo de A.E. Burke)

8.4.2.4 Ácaros depredadores

Estos son pequeños ácaros de movimiento rápido que pueden ser depredadores específicos, como *Phytoseiulus persimilis*, o más generalistas en su dieta, como muchas de las especies de *Amblyseius*. Todos depositan huevos cerca de la presa prevista que eclosionan como ninfas de seis patas, pasan a través de dos mudas y luego se desarrollan como adultos de ocho patas. La ubicación de la presa suele ser por medio de kairomonas (semiqúimicas) liberadas por las heces de la presa, los daños en las plantas o, en el caso de los ácaros araña, por sus telarañas que producen un estímulo de atracción y arresto en el depredador que las retiene en las proximidades de su presa anfitriona. La mayoría de los ácaros depredadores son capaces de sobrevivir con un número relativamente bajo de presas y pueden aumentar rápidamente para proporcionar niveles adecuados de control antes de que se produzca un brote importante.

Los ácaros depredadores se encuentran en todo el mundo y varios de ellos están en producción comercial para su liberación masiva, en particular para cultivos protegidos. Sin embargo, su uso en cultivos al aire libre está aumentando, especialmente en los cultivos comestibles, en los que los intervalos posteriores a la cosecha de muchos plaguicidas restringen o incluso impiden la intervención química. Muchas de las especies de *Amblyseius* pueden producirse en masa con una dieta a base de salvado que puede empaquetarse junto con un ácaro huésped ficticio en bolsitas de papel para facilitar su distribución y mejorar su establecimiento en un cultivo.



Figura 25: Ácaro depredador adulto que se alimenta de ácaros fitófagos (izquierda), bolsa de sistema de liberación controlada (SRC) colocada en un cultivo comercial para introducir ácaros depredadores amblyseidos (derecha).



Figura 26: Ciclo de vida de los ácaros depredadores, familia *Phytoseiidae* (K. Kos, con permiso de copyright)

8.4.2.5 Avispa parasitoide (*Aphidius colemani*)

Aphidius colemani es una pequeña avispa negra, de 4-5 mm de largo, que inserta un solo huevo en un áfido anfitrión. Todas las demás etapas de la vida ocurren dentro del áfido. La aparición de una momia de color marrón dorado indica la presencia de estos parasitoides en un cultivo. En general, este parasitoide ataca a las especies de áfidos más pequeñas. Esta especie está disponible comercialmente en muchos países. Los áfidos son buenos en la ubicación del huésped y pueden proporcionar niveles razonables de control si se introducen pronto cuando el número de plagas es bajo. Sin embargo, si los áfidos se establecen en colonias, *A. colemani* tardará algún tiempo en tener un impacto en la población de la plaga, por lo que se deben considerar los depredadores o un plaguicida selectivo. La etapa de momia es tolerante a la mayoría de los plaguicidas de corta duración, pero aquellos como los piretroides sintéticos tienen una larga actividad residual y pueden matar al adulto cuando emerge de la momia del áfido. Las plantas bananeras de cereales infestadas con un áfido específico son útiles en los cultivos en los que se requiere un suministro continuo de parasitoides.



Figura 27: Avispa parasitoide adults (*Aphidius colemani*) poniendo huevos en un áfido (izquierda). Áfido parasitado por *Aphidius colemani*: estado de momia (derecha).

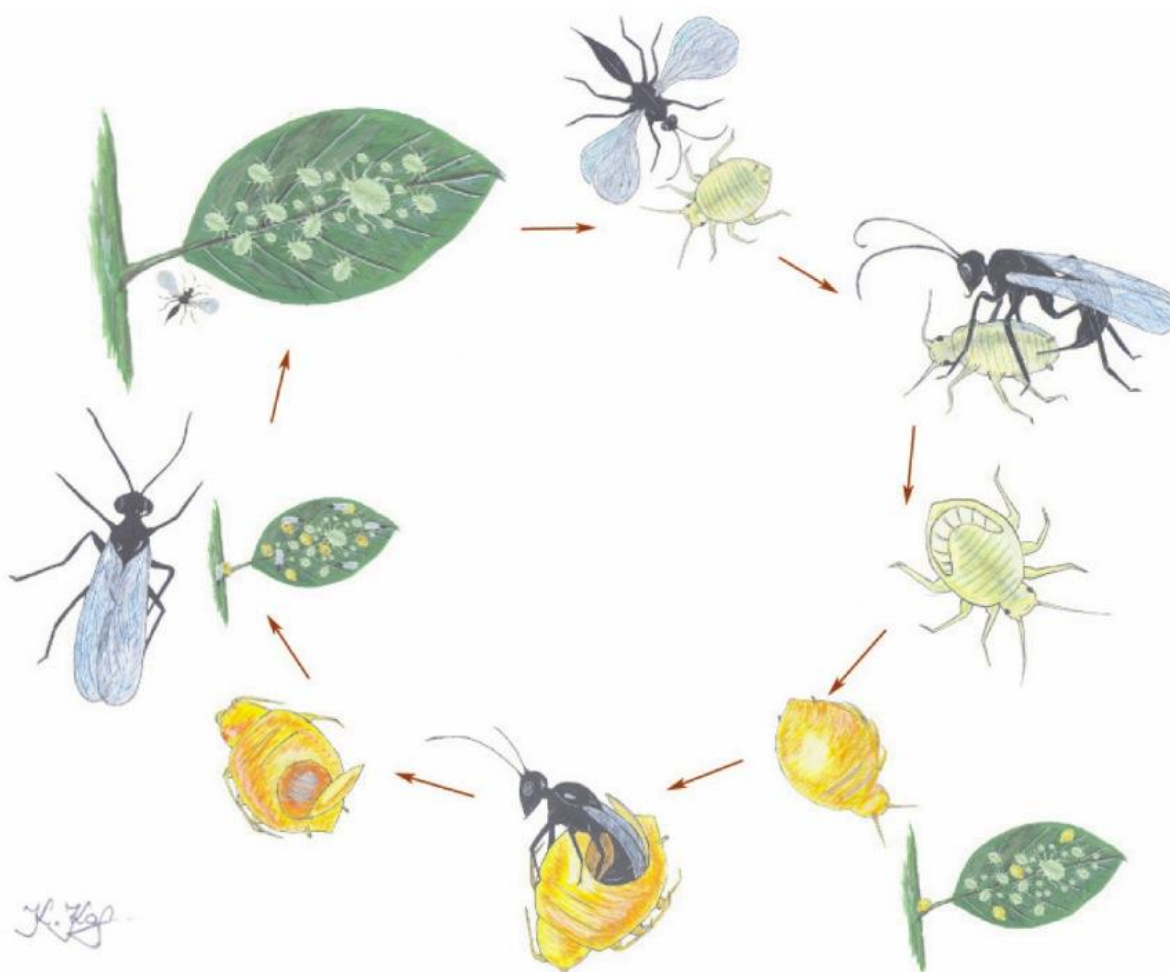


Figura 28: Avispa parasitoide (*Aphelinus mali*) para el control biológico de áfidos (*Eriosoma lanigerum*) (K. Kos, con permiso de copyright)

8.5 Referencias

- Bittsánszky, A., Gyulai, G., Junge, R., Schmautz, Z. y Komives, T. 2015. [Plant protection in ecocycle-based agricultural systems: Aquaponics as an example](#). In *Proceedings of the International Plant Protection Congress (IPPC)*, Berlin, Germany Vol. 2427.
- Conte, L., Chiarini, F., Zancanaro, A., y Monta, L.D. 2000. [Biological control of *Aphis gossypii* Glover \(Rhynchota, Aphididae\) in organic greenhouse cucumbers using 'banker plants' as open rearing units of beneficials: two years of trials](#). In *IFOAM 2000: The World Grows Organic. Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference*, Basel, Switzerland. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich.
- FAO 2018. [Pest and Pesticide Management](#). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FiBL 2019. [Betriebsmittelliste 2019 für den biologischen Landbau in der Schweiz](#).
- Gravel, V., Dorais, M., Dey, D. y Vandenberg, G. 2015. [Fish effluents promote root growth and suppress fungal diseases in tomato transplants](#). *Canadian Journal of Plant Science* 95: 427-436.
- Kleinhenz, M.D., Waiganjo, M., Erbaugh M.J. y Miller, S.A. 2011. [Tomato grafting guide. Preparing Grafted Tomato Plants using the Cleft Graft Method](#).

- Raviv, M. y Lieth, J.H. 2007. *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier.
- Resh, H.M. 2013. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th edition). CRC Press, Boca Raton.
- Schmautz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., Goesmann, A., Junge, R. y Smits, T.H. 2017. [Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system](#). *Archives of Microbiology* 199 (4): 613-620.
- Somerville et al. 2014. Appendix 2 – Plant pests and disease control In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. *Small-scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming*, pp. 183-186. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Tang, S., Xiao, Y., Chen, L. y Cheke, R.A. 2005. [Integrated pest management models and their dynamical behaviour](#). *Bulletin of Mathematical Biology* 67: 115-135.
- The European Parliament and the Council of the European Union 2009. [Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides](#). *Official Journal of the European Union* L 309/71.
- Vermeulen, T. y Kamstra, A. 2012. [The need for systems design for robust aquaponic systems in the urban environment](#). In *International Symposium on Soilless Cultivation* 1004: 71-77.
- Vincent, C., Weintraub, P. y Hallman, G. 2009. [Physical control of insect pests](#). In V.H. Resh y R.T. Cardé (eds.) *Encyclopedia of Insects* (2nd edition), pp. 794-798. Academic Press, San Diego.

9. MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS

9.1 Introducción a la monitorización

9.1.1 Parámetros científicos

Un parámetro científico es una característica o un valor definible o medible, seleccionado a partir de un conjunto de datos. Una variable es cualquier factor, rasgo o condición que puede existir en diferentes cantidades o tipos. En la ciencia experimental, suele haber tres tipos de variables: independientes, dependientes y controladas. La variable independiente es la que el experimentador cambia para medir u observar una respuesta o un efecto. La variable dependiente es la respuesta medida a los cambios realizados en la variable independiente. Las variables controladas son las variables que se mantienen constantes en un experimento.

Ilustremos estas variables con un experimento imaginario utilizando un sistema acuapónico. Nos interesa cómo la masa total de peces afecta a la producción de amoníaco en el tanque que esta conectado con la unidad hidropónica. La concentración de amoníaco se medirá en g/L en el tanque así como en la unidad hidropónica. La cantidad y la tasa de alimentación permanecerán constantes, mientras que la masa total de peces variará con la adición de peces en el tanque. En este experimento imaginario, la masa total de los peces es la variable independiente (esto es lo que estamos cambiando), y la concentración de amoníaco es la variable dependiente (esto es lo que nos interesa - es lo que estamos midiendo como respuesta a la variación de la masa de los peces). Las variables, como la cantidad de alimento, la tasa de alimentación, los intervalos de tiempo entre las alimentaciones, los intervalos de tiempo entre las variaciones de la masa total de los peces, la temperatura del agua en el tanque, la temperatura del agua en la unidad hidropónica, la superficie del biofiltro, el número de plantas en la unidad hidropónica, etc., tienen que mantenerse constantes para medir sólo el efecto de la variación de la masa total de los peces en la producción de amoníaco, y por lo tanto son las variables controladas.

Es importante señalar que los experimentos científicos (o las mediciones de un mismo parámetro) se realizan en múltiplos, generalmente triplicados, a fin de validar los datos empíricos o los resultados observados. Tres repeticiones suelen ser suficientes para descartar cualquier posible valor atípico (si las otras dos mediciones coinciden). A continuación se toma una media (en estadística llamada media aritmética) de esas mediciones para mejorar la precisión del resultado. También debe calcularse la desviación estándar (DE) de las tres réplicas para informar sobre la variabilidad entre los datos. Es preferible una desviación estándar baja. No olvide incluir unidades en sus mediciones. A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de la media aritmética y la desviación estándar:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

dónde:

\bar{x} = media aritmética

x_1, x_2, x_3, x_n = valores individuales en el conjunto de datos

n = el número de puntos en el conjunto (el número de valores de 'x')

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

dónde:

SD = desviación estándar

Σ = sumatoria

x = cada valor individual en el conjunto de datos

\bar{x} = la media aritmética

n = el número de puntos en el conjunto (el número de valores de 'x')

9.1.2 ¿Por qué monitorizar?

La necesidad de la monitorización en la acuicultura surge desde dos puntos de vista: la legislación y la gestión. El carácter holístico de la acuaponía hace que se incluya en varias categorías legislativas diferentes en lo que respecta a la política a nivel de la UE. La [Política Pesquera Común \(PPC\)](#) y la [Política Agraria Común \(PAC\)](#), así como las políticas sobre seguridad alimentaria, salud y bienestar de los animales, sanidad vegetal y legislación ambiental, entre otras, pueden aplicarse todas ellas, dependiendo de las características operativas del sistema. La legislación y los reglamentos que deben observarse durante la producción acuapónica incluyen, entre otros, las siguientes:

- [La Directiva Marco sobre el Agua \(2000/60/EC\)](#) (WFD) – Entre otras cosas, la DMA establece las normas para el control, la toma de muestras y el análisis de la descarga de efluentes en los cursos de agua. También exige a los Estados miembros que establezcan regímenes de monitorización dentro de sus países, lo que a menudo incluye inspecciones en los lugares de descarga para analizar los efluentes
- [La Directiva sobre Nitratos \(91/676/EEC\)](#) especifica los límites de los parámetros de los efluentes que pueden ser descargados/eliminados
- Los reglamentos de seguridad alimentaria, que se tratarán con más detalle en el capítulo 10 de este libro de texto
- Reglamentos sobre bienestar animal y sanidad de los peces, como la [Directiva 91/496/EEC](#), que establece los principios que rigen sobre la organización de los controles veterinarios de los animales que entran en la UE procedentes de terceros países

En la mayoría de los países se dispondrá de ayuda de los organismos gubernamentales para mantener a los acuicultores en consonancia con la ley, por lo que deberán solicitar a las autoridades competentes información completa sobre su situación particular ([Joly 2018](#)).

El monitoreo regular de los parámetros es una parte indispensable de la gestión, el funcionamiento y el mantenimiento del sistema acuapónico. El monitoreo de la calidad del agua y de la salud de los peces y las plantas indicará el buen funcionamiento del sistema y sus importantes beneficios en materia de costes. Llevar un buen registro de sus mediciones puede ayudar en gran medida a observar las tendencias y a diagnosticar futuros problemas. Es importante registrar/grabar todas las lecturas. Parámetros como el amoníaco, el nitrito, el oxígeno disuelto y el pH pueden dar una indicación de si el sistema está funcionando mal. La identificación del parámetro que es problemático (es decir, fuera del rango deseado) ayuda al operador a solucionar el problema rápidamente y a restablecer el funcionamiento del sistema acuapónico a niveles óptimos, lo que resultará en un mayor rendimiento de peces y plantas.

9.1.3 Diferentes acercamientos a la monitorización

Los enfoques de monitorización para comprobar la calidad del agua acuapónica van desde los muy simples y baratos hasta los complejos y que implican un costoso equipo analítico. El enfoque más simple y barato es utilizar tiras de prueba, que se sumergen en el agua. Éstas contienen un reactivo que cambia de color cuando entra en contacto con el agua. La intensidad de esta reacción puede ser comparada con la tabla de colores proporcionada con el kit, que dará una medida relativamente precisa de lo que se está probando. y luego comparar el color que se desarrolla con la tabla de colores proporcionada en la caja. Estos kits son a menudo baratos y fáciles de usar, aunque como son un material consumible, las existencias deberán ser constantemente repuestas. Sin embargo, por lo general sólo pueden utilizarse para una gama limitada. Por ejemplo, algunas tiras reactivas para el pH sólo funcionan dentro de un rango de pH de 5 a 8. Si el pH en el sistema acuapónico cae fuera de este rango (por debajo de 5 o por encima de 8), entonces las tiras reactivas pueden dar resultados falsos.

El siguiente nivel en términos de complejidad y costo son las pruebas con reactivos químicos y una tabla de colores. Aquí la muestra se coloca en un pequeño tubo de ensayo y se añaden gotas de reactivos según las instrucciones. Se produce una reacción y el color de la solución en el tubo de ensayo se compara con la carta de colores que viene con el kit. Estos pueden costar desde unos 9 euros para un solo parámetro hasta unos pocos cientos de euros para múltiples parámetros. Una versión más precisa y avanzada de estas pruebas mide el color usando espectrofotómetros.

La espectrometría es un método de análisis cuantitativo que utiliza la absorbencia de la luz. Normalmente se centrifuga una muestra de agua para eliminar los sólidos en suspensión y se añade un reactivo específico para la prueba deseada. Esto se coloca en el interior de un espectrofotómetro para su análisis. La lectura dada por el espectrofotómetro puede entonces relacionarse con las curvas estándar conocidas para ese parámetro químico en particular para dar una concentración. Algunos fabricantes también proporcionan kits de prueba para un análisis más rápido, sin necesidad de utilizar curvas de calibración, y estos están disponibles para una amplia gama de parámetros de calidad del agua.

El enfoque más avanzado y costoso de la monitorización implica el uso de sondas y medidores electrónicos. Estos existen en configuraciones de un solo parámetro, o en configuraciones de múltiples sondas de un solo parámetro. Las sondas se conectan a un medidor electrónico digital y se sumergen en el agua. También se pueden instalar monitores continuos en línea dentro del tanque, con una sonda en constante contacto con el agua. Cuestan desde unos 100 euros hasta varios cientos de euros, son los instrumentos más precisos para la monitorización y tienen el mayor rango de medición ([Klinger-Bowen et al. 2011](#)).

El enfoque de monitorización elegido suele estar asociado al tamaño del sistema acuapónico y al nivel de productividad. Los sistemas comerciales profesionales suelen emplear monitores continuos en línea para el oxígeno disuelto (OD), el nivel de agua y el suministro eléctrico. Por otra parte, los sistemas de patio de recreo suelen basarse en los enfoques más simples y baratos, como las tiras reactivas, o incluso sólo inspecciones visuales de la turbiedad del agua, la oxigenación en el biofiltro y la salud de las plantas y los peces.

9.1.4 Clasificación de los parámetros de monitorización

Los parámetros que deben ser monitoreados en un sistema acuapónico son la calidad del agua, la salud de los peces y la salud de las plantas, y pueden clasificarse en los siguientes tipos: químicos, físicos y biológicos. Los parámetros químicos tienen que ver con la calidad del agua e incluyen el pH, el oxígeno disuelto (OD), el amoníaco, el nitrito, el nitrato, el contenido de fósforo y la dureza del agua. Los parámetros físicos incluyen la temperatura del agua y del aire, la humedad relativa y la intensidad de la luz UV. Los parámetros biológicos proporcionan una visión directa del rendimiento del sistema, e incluyen todo, desde la biomasa y la salud de los peces, la biomasa y la salud de las plantas, las deficiencias de nutrientes en las plantas, la contaminación por algas y otros parámetros microbiológicos. Cada organismo de una unidad acuapónica -los peces, las plantas y las bacterias del biofiltro- tiene un rango de tolerancia específico para cada parámetro físico-químico (Tabla 1). Los márgenes de tolerancia son relativamente similares para los tres organismos, pero es necesario llegar a un compromiso y, por lo tanto, algunos organismos podrían no estar funcionando a su nivel óptimo ([Somerville et al. 2014a](#)).

Tabla 1: Rangos óptimos de parámetros fisicoquímicos para peces (agua caliente y fría), plantas y bacterias nitrificantes.

Tipo de organismo	Temperatura (°C)	pH	Amonio (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)	DO (mg/L)
Peces aguas cálidas	22-32	6-8.5	<3	<1	<300	4-6

Tipo de organismo	Temperatura (°C)	pH	Amonio (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)	DO (mg/L)
Peces aguas frías	10-18	6-8.5	<1	<0.2	<300	6-8
Plantas	16-30	5.5-6.5	<30	<1	-	> 3
Bacterias	14-34	6-8.5	<3	<1	-	4-8

9.1.5 Frecuencia de monitoreo

El objetivo es mantener un ecosistema saludable con parámetros físico-químicos y de otro tipo que satisfagan los requisitos para el cultivo simultáneo de peces, vegetales y bacterias. Hay ocasiones en las que la calidad del agua tendrá que ser manipulada activamente para cumplir con estos criterios y mantener el sistema funcionando correctamente (Sallenave 2016; Somerville *et al.* 2014a). En la Figura 1 se muestra un ejemplo de libro de registro de datos.

Sampling/ monitoring details		PHYSICAL PARAMETERS												CHEMICAL PARAMETERS												BIOLOGICAL PARAMETERS		
Date	Time of sampling (h:min)	pH			Water temperature [°C]			Electrical conductivity [µS/cm]			Dissolved oxygen [mg/L]			Ammonia [mg/L]			Nitrite [mg/L]			Nitrite [mg/L]			Phosphate [mg/L]			Mass of fish [g]	Appearance & behaviour of fish	Appearance of plants
		SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3	SS1	SS2	SS3			

Figura 1: Ejemplo de cuadro de registro de datos de monitoreo. SS en la tabla significa "sitio de muestreo"

9.2 Parámetros importantes en la acuaponía

Además de vigilar los parámetros físico-químicos generales que son importantes para mantener la calidad del agua en los sistemas acuapónicos, y los parámetros biológicos que indican el rendimiento del sistema y revelan posibles problemas con la calidad del agua, también es necesario realizar controles regulares del rendimiento de la tecnología (filtros, agua, bombas de aire, etc.).

9.2.1 La tecnología

Eliminación de sólidos

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Una consideración importante en la acuaponía es la eliminación de las partículas grandes y la reducción del tiempo de retención de estas partículas. Estas partículas incluyen alimentos no consumidos, desechos de peces, así como otras fuentes de material biológico, como las partículas vegetales. Pueden tener un impacto negativo en parámetros químicos como el pH y el DO. La filtración mecánica (pantallas y barreras físicas) será el primer paso importante en el monitoreo para permitir la eliminación eficiente de las partículas. La inspección visual de las pantallas y los filtros

suele ser el mejor método para comprobar si hay partículas grandes. Es importante que las partículas se eliminen rápidamente, a fin de evitar que se descompongan en trozos más pequeños, lo que aumentaría el tiempo necesario para su eliminación y provocaría un aumento de la demanda de oxígeno debido al incremento de la carga de nutrientes (Thorarinsdottir *et al.* 2015). Las pantallas deben limpiarse con frecuencia para asegurar que los desechos se eliminen.

MONITOREO: Para partículas más pequeñas, una medida útil es la transparencia del agua, también conocida como turbidez, aunque puede ser una medida subjetiva, dependiendo del método utilizado. Un método es la representación de lo bien que se transfiere la luz a través del medio (agua). La principal causa de la turbidez son a menudo los sólidos en suspensión, determinados como sólidos en suspensión totales (SST). Estos pueden medirse con precisión por peso seco. En primer lugar, se toma un volumen definido de agua del sistema. Esto debería ser relativo a la turbidez del agua, pero a menudo 1 L será suficiente. Esto puede reducirse para el agua cargada con sólidos en suspensión, o aumentarse si el agua es clara. La muestra de agua se filtra entonces a través de un papel de filtro pre-pesado de un tamaño de poro especificado. Los sólidos permanecerán en el papel de filtro, que puede ser pesado cuando esté completamente seco (es decir, cuando el papel deje de perder peso después de seguir secándose). El aumento de peso del papel de filtro proporciona una medida de la cantidad de partículas presentes, que puede expresarse en mg/L o kg/m³ (Rice *et al.* 2012) (Tabla 2).

Tabla 2: El procedimiento para la medición de los sólidos en suspensión.

No.	Procedimiento	Observaciones
1	Pesar el papel de filtro con una precisión de 0,1 mg. Registrar la masa como masa 1.	Anotar el peso de masa 1
2	Poner en marcha el aparato de filtración, insertar un filtro, y aplicar un vacío con una bomba de vacío para hacer pasar el agua a través del filtro	
3	Humedecer el papel de filtro con un pequeño volumen de agua desionizada (DI)	
4	Agitar la muestra vigorosamente y luego medir el volumen de muestra predeterminado con una probeta graduada.	Apuntar el volumen filtrado
5	Enjuagar la probeta graduada y filtrar con tres volúmenes de 20 ml de agua desionizada, permitiendo un drenaje completo entre lavados	
6	Continúe la succión con la bomba de vacío durante tres minutos después de que la filtración se haya completado.	
7	Trasladar con cuidado el filtro a un plato de aluminio para pesar, y colocar el filtro en una bandeja de galletas o un dispositivo similar	
8	Poner los filtros en un horno a 104 ± 1 °C, y secar por un mínimo de una hora	
9	Retirar los filtros del horno y páselos a un desecador para enfriarlos a temperatura ambiente. Pesar un filtro de muestra con una precisión de 0,1 mg.	Registrar la masa como masa 2 y aplicar la siguiente ecuación: $TSS (mg/L) = (Masa\ 1 - Masa\ 2) / Volumen\ de\ la\ muestra$

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si se descubre que se están acumulando grandes desechos en los filtros a velocidades que superan la capacidad de los filtros para eliminarlos, entonces se debe aplicar un mayor programa de limpieza para asegurar que los desechos se eliminen con mayor

frecuencia. Si la turbiedad comienza a aumentar, entonces esto puede ser un signo de un problema en el sistema de filtración. Por lo tanto, los filtros deben ser revisados regularmente para asegurar que no haya obstrucciones o, si es posible, se deben reducir los tamaños de las mallas para capturar partículas más pequeñas.

Biofiltración

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Se debe comprobar el funcionamiento mecánico de la unidad de biofiltro. Se deben hacer comprobaciones diarias para asegurar que el sistema de aireación funciona correctamente y que las burbujas de aire son visibles; esto asegurará que haya un suministro de aire adecuado para las colonias bacterianas. Debe excluirse la luz del biofiltro, ya que puede favorecer el crecimiento de algas fotosintéticas; por lo tanto, debe garantizarse la existencia de una cubierta ligera. El lodo también puede acumularse en los medios contenidos en el biofiltro, por lo que deben hacerse comprobaciones semanales para asegurar que la acumulación esté en niveles aceptables, de lo contrario la eficiencia del sistema podría verse comprometida.

MONITOREO: La mejor manera de monitorear el funcionamiento del biofiltro es analizando el agua en busca de niveles de amonio, nitrito y nitrato, para asegurar que se mantengan dentro de los rangos óptimos para la especie objetivo, y también para cumplir con la legislación local y de la UE. Las concentraciones de amonio, nitrito y nitrato se suelen medir utilizando sondas electrónicas especializadas, ya que cantidades específicas crean cambios en la conductividad del agua. La lectura numérica puede entonces compararse con las cantidades deseadas. Otra forma de medir los niveles de estos nutrientes puede ser con pruebas fotométricas.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Hay varios pasos que deben tomarse si se detectan altos niveles de amonio o nitritos. En primer lugar, hay que determinar si el biofiltro tiene un suministro adecuado de oxígeno y está libre de lodo. El pH debe vigilarse de cerca, ya que el nitrógeno se convierte en amoníaco tóxico (NH_3) a niveles de pH más altos y es especialmente dañino para los peces. Si el pH se mantiene neutro o ácido, el nitrógeno se encuentra en forma de amonio no tóxico (NH_4^+). Ver el Cuadro 3 del Capítulo 5. A continuación, se debe ayunar a los peces durante unos días para evitar que se añada al sistema un exceso de amonio. Esto disminuirá la disponibilidad de amonio, limitará el crecimiento de *Nitrosomonas* y permitirá a las colonias de *Nitrobacter* convertir el exceso de nitritos en nitratos. El amoníaco y el nitrito también pueden comprometer la absorción de oxígeno en los peces, por lo que las concentraciones de DO en la pecera deben mantenerse óptimas. El amoníaco y el nitrito también pueden comprometer la absorción de oxígeno en los peces, por lo que las concentraciones de DO en la pecera deben mantenerse óptimas (Thorarinsdottir et al. 2015).

Formación de biopelículas

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: No hay que subestimar la formación de biopelículas, que pueden obstruir los componentes del sistema como tuberías o salidas o hacer que los sensores automáticos

realicen mediciones defectuosas. Por lo tanto, las biopelículas deben comprobarse y retirarse con regularidad (se recomienda una limpieza semanal).

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si, por ejemplo, sólo un sensor del sistema muestra un valor demasiado bajo / demasiado alto en el caso de una alarma de oxígeno, es posible que se haya formado una biopelícula en el sensor correspondiente, lo que conduce a mediciones incorrectas. Se ha observado que a medida que la biopelícula aumenta, los valores de EC y de oxígeno disminuyen continuamente. En caso de alarma, se debe actuar inmediatamente. No debe asumirse que la medición se debe a la formación de una biopelícula en el sensor.

Bombas de agua y aire

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Los dispositivos mecánicos que proporcionan el oxígeno disuelto y el movimiento del agua tienen que ser revisados frecuentemente (Tabla 3) para asegurar que funcionan correctamente. Las bombas de agua crean un flujo en los sistemas acuapónicos que transporta nutrientes y oxígeno a su alrededor. También mueven los productos de desecho hacia los filtros para que puedan ser eliminados. Si su eficiencia se ve comprometida, o si dejan de funcionar, esto obstaculizará el flujo de nutrientes y la eliminación de los productos de desecho, lo que dará lugar a una disminución de la producción. Sin una aireación suficiente, los peces morirán. Por lo tanto, es necesario asegurarse de que las bombas de aire funcionan correctamente. Esto puede hacerse a menudo visualmente, asegurándose de que hay un flujo constante de burbujas que salen de los aireadores. Una reducción del oxígeno disuelto también puede ser indicativo de un problema. Si se producen problemas, debe buscarse un ingeniero con la formación adecuada para remediar el problema.

Tabla 3: Tareas relacionadas con un sistema de recirculación.

Diario:	<ul style="list-style-type: none"> • Observe el flujo de agua en diferentes puntos del sistema en la unidad de acuicultura y de hidroponía (el agua necesita circular constantemente) • Verifique el intervalo de la bomba de agua; un intervalo más corto = mejor flujo de agua • Asegúrate de que la bomba de agua esté sincronizada con las válvulas a través de las cuales el agua entra en los tanques y la unidad hidropónica • Verificar que ningún agujero de desbordamiento esta taponado (por ejemplo con heces de los peces, pienso, o materia de las plantas, o por partes del Sistema)
Por temporada:	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar el funcionamiento de la bomba de agua y el sistema de aireación • Limpiar la(s) bomba(s), el sistema de aireación y las tuberías y la unidad hidropónica si es necesario • Compruebe el estado de los tubos y las válvulas • Verificar y limpiar a menudo las bombas de agua antes del filtro • Sustituir periódicamente las membranas y partes de desgaste en bombas de aire con membranas

Pantallas

Las pantallas crean una barrera física entre las bombas, los filtros y, en algunos casos, el mundo exterior. Los peces que escapan de los sistemas acuapónicos pueden dañar el equipo, los filtros y, en casos extremos, pueden dar lugar a que especies no autóctonas entren en un ecosistema natural. Es importante que se identifiquen los lugares apropiados para las pantallas. Estos incluirán bombas, corrientes de entrada para los filtros y tuberías donde el agua entra y sale del sistema.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Las pantallas deben ser revisadas diariamente para detectar signos de desgaste, y cualquier pantalla dañada o desgastada debe ser reemplazada utilizando los reemplazos adecuados.

Posibilidad de desacoplamiento del sistema hidropónico

En caso de contaminación en una zona del sistema, es ventajoso que la parte del sistema afectada pueda desconectarse fácilmente del resto (por ejemplo, desenchufar una bomba). Esto puede garantizarse conectando la unidad hidropónica y de acuicultura mediante, por ejemplo, un sumidero de bomba que conecta los dos bucles del sistema. Es importante que todos los componentes del sistema para el tratamiento del agua estén situados en la parte de acuicultura, es decir, delante del sumidero de la bomba, de modo que se pueda garantizar la calidad del agua para los peces.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: La principal aplicación importante es que se puede evitar la contaminación de los peces si se produce en la sección de hidroponía, por ejemplo, debido al uso indebido de plaguicidas. Pero también puede ser ventajoso a la inversa, por ejemplo si los peces necesitan ser tratados con sal, por alguna enfermedad. Durante el período de desacoplamiento, el agua del sistema hidropónico puede ser fertilizada con abonos orgánicos, que ciertamente no perjudican a los peces (recuerde siempre que los dos bucles del sistema deben volver a unirse lo antes posible).

9.2.2 Calidad de agua

El término “calidad del agua” incluye todo aquello que afecta negativamente a las condiciones necesarias para mantener la salud de peces y plantas. Mantener una buena calidad de agua en un sistema acuapónico es de extrema importancia. El agua es el medio a través del cual se transportan todos los macro y micronutrientes esenciales para las plantas, y el medio a través del cual los peces reciben oxígeno; por lo tanto, afectará directamente a la productividad y viabilidad del sistema. Hay cinco parámetros clave de la calidad del agua que son cruciales para una monitorización estrecha del sistema: el oxígeno disuelto (OD), la acidez del agua (pH), la temperatura del agua, los compuestos de nitrógeno (amoníaco, nitritos y nitratos) y la dureza del agua. También es necesario vigilar otros parámetros para mantener un sistema equilibrado y saludable, como el fósforo y otros nutrientes, la contaminación por algas, los sólidos en suspensión, la concentración de dióxido de carbono, etc. Sin

embargo, estos parámetros pueden vigilarse con menor frecuencia en un sistema bien equilibrado (Somerville *et al.* 2014a; Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (DO) describe la cantidad de oxígeno molecular en el agua y se suele medir en miligramos por litro (mg/L). Si los niveles de DO no son suficientes, los peces estarán estresados y su crecimiento puede disminuir, y podrían morir. Los requisitos de DO difieren para los peces de aguas cálidas y los de aguas frías. Las lubinas y los bagres, por ejemplo, que son especies de aguas cálidas, requieren unos 5 mg/L para su máximo crecimiento, mientras que la trucha, un pez de agua fría, requiere unos 6,5 mg/L de DO. Las bacterias nitrificantes del biofiltro también necesitan altos niveles de DO, que son esenciales para convertir los desechos de los peces en nutrientes para las plantas. Por lo tanto, el DO también afecta indirectamente al crecimiento de las plantas. Además, las plantas necesitan altos niveles de DO ($> 3\text{mg/L}$), lo que facilita a la planta el transporte y la asimilación de nutrientes a través de sus superficies radicales. Además, en condiciones de DO baja, pueden aparecer patógenos de las raíces de las plantas. Se recomienda que los niveles de DO se mantengan en 5 mg/L o más en un sistema acuapónico.

MONITOREO: Los niveles de oxígeno deben medirse con frecuencia en un sistema nuevo, pero una vez que los procedimientos se estandarizan (por ejemplo, se han alcanzado las tasas adecuadas de almacenamiento y alimentación de los peces, y se proporciona suficiente aireación) no es necesario medir el DO con tanta frecuencia. El monitoreo de la DO puede ser difícil porque los dispositivos de medición pueden ser muy costosos. Existen algunos equipos de acuario que incluyen reactivos para probar el contenido de DO, pero el enfoque más fiable es el uso de sondas de DO con medidores electrónicos, o monitores en línea que miden constantemente los parámetros más significativos del tanque. En una unidad a pequeña escala podría ser suficiente con vigilar frecuentemente el comportamiento de los peces, el agua y las bombas de aire en su lugar. Si los peces suben a la superficie en busca de aguas superficiales ricas en oxígeno, esto indica que los niveles de oxígeno disuelto en el sistema son demasiado bajos. Asegúrate de que las bombas de agua y aire estén constantemente circulando y aireando el agua.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Los bajos niveles de oxígeno disuelto no suelen ser un problema para los cultivadores aficionados de acuicultura que utilizan bajas tasas de densidad de peces. El problema tiende a surgir más en operaciones con altas densidades. Si los niveles de DO en su sistema son demasiado bajos, aumente la aireación agregando más piedras de aire o cambiando a una bomba más grande. No hay riesgo de agregar demasiado oxígeno; cuando el agua se satura, el oxígeno extra simplemente se dispersa en la atmósfera. Ten en cuenta que los niveles de oxígeno disuelto están estrechamente relacionados con la temperatura del agua. El agua fría puede contener más oxígeno que el agua caliente, por lo que en caso de clima más cálido, es esencial controlar el nivel de oxígeno disuelto o aumentar preventivamente la aireación. El consumo de oxígeno también está relacionado con el tamaño de los peces: los peces más pequeños consumen cantidades considerablemente mayores de oxígeno que los grandes. Este hecho debe tenerse en cuenta cuando se establezca el sistema y se abastezca a los peces pequeños (Sallenave 2016; Somerville *et al.* 2014a).

Si se detectan bajos niveles de DO en el agua en la unidad hidropónica, esto podría resolverse instalando una bomba de aire.

pH

El pH de una solución es una medida de la acidez en una escala de 1 a 14,0. El pH 7,0 es neutro, el pH <7,0 es ácido y el pH >7,0 es alcalino. El pH se define como la cantidad o la actividad de los iones de hidrógeno (H⁺) en una solución:

$$pH = -\log(H^+)$$

La ecuación muestra que el pH disminuye a medida que la actividad de los iones de hidrógeno aumenta. Esto significa que el agua ácida tiene altos niveles de H⁺ y por lo tanto un pH bajo. El pH del agua es un parámetro especialmente importante para las plantas y las bacterias. Para las plantas, el pH controla la disponibilidad de nutrientes. A un pH de 5,5-6,5, todos los nutrientes son fácilmente accesibles para las plantas, pero fuera de este rango se hace difícil (Figura 2). Incluso una ligera desviación del pH a 7,5 o más puede provocar deficiencias de hierro, fósforo y manganeso en las plantas. Ver también la Figura 10 del Capítulo 5.

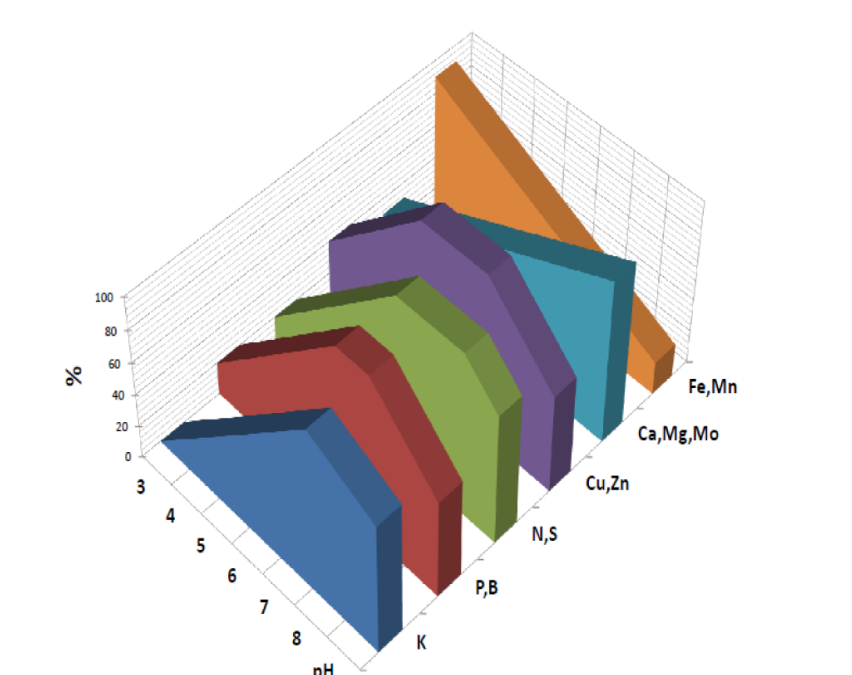


Figura 2: El impacto del pH en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Por F. Moeckel [Dominio público], de Wikimedia Commons

Las bacterias nitrificantes son incapaces de convertir el amoníaco en nitrato a un pH de 6,0 o inferior. Esto hace que la biofiltración sea menos exitosa y los niveles de amoníaco pueden comenzar a aumentar. Los peces tienen un rango de tolerancia al pH de alrededor de 6,0 a 8,5. Para satisfacer las necesidades de los tres organismos (plantas, peces y bacterias), el pH del sistema acuapónico debe mantenerse entre 6,0 y 7,0.

Ciertos eventos o procesos en el sistema acuapónico afectarán al pH, por lo que no se mantendrá constante y será necesario controlarlo regularmente. Estos procesos son la nitrificación, la densidad de población de peces y la contaminación por fitoplancton. En el proceso de nitrificación, las bacterias producen pequeñas concentraciones de ácido nítrico y el pH del sistema acuapónico se reduce. La densidad de población de peces también afecta al pH del sistema. Cuando los peces respiran producen CO_2 que es liberado en el agua. Al entrar en contacto con el agua, el CO_2 se convierte en ácido carbónico (H_2CO_3), que también reduce el pH del agua. Este efecto es mayor a mayores densidades de población de peces. El fitoplancton generalmente está siempre presente en el sistema acuapónico, aunque las cantidades altas son indeseables, porque compite con las plantas por los nutrientes. Debido a la fotosíntesis del fitoplancton, que consume el CO_2 del agua, esto aumenta el pH, especialmente durante el día cuando la fotosíntesis está al máximo. En general, el agua acuapónica se acidifica y el pH deberá ser controlado y ajustado regularmente ([Somerville et al. 2014a](#); [Thorarinsdottir et al. 2015](#)).

MONITOREO: Hay varios métodos para monitorear el pH. El más simple es usar tiras reactivas de pH, que es el método más barato, pero sólo es moderadamente preciso. El siguiente nivel de precisión implica el uso de kits de análisis de agua, sin embargo, el método recomendado y más preciso es utilizar medidores digitales con sondas de pH y monitores en línea para la vigilancia continua. Idealmente, el nivel de pH debe ser monitoreado continuamente o al menos diariamente y ajustado adecuadamente.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Hay varias maneras de elevar el pH en el sistema. Los métodos más comunes incluyen:

- Añadir NaHCO_3 siempre que sea necesario. Disolver el NaHCO_3 en un poco de agua, añadirlo gradualmente al tanque y medir el pH. Puede que necesites hasta 20 g por 100 L. No añadas demasiado de una sola vez ya que esto puede matar a los peces
- Añadiendo bases fuertes, como el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o el hidróxido de potasio (KOH). Disolver los pellets o el polvo en agua y añadirlo gradualmente al tanque.

En algunos casos, el agua que se agrega al sistema es dura con un pH alto, típicamente en regiones con lecho de piedra caliza. El pH también puede aumentar si hay una alta tasa de evapotranspiración, o si la densidad de la población de peces no es suficiente para producir suficientes desechos para impulsar la nitrificación. En estos casos, será necesario reducir el pH añadiendo ácido. La mejor práctica consiste en reducir el pH del agua del depósito en lugar del agua del tanque. En este caso, el ácido fosfórico (H_3PO_4), que es un ácido relativamente suave, puede añadirse al agua del depósito (¡nunca directamente al tanque!) ([Thorarinsdottir et al. 2015](#)).

Temperatura del agua

La temperatura del agua afecta a todos los aspectos de los sistemas acuapónicos. Cada organismo del sistema tiene su propio rango óptimo de temperatura del agua, que debe considerarse al elegir la especie de peces y el tipo de cultivo. Además, debe elegirse una combinación de peces y plantas que coincidan con la temperatura ambiente de la ubicación del sistema, ya que cambiar la temperatura del agua puede ser muy intensivo en energía. La temperatura tiene un efecto sobre el DO así como sobre la toxicidad (ionización) del amoníaco; las altas temperaturas tienen menos DO y más amoníaco ionizado (tóxico). Las altas temperaturas también pueden restringir la absorción de calcio en las plantas.

MONITOREO: La temperatura del agua puede ser monitoreada con termómetros analógicos o digitales, o con sondas de temperatura. Si se utiliza un dispositivo de medición en línea, el monitoreo de la temperatura suele estar incluida en el sistema.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Existen algunas técnicas de gestión que facilitarán la minimización de las fluctuaciones de temperatura. Las superficies de agua de los tanques, las unidades hidropónicas y los biofiltros deben protegerse del sol mediante el uso de estructuras de sombreado. Del mismo modo, la unidad puede protegerse térmicamente utilizando aislamiento contra las bajas temperaturas nocturnas dondequiera que éstas se produzcan. Alternativamente, hay métodos para calentar pasivamente las unidades acuapónicas utilizando invernaderos o energía solar con mangueras negras enrolladas, que son más útiles cuando las temperaturas son inferiores a 15 °C (Somerville *et al.* 2014a).

Nitrógeno total (amonio, nitrito, nitrato)

El nitrógeno es un parámetro crucial de la calidad del agua. La suma de la forma tóxica no ionizada y la forma iónica no tóxica del amoníaco se llama Nitrógeno de Amonio Total (TAN). TAN es lo que la mayoría de los kits de prueba de amoníaco comerciales miden. En una unidad acuapónica en pleno funcionamiento con una biofiltración adecuada, los niveles de amoníaco y nitrito deben ser cercanos a cero, o como máximo de 0,25-1,0 mg/L (véase el capítulo 5).

PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN: El análisis del agua para los compuestos de nitrógeno (TAN, NO₂⁻, NO₃⁻) debe realizarse diariamente o por lo menos semanalmente con el fin de vigilar los picos de amoníaco y nitrito.

Tabla 4: Parámetros con valores objetivo, máximos y mínimos de los compuestos de nitrógeno en el agua del sistema.

Parámetro	Abr.	Unidad	Valor objetivo	Mínimo	Máximo
Nitrógeno de Amonio Total	TAN	mg/L	0.0	-	1.0
Nitrito	NO ₂ ⁻	mg/L	0.0	-	0.2
Nitrato	NO ₃ ⁻	mg/L	0.0	-	300

MONITOREO: Los kits de acuario para medir el amoníaco, el nitrito y el nitrato son bastante precisos y económicos. El análisis espectrofotométrico puede ser usado para una medición más precisa. Hay kits de prueba espectrofotométricos disponibles para medir el amoníaco, el nitrito y el nitrato.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si se producen picos de nitrito o amoníaco, reduzca la alimentación durante varios días, sin dejar de alimentar puesto que eso hará que se mueran de hambre los micro-organismos en el biofiltro (Klinger-Bowen *et al.* 2011). También ver los procedimientos de solución de problemas para la biofiltración (sección 9.2.1).

Fósforo y otros nutrientes

La nutrición desempeña un papel crucial en la salud de las plantas, y un método para comprobar este parámetro consiste en observar el estado de los tejidos de las plantas observando el estado general de las mismas. Los cambios en la forma y el color de las hojas, así como el marchitamiento de la planta, pueden ser un indicio de ciertas deficiencias de nutrientes, y se necesitará una pronta investigación para asegurar la supervivencia del cultivo. A continuación se describen los signos que pueden presentar las plantas si se limita la presencia de sus nutrientes más importantes. Las gamas óptimas de nutrientes diferirán de un cultivo a otro, por lo que es importante que el operador esté familiarizado con la gama óptima de nutrientes para el cultivo elegido (Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Fósforo (P)

Las deficiencias se caracterizan por el escaso crecimiento de las raíces, el enrojecimiento de las hojas, así como por el color verde oscuro de las hojas y el retraso de la madurez. Las puntas de las hojas de las plantas también pueden aparecer quemadas (Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Potasio (K)

La deficiencia causará una menor captación de agua y perjudicará la resistencia a las enfermedades. Entre los indicios de deficiencia de potasio figuran las manchas quemadas en las hojas más viejas, la marchitez y la incapacidad de las flores y los frutos para desarrollarse adecuadamente (Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Calcio (Ca)

Las deficiencias son bastante comunes en la acuaponía, y los signos incluyen la quema de las puntas en las plantas frondosas, la putrefacción del extremo de la flor en las plantas frutales y el crecimiento inadecuado de los tomates (Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Magnesio (Mg)

Las deficiencias suelen implicar cambios en el color de las hojas viejas, con el área entre las venas volviéndose amarilla, rígida y quebradiza antes de caer. Rara vez se encuentra en la acuaponía (Thorarinsdottir *et al.* 2015).

Azufre (S)

Las deficiencias suelen implicar cambios en el color de las hojas nuevas, con el área entre las venas volviéndose amarilla, rígida y quebradiza antes de caer. Es un problema que rara vez se encuentra en la acuaponía ([Thorarinsdottir et al. 2015](#)).

Hierro (Fe)

La falta de hierro en un sistema se presenta visualmente, volviendo amarillas las puntas de las plantas y las hojas enteras de las plantas jóvenes. Esto eventualmente cambiará a blanco con parches necróticos. Una deficiencia puede ser fácilmente identificada observando los cambios en las nuevas hojas en comparación con las hojas viejas. Las hojas nuevas crecerán y aparecerán blancas, mientras que las viejas permanecerán verdes. Con el fin de facilitar la absorción por parte de las plantas, a menudo se añade hierro en su forma quelatada, en concentraciones de hasta 2 mg/L. El hierro también puede ser aplicado directamente en las hojas, con un spray. También es importante controlar el pH cuando se sospecha una deficiencia de hierro, porque a un pH inferior a 8 el hierro puede precipitarse del agua e impedir su absorción por las plantas. Una buena regla a seguir es añadir 5 mL de hierro por 1 m² de plantas cultivadas. Una alta concentración de hierro no dañará un sistema acuapónico, aunque puede dar un ligero color rojo al agua ([Roosta y Hamidpour 2011](#); [Thorarinsdottir et al. 2015](#)).

Zinc (Zn)

Como resultado de la deficiencia de zinc, el crecimiento de las plantas se atrofiará, presentándose como entrenudos acortados y hojas más pequeñas. En términos generales, un problema importante en la acuicultura es la toxicidad del zinc, porque si bien las plantas pueden tolerar un exceso, los peces no pueden y pueden causar mortalidad. El zinc se utiliza como parte del proceso de galvanización de los tanques, tuercas y pernos, etc., y se encuentra en los desechos de los peces. Por lo tanto, las deficiencias rara vez son un problema. Los niveles de zinc deben mantenerse entre 0,03 y 0,05 mg/L, ya que la mayoría de los peces se estresarán entre 0,1 y 1 mg/L, y comenzarán a morir entre 4 y 8 mg/L. Como el zinc se introduce en el sistema principalmente a través del recubrimiento de los equipos, la mejor manera de mantener los niveles de zinc dentro de los límites es utilizar alternativas al equipo galvanizado, como el acero inoxidable o el plástico ([Storey 2018](#)).

MONITOREO: Aunque el monitoreo de los tejidos de las plantas da una indicación del estado de los nutrientes del agua, sólo se revela después de que una deficiencia ha llegado a la etapa en que se ha presentado un problema en el cultivo. Por lo tanto, la mejor solución es la supervisión constante del agua. Para todos los nutrientes anteriores esto puede hacerse utilizando tiras de prueba. Éstas contienen un reactivo que cambia de color cuando entra en contacto con el agua. La intensidad de esta reacción puede ser comparada con la tabla de colores proporcionada con el kit, que luego dará una medida relativamente precisa de lo que se está probando. Estos kits son a menudo baratos y fáciles de usar, aunque como son un material consumible, las existencias deberán ser constantemente repuestas. Algunos de estos parámetros también pueden comprobarse mediante la espectrometría, que es un método de análisis cuantitativo que utiliza la absorbencia de la luz. Por lo general, se centrifuga una muestra de agua para eliminar los sólidos en suspensión y se añade un reactivo específico para la prueba deseada. Este se coloca entonces dentro de un espectrofotómetro para su análisis. La lectura dada puede entonces relacionarse con las curvas estándar conocidas para ese compuesto en particular para dar una concentración.

Para información detallada, véase también la Tabla 9 del Capítulo 5.

Dureza del agua

Hay dos tipos de dureza del agua que son especialmente relevantes para la acuaponía: la dureza general (GH) y la dureza de carbonatos (KH). El GH puede describirse esencialmente como la cantidad de iones de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y, en menor medida, hierro (Fe^{2+}) presentes en el agua. El GH suele producirse de forma natural en zonas donde los cursos de agua atraviesan y entran en zonas con altas concentraciones de depósitos de piedra caliza. El GH es importante tanto para las plantas como para los peces en los sistemas acuapónicos, ya que el Ca^{2+} y el Mg^{2+} son nutrientes esenciales para las plantas y, por lo tanto, son necesarios para una producción vegetal sana. También puede ser una fuente útil de micronutrientes para los peces dentro del sistema; por ejemplo, el Ca^{2+} dentro del agua puede evitar que los peces pierdan otras sales, aumentando así la productividad general del sistema.

El KH es importante sobre todo como agente amortiguador. El KH puede describirse como la cantidad total de carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) dentro de un sistema, que da la alcalinidad del agua. Por lo tanto, el KH tiene un impacto en los niveles de pH, y actúa como un amortiguador del aumento de la acidez que puede surgir de ciertos procesos fisiológicos. Por ejemplo, el proceso de nitrificación, que como ya se ha dicho convierte el amonio de los desechos de pescado en los nitratos utilizados por las plantas, genera ácido nítrico como subproducto. Este puede acumularse y, en última instancia, elevar suficientemente el pH hasta que cause estrés a los organismos. Los iones H^+ del ácido añadido al agua se unirán a los carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-), amortiguando el aumento de la acidez (Sallenave 2016; Somerville *et al.* 2014a; Thorarinsdottir *et al.* 2015).

MONITOREO: A menudo no es necesario vigilar constantemente la dureza del agua en un sistema de flujo si se garantiza que las fuentes de entrada de agua tienen niveles adecuados de GH para promover la salud de las plantas y los peces, así como de KH para neutralizar el ácido nítrico acumulado durante el proceso de nitrificación. El nivel de dureza óptimo para los sistemas acuapónicos está entre 60-120 mg/L (moderadamente duro). En los sistemas RAS, sin embargo, esto debe ser monitoreado una vez por semana. La dureza del agua expresada en miligramos de carbonato cálcico equivalente por litro puede clasificarse como lo definido en la Tabla 5.

Tabla 5: Clasificación de la dureza del agua basada en las correspondientes concentraciones de carbonato de calcio.

Clasificación de la dureza del agua	Concentración (mg/L)
Blanda	0-60 mg/L
Moderadamente duro	60-120 mg/L
Duro	120-180 mg/L
Muy duro	>180 mg/L

La dureza se puede medir usando simples tiras reactivas. La dureza total puede medirse en mg/L o dH (grado de dureza alemán). El pH también dará una medida de la dureza, siendo el agua más alcalina la más dura.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si se comprueba que el agua no tiene un nivel de dureza adecuado, a menudo es posible arreglarlo con aditivos para aumentar el nivel. La piedra caliza o el coral triturado también pueden añadirse al agua para aumentar la dureza ([Sallenave 2016](#); [Somerville et al. 2014a](#); [Thorarinsdottir et al. 2015](#)).

Contaminación por algas, sólidos sedimentables

El crecimiento de las algas en un sistema acuapónico puede tener efectos negativos en su rendimiento. Las algas son organismos fotosintéticos, y crecerán rápida y fácilmente en el agua si se exponen a la luz. Dado que se producen naturalmente en todas las fuentes de agua, es casi inevitable que se produzcan dentro de un sistema acuapónico. La fisiología de las algas varía entre los organismos unicelulares, conocidos como fitoplancton, y los tipos multicelulares, conocidos como macroalgas. Cada uno de ellos tiene sus propios problemas, ya que el fitoplancton puede reproducirse rápidamente, convirtiendo el agua en verde, mientras que las macroalgas forman largas hebras filamentosas, que pueden adherirse al fondo de los tanques. El crecimiento de las algas puede afectar las características químicas del agua, y puede interferir con la mecánica de los filtros y bombas. Las algas competirán con las especies objetivo por los nutrientes. Como son fotosintéticas, también actuarán como un sumidero de DO, produciendo oxígeno durante el día y consumiéndolo por la noche. En casos graves, el consumo de oxígeno por parte de las algas durante la noche puede hacer que el agua se vuelva anóxica, causando la muerte de los peces. Las algas filamentosas también pueden crecer hasta tamaños bastante grandes, y a menudo son difíciles de descomponer. Esto significa que una acumulación de algas puede causar daños en los filtros y bombas que pueden ser costosos de reparar y que pueden comprometer el rendimiento del sistema.

MONITOREO: Afortunadamente, el monitoreo del crecimiento de algas es a menudo un procedimiento sencillo, que por lo general se basa en la inspección visual del sistema, en áreas como las paredes de los tanques, alrededor de las bombas y los filtros, y alrededor de las raíces de las plantas.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: La prevención del crecimiento de las algas es relativamente fácil; el bloqueo de la luz mediante pantallas impedirá su crecimiento ([Somerville et al. 2014a](#)).

Los sólidos en suspensión pueden clasificarse en sólidos asentables y no asentables (o sedimentables y no sedimentables). Los sólidos sedimentables son los que se depositan en el fondo del tanque. El mayor contribuyente son los desechos sólidos de los peces, formados por heces, alimentos no consumidos y otro material biológico. Se estima que 0,45 kg de alimento para peces produce 0,11-0,13 kg de desechos sólidos ([Sallenave 2016](#)). La acumulación del exceso de sólidos sedimentables

tendrá un impacto negativo en un sistema acuapónico por varias razones. En primer lugar, el aumento de la carga de nutrientes disminuirá la DO a medida que se descompongan. Esto tendrá un efecto en otros organismos del sistema, como las bacterias nitrificantes que requieren oxígeno para convertir el amoníaco en nitratos. En segundo lugar, las partículas pueden adherirse a las raíces de las plantas, disminuyendo su eficiencia.

MONITOREO: Para medir los sólidos asentables, tome 1 L de una muestra de agua bien mezclada, colóquela en un cono Imhoff (Figura 3), y déjela durante 1 hora para que se asiente. El cono está graduado en mm, por lo que una lectura directa de mm/L puede ser inferida directamente de la profundidad del material asentado ([MadeCivilEasy 2016](#)).

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Al igual que otros sólidos en suspensión, los sólidos sedimentables se eliminan por filtración, por lo que es necesario asegurarse de que todos los filtros son del tamaño correcto y están en buen estado de funcionamiento.

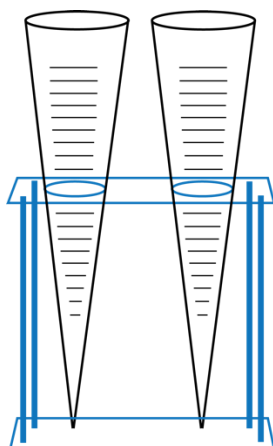


Figura 3: Conos de Imhoff para medir sólidos sedimentables.

9.2.3 Salud de las plantas

Las condiciones desfavorables (por ejemplo, temperatura subóptima, insuficiente intensidad de la luz, deficiencia de nutrientes o plagas y enfermedades) disminuirán el rendimiento general de los cultivos.

MONITOREO: Es muy importante asegurar que los parámetros se establecen dentro del rango óptimo para las especies y cultivares que se cultivan. Hay algunas cuestiones que pueden ser menos obvias y que a menudo son el resultado de deficiencias de nutrientes.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: En tales casos, la estrecha monitorización de la aparición de las plantas ayudará a identificar la causa subyacente ([Somerville et al. 2014b](#)).

Enfermedad

Uno de los principales beneficios de los sistemas acuapónicos es la resistencia comparativa de las plantas a las enfermedades. La podredumbre de la raíz es una enfermedad que afecta a numerosas especies de plantas que crecen en los sistemas hidropónicos. Sin embargo, se ha demostrado que los cultivos que crecen en sistemas acuapónicos tienen una mayor resistencia a los agentes causales, como el *Pythium aphanidermatum* (Stouvenakers *et al.* 2018).

PROCEDIMIENTO DE FUNCIONAMIENTO: Los operadores deben ser diligentes en el monitoreo de las enfermedades. La familiaridad con el sistema es crucial para poder observar cualquier cambio. Lo más importante es el control de la calidad del agua y los parámetros físicos. Debido a la naturaleza controlada de la acuaponía, es posible establecer parámetros de tal manera que se minimice la introducción y propagación de enfermedades.

MONITOREO: Por ejemplo, como la podredumbre de la raíz sólo es virulenta en rangos de temperatura entre 20-30 °C, el control de la temperatura es, por lo tanto, una medida efectiva contra su propagación (Grosch y Kofoet 2003; Sirakov *et al.* 2016). Otra consideración importante es la flora microbiana: las bacterias benéficas y otros microbios desempeñan una función importante en la sanidad vegetal, por lo que es importante que se utilicen inoculantes de estos organismos y que se compruebe ocasionalmente su presencia mediante cultivos; sin embargo, esto no es fácil y requiere conocimientos especializados.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: La sanidad vegetal y el color de las hojas deben observarse diariamente. La forma de la hoja también puede decirnos si una planta está bien. El marchitamiento y los signos de estrés pueden ser indicadores útiles de problemas de salud de la planta (problemas de raíces, cuello o vasculares), así como de desequilibrios de nutrientes.

Humedad relativa

La humedad relativa puede describirse como la cantidad de humedad en el aire, en relación con la capacidad total de transporte de agua del aire; por ejemplo, el 75% de humedad relativa es igual al 75% del contenido total de agua que podría estar presente en el aire. El nivel de agua que puede contener el aire depende de la temperatura, de modo que una habitación a 30°C podría tener significativamente más agua que la misma habitación a 25°C. El punto en el que la humedad relativa alcanza el 100% se conoce como el punto de rocío.

PROCEDIMIENTO DE FUNCIONAMIENTO: Este parámetro es una consideración importante en la acuaponía, porque el control de la humedad en un rango deseado puede prevenir enfermedades, así como defenderse de los parásitos. Como la mayoría de los organismos, los parásitos tienen un umbral óptimo bajo el cual pueden operar eficientemente; por ejemplo, los ácaros araña pueden causar daños a las plantas al perforar las células de las plantas mientras se alimentan. Como no pueden tolerar las condiciones de humedad, los nebulizadores se utilizan a menudo para aumentar la humedad y evitar que se produzcan esos daños. Los microorganismos como el moho y los hongos también pueden causar problemas en los sistemas acuapónicos y, como son difíciles de eliminar mediante la filtración,

la humedad puede utilizarse para controlar las esporas ([Brown 2006](#); [Storey 2016](#)).). Algunas especies de plantas están adaptadas para sobrevivir en condiciones de humedad, mientras que lo contrario ocurre con las plantas de regiones más templadas. Por lo tanto, es importante comprender qué condiciones se adaptan mejor a las plantas que se cultivan.

MONITOREO: Una vez que se ha establecido la humedad relativa óptima para un cultivo, debe ser monitoreada constantemente para asegurar que no quede fuera de este rango por períodos prolongados. La medición de la humedad es un procedimiento sencillo, utilizando un medidor conocido como higrómetro. Este da la humedad relativa de un área como un porcentaje.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si la humedad relativa cae fuera del rango deseado, entonces hay varias cosas que se pueden hacer. En primer lugar, la temperatura puede ser alterada. Como la humedad relativa es una función de la temperatura, y por lo tanto si la humedad relativa es demasiado baja, un aumento de la temperatura permitirá que el agua que se ha condensado se evapore. Por el contrario, si la humedad es demasiado alta, al bajar la temperatura disminuirá la humedad del aire. También se puede manipular el flujo de aire. La ventilación, por ejemplo, diluirá el vapor de agua en el aire, reduciendo así la humedad. También hay dispositivos conocidos como deshumidificadores que pueden activarse en un momento determinado para extraer el agua del aire. Éstos pueden ser especialmente útiles para automatizar el proceso, reduciendo así los costos operacionales (mano de obra) ([Brown 2006](#); [Somerville et al. 2014b](#); [Storey 2016](#)).

Temperatura del aire

La temperatura del aire ambiental tendrá un efecto sobre el crecimiento de la plantas. La mayoría de los vegetales crecen en el rango entre 18-30 °C, aunque hay algunas especies que están adaptadas a umbrales más altos o más bajos. La acelga y los pepinos, por ejemplo, se desempeñan bien entre 8-20 °C, mientras que las especies tropicales como el quimbombó prefieren temperaturas entre 17-30 °C. La temperatura puede afectar a la capacidad de una planta para defenderse de las enfermedades, causando estrés y permitiendo que prosperen las plagas y los parásitos. Otra consideración es la respuesta fisiológica de la planta a la temperatura. Los vegetales de hoja verde, por ejemplo, comienzan a florecer y a sembrar a temperaturas más altas, lo que afecta su sabor, haciéndolos amargos y desagradables.

PROCEDIMIENTO DE FUNCIONAMIENTO: Es importante vigilar constantemente la temperatura de una unidad acuapónica, y las mediciones deben hacerse en diferentes lugares.

MONITOREO: Puede hacerse usando un termómetro digital o con un termómetro analógico. Cualquier cambio en la temperatura debe ser anotado.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si la temperatura cae fuera del rango deseado, puede ser aumentada o disminuida usando equipo especializado (por ejemplo, calentadores de aire,

unidades de aire acondicionado). La mejor manera de garantizar que la temperatura óptima se mantenga durante todo el año es asegurar que el cultivo se adapte al clima local ([Leaffin 2017](#)).

Intensidad de la luz

En condiciones normales de crecimiento, las plantas reciben del sol la luz necesaria para la fotosíntesis. Como otras variables de la naturaleza, esto depende de la ubicación geográfica, la hora del día y las condiciones ambientales locales. La luz es un requisito fundamental para el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, es esencial que se proporcionen los niveles adecuados para el cultivo elegido, a fin de garantizar un rendimiento óptimo ([Chen Lopez 2018](#)). La luz puede medirse por su intensidad (lux), que es el número de fotones que alcanzan una superficie de un tamaño definido. La unidad métrica de la intensidad de la luz es el lumen (lm), y lux es igual a un lumen por metro cuadrado. En acuaponía lo que interesa es el número de fotones que alcanzan la superficie de una hoja. Los fotones son un tipo de partícula elemental, y son esencialmente paquetes de energía que forman una corriente de luz. El número de fotones atrapados por una hoja es el factor determinante de la tasa de crecimiento de la planta ([Badgery-Parker 1999](#)).

PROCEDIMIENTO DE FUNCIONAMIENTO: Sin la intensidad de luz adecuada, las plantas no pueden crecer o funcionar tan bien como deberían. El punto en el que la fotosíntesis es igual a la respiración se conoce como el punto de compensación. Esta es la intensidad que permitirá a las plantas sobrevivir, pero no crecer, y difiere de una planta a otra. En los crisantemos, por ejemplo, este punto está a 4000 lux. Por el contrario, el punto en el que la intensidad de la luz no aumenta la fotosíntesis, y por lo tanto deja de limitar el crecimiento, se conoce como el punto de saturación. En términos generales, las hojas superiores se saturarán a unos 32.000 lux. Debido a la sombra, las hojas inferiores no recibirán tanta luz como las superiores. Para que toda la planta se sature, los niveles de luz deben estar alrededor de 100.000 lux. La radiación fotosintéticamente activa (RFA) es la parte del espectro de luz que las plantas utilizan para la fotosíntesis, e incluye longitudes de onda de 400-700 nm, lo que representa casi toda la luz visible ([Badgery-Parker 1999](#); [Chen Lopez 2018](#)).

MONITOREO: Hay varias maneras de medir la luz, e incluso hay aplicaciones que se pueden comprar para los teléfonos inteligentes (aunque las revisiones de estos deben ser cuidadosamente revisadas, ya que a veces pueden ser menos precisas). Debido a que la intensidad de la luz se basa en su potencia, la energía utilizada para alimentar las luces puede ser extrapolada para dar una medida de la luminiscencia en vatios, o vatios por metro cuadrado (Wm^{-2}). De manera similar, podemos medir la cantidad de energía emitida por una fuente, como una bombilla, a distancia. Un radiómetro es un dispositivo que mide la potencia de una fuente de luz, y un piranómetro puede utilizarse para medir la cantidad total de radiación de onda corta. La radiación de onda corta incluye la luz fotosintética, así como la energía de la luz ultravioleta y la luz infrarroja cercana (IR). Las plantas y las personas experimentan la luz IR como calor. Estos medidores son baratos de comprar y usar, aunque tienen sus limitaciones, la mayor de las cuales es que su uso bajo la luz eléctrica puede dar lecturas erróneas, especialmente cuando la fuente de luz tiene altos niveles en el espectro azul o rojo. Los sensores cuánticos son una forma más precisa de medir la luz; sin embargo, son más caros que los medidores

de pie. Estos son generalmente dispositivos de mano, operados por baterías, que miden la PAR. Muestran su lectura digitalmente, y algunos vienen con capacidades de registro de datos para permitir la fácil transferencia de datos a una computadora. En tercer lugar, los instrumentos que miden el flujo radiante, que es la cantidad de energía por unidad de tiempo, pueden utilizarse para medir la intensidad de la luz.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Dado que el crecimiento de las plantas no es uniforme, las lecturas se deben tomar desde diferentes lugares - oscuros y claros - para asegurar que no haya zonas con deficiencias graves. Si, por ejemplo, las partes inferiores de las plantas están cayendo por debajo de los niveles óptimos, entonces la productividad se reducirá ([Runkle 2009](#); [Runkle 2012](#)). La corrección de la intensidad de la luz cuando ésta cae por debajo del rango óptimo suele ser un proceso bastante sencillo. Si hay problemas obvios, como bombillas fundidas, éstas deben ser reemplazadas. Se pueden añadir más luces a las zonas más oscuras, y se puede cambiar la posición de las luces para asegurar que todas las zonas de las plantas reciban el nivel óptimo.

9.2.4 Salud de los peces

El monitoreo de la salud de los peces es un aspecto central para mantener un sistema acuapónico saludable.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Esto se logra típicamente a través de la observación del comportamiento y el aspecto físico de las poblaciones y la comprensión de lo que constituye lo "normal". Para ello es importante comprender las pautas de comportamiento y el aspecto físico típicos de las especies de peces en cuestión. La calidad del agua desempeña un papel importante en la salud de los peces, y mantener una buena calidad constante contribuirá en gran medida a garantizar que los peces permanezcan en un estado libre de estrés. Esto ayudará a asegurar que los peces mantengan un sistema inmunológico saludable, lo que les permitirá evitar las complicaciones derivadas de la introducción de enfermedades y parásitos.

MONITOREO: En términos generales, los peces deben ser observados diariamente, y se debe tomar nota de su condición, así como de cualquier cambio. La capacitación también es importante en este contexto, ya que la comprensión de los signos clínicos del estrés, las enfermedades y la infestación parasitaria permitirá identificar si se produce un problema.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Otra consideración importante es la densidad de población y las tasas de alimentación. La posible introducción de estrés y enfermedades en un sistema puede evitarse asegurando que los peces se mantengan a una densidad de población apropiada y que la alimentación se mantenga a niveles adecuados ([Somerville et al. 2014c](#)).

Tasas de alimentación

Es importante vigilar las tasas de alimentación por varias razones. Demasiada comida puede llevar a un exceso de nutrientes en el agua, lo que puede tener efectos adversos sobre los parámetros químicos y micro (biológicos). Puede conducir a un aumento de la carga bacteriana, lo que puede permitir que los agentes causantes de enfermedades se afiancen. También puede conducir a un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno, y a cambios en otros parámetros químicos, como el pH.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: Alimentar a los peces con muy poca cantidad puede causar un retraso en su crecimiento, lo que conduce a una disminución de la productividad del sistema, así como a un aumento del estrés y la agresión, que puede hacer que los peces se ataquen entre sí, lo que provoca heridas y llagas que pueden infectarse.

MONITOREO: Típicamente, se pesa la cantidad de alimento, aunque las tasas de alimentación también pueden medirse visualmente, monitoreando a los peces hasta que las tasas de alimentación disminuyan y dejen de alimentarse; en algunos sistemas esto se hace utilizando cámaras submarinas. Muchas empresas de alimentación de peces también dan tasas de alimentación recomendadas, lo que permite a los operadores estimar con precisión la cantidad de alimento a dar. Las tasas de alimentación deben ser observadas y anotadas en cada alimentación para permitir la supervisión.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Si las tasas de alimentación comienzan a reducirse, esto podría ser una señal de que algo anda mal en el sistema y se deberían tomar medidas apropiadas, como la investigación por parte de un veterinario. Un aumento de las tasas de alimentación podría ser una señal de que los peces no están siendo alimentados en cantidad suficiente, en cuyo caso se debería aumentar la alimentación ([Masser et al. 2000](#)).

Crecimiento

El crecimiento es una medida importante del buen funcionamiento de los peces en un sistema, y las empresas de piensos suelen proporcionar gráficos de crecimiento que dan una estimación de la tasa de crecimiento prevista de los peces en función de las tasas de alimentación.

MONITOREO: El crecimiento se mide físicamente, primero pesando y tarando una red de tamaño adecuado en una balanza de anzuelo. Los peces son entonces capturados con la red y ambos son pesados. Otra forma de pesar los peces es colocarlos en cubos de agua en una balanza. Esto es especialmente práctico si los peces son pequeños, y por lo tanto se puede pesar más de un pez al mismo tiempo. Tenga en cuenta que con este método, se debe tener cuidado ya que los peces más grandes pueden golpear con fuerza los lados del cubo y pueden autolesionarse. Para medir la longitud de los peces, generalmente se recomienda anestesiarlos con un anestésico adecuado, como el metansulfonato de triclaína. Una cantidad apropiada de metansulfonato de triclaína se disuelve en un recipiente separado de agua, que tiene un tamaño adecuado para los peces. Los peces deben ser colocados en el agua hasta que queden aturdidos y sean seguros de manejar, y luego pueden ser colocados en una superficie plana, medidos con una regla, y liberados. Estas medidas pueden tomarse

una vez por semana y anotarse. Se debe investigar cualquier cambio inesperado en el tamaño y el peso.

Indicadores para evaluar las poblaciones de peces

Los indicadores más importantes para la salud de los peces son el comportamiento y la condición física. Cualquier cosa fuera de lo común puede clasificarse como signos clínicos de enfermedad o estrés.

MONITOREO: Típicamente, los peces deben ser monitoreados durante y directamente después de la alimentación, y los cambios en la cantidad de comida ingerida deben ser anotados. Los peces sanos mostrarán algunos de los siguientes comportamientos ([OIE 2018](#)):

- Nadar de manera ordinaria y con un propósito
- Aletas limpias e intactas, que se extienden y utilizan adecuadamente
- Piel clara y limpia, con escamas intactas
- No respirar en la superficie del agua

El comportamiento anormal y los signos clínicos de problemas son bastante generales, y puede ser imposible determinar la causa de un problema basándose sólo en ellos. Las cosas a las que hay que estar atentos incluyen ([Bruno et al. 2013](#)):

Signos comportamentales:

- Cambios en las tasas de alimentación
- El letargo y la morbilidad
- Los cambios en los patrones de natación, como nadar en círculos, o la falta de mantenimiento de la flotabilidad
- Agrupamientos cerca de las salidas de agua
- Agrupamiento en los puntos de intercambio de oxígeno
- Romper la superficie y jadeando cerca de la superficie

Signos clínicos:

- Opérculos acortados o acampanados
- Hemorragia
- Exoftalmia (ojos levantados y salidos)
- Enoftalmia (ojos hundidos)
- Agallas pálidas, zonificadas o necróticas
- Lesiones
- Parches blancos
- El respiradero inflamado

Una forma ideal de medir y registrar estos signos es mediante una hoja de puntuación clínica, un ejemplo de la cual se muestra en la Tabla 5. Una hoja de puntuación clínica es una hoja en la que se

pueden registrar y anotar los signos clínicos y conductuales, según su gravedad, por ejemplo, débil, leve y grave.

Tabla 5: Ejemplo de una hoja de puntuación clínica para registrar los signos clínicos y de comportamiento en los peces.

		Severo	Moderado	Débil	Sin signos
Comportamiento	Moribundo				
	Letárgico				
	Colgando verticalmente				
	Moviendo en espiral				
	<i>Flashing</i>				
	Pérdida de equilibrio				
Cuerpo	Oscuro				
	Abdomen distendido				
	Anorético				
Ojos	Exoftálmico				
	Enofthálmico				
Agallas	Pálido				
	Por zonas				
	Necrosis				
Lesiones	Flanco				
	Otros lugares				

Estrés

El estrés puede ser uno de los factores más perjudiciales para los peces en los sistemas acuapónicos. Por sí solo, puede no ser suficiente para matar a las poblaciones; sin embargo, el estrés crónico puede dar lugar a una serie de factores complicados, generalmente causados por la supresión del sistema inmunológico. Los peces inmunocomprometidos tienen más probabilidades de ser víctimas de agentes infecciosos, como bacterias, virus y hongos, así como de infestaciones parasitarias. También puede reducir la capacidad de un pez para contrarrestar los cambios repentinos en su entorno, lo que provoca la mortalidad.

MONITOREO: El estrés puede ser monitoreado directamente en el organismo, a través de la liberación de ciertas hormonas, como el cortisol. Sin embargo, esto requiere de personal capacitado, a fin de asegurar que no se produzca un estrés adicional. Estas mediciones también entran en la categoría de experimentación animal, y se deben cumplir las leyes locales de protección de los animales. La mejor manera es asegurar que se eviten las situaciones de estrés. Esto se puede lograr asegurando que los peces se mantengan con la densidad de población adecuada, alimentados apropiadamente, y que las características físicas del agua (temperatura, pH, DO, etc.) se mantengan en niveles fisiológicos óptimos para la especie elegida. Por lo tanto, es deseable el monitoreo constante de estos parámetros, así como el monitoreo de los propios peces para observar cualquier cambio en su comportamiento o apariencia física (Rottmann *et al.* 1992; Somerville *et al.* 2014c).

Enfermedad

La enfermedad es una consideración importante en cualquier sistema en el que los animales se mantienen en densidades de población más altas que las que se encontrarían en la naturaleza, y esto también es cierto en los sistemas acuapónicos. Los problemas relacionados con las enfermedades pueden verse exacerbados por condiciones deficientes, como un bajo nivel de DO, y también pueden hacer que los patógenos oportunistas introduzcan la infección.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: En términos generales, los sistemas de recirculación contenidos están de alguna manera aislados de la introducción de los agentes causales de la enfermedad. Sin embargo, esto puede ser un arma de doble filo, ya que puede ser difícil erradicar la enfermedad después de su introducción, y cuanto antes se identifiquen los problemas, más eficaces serán el tratamiento y las medidas correctivas. En los sistemas de flujo, la filtración mediante el uso de arena, por ejemplo, o el tratamiento con luz ultravioleta pueden reducir la probabilidad de que se introduzca la enfermedad. En cualquiera de los dos casos, es necesaria una monitorización cuidadosa y constante. Incluso con una prevención cuidadosa, es posible que se introduzcan enfermedades en el sistema, y es importante que esto se reconozca y se aborde con la ayuda del asesoramiento veterinario, si es necesario.

MONITOREO: A fin de vigilar adecuadamente las poblaciones, es importante que los operadores estén familiarizados con los signos clínicos y de comportamiento que pueden presentar los peces, algunos de los cuales se han identificado anteriormente. En un sistema con un número elevado de animales, es probable que haya casos de peces que estén mal, y aunque puede no ser indicativo de una enfermedad, se recomienda que se realicen controles diarios para vigilar la salud general de la población. En estos controles se deben observar los cambios de comportamiento o los signos clínicos de la enfermedad. También se deben hacer controles de mortalidad; los peces muertos deben ser retirados del sistema y eliminados de manera biosegura. En caso de que la frecuencia de los signos clínicos o de la mortalidad empiece a aumentar, es importante asegurarse de que se han establecido procedimientos para identificar primero el problema y luego tomar medidas correctivas.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Por esta razón, es importante que los operadores sepan cómo ponerse en contacto con un especialista veterinario en salud de los peces ([Martins et al. 2010](#); [Somerville et al. 2014c](#)).

9.2.5 Parámetros de interés especial

A veces, los parámetros no estándar en la calidad del agua se vuelven relevantes en un sistema acuapónico, especialmente al elegir la fuente de su agua. Puedes elegir entre utilizar agua del medio ambiente (agua de lluvia, agua de río o lago, etc.), o agua del grifo tratada municipalmente. Dependiendo de la fuente de agua, el agua puede diferir en los niveles de oxígeno, la presencia o ausencia de metales pesados y otros microcontaminantes, trazas de productos químicos y

desinfectantes, y puede o no estar contaminada con bacterias coliformes. El agua que se agrega al sistema puede ser de una calidad muy diferente dependiendo de:

- La ubicación de la fuente de agua
- El clima reciente (si se utiliza agua del medio ambiente)
- Tratamientos de agua municipales (si se utiliza agua del grifo)

PROCEDIMIENTO OPERATIVO: El tratamiento del agua potable suele incluir la adición de desinfectantes, como el cloro y las cloraminas. Estos deben tener un efecto residual, lo que significa que permanecen activos en el agua después de la aplicación del desinfectante. Esto puede ser problemático en un sistema acuapónico, ya que depende en gran medida de las comunidades microbianas del biofiltro. Por otra parte, el agua tomada directamente del medio ambiente puede tener otros problemas, entre ellos la contaminación con microbios indeseables, como las bacterias coliformes, o la presencia de contaminantes, como productos químicos que alteran el sistema endocrino y metales pesados (Godfrey 2018).

MONITOREO: El monitoreo de estos parámetros no estándar es imposible sin el acceso a técnicas analíticas como la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), la espectroscopia de absorción atómica (AAS), y el equipo y materiales de laboratorio de microbiología, como una incubadora, una campana de flujo laminar, un autoclave, un aparato de filtración al vacío y medios de crecimiento microbiológicos. Dado que este equipo es muy caro (>50.000 euros), es mejor consultar a un laboratorio nacional para realizar mediciones específicas si se sospecha que existe un problema con el agua de la fuente.

PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS: Una solución más económica y práctica es evitar por completo los problemas con el agua de la fuente, instalando un filtro de carbono, que eliminará cualquier residuo de desinfectante y contaminantes potenciales, y un filtro UV que desactivará cualquier microbio no deseado en el agua de la fuente.

9.3 Referencias

- Badgery-Parker, J. 1999. [Light in the greenhouse](#). *Agnote* DPI/254, 1-2.
- Brown, J.W. 2006. [Relative Relative Humidity](#). Cropking Incorporated.
- Bruno, D., Noguera, P.A. y Poppe, T.T. 2013. [A Colour Atlas of Salmonid Diseases](#) (2nd edition) Springer Netherlands, Dordrecht.
- Chen Lopez, J. 2018. [Influence of Light on Crop Growth](#). Promix Training Centre.
- Godfrey, M. 2018. [How to Evaluate the Quality of Your Aquaponic Source Water](#). Upstart University.
- Grosch, R. y Kofoet, A. 2003. [Influence of temperature, pH and inoculum density on bottom rot on lettuce caused by *Rhizoctonia solani*](#). *Journal of Plant Diseases and Protection* 110 (4), 366-378.
- Joly, A. 2018. [Aquaponics in EU – Basic regulation you need to know](#). EU Aquaponics Hub.

- Klinger-Bowen, R.C., Tamaru, C.S., Fox, B.K., McGovern-Hopkins, K. y Howerton, R. 2011. *Testing your Aquaponic System Water: A Comparison of Commercial Water Chemistry Methods*. Center for Tropical and Subtropical Aquaculture, Honolulu.
- Leaffin 2017. *What is the Optimum Range of Temperature or Aquaponics*.
- MadeCivilEasy 2016. *Measurement of Settleable Solids*.
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C., Heinsbroek, L.T., Schneider, O., Blancheton, J.P., d'Orbcastel, E.R. y Verreth, J.A.J. 2010. *New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability*. *Aquacultural Engineering* 43 (3), 83-93.
- Masser, M.P., Rakocy, J. y Losordo, T.M. 2000. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Management of Recirculating Systems*. Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 452.
- OIE 2018. *Manual of Diagnostic Tests for Aquatic Animals* (8th edition) Office International des Epizooties, World Organisation for Animal Health, Paris.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P. y Losordo, T.M. 2006. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics — Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 454.
- Rice E.W., Baird, R.B., Eaton, A.D. y Clesceri, L.S. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22nd edition). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Denver.
- Roosta, H.R. and Hamidpour, M., 2011. *Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems*. *Scientia Horticulturae* 129 (3), 396-402.
- Rottmann, R.W., Francis-Floyd, R. y Durborow, R. 1992. *The Role of Stress in Fish Disease*. Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 474.
- Runkle, E. 2009. *Tips for Using Light Sensors*. *GPN Magazine* January 2009, 66.
- Runkle, E. 2012. *Which Light Sensor Should I Use?* *GPN Magazine* September 2012, 62.
- Sallenave, R. 2016. *Important Water Quality Parameters in Aquaponics Systems*. New Mexico State University Circular 680.
- Sirakov, I., Lutz, M., Graber, A., Mathis, A., Staykov, Y., Smits, T.H. y Junge, R., 2016. *Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponic system*. *Water* 8 (11), 518.
- Somerville, C., et al. 2014a. Water quality in aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. *Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 21-34.
- Somerville, C. et al. 2014b. Plants in aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. *Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 83-102.
- Somerville, C. et al. 2014c. Fish in aquaponics. In Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. *Small-Scale Aquaponic Food Production – Integrated Fish and Plant Farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 103-121.
- Storey, A. 2016. *The True Costs of Greenhouse Humidity Control*. Upstart University.
- Storey, N. 2018. *Why You Need to Be Careful About Zinc in Aquaponics*. Upstart University.

Stouvenakers, G., Massart, S. y Jijakli, H. 2018. *Suppressive effect of aquaponic water in the development of root rot caused by Pythium aphanidermatum in lettuce*. Abstract at the XV Meeting of the Working Group 'Biological and integrated control of plant pathogens': Biocontrol products: from lab testing to product development, Lleida.

Thorarinsdottir, R.I. et al. 2015. System control and optimization. In Thorarinsdottir, R.I., Kledal, P.R., Gangenes Skar, S.L., Sustaeta, F., Ragnarsdottir, K.V., Mankasingh, U., Pantanella, E., van de Ven, R. y Shultz, R.C. *Aquaponics Guidelines*. EU Lifelong Learning Programme, Reykjavik, pp. 33-41.

10.SEGURIDAD ALIMENTARIA

Los consumidores se preocupan por la inocuidad y la calidad de los alimentos debido a una serie de noticias relacionadas con los alimentos que han recibido una gran atención en los medios de comunicación. Los consumidores están más preocupados que nunca por obtener alimentos seguros. La seguridad alimentaria consiste en manipular, almacenar y preparar los alimentos para prevenir enfermedades y ayudar a garantizar que los alimentos conserven suficientes nutrientes para que podamos tener una dieta saludable. La inocuidad de los alimentos es la garantía de que los alimentos no causarán daño al consumidor cuando se preparen y/o coman de acuerdo con su uso previsto ([WHO y FAO 2009](#)). Ignorar los principios de la seguridad alimentaria significa que los alimentos buenos se echarán a perder. Tomar atajos evitando las medidas preventivas que hacen que los alimentos sean seguros puede tener efectos negativos en la salud e incluso acortar la vida de las personas.

Quienquiera que venda alimentos, independientemente de su cantidad, tiene la obligación ética y jurídica de garantizar que los alimentos sean seguros para su consumo. Todas las etapas de la cadena alimentaria (desde la granja hasta el tenedor o, en el caso de la acuaponía, desde la balsa hasta el plato), incluida la cosecha de plantas y el sacrificio de peces, deben gestionarse de manera que se garantice que los alimentos sean inocuos y adecuados para el uso previsto ([WHO y FAO 2009](#)). Los productos primarios (productos de producción primaria que consisten en una materia prima natural - un producto sin manufacturar-) también deben protegerse contra diferentes tipos de peligros. Un peligro es un agente (micro) biológico, químico o físico presente en los alimentos que puede causar un efecto adverso para la salud. En general, distinguimos cuatro tipos de peligros relacionados con los alimentos (Tabla 1), en los que la mayor parte se centra en lo (micro) biológico para la acuaponía. La lucha contra los alérgenos es una nueva esfera de preocupación, y en la Unión Europea ya se han establecido requisitos detallados de etiquetado. El pescado y sus productos se enumeran en el [Anexo II del Reglamento \(EU\) No. 1169/2011](#) relativo a la información alimentaria facilitada al consumidor como uno de los catorce alérgenos que deben considerarse en el análisis de riesgos.

Tabla 1: Principales peligros relacionados con los alimentos en la acuaponía.

(MICRO) BIOLÓGICO
Bacterias patógenas, virus, parásitos de peces, mohos, hongos
QUÍMICO
Residuos de productos fitosanitarios, medicamentos veterinarios, desinfectantes, agentes de limpieza, reactivos para pruebas, lubricante
FÍSICO
Cuerpos extraños (metal, vidrio, madera, partes de material de embalaje, polvo, piedras, fragmentos de plástico o vidrio, agujas, etc.)
ALÉRGENOS
Cereales que contengan gluten, crustáceos y productos derivados, huevos y productos derivados, pescado y productos derivados, cacahuets y productos derivados, soja y productos derivados, leche y productos derivados (incluida la lactosa), frutos secos y productos derivados (almendras, avellanas), nueces, anacardos, nueces de pecana, nueces de Brasil, pistachos, macadamia o nueces de Queensland), apio y sus productos,

mostaza y sus productos, semillas de sésamo y sus productos, dióxido de azufre y sulfitos, altramuces y sus productos, moluscos y sus productos.

Nota: para las excepciones, véase el Anexo II del Reglamento (UE) Nº 1169/2011.

El objetivo principal de este capítulo es asegurar la protección del consumidor mediante la producción de alimentos seguros en la primera etapa de la cadena de suministro de alimentos. Por consiguiente, los productores acuapónicos deben ser conscientes de los factores de riesgo de la inocuidad de los alimentos y deben mantener el más alto nivel de observación de las buenas prácticas agrícolas (BPA) y las buenas prácticas de higiene (BPH) que se describen en detalle a continuación. Los productos primarios que se cultivan con poca contaminación tienen menos probabilidades de provocar peligros para la salud causados por una mala manipulación durante las etapas de preparación de los alimentos.

10.1 Marco jurídico

El objetivo de la política de seguridad alimentaria de la UE es garantizar alimentos seguros y nutritivos procedentes de animales y plantas sanos y, al mismo tiempo, apoyar a la industria alimentaria ([EC 2014](#)). La política integrada de seguridad alimentaria también incluye el bienestar de los animales y la salud de las plantas. En la estrategia para el bienestar animal hay una acción sobre el bienestar de los peces de piscifactoría, aunque no hay normas específicas en vigor ([EC 2012](#)). Debido a la gran variedad de productos potenciales, las normas de seguridad alimentaria no son explícitas para los productos acuapónicos y todavía no hay reglamentos específicos de la UE ([Joly et al. 2015](#)). La acuaponía entra en el ámbito de las políticas comunes de la UE relacionadas con la agricultura, la pesca, la seguridad alimentaria y el medio ambiente. Dado que la acuaponía incluye tanto la producción de peces como la de plantas, se aplican políticas diferentes. Al igual que los operadores de la acuicultura, los productores de acuaponía utilizan un recurso primario compartido (el agua) y generan efluentes, y sus actividades están sujetas a una cantidad significativa de políticas y legislación ([Hoevenaars et al. 2018](#); [Joly et al. 2015](#)). En la Tabla 2 se enumeran las principales reglamentaciones de la UE en materia de seguridad alimentaria.

Tabla 2: Principales reglamentos de la UE sobre seguridad alimentaria

Reglamento	Descripción
Reglamento (EC) 178/2002	Principios y requisitos generales de la legislación alimentaria y la seguridad alimentaria
Reglamento (EC) 852/2004	Higiene de los alimentos
Reglamento (EC) 853/2004	Normas específicas de higiene de los alimentos de origen animal
Reglamento (EC) 2073/2005	Criterios microbiológicos para los productos alimenticio
Reglamento (EC) 1169/2011	Suministro de información alimentaria a los consumidores

10.2 Riesgos para la seguridad alimentaria en la acuaponía

Una de las principales preocupaciones en materia de inocuidad de los alimentos en el ámbito de la acuaponía es el cultivo de hortalizas en aguas que contienen excrementos de peces y otras materias orgánicas, incluidos los residuos de partículas de peces y plantas. Las bacterias patógenas pueden entrar en el sistema a través del agua, las heces de los animales, los plantones de las plantas, las herramientas o los seres humanos. El mayor riesgo de los animales de sangre caliente es la introducción de *Escherichia coli*, mientras que las aves pueden ser portadoras de *Salmonella* spp. ([FAO 2014](#)). *E. coli* O157:H7, *Salmonella* spp., y *Listeria monocytogenes* son los principales patógenos transmitidos por los alimentos que se pueden encontrar en el sistema de recirculación de agua y que se ha demostrado que sobreviven en estas condiciones. La contaminación fecal de los sistemas acuapónicos se ha detectado principalmente cuando se ha utilizado una fuente de agua de mala calidad o cuando era posible la entrada de heces de animales domésticos o de la fauna silvestre ([Fox et al. 2012](#)). A pesar de los informes publicados anteriormente que indican la internalización de patógenos transmitidos por los alimentos en los seres humanos, como *E. coli* O157:H7 y *Salmonella* en los vegetales, el estudio realizado por [Moriarty et al. \(2018\)](#) no aportó pruebas de internalización bacteriana. La internalización puede ser un fenómeno que sólo se observa en circunstancias específicas, como una concentración bacteriana muy elevada y una lesión de la planta (especialmente cuando las raíces están dañadas) que aumentan la probabilidad de que se produzca una internalización bacteriana.

Además, el pescado de fuentes no fiables puede introducir virus y enfermedades transmitidas por los alimentos (e.g. *Vibrio* spp.) que no se asocian comúnmente con las frutas y hortalizas ([Fox et al. 2012](#)). Parásitos como *Cryptosporidium* y *Girdia lamblia* también pueden introducirse en el agua misma, por lo que la fuente de agua utilizada en la acuaponía es muy importante para la seguridad de los productos alimenticios ([Ljubojević et al. 2017](#)). La principal vía de contaminación bacteriana de los productos es la del agua que deposita bacterias en la superficie.

Las condiciones de los sistemas acuapónicos (entornos cálidos, húmedos y con bajo contenido de oxígeno y alto contenido de material orgánico) favorecen la presencia de patógenos transmitidos por los alimentos que también son peligrosos para los peces y las plantas. La presencia de sedimentos parece ser uno de los principales factores que influyen en la persistencia de los patógenos ([Aquaponics Association 2015](#)). Por lo tanto, los productores acuapónicos no deberían permitir que estas condiciones se desarrollen en sus sistemas por razones tecnológicas y de inocuidad de los alimentos. Los estudios realizados con patógenos transmitidos por los alimentos en peces sugieren que, si se exponen, los peces pueden ser portadores de patógenos transmitidos por los alimentos durante un breve período. Cuando están en un tanque con buena aireación y eliminación de sólidos, la supervivencia de los patógenos en los peces es muy baja. Sin embargo, cuando los peces se encuentran en un tanque con acumulación de sedimentos y mala aireación, los patógenos persisten en los peces durante mucho más tiempo y a niveles más altos ([Aquaponics Association 2015](#)).

La mayoría de los peces no contienen niveles significativos de peligros causantes de enfermedades en los seres humanos. Si el pescado se trata térmicamente antes de su consumo, cualquier contaminación suele eliminarse rápidamente ([Lee et al. 2015](#)). Sin embargo, se necesita un cuidado especial si el pescado se va a consumir crudo (por ejemplo, sushi, carpaccio o ceviche). Las verduras de hoja y otras hortalizas crudas también son productos de alto riesgo: El 13,9% de los brotes de origen

alimentario en la UE son causados por frutas y verduras ([EFSA y ECDC 2017](#)). Las hortalizas de hoja verde son un cultivo de alto riesgo porque:

- se comen con frecuencia crudas
- crecen cerca de la superficie
- tienen una superficie muy alta para su masa

Los vegetales de hoja verde tienden a entregar una dosis mucho más alta de patógenos por porción que cualquier otro tipo de producto si están contaminados ([Aquaponics Association 2015](#)). Las hierbas, como la albahaca o la menta, tienden a tener un menor riesgo porque se consumen menores cantidades de estas plantas en comparación con la lechuga ([Lee et al. 2015](#)). Un estudio de [Barnhart et al. \(2015\)](#) demostró que no hay una diferencia significativa entre la contaminación de las verduras de hoja lisa sin envasar en las tiendas de comestibles cultivadas con acuaponics, hidroponía y cultivo en tierra.

La contaminación química y de toxinas también es motivo de preocupación. Sin embargo, el entorno controlado de las instalaciones acuapónicas puede hacer que estos peligros sean menos probables en comparación con otras formas de producción agrícola. El productor acuapónico tiene que ser consciente de que cualquier producto químico utilizado con las plantas podría afectar a los peces, y cualquier producto utilizado con los peces podría afectar a las plantas y a los consumidores. Las posibles consecuencias para la salud pública de la contaminación por peligros físicos en la producción primaria parecen ser relativamente poco comunes.

Para eliminar o reducir los riesgos a niveles aceptables, los productores acuícolas deben aplicar medidas preventivas como las BPA (buenas prácticas agrícolas) y las BPH (buenas prácticas de higiene). También debería aplicarse un enfoque preventivo sistémico de análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP) como mejora de las BPA y las BPH (Figura 1).

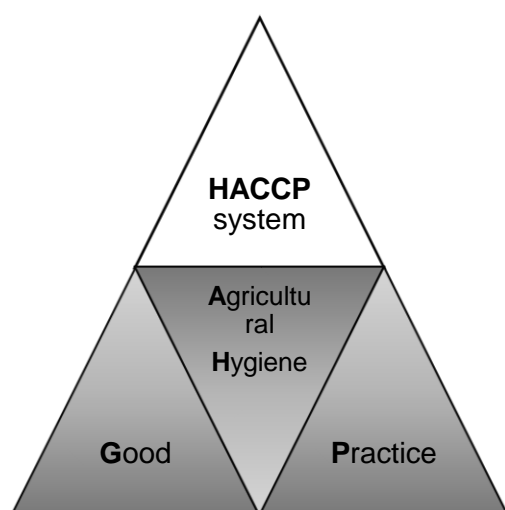


Figura 1: Las BPA y las BPH como requisitos previos importantes del APPCC, que constituyen $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{4}$, respectivamente, del enfoque preventivo de la inocuidad de los alimentos.

10.3 Buenas prácticas agrícolas y de higiene

En general, una buena práctica significa actividades de garantía de calidad que aseguren que los productos alimenticios y los procesos relacionados con los alimentos sean coherentes y estén controlados y garanticen los procedimientos de calidad en los sistemas alimentarios ([Raspor y Jevšnik 2008](#)), o simplemente definidos como “hacer bien las cosas” y garantizar que se han hecho ([FAO 2006](#)). Las BPA son la selección de los métodos que mejor pueden lograr los objetivos de sostenibilidad agronómica y ambiental en la producción de alimentos primarios. Las BPA consisten en procedimientos y procesos prácticos que devuelven el entorno de producción o procesamiento a su estado original (programa de limpieza); garantizan que los edificios y el equipo funcionen de manera eficiente (programa de mantenimiento); y el control de la contaminación cruzada (generalmente relacionada con las personas, las superficies y la segregación de las materias primas y los productos procesados) ([Raspor y Jevšnik 2008](#)). Se deben adoptar BPA y BPA para reducir en la medida de lo posible cualquier fuente de contaminación (Figura 2).

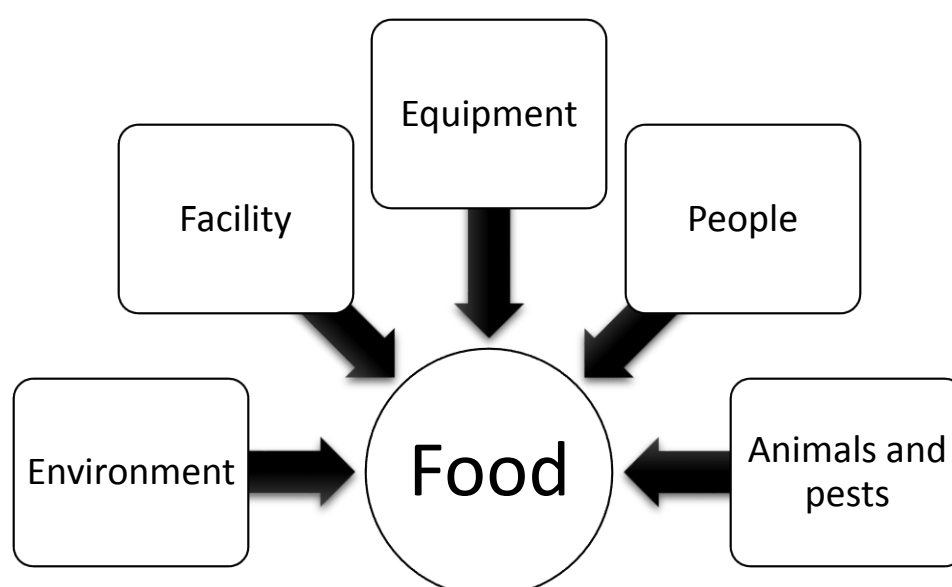


Figura 2: Fuentes de contaminación de los productos alimenticios abordadas por las BPA y las BPA.

10.3.1 Ubicación, diseño y disposición

La acuaponía requiere de un invernadero en la mayoría de los climas. Al decidir la ubicación de la unidad acuapónica, el propietario debe considerar ciertos factores como la proximidad a las plantas industriales, o a lugares susceptibles de contaminación atmosférica o de proliferación de plagas (por ejemplo, plantas de incineración, plantas que liberan metales pesados, carreteras con mucho tráfico motorizado, vertederos de basura al aire libre, etc.) ([Copa – Cogeca 2018](#)). El productor acuapónico también debe considerar el riesgo potencial de desastres naturales (inundaciones, olas de calor, etc.). El aire y el polvo pueden actuar como vehículo para los peligros, lo que puede evitarse con una ventilación controlada. Se recomienda una protección adicional contra el viento para los sistemas de cultivo en aguas profundas (DWC), ya que el viento hace rebotar las balsas, con lo que el agua salpica a través de los agujeros y provoca el contacto entre el agua y las hojas ([Aquaponics Association 2015](#)). Si hay vegetación alrededor de la unidad acuapónica, ésta debe mantenerse segada/recortada, a fin

de reducir el riesgo de que los roedores y los insectos plaga entren en el invernadero. Hay algunas preocupaciones de seguridad alimentaria sobre los gusanos del hígado y otros parásitos transportados por los caracoles en los sistemas acuapónicos. Sin embargo, los caracoles son sólo un paso en el ciclo de vida de la trematoda de hígado, que requiere de ganado para completarlo. Si no hay ganado u otros rumiantes en los alrededores inmediatos de la unidad acuapónica, el riesgo se reduce al mínimo o incluso se elimina, ya que es poco probable que los caracoles sean portadores de trematodas ([Aquaponics Association 2015](#)).

Debe evitarse el uso de materiales de construcción que puedan ser una fuente potencial de contaminación (por ejemplo, la pintura a base de plomo). Dado que las plagas pueden ser muy pequeñas (por ejemplo, moscas blancas y trips), las mallas muy finas pueden impedir su entrada en la unidad. En Europa, las pantallas se caracterizan generalmente por el número de espacios por centímetro en cada dirección (por ejemplo, una pantalla de 10x20 tiene 10 espacios por centímetro en una dirección y 20 en la otra). La reducción de la ventilación natural causada por el uso de pantallas de malla fina puede mitigarse aumentando la superficie de la pantalla (por ejemplo, utilizando pantallas en forma de concierto).

Debería haber servicios disponibles para los trabajadores en todo momento cuando estén en el sitio. Éstos deberían estar conectados a un sistema de drenaje eficaz. Las estaciones de lavado de manos (ya sea que estén conectadas a la instalación de aseo o situadas cerca de ella), deberían estar equipadas con:

- un lavabo
- agua potable corriente
- jabón líquido
- toallas de papel desechables
- un contenedor de desechos cubierto (véase un ejemplo en la figura 3)

Las instalaciones para lavar los productos después de la cosecha deben estar separadas de las instalaciones para lavar las manos. Debe haber un lugar limpio y seguro (fuera del suelo) para que los empleados guarden sus artículos personales. Esta área puede ser pequeña y sencilla, como un estante ([Aquaponics Association 2015](#)).



Figura 3: Un ejemplo de estación de lavado de manos en ZHAW, Instituto de Ciencias de los Recursos Naturales (el contenedor de residuos cubierto no es visible en esta foto) (Foto: Andrej Ovca)

10.3.2 Equipo

El producto tendrá contacto físico con muchas superficies durante la cosecha y el procesamiento. Estas pueden incluir equipos y contenedores de cosecha, contenedores de transporte, cuchillos y otros utensilios, mesas de clasificación y empaquetado, y áreas de almacenamiento. El equipo con el que los alimentos entran en contacto debe ser:

- estar fabricado con materiales como acero inoxidable, plástico de calidad alimentaria, aluminio, cerámica o cobre estañado, y mantenerse en buenas condiciones para reducir al mínimo cualquier riesgo de contaminación
- en su caso, equipados con dispositivos de control (por ejemplo, un termómetro en el refrigerador)
- limpiado efectivamente

Siempre que sea posible, se debe utilizar un equipo dedicado (Figura 4). El equipo y los materiales de contacto de los peces deben estar limpios y no contaminados (palas y redes, contenedores de transporte, máquina de matar peces). El equipo de captura no debe colocarse en el suelo (Figura 4a). Todo el equipo de pesaje y dispensación debe calibrarse periódicamente. El equipo de almacenamiento debe estar dotado de dispositivos que permitan una vigilancia constante de la temperatura y una distribución uniforme de las condiciones de temperatura a fin de mantener la cadena de frío ([Copa – Cogeca 2018](#)).



Figure 4: Sistema de codificación por colores para prevenir contaminación entre equipos e instalaciones (ZHAW, Institute of Natural Resource Sciences; foto: Andrej Ovca).

10.3.3 Higiene del trabajador

Cualquiera que trabaje en la unidad acuapónica debe seguir una simple regla: estar siempre sano y limpio. También se recomienda usar ropa de trabajo especial. La mayoría de las enfermedades que afectan a los humanos pueden ser introducidas en el sistema por los trabajadores o por los visitantes. Uno de los mayores riesgos para la seguridad de los productos frescos son las personas y sus manos, que están en continuo contacto con el medio ambiente. Los trabajadores enfermos, y aquellos con heridas o cortes abiertos, no deben manipular productos, pescado o equipos ([Lee et al. 2015](#)), o si tienen la piel o los ojos amarillos, dolor de garganta con fiebre, están vomitando o tienen diarrea, hasta que los síntomas hayan cesado por lo menos durante 48 horas.

Se debe prohibir fumar, mascar chicle o comer en las zonas de producción. Las manos deben lavarse cada vez que se use el baño, se coma, se dé la mano a alguien, se manipule el pescado, se metan las manos en el agua del sistema, se toquen la boca, la nariz, los oídos, el pelo y, por supuesto, antes de cosechar las plantas. Al lavarse las manos se debe usar jabón líquido en todo momento. Se debe utilizar la técnica recomendada para el lavado de manos (Figura 5). Las manos deben enjuagarse con agua potable y secarse con toallas de papel de un solo uso.



Figure 5: Técnica de lavado de manos
(Fuente: WHO / http://www.who.int/gpsc/clean_hands_protection/en/)

Se debe reducir al mínimo el número de objetos personales que se llevan consigo mientras se trabaja. Esto incluye teléfonos celulares, joyas, esmalte de uñas, extensiones de cabello, etc., que pueden caer en el producto. Si se produce una lesión mientras se manipulan los peces o se trabaja en el agua del sistema, el área debe ser inmediatamente lavada con agua limpia y desinfectada. Si alguien necesita usar una tirita (apósito), tiene que ser de un color no alimenticio (por ejemplo, azul), debidamente asegurada y cubierta con un guante.

Entrar en el invernadero desde el exterior es una importante vía de entrada para los peligros relacionados con la seguridad alimentaria. El riesgo puede reducirse mediante barreras higiénicas como baños de pies y una estación para lavarse las manos a la entrada del invernadero o, si esto no es posible, mediante la desinfección de las manos (Figura 6). Como alternativa a los baños de pies, los trabajadores pueden utilizar zapatos o botas "de invernadero" o botas de papel desechables. Esta última es también una alternativa para los visitantes ([Aquaponics Association 2015](#)). Los baños de pies siempre deben estar mojados y tener una solución desinfectante activa en la estera. Si la estera del

baño de pies está seca, no es efectiva. Se debe tener cuidado de enjuagar los pediluvios regularmente para asegurar que no se obstruyan. La solución química debe cambiarse regularmente dependiendo del producto utilizado.



Figura 6: Punto de desinfección para sanear las botas y las manos de los trabajadores en la entrada del invernadero en ZHAW, Instituto de Ciencias de Recursos Naturales (Foto: Andrej Ovca)

Prevención de la contaminación cruzada

El concepto de contaminación cruzada suele utilizarse en términos de contaminación cruzada por microorganismos y últimamente también en términos de alérgenos.

RUTAS DE CONTAMINACIÓN CRUZADA:

- producir para producir
- a través de equipos, contenedores y accesorios
- a través de los trabajadores
- a través de procedimientos de limpieza
- a través de otros posibles medios de transporte (roedores, insectos)

La contaminación cruzada de producto a producto es menos probable que ocurra en la acuaponía. La contaminación cruzada a través del equipo puede ser (además de una limpieza eficiente) gestionada eficazmente mediante un código de colores (Figura 4). Los diferentes tipos de tareas deben realizarse por separado. Por ejemplo, un trabajador que corta las cabezas de lechuga o que coloca las cabezas de lechuga en cajas sólo debe manipular las plantas, no mover las balsas, tirar de las macetas de red o cualquier otro trabajo en el que sus manos entren en contacto con el agua del sistema. Del mismo modo, un trabajador que realice tareas en las que sus manos estén en contacto con el agua no debería estar manipulando plantas sin antes lavarse las manos y/o cambiarse los guantes ([Aquaponics Association 2015](#)). Preferentemente, los peces, las plantas o los medios no deberían manipularse con las manos desnudas, sino con guantes desechables. Sin embargo, las manos también deberían lavarse antes de ponerse los guantes. Es una buena idea conseguir guantes de nitrilo de un solo uso, sin látex, y deshacerse de ellos después de cada uso. Las enfermedades zoonóticas dermatológicas, incluidas las causadas por especies bacterianas como, por ejemplo, *Mycobacterium*, *Streptococcus (iniae)*, y *Vibrio spp.* han sido discutidas por [Gauthier \(2015\)](#). Aunque la mayoría de los seres humanos tienen una fuerte inmunidad natural a las heridas infectadas por bacterias como *Mycobacterium*, las infecciones más graves suelen estar asociadas a individuos inmunocomprometidos, a heridas punzantes profundas y a cepas de bacterias muy virulentas. Estas infecciones tóxicas suelen producirse como resultado de lesiones por las espinas de los peces o por la contaminación de heridas abiertas.

Es importante evitar que el agua del sistema entre en contacto con el producto durante la cosecha. Los alimentos y las bebidas deben permanecer fuera de la unidad acuapónica. Además de las bacterias no deseadas, los alimentos y bebidas externas pueden introducir en su sistema alérgenos que podrían suponer un riesgo para sus consumidores.

Formación

Los que trabajen con sistemas acuapónicos deben tener las habilidades y la información apropiadas que se ajusten a la complejidad de las operaciones de las que son responsables (capacitación en gestión de animales/plantas, riesgos para la salud y prácticas de seguridad en el lugar de trabajo, operación de equipos, uso de productos químicos, etc.). El propietario de la explotación agrícola debe asegurarse de que todos los trabajadores hayan recibido capacitación en las prácticas de salud y seguridad e higiene pertinentes.

LA CAPACITACIÓN DE LOS TRABAJADORES DEBE INCLUIR, COMO MÍNIMO, LO SIGUIENTE

- la importancia de estar en buena salud cuando se manipulan peces, equipos y productos
- la técnica adecuada de lavado de manos
- uso correcto de los guantes
- política de ropa y calzado limpios
- procedimientos de primeros auxilios para cortes y lesiones

Visitantes

Otra vía de introducción de nuevas plagas y enfermedades en el sistema acuapónico es a través de los visitantes, por lo que siempre se debe asumir que los visitantes están "contaminados". Los visitantes tienen que seguir protocolos como lavarse o desinfectarse las manos antes de tocar el sistema, usar baños de pies y guardar los artículos personales en un lugar designado. Por lo general, los visitantes deben ir acompañados por alguien para que se puedan demostrar estas prácticas ([Aquaponics Association 2015](#)).

10.3.4 Abastecimiento de agua

Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, la fuente de agua utilizada en los sistemas acuapónicos puede influir de manera significativa en la calidad de los productos finales, ya sean peces o plantas ([Chalmers 2004](#)).

- El agua municipal (potable) suele ser la de mejor calidad debido a los requisitos previos de ensayo y seguridad. El agua potable de una fuente limpia siempre es preferible para un sistema acuapónico de recirculación
- El agua subterránea o de pozo tendrá menos patógenos que el agua superficial (como estanques, arroyos o ríos) porque hay menos posibilidades de contaminación
- Las aguas superficiales pueden estar contaminadas con estiércol animal y parásitos
- Es importante no utilizar el agua de lluvia recogida en los tejados, ya que puede estar contaminada por las heces de los pájaros. Si se utiliza el agua de lluvia, hay que asegurarse de que las aves no se posen en la zona de recogida. De lo contrario, se debe considerar la posibilidad de tratar el agua antes de añadirla al sistema.

10.3.5 Alimentación para peces

Después del agua, el alimento de los peces es el principal insumo de los sistemas acuapónicos. El alimento debe adquirirse de una fuente acreditada y debe almacenarse siempre en una zona seca y segura donde los pájaros, roedores y otras plagas no puedan contaminarlo o comerlo. Los piensos contaminados son una vía importante por la que se pueden introducir en el sistema bacterias peligrosas como la *Salmonella* ([Lee et al. 2015](#)). Se debe comprobar la presencia de piensos para peces y otros materiales entrantes:

- plagas
- fecha de caducidad
- embalaje intacto/no dañado

Además, la alimentación de los peces debe ser revisada rutinariamente antes de alimentarlos para asegurarse de que no hay agua condensada o moho visible.

10.3.6 Recolección y elaboración

Los productos pueden contaminarse o cruzarse durante la recolección y el procesamiento. Si es posible, se recomienda el sistema de producción "*todo dentro todo fuera*" (en el que todos los peces y plantas se introducen al mismo tiempo y se cosechan al mismo tiempo) para reducir al mínimo la posibilidad de contaminación. Procesar significa convertir las plantas o animales en lo que

reconocemos como alimento. En el caso de los productos, el procesamiento puede ser tan simple como lavar y clasificar, o puede implicar el recorte y/o el corte en rodajas. Para el pescado, el primer paso del procesamiento es el sacrificio. Si se planifica el procesamiento de los productos y/o el pescado en el sitio, se necesita un área/cuarto especial que esté separado del resto del invernadero y dedicado sólo a este tipo de actividades.

Plantas

Es crucial evitar que el agua acuapónica entre en contacto con las hojas de las plantas. Si es posible, el sistema debe diseñarse de manera que impida físicamente que el agua entre en contacto con las partes comestibles de los cultivos, en lugar de contar simplemente con que los trabajadores tengan cuidado ([Aquaponics Association 2015](#)). Esto evita muchas enfermedades de las plantas, así como la posible contaminación de los productos por el agua de los peces, especialmente si el producto se va a consumir crudo. Las verduras (producidas en un sistema acuapónico o de otro modo) deben lavarse siempre antes de su consumo ([FAO 2014](#)). Las plantas enfermas y las pilas de abono deben mantenerse alejadas del sistema para evitar la contaminación.

Para la Técnica de Película de Nutrientes (NFT, *Nutrient film technique*) y los lechos de DWC (*Deep water culture*) donde los cosechadores pueden alcanzar todo el lecho desde los pasillos, la cosecha en banco (cortando las plantas directamente de la balsa mientras las balsas están todavía en el lecho) minimiza las salpicaduras. Retirar las balsas de los lechos de DWC antes de la cosecha supone un peligro para la seguridad alimentaria debido a las salpicaduras y el goteo, y en el caso de los lechos pequeños a menudo añade más trabajo del que ahorra ([Aquaponics Association 2015](#)).

El productor debe buscar con mucho cuidado los pequeños caracoles y babosas que puedan estar atascados en la profundidad de la planta. Los productos que tienen daños por plagas no deben ser cosechados, porque contienen principalmente patógenos. Cualquier producto que tenga caracoles, babosas o su baba debe ser desechado (recogido como desecho). El producto debe separarse según corresponda y enjuagarse en agua limpia, fresca y potable (nunca en agua del sistema acuapónico) ([Hollyer et al. 2009](#)).

Peces

Los peces enfermos o heridos deben identificarse y separarse de los sanos para evitar la contaminación cruzada. Después de la matanza, el pescado debe ser enfriado inmediatamente. La temperatura del pescado debe llegar a 4°C (o menos) tan rápido como sea posible, y esta temperatura debe mantenerse posteriormente durante el almacenamiento y la distribución. El hielo utilizado para enfriar los productos de la acuicultura debe estar hecho de agua potable. El procesamiento del pescado implica ciertos riesgos más allá de lo que suele ocurrir con la producción vegetal. Si se prevé el sacrificio y la elaboración de pescado in situ, se deberán seguir los requisitos legales y éticos de las autoridades competentes en materia de inocuidad de los alimentos.

Almacenamiento de verduras y pescado

Si la recolección se realiza mucho tiempo antes de la venta, debe utilizarse el almacenamiento en frío. Si se almacena el pescado cosechado, el almacenamiento deberá realizarse en una instalación especializada que cumpla con las normas mínimas de diseño y construcción higiénica de las

instalaciones de almacenamiento y elaboración de pescado. El producto debe mantenerse fresco después de la recolección. La temperatura segura es de 4°C o menos. La temperatura máxima de almacenamiento para el pescado fresco es también 4°C. El almacenamiento de pescado fresco entre -1°C y 2°C mantendrá una mejor calidad y más del doble de la vida útil. La temperatura mínima de almacenamiento requerida para el pescado congelado es -18°C. El almacenamiento a -27°C o inferior mantiene la calidad durante 1-2 años ([CDC 2014](#)). La temperatura de conservación debe mantenerse en todo momento. Diferentes tipos de productos requerirán diferentes regímenes de almacenamiento. Después de que el pescado o las plantas hayan sido cosechados, el producto debe ser mantenido a la temperatura apropiada para retardar o detener el crecimiento de bacterias dañinas. La "cadena de frío" comienza en la cosecha y termina con el consumidor ([Lee et al. 2015](#)). Se deben almacenar los materiales de envasado de alimentos por separado de los productos químicos y de los productos de limpieza, desinfección y protección de las plantas.

Trazabilidad

Un buen mantenimiento de registros permite la posibilidad de rastrear (tanto hacia adelante como hacia atrás) cualquier posible fuente de contaminación, o de encontrar el origen y la causa de los problemas en la cadena alimentaria. Por lo tanto, el productor acuapónico debe asegurarse de que se establezcan sistemas de registro para poder garantizar la trazabilidad ([Copa – Cogeca 2018](#)).

REGISTROS DE LA PRODUCCIÓN VEGETAL:	REGISTROS DE PRODUCCIÓN ANIMAL
<ul style="list-style-type: none"> - uso de cualquier producto fitosanitario y biocidas (producto, fecha de aplicación, cantidad, método de aplicación) - los casos de plagas o enfermedades que puedan afectar a la inocuidad de los productos de origen vegetal (tipo de plaga o enfermedad, fecha, medidas adoptadas) - los resultados de todos los análisis pertinentes realizados en muestras tomadas de las plantas u otras muestras que sean significativas para la salud humana (resultados, tipo de muestra, ubicación si procede, laboratorio de análisis, fecha) 	<ul style="list-style-type: none"> - la naturaleza y el origen de los alimentos que se dan a los animales (alimento, cantidad, fecha) - medicamentos veterinarios u otros tratamientos administrados a los animales (producto utilizado, fecha de administración, tiempo de espera) - casos de enfermedades que pueden afectar a la seguridad de los productos de origen animal (tipo de plaga o enfermedad, fecha, medidas adoptadas) - los resultados de todos los análisis efectuados en muestras tomadas de los animales u otras muestras tomadas con fines de diagnóstico, que sean significativos para la salud humana (resultados, tipo de muestra, ubicación si procede, laboratorio de análisis, fecha) - cualquier informe pertinente sobre los controles realizados a los animales o productos de origen animal

Los envases de los productos tienen que ser etiquetados si el producto se vende a los servicios de restauración y/o a los consumidores finales. Cuando los alimentos se ofrecen a la venta al consumidor final o a los servicios de restauración colectiva sin preembalaje, pero preparados para la venta directa en la unidad acuapónica, es obligatoria la siguiente información:

- El nombre del alimento (en el caso de los peces, se debe indicar tanto el nombre comercial como el científico)
- Cualquier alérgeno presente (cualquier ingrediente o auxiliar tecnológico enumerado en el [Anexo II de Reglamento 1169/2011](#) que cause alergias o intolerancias utilizado en la fabricación o preparación y que siga presente en el producto acabado). Nota: No se requiere cuando el nombre del alimento se refiere claramente a un alérgeno o alérgenos, por ejemplo, el pescado
- Las fechas de caducidad o de caducidad deben aparecer en todos los productos no empaquetados.
- Fecha de la captura o recolección (información voluntaria). La fecha de captura / cosecha puede ser considerada como un lote o remesa. "Lote" o "partida" son útiles para la trazabilidad en caso de que sea necesaria una retirada de producto
- Se recomienda una declaración que aconseja a los consumidores "aclarar con agua antes de comer o servir" para los productos vegetales (información voluntaria)

La información obligatoria para los peces de cultivo (acuicultura) también lo es:

- Método de producción
- País de producción

¿Cómo etiquetar sus productos?

- En el producto. Si es posible, la información debe presentarse en una etiqueta en el envase, pegada al envase, o visible a través del envase
- En un aviso. La información puede ser presentada en un aviso cercano al producto o en el borde de la estantería
- Verbalmente. En el caso de la información sobre alérgenos solamente, puede dar al cliente la información verbalmente. Debe colocar un aviso cerca del producto (o en el mismo producto) invitando a los clientes a pedir a un miembro del personal información sobre los alérgenos, por ejemplo, "*Por favor, pregúntenos acerca de los alérgenos en nuestros alimentos*".

[El Reglamento de la Comisión Europea \(CE\) No 710/2009](#) (Reglamento de Acuicultura Orgánica) establece normas detalladas que rigen las prácticas en la producción de productos de acuicultura que pueden ser etiquetados como orgánicos.

Materiales de contacto con alimentos

Los materiales de contacto con alimentos (FCM) están destinados a entrar en contacto con los alimentos, ya están en contacto con los alimentos o pueden razonablemente entrar en contacto con

los alimentos o transferir sus componentes a los alimentos en el marco de un uso normal o previsible. Entre los ejemplos se incluyen

- contenedores para el transporte de alimentos
- maquinaria para procesar alimentos
- materiales de embalaje
- utensilios de cocina y vajilla

La seguridad del FCM es comprobada por los operadores comerciales que lo comercializan y por las autoridades competentes durante los controles oficiales. Todo material u objeto destinado a entrar en contacto con alimentos debe ser suficientemente inerte para impedir que se transfieran sustancias a los alimentos en cantidades lo suficientemente grandes como para poner en peligro la salud humana o provocar un cambio inaceptable en la composición o un deterioro de las propiedades organolépticas de los alimentos. Existe una amplia gama de tipos de FCM, siendo los más comunes:

- Cerámica
- Corcho
- Vidrio
- Metal y aleaciones
- Papel y cartón
- Celulosa regenerada
- Caucho
- Silicona
- Madera

El símbolo internacional para el material apropiado para el contacto con alimentos (Figura 7) asegura en general que la superficie del material está libre de cualquier contaminante tóxico del proceso de fabricación y que el material no se convertirá potencialmente en una fuente de contaminación tóxica por el uso.



Figura 7: Símbolo internacional del material apropiado para el contacto con alimentos

(Fuente: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:338:0004:0017:DE:PDF>)

10.3.7 Limpieza y saneamiento

La limpieza es un requisito clave que se aplica al personal, las instalaciones y el equipo. Para los dos últimos, se deben mantener continuamente buenas condiciones. Las herramientas de cosecha, los utensilios de corte y las superficies de contacto de los productos deben mantenerse limpios.

SALUD HUMANA

Si no se mantiene limpio el ambiente (especialmente las superficies que entran en contacto con las plantas y los peces después de la cosecha), es más que probable que se cosechen productos que no están limpios o sanos.

SALUD DE LAS PLANTAS

Si no mantiene limpio el cultivo, está abriendo caminos para enfermedades y hongos patógenos.

SALUD DE LOS PECES

Si no mantiene limpia los tanques, está abriendo caminos para las enfermedades de los peces y los patógenos.

Los productos químicos utilizados para la limpieza y la desinfección deben utilizarse de acuerdo con sus instrucciones y almacenarse siempre lejos de las zonas en que se producen, almacenan o manipulan alimentos o piensos. Los productos químicos en su embalaje original y los que se transfieren a unidades más pequeñas deben estar siempre etiquetados (legibles, inconfundibles, impermeables) con al menos la siguiente información: nombre, fecha, concentración.

El productor acuapónico debe asegurarse de que las herramientas se limpien antes y después de cada uso, y asegurarse de que todo el material de limpieza, como escobas y trapeadores, se designe específicamente para la unidad acuapónica. Si hay varios sistemas, el equipo de limpieza (cepillos, esponjas, paños, ollas de muestreo de agua, etc.) debe estar separado para cada sistema, con un etiquetado codificado por colores (Figura 8a).



Figura 8: Herramientas de limpieza separadas para cada línea con sistema de codificación de colores (a) y almacenadas lejos de la unidad acuapónica con agentes de limpieza en el armario cerrado (b) en ZHAW, Instituto de Ciencias de Recursos Naturales (Foto: Andrej Ovca)

IMPORTANTE!

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Asegúrese de usar productos químicos de calidad alimentaria- Use protección ocular y guantes cuando manipule productos químicos fuertes |
|--|

Proceso de limpieza

Las superficies limpiadas deben incluir canales hidropónicos, peceras, laterales de invernaderos, senderos, etc. Se recomienda preparar el programa de limpieza donde se define la siguiente información:

- ¿Qué se va a limpiar?
- ¿Cómo?
- ¿Cuándo y cómo?
- ¿Quién va a limpiar?

¿Qué hay que limpiar?

Las superficies pueden ser divididas en diferentes zonas ([Bihn et al. 2014](#)), por ejemplo:

- Zona 1: Superficies de contacto directo con alimentos (mesas de clasificación, estantes, utensilios, recipientes de cosecha/almacenamiento)
- Zona 2: Superficies de contacto no alimentarias que se encuentran muy cerca del producto (partes internas y externas del equipo de lavado o procesamiento, alojamiento, marco)
- Zona 3: Las áreas dentro de la unidad acuapónica como botes de basura, pisos, drenajes, baños, montacargas)
- Zona 4: Áreas fuera de la unidad acuapónica

¿Cómo se limpia?

Uno siempre debe comenzar el proceso de limpieza en la zona 1 y terminar en la zona 4. Además, la limpieza siempre debe comenzar en la parte superior y continuar hacia abajo, barriendo y fregando los pisos al final.

- Paso 1: La superficie debe ser enjuagada para que cualquier suciedad y escombros obvios sean removidos. Toda la materia biológica (plantas, algas, etc.) debe ser removida antes de continuar con la limpieza.
- Paso 2: Se debe aplicar un detergente/agente de limpieza y restregar la superficie
- Paso 3: La superficie debe ser enjuagada con agua potable
- Paso 4: Se debe aplicar un agente de desinfección apropiado si es necesario. Si el agente de desinfección requiere un enjuague final, esto requerirá un paso extra
- Paso 5: La superficie debe dejarse secar al aire

Una vez que los peces han sido retirados del sistema, deben ser drenados y los tanques limpiados adecuadamente con una manguera de alta presión. El uso de una unidad de agua caliente a alta presión con detergente es una buena manera de limpiar e higienizar las superficies también. Todo el equipo (redes, cubos, etc.) que entre en contacto con el agua del sistema debe ser desinfectado. Nota:

después de la cosecha las balsas deben ser limpiadas pero no desinfectadas, y dejadas para secar para evitar matar las bacterias nitrificantes de la superficie sumergida de la balsa. Las tablas de cortar y los cuchillos deben lavarse con jabón en agua caliente antes de cortar los productos. Todo el jabón debe enjuagarse con agua corriente y secarse según sea necesario con una toalla de papel de un solo uso. Los cortadores también pueden ser limpiados rutinariamente usando una solución desinfectante como la lejía, el alcohol u otro producto comercial.

¿Cómo desinfectar?

Los productores acuapónicos siempre deben seguir el etiquetado de un producto y usar el equipo de protección adecuado. Se pueden utilizar diferentes agentes para la desinfección. La lejía de cloro, mezclada en una solución al 10 % y dejada en reposo durante cinco minutos, es muy eficaz para matar los patógenos de las enfermedades ([Moran 2013](#)). Otros tipos de productos son los que contienen amonio cuaternario, que son menos volátiles y más estables que la lejía, y se recomiendan sobre todo para superficies metálicas. El dióxido de cloro es un gas, por lo que puede penetrar e infiltrarse en los rincones del invernadero mucho mejor que los productos líquidos. El vinagre es otro desinfectante ([Godfrey 2015](#)). El ácido peroxiacético concentrado (máximo 15 ml por 3 m³ de agua de acuario) puede utilizarse para desinfectar los filtros de tambor y también para eliminar la piedra caliza que se haya formado en la malla. Hay que tener cuidado de que el ácido no entre en el biofiltro y en la pecera de una sola vez. **Importante:** La desinfección sólo debe ser realizada por personal debidamente capacitado.

¿Con qué frecuencia hay que limpiar?

- Basura y agua estancada deben ser quitados diariamente para la seguridad de los trabajadores, así como para minimizar el riesgo de atraer plagas. La eliminación de todos los restos de plantas, incluyendo las raíces, al final de cada cosecha ayuda a reducir la incidencia de plagas y enfermedades
- El suelo del sistema debe ser limpiado una vez por semana (telarañas, alimento para peces, etc.) con una escoba y, si es necesario, con el paño húmedo
- Las bombas y los filtros de tambor deben ser limpiados al menos una vez cada 2 meses
- Una o dos veces al año las peceras deben ser fregadas para eliminar las algas y la biopelícula de las paredes

10.3.8 Control de animales y plagas

El control de plagas ya fue tratado en el Capítulo 8 (Manejo Integrado de Plagas), por lo que aquí sólo se tratarán los puntos clave. Las plagas y los animales salvajes como aves, alimañas e insectos, y los animales domésticos (perros, gatos, etc.) pueden ser una fuente de contaminación de los alimentos y también pueden actuar como vector de enfermedades infecciosas. El productor acuapónico debe tomar medidas para evitar que las plagas contaminen directamente los productos, así como cualquier equipo y otros materiales que entren en contacto con los productos. También es necesario excluir a la fauna y flora silvestres y las plagas para evitar que los peces y los vegetales sean depredados por la fauna y flora silvestres ([Aquaponics Association 2015](#)). Las alimañas, la vida silvestre y las mascotas

deben ser excluidas o minimizadas en el área general donde se encuentra el invernadero. Se puede evitar que las aves contaminen el sistema mediante el uso de redes y elementos disuasorios.

Las puertas del invernadero deben mantenerse cerradas la mayor parte del tiempo, y los desechos deben ser retirados de los alrededores de la instalación. Deberá realizarse una inspección visual de la presencia de plagas y se adoptarán medidas correctivas si se detectan signos de plagas. El uso impropio o ilegal de productos químicos para controlar las plagas puede resultar en peligros para la salud humana. La mejor práctica es la de establecer una red de todos los sistemas de producción. Los sistemas de redes restringen severamente cualquier acceso de animales de sangre caliente. Para evitar la presencia de roedores en el invernadero, se deben utilizar y controlar las trampas para ratones de 3 a 4 veces por semana, especialmente en otoño e invierno, cuando las posibilidades de que aparezcan son mayores. Si los productos se venden a los consumidores y/o a los operadores de empresas alimentarias, las trampas para ratones deben ser instaladas por una autoridad registrada y competente que también debe ocuparse de los animales capturados. Las lámparas de insectos deben ser revisadas y limpiadas.

10.3.9 Desechos y sustancias peligrosas

Los productos veterinarios y químicos (productos fitosanitarios, biocidas, agentes de limpieza, etc.) deben almacenarse de acuerdo con la orientación proporcionada por el fabricante y lejos de las zonas donde se producen, almacenan y manipulan alimentos.

Tabla 3: Medidas para prevenir el riesgo de los productos veterinarios, los productos químicos, los desechos y las aguas residuales ([Copa – Cogeca 2018](#))

PRODUCTOS VETERINARIOS	<ul style="list-style-type: none"> -Sólo deben utilizarse productos autorizados y debe evitarse la sobredosis. Los tratamientos veterinarios deben administrarse siempre de acuerdo con las indicaciones del fabricante -Los productos veterinarios que han pasado su fecha de caducidad no deben utilizarse -Tras la aplicación de tratamientos veterinarios de los piensos medicados, debe respetarse el período de espera para evitar la posible presencia de residuos químicos. Los productos animales producidos durante este período nunca deben ser destinados al consumo humano. En cambio, deben ser eliminados de acuerdo con las normas nacionales o destinados a usos alternativos autorizados en su país. - Los medicamentos veterinarios no utilizados y sus envases deben ser eliminados de acuerdo con los requisitos establecidos por su autoridad nacional. En la medida de lo posible, los productores acuapónicos deben evitar que los medicamentos entren en el medio ambiente, ya que pueden surgir problemas de resistencia
PRODUCTOS QUÍMICOS	-Sólo se deben utilizar productos químicos autorizados y seguir las instrucciones del fabricante

	<p>-Cuando sea necesario, se deberían respetar los plazos de espera establecidos por el fabricante para evitar toda posible contaminación de los animales</p> <p>- Los productos químicos no utilizados y sus contenedores deben eliminarse de acuerdo con las normas nacionales</p>
RESIDUOS	<p>-Los residuos como lubricantes, basura, vidrios rotos, baterías, etc. deben ser almacenados en contenedores cerrados, recipientes o cajas, libres de humedad, inaccesibles para los roedores, y evitando toda posibilidad de contaminación de agua, alimentos o piensos.</p> <p>-Los animales muertos, los desechos y otros subproductos no destinados al consumo humano deben ser retirados rápidamente de la instalación de manera que se evite la contaminación de los alimentos</p> <p>- Los contenedores deben ser de una construcción apropiada, mantenerse en buenas condiciones, ser fáciles de limpiar y, cuando sea necesario, desinfectar (contenedores con cierre)</p>
AGUA RESIDUAL	<p>-Es mejor aplicar al suelo el agua de efluentes de peces "usados". Puede ser usada para regar y fertilizar áreas de pasto o plantas. El agua de las peceras no debe ser puesta directamente en un arroyo, alcantarilla, zanja de riego o embalse, porque los peces pequeños u otras formas de vida acuática podrían ser liberados en el medio ambiente</p>

10.4 Sistema HACCP

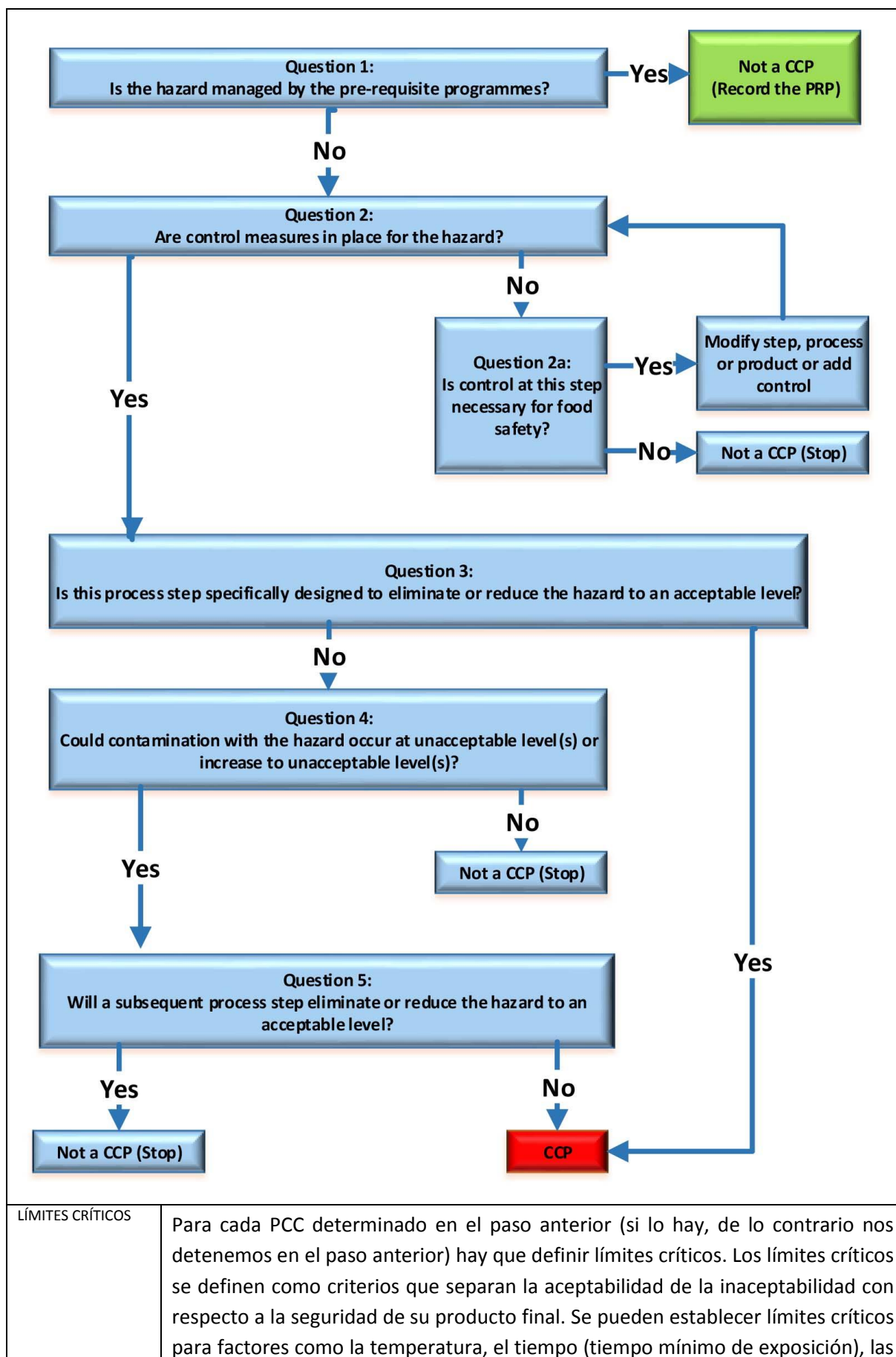
La gestión de la seguridad alimentaria, que consiste en programas de requisitos previos (BPA y BPH) y que se ha mejorado con un sistema de análisis de riesgos y puntos de control críticos (HACCP), es una hoja de ruta para los productores de acuaponía para reducir los riesgos que pueden poner en peligro la seguridad de los productos. Un plan completo de HACCP describe los procedimientos para todos los aspectos de la producción y la elaboración. También proporciona una estructura para evaluar una operación y sirve de referencia para los trabajadores durante la capacitación. Dado que un sistema de HACCP siempre tiene que adaptarse a cada situación individual, en la Tabla 4 se presenta un enfoque genérico.

Si están vendiendo productos al consumidor final o a otros operadores de empresas alimentarias, el productor acuapónico debe comprobar la eficacia del sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos mediante el muestreo y el análisis del producto/producto final. Para ello, los productores acuapónicos deberían colaborar con un laboratorio acreditado que realice análisis microbiológicos de los productos finales al menos una vez al año. Además de los productos alimenticios, también pueden tomarse muestras y analizarse las superficies en contacto con los alimentos. Además, también se recomiendan los análisis químicos de residuos.

Tabla 4: Enfoque genérico para establecer un plan de HACCP.

PESO	DESCRIPCIÓN
------	-------------

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	En resumen, la descripción del producto debe incluir el nombre del mismo, su potencial para favorecer la proliferación microbiana, el envasado apropiado y el uso previsto, incluida la población destinataria. Es importante, por ejemplo, tener en cuenta si los segmentos sensibles de la población pueden consumir el producto (es decir, los ancianos, los inmunodeprimidos, las mujeres embarazadas y los lactantes).																																										
DIAGRAMA DE FLUJO	Es más fácil identificar las rutas de la contaminación potencial y sugerir métodos de control si hay un diagrama de flujo. El examen del flujo desde el punto en que los materiales entran en el sistema, a través de la recolección y el procesamiento, es la característica que hace que un sistema de gestión de la seguridad alimentaria sea una herramienta específica e importante para la identificación y el control de los posibles peligros. El diagrama de flujo del proceso ayuda a identificar las etapas importantes del proceso. Cada etapa del proceso debe examinarse en detalle y la información debe ampliarse para incluir todos los datos pertinentes del proceso																																										
ANÁLISIS DE PELIGROS	<p>Después de enumerar todos los peligros que pueden esperarse razonablemente, el riesgo potencial de cada peligro en cada etapa del proceso debe evaluarse considerando su probabilidad de ocurrencia y su gravedad mediante el siguiente modelo:</p> <table><tr><th>Frecuencia</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th></tr><tr><th>Consecuencia</th><th>Común</th><th>Se sabe que ocurre (Publicado)</th><th>Puede ocurrir</th><th>No se espera que ocurra</th><th>Prácticamente imposible que ocurra</th></tr><tr><td>(1) Fatalidad</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>7</td><td>11</td></tr><tr><td>(2) Enfermedad grave</td><td>3</td><td>5</td><td>8</td><td>12</td><td>16</td></tr><tr><td>(3) Retirada de producto</td><td>6</td><td>9</td><td>13</td><td>17</td><td>20</td></tr><tr><td>(4) Queja del consumidor</td><td>10</td><td>14</td><td>18</td><td>21</td><td>23</td></tr><tr><td>(5) Insignificante</td><td>15</td><td>19</td><td>22</td><td>24</td><td>25</td></tr></table> <p>La estimación del riesgo de que ocurra un peligro se basa en una combinación de experiencia e información de la literatura. La severidad es el grado de gravedad de las consecuencias de un peligro si éste no se controla. Es posible que los peligros ya se hayan abordado mediante las buenas prácticas agrícolas (BPA) y las buenas prácticas de higiene (BPH)</p>	Frecuencia	A	B	C	D	E	Consecuencia	Común	Se sabe que ocurre (Publicado)	Puede ocurrir	No se espera que ocurra	Prácticamente imposible que ocurra	(1) Fatalidad	1	2	4	7	11	(2) Enfermedad grave	3	5	8	12	16	(3) Retirada de producto	6	9	13	17	20	(4) Queja del consumidor	10	14	18	21	23	(5) Insignificante	15	19	22	24	25
Frecuencia	A	B	C	D	E																																						
Consecuencia	Común	Se sabe que ocurre (Publicado)	Puede ocurrir	No se espera que ocurra	Prácticamente imposible que ocurra																																						
(1) Fatalidad	1	2	4	7	11																																						
(2) Enfermedad grave	3	5	8	12	16																																						
(3) Retirada de producto	6	9	13	17	20																																						
(4) Queja del consumidor	10	14	18	21	23																																						
(5) Insignificante	15	19	22	24	25																																						
PUNTO CRÍTICO DE CONTROL (PCC)	Un punto crítico de control (PCC) se define como "un paso en el que se puede aplicar el control y es esencial para prevenir o eliminar un peligro para la seguridad alimentaria o reducirlo a un nivel aceptable". La determinación de un PCC puede facilitarse mediante la aplicación de un árbol de decisiones (véase más adelante) que indica un enfoque de razonamiento lógico. La aplicación del árbol de decisiones debe ser flexible según el tipo de unidad analizada. Es importante subrayar que si el peligro o peligros ya están gestionados por los programas de requisitos previos (BPA/BPA), la etapa del proceso no se clasifica como PCC																																										



	<p>dimensiones físicas del producto, el nivel de humedad, etc. Los límites críticos deben cumplir con los requisitos de los reglamentos (si los hay) y/o las normas internas. Es esencial que la persona responsable de establecer los límites críticos tenga conocimiento del proceso y de las normas legales y comerciales requeridas para el producto. Las fuentes de información sobre los límites críticos incluyen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Publicaciones científicas/datos de investigación - Requisitos reglamentarios y directrices - Estudios experimentales <p>Si no se dispone de la información necesaria para establecer límites críticos, se debe seleccionar un valor conservador o utilizar límites reglamentarios. Una vez establecidos los límites críticos, se deben registrar</p>
MONITOREO	<p>El monitoreo es <i>"el acto de llevar a cabo una secuencia planificada de observaciones o mediciones de parámetros de control para evaluar si un PCC está bajo control"</i>. La vigilancia es la medición u observación programada de un PCC en relación con sus límites críticos. Los procedimientos de vigilancia deben ser capaces de detectar la pérdida de control en el PCC. En las especificaciones de vigilancia de cada PCC se deberá proporcionar información sobre</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lo que se vigilará - Cómo se vigilarán los límites críticos y las medidas preventivas - Frecuencia de la vigilancia - ¿Quién vigilará
ACCIONES CORRECTIVAS	<p>La acción correctiva es <i>"cualquier acción que se tome cuando los resultados de la vigilancia en el PCC indican una pérdida de control"</i>. La diversidad de posibles desviaciones en cada PCC significa que puede ser necesaria más de una acción correctiva. Cuando se produce una desviación, lo más probable es que se observe durante la vigilancia de rutina del PCC. Los procedimientos de desviación en cada PCC deberán registrarse. Los procedimientos de acción correctiva son necesarios para determinar la causa del problema, adoptar medidas para evitar su repetición y hacer un seguimiento con la vigilancia y la reevaluación para asegurar que las medidas adoptadas sean eficaces. Si las medidas correctivas no abordan la causa fundamental de la desviación, ésta podría volver a producirse</p>
DOCUMENTACIÓN	<p>Los registros son esenciales para examinar la adhesión del sistema HACCP al plan HACCP. Un registro muestra la historia del proceso, la vigilancia, las desviaciones y las medidas correctivas que se produjeron en el CCP identificado. Puede ser de cualquier forma, por ejemplo, un gráfico de procesamiento, un registro escrito o un registro informatizado. Se deben mantener tres tipos de registros como parte del programa de HACCP:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Documentación de apoyo para la elaboración del plan de HACCP (por ejemplo, descripción del producto, diagrama de flujo, análisis de peligros, identificación de los PCC) - Registros generados por el sistema HACCP (registros de vigilancia de todos los PCC, registros de desviación y de medidas correctivas)

10.5 Referencias

- Aquaponics Association 2015. [*Provisional GAPs for leafy greens and fruiting crops in commercial aquaponics*](#).
- Barnhart, C., Hayes, L. y Ringle, D. 2015. [*Food Safety Hazards Associated with Smooth-Textured Leafy Greens Produced in Aquaponic, Hydroponic, and Soil-based Systems with and without Roots in Retail*](#). Minneapolis: University of Minnesota Aquaponics.
- Bihn, E.A., Schermann, M.A., Wszelaki, A.L., Wall, G.L., y Amundson, S.K. 2014. [*On-Farm Decision Tree Project: Sanitation and Postharvest Handling*](#). National Good Agricultural Practices Programme, Cornell College of Agriculture and Life Sciences.
- CDC 2014. [*Fish Cooking and Storage Temperatures*](#). BC Centre for Disease Control, British Columbia.
- Chalmers, G.A. 2004. [*Aquaponics and Food Safety*](#).
- Copa – Cogeca 2018. [*EU Guide to Good Hygiene Practice \(GGHP\) for the primary production of foodstuffs*](#). Copa – Cogeca European Farmers European Agri-Cooperatives, Brussels.
- Deering, A.J., Mauer, L.J. y Pruitt, R.E. 2012. [*Internalization of E. coli O157:H7 and Salmonella spp. in plants: A review*](#). *Food Research International* 45 (2), 567-575.
- EC 2012. [*The Common Agricultural Policy - A story to be continued*](#). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- EC 2014. [*Food Safety*](#). European Commission, Brussels.
- EFSA y ECDC 2017. [*The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2016*](#). *EFSA Journal* 15 (12), 5077.
- FAO 2006. [*Glossary*](#). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO 2014. [*Small-scale Aquaponics Food Production: Integrated Fish and Plant Farming*](#). FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fox, B.K., Tamaru, C.S., Hollyer, J., Castro, L.F., Fonseca, J.M., Jay-Russell, M. y Low, T. 2012. [*A Preliminary Study of Microbial Water Quality Related to Food Safety in Recirculating Aquaponic Fish and Vegetable Production Systems*](#). Food Safety and Technology 51. University of Hawai'i at Mānoa, College of Tropical Agriculture and Human Resources.
- Gauthier, D.T. 2015. [*Bacterial zoonoses of fishes: A review and appraisal of evidence for linkages between fish and human infections*](#). *The Veterinary Journal* 203 (21), 27-35.
- Godfrey, M. 2015. [*How to Sanitize and Sterilize Hydroponic Systems*](#). Upstart University.
- Hoevenaars, K., Junge, R., Bardocz, T. y Leskovec, M. 2018. [*EU policies: New opportunities for aquaponics*](#). *Ecocycles* 4 (1), 10-15.
- Hollyer, J., Tamaru, C., Riggs, A., Klinger-Bowen, R., Howerton, R., Okimoto, D., Castro, L., Ron, T., Fox, B.K., Troegner, V. y Martinez, G. 2009. [*On-Farm Food Safety: Aquaponics*](#). Food Safety and Technology 38. University of Hawai'i at Mānoa, College of Tropical Agriculture and Human Resources.
- Joly, A., Junge, R. y Bardocz, T. 2015. [*Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions*](#). *Ecocycles* 1 (2), 3-5.
- Lee, J., Phelps, N., Driessen, S., Schermann, M. y Waters, K. 2015. [*Keeping Aquaponics Products Safe*](#). University of Minnesota.

- Ljubojević, D., Pelić, M., Radosavljević, V. y Ćirković, M. 2017. [Food safety hazards related to fish produced in aquaponics](#). Conference paper, Aquaculture Europe 2017, Dubrovnik, Croatia.
- Moran, N. 2013. [Keep it clean](#). *Greenhouse Management* November 2013.
- Moriarty, M.J., Semmens, K., Bissonnette, G.K. y Jaczynski, J. 2018. [Inactivation with UV-radiation and internalization assessment of coliforms and *Escherichia coli* in aquaponically grown lettuce](#). *LWT - Food Science and Technology* 89, 624–630.
- Raspor, P. y Jevšnik, M. 2008. [Good nutritional practice from producer to consumer](#). *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48 (3), 276-292.
- WHO y FAO 2009. [Food Hygiene: Basic Texts](#) (4th edition) World Health Organization / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

11.MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

11.1 ¿Qué es la ciencia, qué es la investigación? Términos básicos

11.1.1 Definiciones generales

Ciencia

La palabra "ciencia" viene de la palabra latina "*scientia*", que significa conocimiento. La ciencia se refiere al conocimiento sistemático y organizado en cualquier área de investigación que se haya obtenido usando el "método científico". El método científico es el mejor método que tenemos para obtener datos fiables sobre el mundo, que ayuda tanto a explicar cómo, a predecir diferentes fenómenos. La ciencia se basa en cosas/fenómenos observables y medibles. Sin embargo, no existe una verdad científica absoluta; sólo que es menos probable que algunos conocimientos sean erróneos que otros ([Nayak y Singh 2015](#)). Las declaraciones producidas a través de la investigación científica deben ser comprobables, y la investigación por sí misma debe ser reproducible (un buen documento científico es aquel que permite que el método se replique).

Investigación

La investigación se define como la búsqueda científica y sistemática de información pertinente sobre una cuestión particular. En ese caso, el término "investigación" se refiere al método sistemático que incluye la articulación del problema, la formulación de una hipótesis, la recopilación de los hechos o datos, el análisis de los mismos y la extracción de determinadas conclusiones, ya sea como solución(es) al problema investigado o como generalizaciones para alguna formulación teórica. La investigación se denomina "investigación científica" si contribuye al conjunto de la ciencia y sigue el método científico.

En general, la investigación puede dividirse en dos grupos:

- *Investigación básica*: el objetivo principal es adquirir un cuerpo organizado de conocimientos científicos y no necesariamente generar resultados con un impacto práctico directo. La investigación básica trata de las propiedades fundamentales de los objetos, su relación y su comportamiento, y comprende la investigación teórica y experimental.
- *Investigación aplicada*: el objetivo principal es resolver problemas prácticos y el objetivo de contribuir al acervo de conocimientos científicos es secundario. La investigación aplicada se centra en la utilidad de los objetos y su comportamiento, y en las mejoras de la tecnología.

11.1.2 Vocabulario de investigación

Variables y niveles de medición

Una variable es una característica medible de una construcción abstracta. Una variable es algo que puede tener más de un valor y puede variar de negativo a positivo, de bajo a alto, etc. Es lo opuesto a una constante. Los valores de una variable pueden ser palabras (por ejemplo, el género) o números (por ejemplo, la temperatura). Las construcciones por sí mismas no pueden medirse directamente; por lo tanto, los científicos necesitan encontrar medidas sustitutivas llamadas variables. Por ejemplo, la calidad del agua suele medirse en forma de concentraciones de nitrato y fosfato y de demanda química de oxígeno, que son parámetros diferentes obtenidos a partir de procedimientos analíticos de laboratorio realizados en una muestra de agua. En este caso, la calidad del agua es una construcción, y las concentraciones de nitrato y fosfato y la demanda química de oxígeno son las variables que la miden.

Las variables que describen otras variables se denominan variables independientes, mientras que las variables que se describen por otras variables son variables dependientes. En un experimento de investigación puede haber otras variables que no son pertinentes para el estudio de una variable dependiente seleccionada pero que podrían tener algún efecto en ella. Estas variables deben controlarse durante todo el experimento y se denominan variables de control (por ejemplo, el pH y la concentración de oxígeno en el caso de la calidad del agua). En la investigación queremos seleccionar variables específicas y buscar relaciones entre ellas; además, queremos entender si la variación de una variable afecta a la variación de otra y cómo lo hace.

Las diferentes variables tienen diferentes niveles de medición en orden ascendente: nominal, ordinal, intervalo y relación. Para la investigación es importante seleccionar siempre las variables con el nivel de medición más alto ([Nayak y Singh 2015](#)):

- **Nivel nominal de medición:** los valores de este nivel incluyen una lista de nombres/palabras. Los valores de los nombres son una medida cualitativa (por ejemplo, el género, el color). También es posible sustituir los nombres de los valores por números (por ejemplo, 1 para el hombre y 2 para la mujer); sin embargo, en este caso los números sólo significan un tipo diferente de nombre, y no hacen que la variable sea cuantitativa. Dar números a las características facilita los análisis estadísticos de los datos cualitativos. El análisis estadístico de la tendencia central de las mediciones nominales es la moda; no se puede definir la media o la mediana (no es posible calcular un sexo o un color promedio). Los análisis estadísticos apropiados son el chi-cuadrado y la distribución de frecuencias, y una transformación de uno a uno (igualdad) (por ejemplo, 1=verde, 2=amarillo, 3=rojo).

- **Nivel de medición ordinaria:** los valores de este nivel pueden ordenarse en rangos. Todas las variables medidas como altas, medias o bajas (por ejemplo, la clase socioeconómica), o como escalas de opinión (muy de acuerdo / de acuerdo / neutral / en desacuerdo / muy en desacuerdo) son ordinales. Las escalas ordinales proporcionan datos sobre menos y más - por ejemplo, fuertemente de acuerdo es más que de acuerdo; sin embargo, lo que las variables ordinales no nos dicen es cuánto más. La medida de tendencia central de una escala ordinal puede definirse como mediana o modo, mientras que la media no puede interpretarse. Los análisis estadísticos apropiados son los análisis percentiles y no paramétricos, y la transformación monótona creciente (que mantiene la clasificación); sin embargo, los análisis más sofisticados como la correlación, la regresión y el análisis de la varianza no son adecuados.

- **Nivel de intervalo de medición:** los valores de este nivel tienen todas las propiedades de las variables nominales y ordinales; además, las distancias entre las observaciones son significativas. El nivel de intervalo de medición es una medición cuantitativa. Los valores medidos no sólo se ordenan en rangos, sino que la distancia entre los atributos adyacentes en una escala es siempre la misma; por ejemplo, la escala de temperatura en Celsius, donde la diferencia entre 30 y 40 grados es la misma que entre 80 y 90 grados. La escala de intervalos nos permite describir cuánto más, o cuánto menos, se compara una medida con otra, lo que no ocurre con las escalas nominales u ordinales. Las medidas de tendencia central pueden ser media, mediana o modo. También son posibles las medidas de dispersión, como el rango y la desviación estándar. Los análisis estadísticos apropiados incluyen todos los métodos adecuados para las escalas nominales y ordinales, así como la correlación, la regresión y el análisis de la varianza. La transformación de la escala debe ser lineal positiva.

- **Nivel de medición de la relación:** además de tener intervalos iguales, las observaciones pueden tener también un valor de cero, lo que significa la ausencia del fenómeno que se está midiendo. Las escalas de relación tienen todas las características de las escalas nominales, ordinales y de intervalo, así como un punto "cero verdadero". La mayoría de las mediciones en las ciencias naturales y la ingeniería, como la masa, el volumen, las concentraciones de compuestos y la carga eléctrica, son escalas de proporción. Todos los métodos estadísticos y transformaciones son adecuados.

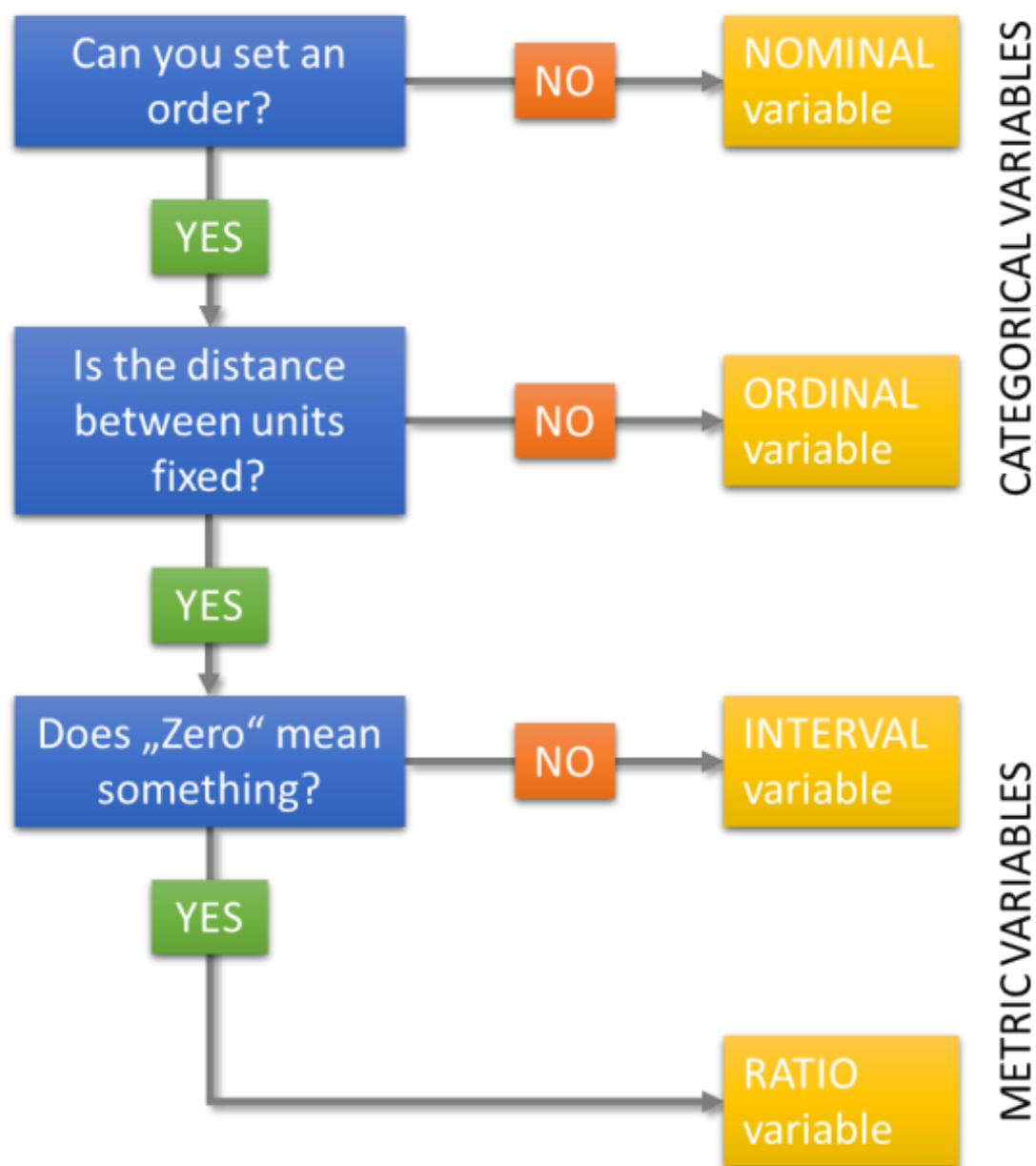


Figura 1: Niveles de medidas.

Validez, fiabilidad, precisión y exactitud

La validez es la cualidad de ser legal u oficialmente vinculante o aceptable. La validez de los instrumentos, los datos y los hallazgos es el requisito más importante en la investigación. Se refiere a su exactitud y confiabilidad. La validez de los datos depende de la validez de los instrumentos; sin embargo, suponiendo que los instrumentos y los datos sean válidos, la validez de los resultados y las conclusiones todavía puede ser cuestionada ([Nayak y Singh 2015](#)).

La fiabilidad es la cualidad de tener un buen rendimiento constante. La fiabilidad muestra si es posible obtener el mismo resultado utilizando un instrumento para medir una variable más de una vez. Los

instrumentos pueden ser dispositivos de laboratorio, escalas, o pueden ser preguntas dadas a un grupo de personas.

La precisión se refiere al número de decimales en un resultado numérico de una medición.

La exactitud es el grado en que el resultado de una medición, cálculo o especificación se ajusta al valor correcto o a un estándar. La exactitud se refiere al nivel de precisión de la escala.

11.2 Fundamentos de la metodología de la investigación científica

La metodología de investigación es una disciplina de procedimientos científicos. Incluye teoría, análisis y directrices sobre cómo debe proceder la investigación: cómo debe realizarse la investigación y los principios, procedimientos y prácticas que la dirigen. La metodología de la investigación es el conjunto específico de procedimientos o técnicas utilizados para identificar, seleccionar, procesar y analizar la información sobre un tema. Dado que la metodología puede diferir entre las distintas disciplinas, existe por lo tanto un abanico de diferentes metodologías de investigación que pueden no ser apropiadas para todos los problemas de la investigación ([Nayak and Singh 2015](#)). La metodología no debe confundirse con los métodos científicos, es decir, con las formas o técnicas de reunir información/resultados. Los métodos científicos describen la forma en que se obtienen los conocimientos científicos. En un documento de investigación, la sección de materiales y métodos permite al lector evaluar críticamente la validez y fiabilidad generales de un estudio, porque en ella se indica cómo se recopilaban o generaban los datos y cómo se analizaron. A continuación se presenta un ejemplo de una metodología de investigación:

1. Observar y preguntar: selección y definición del problema de investigación
2. Revisión de la literatura relacionada
3. Formulación de hipótesis
4. Preparación del diseño de la investigación, incluido el plan de muestreo y la selección de los instrumentos para la reunión de datos
5. Ejecución del plan de investigación: recopilación de los datos
6. Procesamiento de los datos
7. Informe, incluyendo el apoyo o rechazo de la hipótesis

11.2.1 Diseños de investigación

Un diseño de investigación es un plan de investigación empírica que incluye la planificación, organización y dirección de la investigación, incluyendo la definición del problema de la investigación, las preguntas de la investigación y los objetivos. Esboza la forma en que se llevará a cabo el estudio de investigación; por lo tanto, incluye un plan exhaustivo para la adquisición de datos, la definición de los instrumentos utilizados y los procedimientos de muestreo y vigilancia, con el fin de resolver cuestiones específicas de la investigación o poner a prueba una hipótesis concreta. Los diseños de investigación pueden agruparse en dos categorías:

- Diseño de investigación de encuestas

- Diseño de investigación experimental

Diseño de la investigación de la encuesta

Las encuestas se utilizan principalmente en las ciencias sociales. En las encuestas se reúnen los datos de un grupo de prueba predefinido para obtener información y comprensión sobre diversos temas de interés. Hay tres tipos diferentes de encuestas según su propósito: estudios exploratorios, descriptivos y explicativos ([Nayak y Singh 2015](#)).

El estudio o la **investigación exploratoria** suele comenzar con el examen de los datos disponibles, o con métodos cualitativos como debates informales, entrevistas en profundidad, grupos de discusión y estudios de casos; por lo tanto, los datos reunidos son cualitativos. A continuación se cuantifican los datos y se formulan hipótesis. La investigación exploratoria no puede generalizarse a toda la población. Los resultados de la investigación exploratoria no pueden llevar a conclusiones firmes, pero pueden permitir una importante comprensión de una situación determinada. La finalidad del estudio exploratorio es enmarcar un problema para una investigación más exacta o para formular hipótesis. Por lo tanto, los estudios de investigación exploratoria no tienen hipótesis. El diseño de la investigación exploratoria se utiliza cuando se sabe poco sobre el fenómeno y cuando las teorías anteriores no han logrado aclararlo.

El **estudio descriptivo** describe con la mayor exactitud posible la conexión entre las características de una población y el fenómeno estudiado. No puede describir lo que causó la situación, sólo cuáles son las características. El estudio descriptivo se realiza normalmente después de una encuesta y antes del estudio explicativo, por lo que se utiliza cuando ya se tiene cierto conocimiento sobre un fenómeno, pero queremos saber más sobre él. Por lo tanto, los estudios de investigación descriptiva tienen hipótesis.

Estudio explicativo: Cuando hay un fenómeno conocido que está suficientemente descrito, la investigación procede a averiguar las causas y razones del mismo. El objetivo de los estudios de investigación explicativa es explicar el "por qué". Va más allá de la descripción del problema y las características del fenómeno, y tiene por objeto explicar las causas y los efectos.

Diseño de la investigación experimental

El diseño de investigación experimental es más común en la ciencia ambiental. Es un experimento real, en el que un investigador manipula una variable y controla las otras variables. El diseño de la investigación experimental proporciona pruebas que contribuyen a una mayor validez de la investigación. La investigación experimental siempre tiene un grupo control y un grupo de prueba, en el que se manipula una variable seleccionada (sólo una a la vez), mientras que las variables externas son controladas. Los estudios experimentales prueban una hipótesis causal, que se refiere a una relación causal entre dos variables en la que la variable X (la causa) determina la variable Y (el efecto). Así pues, los estudios experimentales tienen por objeto examinar las relaciones causa-efecto (hipótesis) en condiciones estrictamente controladas, separando la causa del efecto en el tiempo, exponiendo un grupo a la causa (el grupo de prueba o de tratamiento) mientras que no se expone otro grupo (el grupo control), y observando cómo varían los efectos entre estos dos grupos. El principal punto fuerte del diseño experimental es la sólida validez alcanzada por el aislamiento, el control y el

examen intensivo de un pequeño número de variables, mientras que el principal punto débil es la limitada generalizabilidad externa, porque las situaciones en la vida real son frecuentemente más complejas y pueden incluir más variables extrañas que en los entornos artificiales de laboratorio o de campo. Además, el investigador debe identificar todas las variables extrañas pertinentes y controlarlas, pues de lo contrario la validez interna puede verse reducida y pueden aparecer falsas correlaciones. Los experimentos pueden realizarse en un laboratorio o en el campo. Ambas formas tienen ventajas y desventajas. Los experimentos de laboratorio permiten aislar las variables objetivo y controlar las variables extrañas, lo que podría no ser el caso en los experimentos sobre el terreno. Por ello, las extrapolaciones hechas a partir de los experimentos de laboratorio tienden a ser más fuertes en cuanto a su validez interna, mientras que las de los experimentos de campo tienden a ser más fuertes en cuanto a su validez externa. Los datos experimentales se procesan mediante métodos estadísticos cuantitativos ([Nayak y Singh 2015](#)).

11.2.2 Medidas preliminares

Formulación del problema

El primer y más importante paso en el diseño de la investigación es la formulación de un problema. El problema debe ser identificado e investigado. El problema no puede explicarse con éxito si un investigador no tiene el conocimiento y la comprensión adecuados de los problemas específicos que causan o crean el problema. Hay algunos pasos principales a seguir cuando se forma un problema (resumido en [Nayak and Singh 2015](#)):

1. Definir un campo de investigación
2. El campo de investigación tiene que ser conocido por el investigador que realiza la investigación (un especialista en la materia)
3. Revise las investigaciones anteriores realizadas en la zona para estar familiarizado con los hallazgos recientes
4. Establecer el campo de estudio, basado en esta revisión
5. Identificar el problema en general
6. Identificar la característica específica del problema que se va a examinar, y formar una declaración del problema

Un enunciado del problema es un resumen de una formulación del problema. Es importante para el diseño de futuras investigaciones. Los buenos enunciados del problema se centran en la relación entre dos o más variables, se enuncian de manera clara y explícita en forma de preguntas, pueden probarse empíricamente y no son moral o éticamente cuestionables.

Revisión de la literatura

Tras la formulación del problema, se debe realizar una búsqueda sistemática y detallada de todos los tipos de literatura científica y de expertos que se refieran al tema de investigación, con el fin de

identificar una serie de referencias de buena calidad. La mayoría de las referencias deben proceder de literatura académica revisada por pares; sin embargo, también pueden ser pertinentes otras fuentes (legislación, publicaciones de organizaciones internacionales como la OMS y la FAO, fuentes orales, etc.). La principal bibliografía académica consiste en libros, artículos, revistas, actas de conferencias, informes de investigación, bases de datos, tesis y monografías. Tras reunir toda la información, se debe realizar un examen detallado de la literatura académica y un debate crítico de los conocimientos actuales. Esta es una base importante para el éxito del proyecto de investigación. La revisión de la literatura reúne las principales teorías y hallazgos en el área de la investigación, identifica a los autores clave y destaca las lagunas de conocimiento en las que hay que centrarse.

Hoy en día la revisión de la literatura se hace principalmente con búsquedas en línea en diferentes bases de datos. Es importante seleccionar palabras clave apropiadas que también pueden combinarse entre sí utilizando 'y' y 'o' para refinar o especificar los resultados de la búsqueda. Las revistas y artículos electrónicos son los recursos más actualizados disponibles. Los artículos pueden publicarse en línea tan pronto como se hayan editado, sin necesidad de esperar a que haya suficientes artículos para formar el número completo de la revista. Esto es de especial importancia en los campos que evolucionan rápidamente ([Nayak y Singh 2015](#)). Algunos recursos electrónicos son gratuitos ("acceso abierto"). Sin embargo, la mayoría son de pago. Es posible comprar artículos en línea como investigador individual; sin embargo, por lo general las universidades, bibliotecas y otras instituciones educativas tienen suscripciones de pago para diferentes bases de datos y sus empleados o miembros pueden acceder a ellas gratuitamente. Las bases de datos y los motores de búsqueda académicos más comunes son:

- [ScienceDirect](#) es una destacada base de datos científica de texto completo que incluye artículos de más de 2.500 revistas y capítulos de libros de casi 20.000 libros
- [SpringerLink](#) es la colección online más completa de revistas, libros y obras de referencia en el ámbito de la ciencia, la tecnología y la medicina
- [Google Scholar](#) es un motor de búsqueda gratuito que cataloga la información académica de varios recursos web en línea. Reúne información de una gama de recursos académicos que generalmente son revisados por pares. Es uno de los recursos académicos más utilizados por los investigadores
- [Web of Science](#) es un servicio de indexación de citas científicas para clientes suscritos que proporciona una búsqueda de citas completa. Da acceso a numerosas bases de datos
- [El catálogo de Investigación Mendeley](#) es una base de datos de documentos de investigación de origen múltiple. Los investigadores han subido casi 100M documentos al catálogo con contribuciones adicionales que vienen directamente de diferentes repositorios
- [PubMed](#) es una base de datos principalmente de referencias y resúmenes sobre temas de ciencias de la vida y biomédicos
- [Scopus](#) es la base de datos de resúmenes y citas más grande del mundo de literatura de investigación revisada por pares. Contiene más de 20.500 títulos de más de 5.000 editoriales internacionales. Aunque es un producto de suscripción, los autores pueden revisar y actualizar sus perfiles a través del [ORCID](#) o buscando primero su perfil en la página gratuita de búsqueda de autores

Al preparar una revisión de la literatura es importante mantener una base de datos de las referencias, que puede utilizarse para tomar notas sobre los puntos clave de cada fuente ([Nayak y Singh 2015](#)). Existen algunos programas informáticos que permiten crear y organizar una base de datos personal de trabajos científicos y formar citas al redactar un informe científico. La base de datos puede organizarse o consultarse por autores, revistas, fecha y otras características de los trabajos, o según el tema, la pertinencia, leído/no leído, favoritos, etc. Los paquetes de software especialmente útiles para la gestión de referencias son [EndNote](#), [Mendeley](#) and [RefWorks](#).

Cuando se crea una lista de artículos pertinentes, es necesario examinar detenidamente cada artículo, o al menos su resumen, para decidir si el artículo es adecuado para una revisión detallada. La revisión de la literatura debe ser exhaustiva y no limitarse a unos pocos artículos, unos pocos años o una metodología específica. En una revisión de la literatura se debe examinar si las preguntas de investigación primaria se han investigado previamente y cuáles fueron los resultados (en este caso se debe explicar por qué es importante volver a estudiarlas), si aparecen preguntas de investigación nuevas o diferentes y si las preguntas de investigación primaria deben adaptarse o cambiarse de acuerdo con los resultados de la literatura. La revisión de la literatura también puede ofrecer posibles respuestas a las preguntas de investigación, o ayudar a identificar las teorías que se han utilizado anteriormente para analizar preguntas comparables ([Nayak y Singh 2015](#)).

Una revisión de la literatura es un informe evaluativo bien estructurado y razonado de estudios previos relacionados con el tema de investigación. La revisión proporciona la descripción, evaluación y crítica de esta literatura. Proporciona una base teórica para la investigación y ayuda a determinar sus principales características. Una revisión de la literatura es más que una recopilación de información; también comprende la identificación de la relación entre la literatura y el tema de investigación.

Objetivos del estudio

A diferencia de la formulación del problema, que describe el objetivo de la investigación, los objetivos ofrecen una definición de las medidas concretas que se adoptarán para alcanzar ese objetivo. Describen lo que esperamos lograr al llevar a cabo la investigación. Puede haber un objetivo general seguido de una lista de objetivos específicos. El objetivo general describe la forma en que planeamos abordar el problema: por ejemplo, necesitamos encontrar la respuesta al problema A aplicando la acción B. A continuación, los objetivos específicos describen la acción B con más detalle. Normalmente hay de dos a cuatro objetivos específicos. Así pues, los objetivos explican cómo vamos a responder a la pregunta de la investigación. Por lo tanto, es un requisito previo que la pregunta de investigación sea clara. Los objetivos suelen comenzar con palabras como: identificar, establecer, describir, determinar, estimar, desarrollar, comparar, analizar, recoger, etc. ([Nayak y Singh 2015](#)). Los buenos objetivos de investigación deben ser:

- breve y preciso
- enumeradas en un orden lógico, ya que un objetivo puede referirse a otro
- realistas, lo que significa que es posible lograrlos dentro del plazo y los recursos disponibles

- expresado en términos operativos
- sin cambios desde el principio del estudio (no deben ser objetivos móviles)

Hipótesis

Una hipótesis sugiere una solución al problema que se va a probar empíricamente durante la investigación y que al final será rechazada o apoyada según los resultados observados. La hipótesis es una suposición o una propuesta de generalización ([Nayak y Singh 2015](#)). La hipótesis puede ser desarrollada a través de la analogía, la inducción, la deducción o la intuición. La característica más importante de una hipótesis es que debe ser falsificable, lo que significa que puede ser refutada.

Las hipótesis deben ser fuertes, no débiles. Un ejemplo de hipótesis débil es "las altas concentraciones de fósforo están relacionadas con el crecimiento de las algas", porque no indica ni la dirección (es decir, si la relación es positiva o negativa), ni la causalidad (es decir, si las altas concentraciones de fósforo causan el crecimiento de las algas, o si el crecimiento de las algas causa altas concentraciones de fósforo). Una hipótesis más fuerte sería "las altas concentraciones de fósforo están positivamente relacionadas con el crecimiento de las algas", lo que indica la direccionalidad pero no la causalidad; y la hipótesis más fuerte sería "las altas concentraciones de fósforo estimulan el crecimiento de las algas", lo que postula tanto la dirección como la causalidad.

11.2.3 Diseño de protocolos

El diseño del protocolo es un plan escrito de las actividades que se deben llevar a cabo para responder suficientemente a la pregunta de investigación planteada. Incluye la elección de un método de investigación para la reunión de datos y la planificación de una estrategia de muestreo apropiada para seleccionar una muestra de la población objetivo. El protocolo debe especificar con precisión:

1. las características del sistema de ensayo (especie, fuente de suministro, número, intervalo de peso corporal, sexo, edad, etc.)
2. información detallada sobre el diseño experimental, incluida una descripción del procedimiento cronológico del estudio, todos los métodos, materiales y condiciones, cuántas muestras, qué tipo de muestras, cuántos paralelos, los niveles de dosis y/o concentración(es), el tipo y la frecuencia de los análisis, las mediciones, observaciones y exámenes que se realizarán, y los métodos estadísticos que se utilizarán.

Una muestra es un grupo más pequeño de una población. La muestra debe representar a toda la población a fin de permitir la generalización de los resultados de la muestra de la investigación a la población en su conjunto. Un plan de muestreo adecuado también permite utilizar los fondos de la investigación de manera eficaz en función de los costes, así como un ritmo, flexibilidad y precisión de la investigación adecuados. Existen dos tipos de muestreo ([Nayak y Singh 2015](#)): el muestreo probabilístico y el muestreo no probabilístico (Tabla 1). En el muestreo probabilístico hay una

oportunidad igual para cada sujeto o unidad que se seleccione de la población, mientras que en el muestreo no probabilístico todos los individuos de la población no tienen la misma oportunidad/probabilidad de ser seleccionados. Este tipo de muestreo se realiza cuando es imposible hacer un muestreo aleatorio, cuando la investigación tiene un tiempo, un presupuesto o una fuerza de trabajo limitados, o cuando la investigación no tiene como objetivo la generalización a toda la población. En general, el muestreo no probabilístico es más apropiado para las ciencias sociales que para las ciencias naturales. Sin embargo, puede utilizarse en un estudio preliminar para obtener alguna información básica sobre la población y para informar sobre el tipo de muestreo probabilístico que debe elegirse en un experimento. Por ejemplo, queremos estudiar el crecimiento de la lechuga en la acuaponía, pero no sabemos si hay diferencias entre las plantas que crecen en los bordes de una balsa y las que crecen en el centro, de modo que en un estudio preliminar podríamos tomar unas pocas plantas del borde y otras del centro (muestreo no probabilístico), y medirlas. Si no hay diferencias entre ellas, entonces se puede utilizar un muestreo aleatorio simple para el experimento, pero si hay diferencias, entonces sería mejor utilizar un muestreo aleatorio sistemático o tal vez incluso un muestreo por conglomerados.

Además de seleccionar el tipo de muestreo apropiado, también hay que definir el tamaño de la muestra. El tamaño de la muestra depende de las características de una población, principalmente de lo heterogénea que sea. Además de esto, el tamaño de la muestra también está relacionado con el número de variables que queremos analizar, los procedimientos estadísticos que queremos utilizar, la precisión deseada y el número de comparaciones que queremos hacer. Por otra parte, el tamaño de la muestra también puede estar limitado por el tiempo disponible y la financiación.

Tabla 1: Tipos de muestreo.

	Tipo	Como se muestrea	Explicación adicional
MUESTREO PROBABILÍSTICO	Aleatorio simple	Seleccionando las unidades básicas de manera que cada unidad de la población tenga las mismas posibilidades de ser elegida	<i>Una muestra aleatoria simple no tiene un sesgo de muestreo</i>
	Aleatorio sistemático	Escogiendo una unidad al azar y escogiendo unidades adicionales a intervalos uniformes hasta que se consiga el número de unidades requerido	<i>Por ejemplo, las verduras que crecen en una línea y escogemos una de cada cinco verduras</i>
	Aleatorio Estratificado	Escogiendo independientemente una muestra aleatoria simple individual de cada estrato de la población	<i>Una población se divide en diferentes estratos (grupos) en función de características o variables específicas. El número de unidades que elegimos al azar de cada estrato tiene que estar alineado con el tamaño del estrato, ya que los estratos pueden ser de diferentes tamaños; por ejemplo, podemos</i>

			<i>decidir elegir el 10% de unidades de cada estrato</i>
	Clúster	La población se divide en clústeres (grupos), y la muestra se recoge escogiendo unos pocos grupos mediante un simple muestreo aleatorio. La muestra comprende una unidad de clúster seleccionados al azar	<i>Los conglomerados se suelen hacer según unidades geográficas (por ejemplo, todas las regiones de un país) mientras que el análisis se hace en conglomerados seleccionados al azar (se selecciona al azar el número de regiones requerido, que representa una muestra)</i>
MUESTREO NO-PROBABILÍSTICO	Conveniencia	Se recoge una muestra de los casos que están disponibles para el estudio, es decir, listos para participar	
	A propósito	Se recoge una muestra de casos que tienen características similares. Las características se seleccionan con el fin de encontrar respuestas a una pregunta específica y pueden ser muy similares/diferentes, muy típicas o críticas. El requisito previo es que los investigadores conozcan ya algunas características de la población	<i>A diferencia del muestreo probabilístico estratificado, en el que hay una oportunidad igual de ser seleccionado para cada unidad en los mismos estratos, en el caso del muestreo intencional la muestra no se selecciona al azar</i>
	Bola de nieve	Es donde los sujetos de estudio existentes reclutan a los futuros sujetos de entre sus conocidos	<i>Se dice que el grupo de muestra crece como una bola de nieve rodante. También llamado muestreo en cadena, muestreo en cadena de referencia, muestreo de referencia</i>
	Cuota	Divide la población en diferentes grupos similares a los estratos en el muestreo estratificado (por ejemplo, edad, sexo)	<i>Se elige al azar un número proporcional o desproporcionado de unidades de cada grupo</i>

Existen varios métodos para definir el tamaño de la muestra a utilizar, entre ellos la metodología de decisión de Neyman-Pearson o el análisis de potencia ([Neyman y Pearson 1933](#)). Para estimar el tamaño de muestra necesitamos una idea de la varianza de la variable de la literatura. La varianza (y la desviación estándar) dependerá de la variable considerada y de la especie a evaluar.

Los datos de las ciencias naturales se recogen principalmente a partir de observaciones y mediciones realizadas con diferentes instrumentos de laboratorio y de campo. Los registros originales de los instrumentos y la documentación, o sus copias verificadas, que son el resultado de las observaciones y actividades originales, representan datos brutos. Los datos brutos pueden ser, por ejemplo, datos registrados de instrumentos automatizados, imágenes microscópicas, mediciones individuales de instrumentos de laboratorio, fotografías, observaciones escritas a mano y datos de mediciones analógicas. Los datos brutos deben ser convertidos a un formato numérico legible por computadora,

como en una hoja de cálculo o un archivo de texto, para que puedan ser analizados por programas informáticos como [R](#) o [SPSS Statistics](#).

Un sistema de prueba o unidad de análisis es cualquier sistema biológico, químico o físico, o su combinación, para ser usado en un estudio. Es un elemento muy básico de la investigación. La unidad de análisis puede ser un organismo o su parte, una colonia o colectivo, o un objeto que sea el objetivo de la investigación. La unidad de análisis tiene que definirse al principio del diseño de un protocolo, ya que afecta a los instrumentos utilizados y a los procedimientos adoptados durante la investigación. Además, siempre se debe elegir el nivel más bajo de unidad (por ejemplo, recopilar datos de tejidos vegetales separados, no de toda la planta en conjunto).

Un elemento de ensayo es un elemento que es objeto de un estudio y un elemento de referencia ("elemento de control") es un elemento utilizado para proporcionar un control para la comparación con el elemento de ensayo. Un lote es una cantidad específica, o una porción de artículos de prueba o de referencia, formada por un ciclo de experimentación definido de manera que se espera que todos los artículos tengan una característica uniforme.

La mayoría de las propuestas de proyectos incluyen una sección sobre los aspectos éticos de los protocolos científicos que se utilizarán. Esto suele implicar la aprobación previa de los métodos por un comité de ética de la institución de origen, que en su mayoría considera aspectos relacionados con el bienestar de los animales, en este caso el bienestar de los peces. Esos comités formulan una serie de preguntas que incluyen la justificación de la investigación, su impacto en los animales y cómo se puede prevenir la angustia. Para obtener un conjunto de directrices sobre ética, bienestar animal y procedimientos de muestreo adecuados, véase el [NC3Rs Experimental Design Assistant](#), cuyo principal objetivo es reemplazar, perfeccionar y reducir el número de animales utilizados en la experimentación. Se cree que en un futuro próximo los científicos podrán conseguir que sus procedimientos y protocolos sean aprobados por las revistas de destino antes de publicar los resultados, y así tener una cierta garantía de que sus estudios serán publicados. Este movimiento se denomina pre-registro ([Nosek et al. 2018](#)), y tiene por objeto reforzar las metodologías y los resultados científicos en general. Por último, muchas revistas piden ahora que los datos brutos y los resultados de los estudios publicados se pongan a disposición de los interesados en bases de datos en línea, por ejemplo, utilizando el Data Research Item de [Research Gate](#).

Por **buenas prácticas de laboratorio** (BPL) se entiende un sistema de calidad que se refiere al proceso de organización y a las condiciones en que se planifican, realizan, supervisan, registran, archivan e informan los estudios ([OECD 1998](#)).

Los **Procedimientos Operativos Estándar** (POE) son procedimientos documentados que describen cómo realizar pruebas o actividades que normalmente no se especifican en detalle en los planes de estudio o en las directrices de las pruebas. Los PON incluyen:

1. el mantenimiento de los registros, incluida la caracterización de los artículos de ensayo y de referencia, la fecha de recepción, la fecha de caducidad, las cantidades recibidas y utilizadas en los estudios
2. La identificación de los procedimientos de manipulación, muestreo y almacenamiento a fin de garantizar en la medida de lo posible la homogeneidad y la estabilidad y evitar la contaminación.
3. Los contenedores de almacenamiento deben estar marcados con información de identificación, fecha de caducidad e instrucciones específicas de almacenamiento.

Después de decidir el objeto de estudio, qué medir y cómo reunir y analizar los datos, es el momento de ejecutar la investigación. La ejecución de la investigación también incluye pruebas preliminares del equipo, los instrumentos de laboratorio, el muestreo y los análisis. Las **pruebas preliminares** son una parte importante del proceso de investigación, ya que permiten detectar posibles problemas en el diseño de la investigación y comprobar los instrumentos de laboratorio utilizados en el estudio para que sean fiables y proporcionen medidas válidas. Después de las pruebas preliminares se puede optimizar el diseño de la investigación y luego se puede ejecutar la investigación real.

Todos los datos generados durante la investigación deben registrarse directamente, con prontitud, precisión y legibilidad en el **diario de laboratorio**. Estas anotaciones deben estar firmadas y fechadas. Para garantizar la trazabilidad, un proyecto de investigación debe tener una identificación única, y todas las muestras, especímenes, archivos de datos, etc. relativos al estudio deben llevar esta misma identificación. Cualquier cambio en los datos brutos debe hacerse de manera que no se elimine la entrada anterior, debe indicarse la razón de cualquier cambio, y el cambio debe estar fechado y firmado por la persona que lo hizo.

11.2.4 Análisis de los resultados

Tablas y figuras

Las tablas y las cifras son la forma más rápida de comunicar grandes cantidades de información compleja. Tienen que ser diseñadas cuidadosamente. Una buena tabla o figura debe presentar los datos de manera simple, clara y nítida, y permitir que el lector comprenda los resultados sin tener que mirar otras secciones del documento; es decir, las tablas y figuras deben ser auto-explicativos y comprensibles incluso cuando se extraen del texto; por lo tanto, los títulos claros e informativos son cruciales. Una buena figura (gráfico o dibujo) debe tener:

- sólo la información necesaria
- letras suficientemente grandes
- un marco
- una leyenda que explica todo lo necesario
- un formato gráfico en alta resolución (>300 dpi)

Una buena tabla debería tener:

- una celda separada para cada valor

- sólo los bordes de las líneas horizontales
- un número razonable de dígitos después de un punto decimal

Las tablas más grandes se publican en suplementos a los documentos científicos.

Para informar de los resultados, se deben utilizar unidades de medida válidas y reconocidas internacionalmente. En la ciencia, la industria y la medicina se utiliza el Sistema Internacional de Unidades (abreviado SI). En algunos lugares geográficos (por ejemplo, en los Estados Unidos) se utiliza el Sistema Imperial, que incluye unidades como galones, pies, millas, libras y ppm. Este sistema no es apropiado para las publicaciones científicas internacionales. El sistema del SI incluye siete unidades básicas (Tabla 1).

Tabla 1: Siete unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades.

Cantidad	Unidad	Símbolo
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Temperatura	kelvin	K
Corriente eléctrica	ampere	A
Cantidad de una sustancia	mole	mol
Intensidad lumínica	candela	cd
Distancia	meter	m

La elección metodológica más importante que hacen los investigadores se basa en la distinción entre datos cualitativos y cuantitativos. Los datos cualitativos adoptan la forma de descripciones basadas en el lenguaje o las imágenes, mientras que los datos cuantitativos adoptan la forma de números. La elección de la metodología a utilizar dependerá de las preguntas de su investigación, cuya formulación se basa, por consiguiente, en su perspectiva de investigación. La investigación en ciencias sociales puede generar datos tanto cualitativos como cuantitativos, normalmente mediante el uso de encuestas. Los datos se recogen de un grupo de prueba predefinido con el fin de obtener información y comprensión sobre diversos temas de interés. Existen varios tipos diferentes de métodos de encuesta, entre ellos cuestionarios, debates informales, entrevistas en profundidad, grupos de discusión y estudios de casos.

Los **datos cualitativos** son más ricos y generalmente se basan en una perspectiva subjetiva. Sin embargo, si bien esto suele ser así, no siempre lo es. La investigación cualitativa apoya una comprensión a fondo de la situación investigada y, debido a las limitaciones de tiempo, suele abarcar una pequeña muestra de participantes. Por esta razón, los resultados se limitan a la muestra estudiada y no pueden generalizarse a otros contextos o a la población en general. Entre los métodos populares

para generar datos cualitativos figuran las entrevistas semiestructuradas o no estructuradas, las observaciones de los participantes y el análisis de documentos. Un buen análisis cualitativo suele requerir más tiempo que un análisis cuantitativo.

Por otra parte, los **datos cuantitativos** pueden ser más fáciles de reunir y analizar, y se basan en una muestra amplia. Las mediciones cuantitativas implican la reunión de datos que pueden medirse "objetivamente" con números. Los datos se analizan mediante comparaciones numéricas y análisis estadísticos. Por esta razón, parece más "científica" y puede resultar atractiva para las personas que buscan respuestas claras a preguntas causales específicas. El análisis cuantitativo suele ser más rápido de llevar a cabo, ya que implica el uso de equipos y programas informáticos de medición. Debido al gran número de muestras, permite la generalización a un grupo más amplio que la muestra de investigación.

La investigación experimental, por otra parte, es más común en la ciencia ambiental. En los experimentos, un investigador manipula una variable y controla las otras variables para explorar las relaciones causa-efecto. Los datos reunidos son cuantitativos y pueden analizarse utilizando métodos estadísticos apropiados.

11.2.5 Publicación del informe de la investigación

Un experimento no se completa hasta que los resultados se han publicado y comprendido. La publicación de los resultados es importante para permitir la reproducibilidad de los experimentos; por lo tanto, los métodos se muestran por separado de los resultados. Como declaró el Consejo de Editores de Biología (1968) "una publicación científica primaria aceptable debe ser la primera divulgación de una investigación que contenga información suficiente para permitir a los colegas: 1) evaluar las observaciones, 2) repetir los experimentos y 3) evaluar los procesos intelectuales; además, debe tener un formato atractivo y ser transparente, esencialmente permanente, disponible para la comunidad científica sin restricciones, y que pueda ser examinada periódicamente por uno o más de los principales servicios secundarios reconocidos" (por ejemplo, Biological Abstracts, Chemical Abstracts) ([CBE 1968](#)).

La buena escritura científica es una escritura sencilla. La ciencia es compleja, pero la escritura utilizada para describirla no tiene por qué serlo. La mejor escritura es la que da el sentido en el menor número de palabras simples. Escritura simple y de alta calidad:

- aumenta las posibilidades de aceptación para la publicación
- aumenta el impacto de una publicación en la comunidad de investigación
- acelera la comprensión y la aceptación de la investigación
- aumenta la fe de los lectores en la calidad de la investigación

Los manuscritos mal escritos y complicados molestan a los lectores, revisores y editores de revistas, y dificultan su comprensión de conceptos científicos complicados. Es más probable que se acepte una presentación si:

- describe la investigación que hace avanzar el campo
- está cuidadosamente preparado y formateado
- utiliza un lenguaje claro y conciso
- sigue las normas éticas

El proceso de publicación:

1. Una necesidad/deseo de publicar
2. Elija una revista de acuerdo con: los temas de la revista, la audiencia de la revista, los tipos de artículos, la reputación de la revista, el factor de impacto o los requisitos personales. Podemos encontrar las revistas adecuadas comprobando dónde se han publicado artículos similares y mediante búsquedas en línea
3. Lea los números anteriores
4. Escribir el primer borrador
5. Usa un amigo crítico para el primer control
6. Refinar los borradores posteriores
7. Comprobar que el artículo se adhiere a las directrices del autor
8. Corregir y presentar

Puede haber más de un autor de una publicación científica. Los coautores son las personas que hicieron contribuciones intelectuales sustanciales a un estudio que va a ser publicado. Es importante mantener el número de coautores en una cantidad razonable: el primer autor suele ser el que dirigió la investigación e hizo la mayoría de los escritos, y el último autor suele ser el que dirige el grupo de investigación. Entre ambos se acostumbra poner a los coautores en orden alfabético por sus apellidos, por ejemplo Wilson, T., Abercombie, J., Brown, E., Curwen, H., Davenport, K. y Albert, W.

Los manuscritos científicos son manuscritos revisados por pares en revistas y libros que suelen tener un factor de impacto (FI). El FI se utiliza para comparar diferentes revistas dentro de un determinado campo. Los informes, documentos de conferencias, carteles y charlas no son manuscritos científicos y no tienen FI. El FI es una medida que refleja el **número medio anual de citas** de los artículos de esa revista. En el caso de las revistas que figuran en los informes de citaciones de revistas, el FI se calcula anualmente para el año anterior, siguiendo la fórmula que figura a continuación:

$$IF_y = \frac{\text{Citations}_{y-1} + \text{Citations}_{y-2}}{\text{Publications}_{y-1} + \text{Publications}_{y-2}}$$

Todos los artículos científicos siguen la misma estructura prescrita. Esta estructura proporciona una línea lógica a través de los contenidos, permite que los manuscritos sean predecibles y fáciles de leer, presenta un "mapa" para que los lectores puedan encontrar rápidamente los contenidos de interés en cualquier manuscrito y, por último, pero no por ello menos importante, recuerda a los autores qué contenidos deben incluirse. La estructura es la siguiente:

- Título
- Resumen
- **Introducción**
- **Materiales y métodos**
- **Resultados**
- **Discusión**
- Conclusión
- Agradecimientos
- Referencias

Además de los capítulos indicados, cada manuscrito suele incluir también tablas y figuras, y datos complementarios en un archivo o archivos separados. El contenido principal del trabajo científico se describe en los capítulos centrales: Introducción (qué problema vamos a estudiar), Materiales y Métodos (cómo vamos a estudiar el problema), Resultados (qué hemos descubierto) y Discusión (qué significa). Según las mayúsculas de los capítulos, esta estructura se denomina formato **IMRaD**.

Título y resumen

El título y el resumen son las partes más visibles del artículo. Pueden verse en el sitio web de la revista y en las bases de datos (por ejemplo, Science Direct, PubMed, etc.); por lo tanto, es importante prestar la debida atención a su formulación. Un resumen bien preparado permite a los lectores identificar el contenido básico de un documento de manera rápida y precisa, para determinar su pertinencia para sus intereses y, por consiguiente, decidir si necesitan leer el documento en su totalidad (American National Standards Institute 1979). Leer un artículo científico no es lo mismo que leer una historia de detectives. Queremos saber desde el principio que el mayordomo lo hizo (Ratnoff 1981).

El título debe ser tan preciso, informativo y completo como sea posible. Le da la primera información al lector que luego decide si continuar leyendo o no. Por lo tanto, es crucial que el título sea lo más descriptivo posible. Para ello, se deben utilizar términos específicos más que generales; sin embargo, el título debe ser comprensible y razonablemente sencillo. El título no suele incluir abreviaturas, acrónimos o iniciales. Todos los nombres científicos deben escribirse en su totalidad (por ejemplo, *Lactuca sativa*, en lugar de *L. sativa*).

El resumen suele contener entre 200 y 300 palabras. Debe esbozar los aspectos más importantes del estudio: debe incluir los antecedentes, la metodología y los resultados, pero con detalles limitados. Sólo debe reproducir los hechos tratados en el manuscrito. Es aconsejable incluir sinónimos de las palabras y conceptos que figuran en el título y, en cuanto a la escritura científica propiamente dicha,

debe utilizarse un estilo de redacción comprensible y razonablemente sencillo. Por otra parte, el resumen no debe incluir abreviaturas ni citar referencias.

Introducción

En la introducción se debe proporcionar la información necesaria para comprender el estudio y las razones por las que se realizaron los experimentos. Debe explicar qué pregunta/problema se estudió y dar información de estudios anteriores; por lo tanto, incluye numerosas citas. Estas últimas deben ser bien equilibradas, actuales y pertinentes. La introducción no es una revisión de la literatura, pero se pueden citar revisiones de la literatura ([Nayak y Singh 2015](#)).

Materiales y métodos

Los materiales y métodos proporcionan todos los detalles de **cómo** se llevó a cabo el estudio. Las diferentes metodologías que se utilizaron en el estudio pueden dividirse por subtítulos. Los nuevos métodos que se utilizaron deben describirse con suficiente detalle para que otro investigador pueda reproducir el experimento. Se deben citar los métodos utilizados y publicados anteriormente, y se debe describir con exactitud cualquier modificación hecha a los métodos establecidos. Se deben enumerar todas las pruebas y parámetros estadísticos. El capítulo sobre materiales y métodos debe escribirse en tiempo pasado.

Resultados

En el apartado de resultados se ofrece una visión general de los experimentos, sin repetir los detalles que se describieron en los métodos. Además de esto, el investigador debe revisar críticamente los datos y seleccionar los resultados que van a ser publicados. Una simple transferencia de los datos del diario de laboratorio al manuscrito no será suficiente para una presentación eficiente de los resultados. La presentación debe ser transparente y representativa y puede hacerse a través del texto o de tablas y figuras. Los datos ya descritos en las tablas o figuras no deben volver a describirse en detalle en el texto. Las tablas y las figuras deben citarse en el texto sólo brevemente. Si sólo hay una o unas pocas mediciones de una característica, entonces suele describirse en el texto, mientras que si se trata de mediciones repetidas, entonces una tabla o gráfico es más representativo. Según la revista, los resultados pueden formar un capítulo individual o unirse al debate en un solo capítulo. Los resultados deben escribirse en un orden lógico y dividirse en subsecciones con títulos cortos e informativos. Los resultados de los análisis estadísticos también deben incluirse y presentarse en el texto. El capítulo de resultados debe escribirse en tiempo pasado, mientras que el tiempo presente se utiliza para referirse a tablas y figuras.

Discusión

La mayor parte del apartado de discusión y conclusiones debe ser una interpretación de los resultados. Los subcapítulos pueden formarse siguiendo el marco lógico de los subcapítulos del capítulo de resultados. En el capítulo de discusión, los resultados de la investigación se comparan con estudios anteriores. También hay que describir las limitaciones de la investigación, mencionar los resultados no concluyentes y, si los resultados son preliminares, señalar las sugerencias para futuros estudios.

Las principales conclusiones deben repetirse al final del debate, o en un capítulo de conclusiones separado.

Referencias

Al escribir un manuscrito científico, siempre debe quedar claro cuáles son los pensamientos, las evaluaciones y el texto de los autores de este estudio, y lo que se ha derivado de los autores de otras publicaciones. Se debe proporcionar la fuente de cualquier declaración que no provenga de los autores del manuscrito, escribiendo el autor y el año de publicación - por ejemplo, el micro-elemento níquel juega un papel importante en la descomposición de la urea en los sistemas acuapónicos (Komives y Junge 2018), mientras que la cita completa se da en las referencias - por ejemplo, Komives, T. y Junge, R. 2018. Importancia del níquel como nutriente en los sistemas acuapónicos - algunas consideraciones teóricas. *Ecocycles* 4 (2), 1-3. Las referencias deben escribirse en el estilo exigido por la revista en la que se va a publicar el manuscrito y, por lo tanto, el estilo de citación de la revista en las “Instrucciones para los Autores” debe ser cuidadosamente comprobado. Existen varios programas informáticos que permiten una gestión adecuada de las referencias (EndNote, Zotero, RefWorks, Mendeley, etc.; véase la sección 6.2.2.2).

Plagio

El plagio es hacer trampa y está moralmente mal visto. Es el uso de la obra de otro sin reconocimiento, como si fuera la tuya. Para evitarlo, uno tiene que saber cómo documentar el uso del trabajo de otras personas. Un investigador es responsable de referenciar el uso de las fuentes en cada trabajo que escribe. Hay dos maneras de referenciar los trabajos de otros autores:

- a) **Parafrasear** significa resumir las ideas de otro autor en sus propias palabras, sin dejar de referirse a la fuente original. Las comillas no son necesarias. Una declaración bien parafraseada es concisa y demuestra la comprensión del investigador de lo que ha leído. Al parafrasear o referirse a una idea de otra publicación, es beneficioso proporcionar un número de página o de párrafo para la referencia, especialmente cuando se cita un texto largo y complejo (por ejemplo, un libro).
- b) Las **citas directas** significan una repetición directa de una afirmación y se utilizan raramente en la escritura científica. Las citas deben utilizarse de manera económica, principalmente para citas históricas o políticas de personas eminentes. Deben evitarse las citas de las conclusiones de investigaciones anteriores, ya que el lector también desea ver las opiniones y el análisis de los escritores sobre lo que se ha leído, que no se da en la cita directa. Cuando se utiliza una cita directa, es necesario poner comillas al principio y al final de la cita.

11.3 Metodología científica aplicada a la acuaponía

Los siguientes estudios de casos ilustran algunos de los diferentes tipos de metodologías que pueden utilizarse para las investigaciones relacionadas con la acuaponía. El primer estudio de caso es un

ejemplo de investigación en ciencias sociales realizada mediante un cuestionario. Un cuestionario es un instrumento para reunir y registrar información sobre una cuestión de interés particular de manera normalizada. La información de los cuestionarios tiende a clasificarse en dos grandes categorías: hechos y opiniones; muy a menudo incluyen preguntas sobre ambos. Las preguntas pueden ser no estructuradas o puede ser estructuradas o, como en el estudio de caso que figura a continuación, una combinación de ambas. En las preguntas no estructuradas se pide a los encuestados que den una respuesta en sus propias palabras, mientras que en las preguntas estructuradas se pide a los encuestados que seleccionen una respuesta de un conjunto determinado de opciones. Los cuestionarios estructurados suelen estar asociados a la investigación cuantitativa, es decir, a la investigación que se ocupa de los números (¿cuántos?) Las respuestas a las distintas preguntas de un cuestionario estructurado pueden agregarse y utilizarse para el análisis estadístico ([Nayak y Singh 2015](#)).

Caso de estudio 1	
Love, D.C. et al. 2014. An international survey of aquaponics practitioners . <i>PLoS ONE</i> 9(7), e102662.	
Meta	Hacer un seguimiento de la acuaponía en los Estados Unidos y proporcionar información que pueda servir de base a los esfuerzos de política, investigación y educación en relación con la acuaponía a medida que madura y posiblemente evolucione hacia una forma de agricultura convencional.
Objetivo	Documentar y analizar los métodos de producción, las experiencias, las motivaciones y la demografía de los profesionales de la acuicultura, tanto en los Estados Unidos como a nivel internacional
Metodología	<ol style="list-style-type: none"> 1. Examen de la bibliografía para determinar si existen instrumentos de encuesta adecuados para reunir información sobre las prácticas de producción y las actitudes de las personas que se dedican a la acuicultura 2. Elaboración de un cuestionario basado en los métodos descritos anteriormente para las encuestas por Internet y las encuestas sobre prácticas agrícolas 3. Prueba previa del proyecto de cuestionario para la comprensión del contenido con 10 personas que eran expertos o profesionales de la acuicultura y representaban a los grupos a los que se dirigía la encuesta (es decir, agricultores comerciales, educadores, aficionados y organizaciones sin fines de lucro) 4. Encuesta en línea usando el método de muestreo de la bola de nieve para llegar al mayor número de personas posible. Dieciocho organizaciones distribuyeron el cuestionario a sus miembros o suscriptores utilizando sus propios medios de comunicación preferidos (correo electrónico, listas de correo electrónico, boletines en línea, correo electrónico directo y medios sociales). El incentivo ofrecido por la participación en la encuesta fue la posibilidad de ganar una de las cuatro tarjetas de regalo de 75 dólares. 5. De los 1.084 encuestados, 809 cumplían los criterios de inclusión (tenían 18 años o más, sabían leer en inglés y habían operado y mantenido un sistema acuapónico en los 12 meses anteriores), y sus respuestas constituyen la muestra 6. Los datos del software de encuestas (Qualtrics) se exportaron y analizaron en Excel o SPSS, y las cifras se produjeron utilizando Prism. Se realizaron pruebas de test t, para comparar la demografía de los encuestados por sexo, con una

	significación fijada en un alfa de 0,05. El error fue reportado como desviación estándar
Limitaciones de la investigación	La utilización del método de muestreo de bola de nieve y de los medios de comunicación social para identificar a los posibles participantes significa que no es posible calcular la tasa de respuesta a la encuesta y que la generalización para los profesionales de la acuicultura es limitada, aparte de los que respondieron al estudio. El hecho de que la mayoría de los encuestados fueran de los Estados Unidos (80%) sugiere que los resultados pueden estar sesgados porque la encuesta se originó en los Estados Unidos y no se ofreció en idiomas distintos del inglés

Los cuestionarios son una de las formas más asequibles de reunir datos cuantitativos. Las encuestas en línea, en particular, pueden tener un coste muy bajo y un alcance generoso, y los resultados pueden analizarse rápida y fácilmente para poner de relieve las tendencias de los datos. Sin embargo, el uso de los cuestionarios presenta una serie de inconvenientes. Si bien todo investigador espera respuestas concienzudas, no hay forma de saber si el encuestado ha entendido realmente la pregunta antes de responder. A veces, las respuestas se elegirán antes de leer completamente la pregunta o las posibles respuestas, y a veces los encuestados se saltarán las preguntas, o podrán elegir en fracciones de segundo. Todo esto afectará a la validez de los datos recogidos. Si bien los cuestionarios pueden revelar pautas y tendencias en los datos, no permiten comprender sus causas.

El segundo estudio monográfico es un ejemplo de investigación en ciencias sociales que utiliza un enfoque de estudio monográfico comparativo y entrevistas semiestructuradas para generar datos cualitativos.

Caso de estudio 2	
Laidlaw, J. y McGee, L. 2016. Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne . <i>Local Environment</i> 21 (5), 573–590.	
Meta	Comprender el contexto socioeconómico y cultural esencial para la construcción de comunidades y ciudades con soberanía alimentaria, en particular la función potencialmente catalizadora de las empresas sociales de acuaponía urbana en el fomento de una disposición cívica más amplia y una mayor receptividad hacia la soberanía alimentaria
Objetivo	Explorar las experiencias de los interesados en la creación de empresas comunitarias de acuicultura urbana para comprender los factores internos y externos que influyen en su éxito o fracaso
Metodología	Enfoque comparativo de los estudios de casos que implican: <ol style="list-style-type: none"> 1. Entrevistas cualitativas no estructuradas con los principales interesados en el proyecto en dos empresas comunitarias de acuaponía urbana y una encuesta en línea de una cohorte más amplia de interesados. El tamaño de la muestra es de 23 (7 interesados clave del proyecto y otros 15 interesados) 2. Análisis de la documentación y las observaciones del proyecto recopiladas mediante una serie de visitas al lugar

	3. Análisis del discurso de las transcripciones de la entrevista
Limitaciones de la investigación	El pequeño tamaño de la muestra (partes interesadas asociadas a dos empresas de acuicultura) hace que la generalización de los resultados sea limitada. No se indican los métodos utilizados para el análisis del discurso

Los estudios de casos comparativos como éste implican el análisis y la síntesis de las similitudes, diferencias y pautas de dos o más casos que comparten un enfoque u objetivo común. Dado que el objetivo es generar una buena comprensión de los casos y del contexto del caso, entre los diversos métodos de reunión de datos empleados suelen predominar métodos como las visitas a campo, la observación, las entrevistas y el análisis de documentos. Los estudios de casos comparativos pueden incorporar datos tanto cualitativos como cuantitativos y, si bien pueden requerir mucho tiempo, pueden generar abundantes detalles sobre el contexto y las características de dos o más casos de fenómenos específicos.

El campo de la acuaponía es bastante nuevo, ya que el primer documento científico en el que se utiliza específicamente el término apareció en una revista de impacto en 2004¹. Antes de eso se habían hecho muchos progresos, a saber, por James Rackocy y su grupo (Universidad de las Islas Vírgenes), pero sus publicaciones son más demostrativas y menos experimentales. Según la Web of Science, desde 2004 se han publicado más de 60 artículos sobre acuaponía revisados por homólogos, pero muchos artículos se centran más en la promoción del potencial de la acuaponía que en la realización de ensayos científicos propiamente dichos. Parte del problema radica en disponer de suficientes réplicas y en establecer grupos de control adecuados. Por lo general, es bastante difícil y lleva mucho tiempo establecer un sistema acuapónico, con su filtro, bacterias, peces y plantas, y mucho menos establecer varias unidades o réplicas por tratamiento. En los ensayos de alimentación en la acuicultura, por ejemplo, es común tener por lo menos 3 réplicas por tratamiento, siendo cada unidad experimental generalmente un tanque, no los peces individuales. Esto significaría, por ejemplo, que si se comparan los efectos de la adición de extracto de ajo al alimento, se necesitarían tres tanques de peces a los que se añade el alimento de ajo y tres tanques más a los que se añade el alimento de control. Hacer algo similar usando la acuaponía es más complejo. Por ejemplo, si queremos comparar el efecto del pH del agua en el bienestar de los peces y el crecimiento de la lechuga, necesitaríamos seis unidades acuapónicas separadas, tres de ellas con un pH específico y otras tres con otro nivel de pH, y las seis unidades necesitarían tener peces y lechuga en las mismas densidades de población. Por lo tanto, el coste de cada experimento es mayor que el de los ensayos de alimentación, y la lista de cosas que podrían salir mal también es mucho mayor. Por esta razón, al mirar la literatura, normalmente vemos muy pocas o ninguna réplica, o dos réplicas por tratamiento como máximo.

El tercer estudio de caso es un ejemplo de una metodología de investigación experimental. El propósito del diseño de la investigación experimental es permitir al investigador establecer de manera creíble una relación de causa y efecto. Un experimento es una prueba en condiciones controladas que se lleva a cabo con el fin de apoyar, refutar o validar una hipótesis. Los experimentos permiten comprender la relación causa-efecto al demostrar qué resultado se produce cuando se manipula una determinada variable. Los experimentos varían enormemente en cuanto a su objetivo y escala, pero

siempre se basan en un procedimiento repetible y en el análisis lógico de los resultados. Por consiguiente, la metodología de investigación se explica con gran detalle a fin de que otros investigadores puedan repetir el experimento y, de ese modo, validar o falsificar sus resultados.

Caso de estudio 3	
Goddek, S. y Vermeulen, T. 2018. Comparison of <i>Lactuca sativa</i> growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems . <i>Aquaculture International</i> 2018, 1–10.	
Meta	Verificar las conclusiones de Delaide y otros (2016) ¹ - que el rendimiento de crecimiento de la lechuga en la solución acuapónica complementada supera al de la hidroponía
Objetivo	Comparar el crecimiento de la lechuga en un sistema hidropónico convencional con el de un sistema basado en el RAS
Metodología	Se plantaron dos sistemas de NFT, cada uno de ellos compuesto por 16 mesas de 7,7 metros de largo y un contenedor de recirculación con capacidad para 250 litros, con 38 lechugas por mesa, lo que dio como resultado una densidad de plantación de 12 cabezas de lechuga por metro cuadrado. El tanque de tratamiento hidropónico se llenó continuamente con agua de lluvia y el tanque de tratamiento RAS con un 30% de agua RAS y un 70% de agua de lluvia. El análisis de las concentraciones de micro y macronutrientes en el agua se llevó a cabo una vez cada dos semanas utilizando un equipo de HPLC de acuerdo con la norma ISO 17025. Se seleccionaron al azar 20 brotes de lechuga, se cosecharon y pesaron individualmente siete semanas después de la plantación. Antes de enviar los brotes de lechuga molidos para el análisis del plomo, las cabezas de lechuga de cada sistema se cortaron en pequeños trozos y se secaron (durante 24 h a 103 °C) para determinar su peso seco. El análisis del contenido de nutrientes en la hoja se realizó con un ICP-OES por Groen Agro Control de acuerdo con su protocolo de análisis certificado. El análisis de la significación estadística y el ANOVA se realizaron en R. Se utilizó una prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras para comprobar si las distribuciones de probabilidad de la concentración de Na difieren entre los sistemas hidropónicos y RAS. Se utilizó el programa informático Genstat para realizar un análisis de los componentes principales con respecto a la composición de nutrientes de las lechugas.

11.4 Referencias

American National Standards Institute 1979. *American National Standard for the Preparation of Scientific Papers for Written or Oral Presentation*. American National Standards Institute, New York.

CBE 1968. [Scientific Writing for Graduate Students: A Manual on the Teaching of Scientific Writing](#) (ed. F.P. Woodford). Committee on Graduate Training in Scientific Writing of the Council of Biology Editors. Rockefeller University Press, New York.

Nayak, J.K. y Singh, P. 2015. [Fundamentals of Research Methodology: Problems and Prospects](#). SSDN Publishers y Distributors, New Delhi.

Neyman, J. y Pearson, E.S. 1933. [On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses](#). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 231, 289-337.

Nosek, B.A., Ebersole, C.R., DeHaven, A.C. y Mellor, D.T. 2018. [The preregistration revolution](#). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (11), 2600-2606.

OECD 1998. [OECD Principles of Good Laboratory Practice](#). OECD Series on Principles of Good Laboratory Practice and Compliance Monitoring Number 1. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Ratnoff, O.D. 1981. How to read a paper. In K.S. Warren (ed.) *Coping with the Biomedical Literature*, pp. 95-101. New York, Praeger.

12. DISEÑAR Y CONSTRUIR

12.1 Comenzando a diseñar un sistema acuapónico

No se confunda por la gran variedad de diseños de sistemas acuapónicos que puede encontrar en la literatura o navegando por la web. Cuando se planifica y construye un sistema acuapónico, es necesario seguir unos principios básicos para que el sistema funcione correctamente. Hay grandes diferencias entre los sistemas en cuanto a los costes de inversión, costes de mantenimiento y funcionamiento, la fiabilidad, la salud y la seguridad, el potencial de crecimiento de los peces y los cultivos, y la carga de trabajo total. Por lo tanto, es necesario definir todos estos aspectos durante la fase de diseño.

El diseño de un nuevo sistema acuapónico debe basarse en sus objetivos y requisitos:

- ¿Cuál es el propósito del sistema? (autosuficiencia alimentaria, negocios, decoración, impacto social, enseñanza)
- ¿Cuánto espacio hay disponible? Un sistema comercial necesita más de 1000 m², mientras que la acuaponía “de patio trasero” (*backyard aquaponics*) para la autosuficiencia puede ser más pequeña
- ¿Dónde se colocará el sistema? Si estará en el exterior, los costes de construcción serán menores pero se gastará más energía en calefacción. Si estará en el interior, se gastará más energía en la iluminación
- ¿Cuánto tiempo se puede invertir en la operación? La regulación automática es costosa, mientras que los múltiples controles diarios consumen mucho tiempo (aunque los peces deben ser controlados diariamente de todos modos)
- ¿Debería comprar un kit ya preparado o construir el mío propio? Hay varios diseños de kits disponibles, pero puede que no se ajusten a sus objetivos. Por otro lado, construir requiere conocimiento, aunque los materiales reciclados pueden ser usados para reducir los costes
- Al diseñar, considere todas las actividades para anticipar los procedimientos de rutina, el mantenimiento y la forma de hacer frente a las emergencias.

El diseño y la construcción de un sistema acuapónico sigue una serie de pasos secuenciales: estudio de viabilidad y selección del sitio, diseño básico, diseño detallado, preparación del sitio de construcción y construcción. Los criterios básicos de diseño ya han sido discutidos en el Capítulo 2, así que aquí pasamos por alto este paso y utilizamos el ejemplo del Capítulo 2 como plantilla para el diseño detallado. La Tabla 1 resume los principales pasos que se deben seguir para pasar de la idea de un sistema acuapónico a un sistema plenamente operativo.

Tabla 1: Pasos en el diseño y construcción de un sistema acuapónico.

Estudio de viabilidad y selección del emplazamiento	En el estudio de viabilidad se comprueba si el emplazamiento en el que se planea colocar el sistema acuapónico tiene las necesidades básicas para permitir la construcción y el funcionamiento. Estas necesidades cubren los requisitos de espacio, carga de superficie, disponibilidad y fiabilidad de la energía, acceso vehicular, calidad y disponibilidad del agua, posibilidades de refrigeración y calefacción, clima, luz solar, etc. El estudio de viabilidad incluye también la planificación de la producción del emplazamiento, por lo que es necesario saber cuántos depósitos se necesitarán y con qué volumen de agua, el tamaño de la zona de cultivo de plantas, etc. Estas son las primeras cosas que necesita saber antes de que el proceso de diseño básico pueda comenzar.
Diseño básico	En el diseño básico se planifican las dimensiones básicas del sistema siguiendo un proceso de planificación paso a paso (véase el Capítulo 2). Se empieza con la zona de producción de las verduras y luego se diseña el sistema de cría de peces en función de las necesidades de nutrientes de las plantas, o viceversa. Al final del diseño básico, se habrá definido un diagrama general de flujo del proceso con los principales componentes: tasas de producción de peces y plantas; tasas de flujo de agua; volumen, forma y nivel de agua del tanque con peces; dimensiones de la eliminación de sólidos; tipo, tamaño y forma del biofiltro; longitud y diámetro de las tuberías; velocidades de flujo del agua en las diferentes tuberías; niveles de agua. El diseño básico revelará si sus objetivos de producción pueden alcanzarse en el sitio que ha elegido.
Diseño detallado	El diseño detallado utiliza las mismas consideraciones de diseño que el diseño básico, pero entra en más detalles. Mientras que en el paso anterior se centraba sólo en la hidráulica y las dimensiones, ahora también es necesario centrarse en los materiales que se utilizarán, y elegir los componentes técnicos individuales, su demanda de energía, los requisitos de energía de reserva, las mediciones y las unidades de control, y hacer un diseño detallado de todos los componentes hidráulicos (tuberías, pantallas de salida, biofiltro, etc., etc.). Dependiendo del tamaño del proyecto y del país en el que trabaje, el diseño detallado terminará con planes de construcción que usted mismo ejecutará o que pueden ser entregados a una empresa constructora para que los ejecute. La planificación de la fontanería, el cableado eléctrico, los canales de ventilación y las pasarelas en un modelo 3D le ayudará a asegurar que el proceso de instalación se desarrolle sin problemas. Durante el diseño detallado también es necesario tener una buena comprensión del material de construcción y las técnicas de construcción necesarias, para que haya suficiente espacio para montar el sistema.
Construcción	El objetivo principal durante la construcción es construir la granja lo más rápido posible, ya que tener un lugar para la construcción durante mucho tiempo suele ser muy costoso.
Procedimientos de puesta en marcha de la operación	Es necesario llenar el sistema con agua y probar los siguientes requisitos operativos básicos antes de transferir los peces al sistema: - tasa de recirculación

	<ul style="list-style-type: none"> - fugas - los niveles de agua - flujos de aire - capacidad de oxigenación - capacidad de desgasificación - sistema de vigilancia y protocolos de emergencia <p>El siguiente paso será la puesta en marcha biológica del sistema, que debe hacerse de 4 a 6 semanas antes de que se añadan los primeros peces al sistema. Para este momento, los SOPs (<i>standard operating procedure</i> o procedimientos operativos estándar) para el funcionamiento del sistema tendrán que estar listos. Calcula al menos 8 semanas desde el final de la construcción hasta que los primeros peces entren en el sistema.</p>
--	---

12.2 Estudio de viabilidad: ubicación e infraestructura

En el Tabla 2 se esbozan las consideraciones más importantes en materia de ubicación e infraestructura al diseñar un nuevo sistema acuapónico.

Aspecto	Descripción
Estabilidad del sitio y cimientos	El agua es pesada. Elija un terreno estable y nivelado para construir su sistema acuapónico. Si el terreno no es estable, los cimientos serán inestables y podrían producirse fugas debido al movimiento de las tuberías.
Fuentes de agua y electricidad	Considere cómo proteger el sistema acuapónico contra eventos climáticos extremos. Europa está situada en una zona climática moderada caracterizada por estaciones cambiantes con temperaturas y longitudes de día diferentes. Por lo tanto, debe considerar qué hacer durante los períodos de baja temperatura y corta luz diurna. Una opción es detener la producción y comenzar de nuevo en la primavera; la otra es calentar el agua y el aire y proporcionar iluminación artificial. Por otro lado, las temperaturas extremadamente altas deben ser evitadas durante el verano. Se pueden instalar redes de sombreado, o pintar el exterior del invernadero con pintura/cal blanca. Los invernaderos de buena calidad tienen rociadores automáticos y dispositivos de ventilación. Recuerde que los sistemas con un gran volumen de agua son más resistentes al sobrecalentamiento que aquellos con un pequeño volumen de agua. Puede ayudar tener acceso a agua adicional (agua de manantial, etc.) para enfriar usando un intercambiador de calor. Además de la radiación solar, los peces y los componentes eléctricos también producen mucha energía térmica que debe ser eliminada durante el clima cálido.
Fuentes de agua y electricidad	Debe haber una fuente fiable de electricidad y de agua de calidad y cantidad adecuadas en el lugar. También hay que considerar la posibilidad de cortes de energía. ¿Tiene un generador de electricidad de reserva? ¿Cómo proporcionará oxígeno a los peces? ¿Cómo los mantendrá calientes/fríos? Los balances de calor y masa tienen que ser calculados durante la etapa de diseño detallado para definir el tiempo de reacción en tales eventos.

Accesibilidad, entrada, vallas	El lugar debe ser accesible para transportar el equipo, las verduras cosechadas y los peces. El sistema debe ser siempre accesible para intervenciones urgentes. Por otra parte, se debe impedir el acceso de personas no autorizadas, debido al riesgo de infecciones y enfermedades.
Zonas de trabajo y almacenamiento designadas	Al diseñar un sistema acuapónico hay que tener en cuenta todas las operaciones y procesos que se llevarán a cabo, incluido el espacio de almacenamiento de los alimentos para peces, el material y las herramientas de limpieza, el equipo de vigilancia y la ropa de trabajo. Se necesitará una mesa para el trabajo de documentación y para mostrar las instrucciones de funcionamiento, mantenimiento y solución de problemas.



Figura 1: (izquierda) Daños por el viento en un invernadero; (b) Las redes de sombreado en un invernadero proporcionan protección contra la fuerte luz solar e impiden el crecimiento de algas (fotos: U. Strniša)

12.3 El tanque para peces

Los componentes básicos que hay que tener en cuenta son los tanques con peces, la unidad de eliminación de lodos, el biofiltro, el sumidero, los lechos de las plantas, las bombas y las tuberías. Es necesario considerar la función, los materiales necesarios y la ubicación de cada uno de ellos, así como su interacción con otros componentes. La interacción entre los componentes, por ejemplo, determinará el número de bombas que se necesitarán.

El tanque será el hogar de los peces durante un período de tiempo relativamente largo, por lo que debe elegirse con cuidado. Los materiales, el diseño y el tamaño del tanque son todos importantes, y deberían permitir una observación y manipulación relativamente fácil de los peces, la eliminación de partículas sólidas y una buena circulación del agua (simulación del flujo natural del agua).

12.3.1 Volumen

El volumen del tanque depende de los siguientes factores: i) el número de peces que tendrá que albergar, ii) el volumen del espacio vital que requiere cada especie de peces, y iii) el método para mantener estable la temperatura del agua. El diseño de los sistemas acuapónicos se basa en la cantidad de alimento para los peces, que está relacionada con la densidad de los mismos. El

volumen requerido del tanque se basa en la densidad de peces y la biomasa objetivo. Por ejemplo, si la densidad objetivo es de 10 kg/m^3 , y se prevé cultivar 30 kg de peces, se necesitará un tanque de 3000 litros. También hay que tener en cuenta que los peces crecerán y, por lo tanto, la densidad de peces y la biomasa también aumentarán durante el ciclo de producción. En general, los sistemas más grandes son más estables en cuanto a las oscilaciones de la temperatura del agua.



Figura 2: La importancia del volumen del tanque para las oscilaciones de la temperatura del agua: (izquierda) los tanques pequeños muestran cambios más rápidos de la temperatura del agua; (derecha) en volúmenes de agua más grandes la temperatura será más estable.

12.3.2 Forma del tanque

Los tanques suelen ser circulares o rectangulares. Además, hay tanques de doble D o sin fin que son un híbrido entre los tanques circulares y los tanques largos (Figura 3). En el Tabla 2 se resume algunas ventajas y desventajas generales de los tanques circulares, cuadrados y de doble D. Además de éstos, hay que considerar otros factores, como el tipo de especies de peces que se desea criar. Los peces que habitan en el fondo, como el rodaballo, el lenguado o peces planos similares, permanecen en su mayoría en el fondo del tanque y pueden preferir un flujo de agua lento. Además, los peces que viven en el fondo pueden almacenarse de tal manera que la autolimpieza del tanque se logre realmente a través de los movimientos de los peces y no del patrón hidráulico de la columna de agua. Por lo tanto, un diseño de tanque cuadrado puede no ser la peor solución para la cría de peces que viven en el fondo. Otro aspecto del diseño del tanque es la inclinación del fondo del tanque. Aunque tiene muy poco efecto en la capacidad de autolimpieza del sistema, una mayor inclinación puede ayudar a drenar todo el tanque.



Figura 3. Diferentes formas de tanques: (izquierda) tanque circular, (centro) tanque rectangular (flujo de conducto o de tapón), y (derecha) tanque doble D o conducto de extremo D (híbrido de circular y conducto)
(fuente: www.aqua-tech.eu, Bregnballe 2015)

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los tanques redondos, cuadradas y doble-D.

Tipo de tanque	Ventajas	Desventajas
Circular	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad estructural, sin puntos de presión en las esquinas • Se necesita menos material (costo de equipo de tanque barato) • Conceptualmente simple • Permite una distribución homogénea del agua y una buena calidad del agua • Las condiciones de flujo (fuerzas centrífugas) lavan los sedimentos hacia la salida en el centro del centro de la cuenca hacia la salida (alto efecto de autolimpieza) • El bajo tiempo de residencia de las partículas • Control y regulación de oxígeno fácil 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia de área, baja utilización del espacio • Conectores del tanque difíciles de sellar (tubería a través de la pared del tanque) • Difícil de segmentar • Las tasas de flujo varían dentro del tanque
Cuadrado	<ul style="list-style-type: none"> • Uso eficiente del área y el espacio • Conectores del tanque fáciles de sellar • Segmentación simple • más fácil de manejar los peces 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja autolimpieza (surgen posibles zonas muertas, gradientes de concentración de oxígeno disuelto y amoníaco) • Para evitar la baja autolimpieza se necesita una alta tasa de flujo • El alto tiempo de residencia de las partículas • Control y regulación del oxígeno medio • Puntos de presión en la estructura • El desperdicio de alimento es mayor debido a la mayor dispersión de los peces
<ul style="list-style-type: none"> • Doble-D 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso eficiente del área y el espacio • La mezcla de agua es posible en parte • Segmentación simple • Autolimpieza media • El control y la regulación del oxígeno es fácil • Los peces pueden nadar en círculos 	<ul style="list-style-type: none"> • Conceptualmente complejo • Se necesita una gran cantidad de materiales • Más caro

12.3.3 Altura y proporción

El tanque debe estar a una altura tal que permita al personal observar y trabajar con los peces. Si se utilizan tanques más profundos, se debe incluir una ventana para observar a los peces y/o una pasarela estable para acceder al tanque. La altura del tanque también determina la altura de la columna de agua y la velocidad del flujo de agua hacia el siguiente componente del sistema acuapónico (véase el capítulo 2).



Figura 4: Tanques de peces posicionados (izquierda) sobre el suelo (foto: U.S. Strniša), y (derecha) a nivel del suelo (fuente: www.humblebynature.com/about-us/projects-at-humble-by-nature/aquaponics-solar-greenhouse)

Si se utiliza un tanque circular, hay que asegurarse de que el diámetro/altura del agua siga una cierta proporción. La proporción máxima debe ser de 6:1. Si los tanques son más anchos, entonces la remoción de sólidos y la distribución uniforme del agua de la entrada se verá obstaculizada. Reducir la proporción por debajo de 3:1 creará un vórtice en el desagüe central, y el oxígeno no se distribuirá uniformemente en el tanque. Las proporciones por debajo de 3:1 deben incluir un drenaje lateral (doble drenaje) para evitar la acumulación de un vórtice.

12.3.4 Materiales

Hay diferencias en cuanto a los costes de inversión, la estabilidad del tanque y la instalación, pero lo más importante es asegurarse de que los materiales sean seguros tanto para los peces como para las plantas. Esto significa que los materiales galvanizados deben ser evitados, debido a la toxicidad del zinc. El tipo equivocado de plástico también puede ser perjudicial para los peces. Los plásticos termosoldables (los llamados termoplásticos como PE, PP o PVC) son la mejor opción, aunque tienden a ser más caros. La elección del plástico debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Resistencia a los rayos UV (el PE negro es resistente a los rayos UV)
- Porosidad (el PP es más poroso que el PE y por lo tanto permite el crecimiento de biopelículas)
- Estabilidad térmica (el PVC se vuelve quebradizo por debajo de 0°C)

Debido a su resistencia a las duras condiciones climáticas, el PE es el material a elegir para instalaciones de larga duración en invernaderos o al aire libre



Figura 5: Materiales diferentes para los tanques para peces (arriba izquierda) polietileno (foto: U.Strniša), (arriba derecha) cemento (foto: U.Strniša), (abajo izquierda) acero cubierto con plástico (foto: ZHAW), y (abajo derecha) tanques de PVC.

12.3.5 Tapas para tanques

Los peces sanos son criaturas vivas y pueden saltar del tanque. Por lo tanto, todos los tanques deben estar cubiertos para evitar pérdidas y lesiones accidentales a los peces. Las cubiertas también evitan que caigan objetos extraños en el tanque (Figura 6a). Las cubiertas de los tanques reducen las pérdidas de agua debido a la evaporación y proporcionan sombra, lo que reduce el sobrecalentamiento, evita el crecimiento de algas y, por lo tanto, mejora el bienestar de los peces. Además, la mayoría de los peces prefieren estar en la sombra en lugar de estar bajo la luz directa del sol (Figura 6b).



Figura 6: (izquierda) Un tanque cubierta con una red para evitar pérdidas accidentales; (derecha) un revestimiento del tanque y balsas plantadas evitan el crecimiento de algas y proporcionan sombra (todas las fotos: U.Strniša)

12.3.6 Flujo del agua

12.3.6.1 Entrada y salida

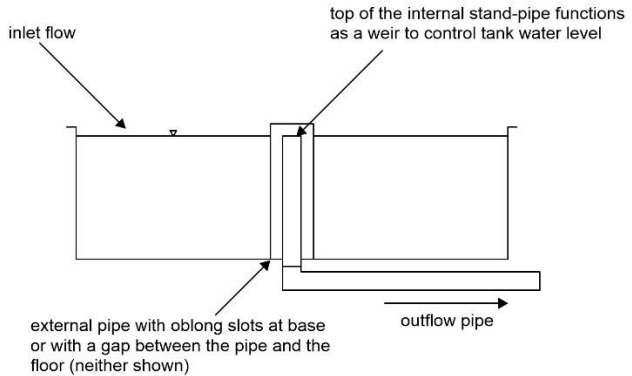
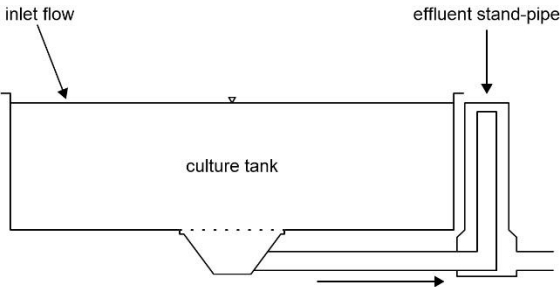
Lo ideal sería que el agua fluyera hacia el tanque en un ángulo desde arriba para enriquecer el agua con oxígeno y generar un flujo circular en el tanque (Figura 7a). Si el agua está sobresaturada (saturación de oxígeno $>100\%$, causada por las unidades de oxigenación como un oxigenador de baja altura o un cono de oxígeno), entonces el agua debería entrar en el tanque por debajo de la superficie a través de un tubo perforado (flauta) que crea un flujo de agua circular. La primera perforación debe estar justo por encima de la superficie del agua y la sección transversal total de todas las perforaciones en el tubo de entrada debe ser igual a la sección transversal del tubo. Las perforaciones también deben ser más pequeñas que el tamaño de los peces que se mantienen en el sistema.



Figura 7: Ejemplos de entrada y salida de agua: (izquierda) la entrada de agua está situada por encima del tanque en un ángulo; (derecha) el flujo de salida de agua está en el centro de la parte inferior del tanque
fotos: U.S. Strniša)

La salida de agua del tanque debe permitir la eliminación de partículas sólidas, evitando al mismo tiempo la pérdida de peces; por lo tanto, se suele colocar en el centro del fondo del tanque (Tabla 4). El correcto dimensionamiento del sistema y de los flujos de agua evita tanto la obstrucción como el desbordamiento. Cada tanque debe construirse como un elemento hidráulico independiente, ya que la comunicación hidráulica entre los tanques acabará con la pérdida total de todos los peces si se produce una fuga en una tubería o en un tanque. Por lo tanto, cada tanque necesita una opción para el desbordamiento (Tabla 4). En ZHAW, se trabaja con tubos verticales externos o desbordamientos externos, de modo que las estructuras dentro del tanque no interfieran con los procedimientos de manipulación de los peces.

Tabla 4: Opciones de desbordamiento del agua (Fuente: [Timmons y Ebeling 2007](#)).

Tipo	(+) Ventajas / (-) Desventajas	Sección
tubo vertical interno	(+) Control del nivel de agua (+) No hay depósito de sedimentos en la tubería (-) Perturba la red de peces	
Tubo vertical externo	(+) Control del nivel de agua (+) Tanque libre de instalaciones (-) Los sólidos pueden asentarse en el segmento de la tubería	

12.4 Separación de sólidos

Las siguientes decisiones deben tomarse durante la etapa de diseño:

i) ¿Es necesario un paso separado de eliminación de sólidos? En los sistemas con una baja tasa de población de peces, un lecho de cultivo de medios puede eliminar los sólidos y actuar como un biofiltro. Sin embargo, con el tiempo, se producirán atascos y zonas anaeróbicas a medida que aumente la cantidad de sólidos.

ii) ¿Cuál es el dispositivo apropiado para la eliminación de sólidos? Las partículas de desechos en el agua pueden ser de diferentes tamaños, lo que afecta a las tecnologías utilizadas para eliminarlas. Los sistemas con una densidad de carga menor ($<10 \text{ kg/m}^3$) pueden utilizar dispositivos basados en la sedimentación para la eliminación de partículas, mientras que los sistemas con una densidad de carga mayor ($>10 \text{ kg/m}^3$) pueden necesitar filtros de tambor rotativo (Figura 7).

iii) ¿Cómo se debe conectar el tanque al dispositivo de eliminación de sólidos? El agua debe fluir siempre por gravedad desde el tanque hasta el separador de sólidos y no debe ser bombeada, ya que este último sólo disminuirá el tamaño de las partículas y hará más difícil su eliminación. Para evitar la sedimentación, la velocidad del flujo en la tubería debe ser de entre 0,7 y 1,0 m/s.

iv) ¿Qué hacer con los lodos? El lodo de los peces es rico en nutrientes que pueden ser reutilizados como fertilizante. Existen varias alternativas para verterlo en el sistema de alcantarillado, entre las que se incluyen las siguientes:

- almacenarlo y reutilizarlo en la jardinería y la agricultura tradicionales; sin embargo, esto puede estar prohibido por la ley
- co-compostaje con residuos verdes estructuralmente ricos (recortes de árboles, paja)
- vermicompostaje (proceso de compostaje que utiliza varias especies de lombrices).
- digestión anaeróbica y reintroducción del digestato en el sistema acuapónico ([Goddek et al. 2016](#)).
- desnitrificación para desplazar la relación N:P en el sistema acuapónico a fin de reducir la limitación de P.

La mayoría de los sistemas de baja tecnología utilizan la sedimentación por gravedad para la eliminación de partículas. Los filtros en esta categoría son: filtro de vórtice, separador con láminas y separador de flujo radial (Figura 8). Los filtros de sedimentación de baja tecnología normalmente sólo pueden hacer frente a partículas de un tamaño superior a $100 \mu\text{m}$. Sin embargo, debido al alto flujo y a la mezcla activa de la columna de agua, la mayoría de las partículas en la mayoría de los RAS intensivos modernos serán menores de $100 \mu\text{m}$. Por lo tanto, el uso exclusivo de filtros de sedimentación no es una solución óptima para la RAS intensiva.

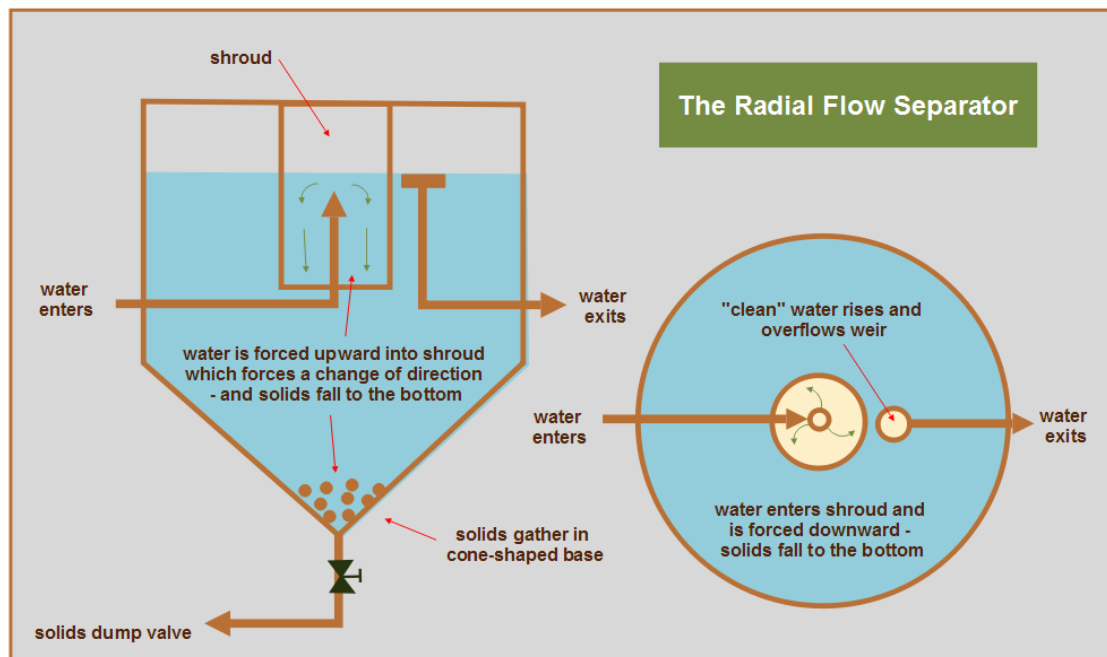


Figura 8: Diagrama de un separador de flujo radial (www.garydonaldson.net).

La mayoría de los RAS modernos e intensivos utilizan micro-pantallas, a menudo aplicadas como filtros de tambor rotativo para la filtración de sólidos (Figura 9). Estos filtros de tambor funcionan de la siguiente manera: el agua entra en el filtro de tambor y se filtra a través de los microtamices (generalmente con una tela filtrante de 40-100 μm), las partículas sólidas se retienen y luego se lavan de los elementos filtrantes en la bandeja de lodos, y el agua de lodos sale entonces del sistema de peces y entra en la instalación de tratamiento de aguas residuales.

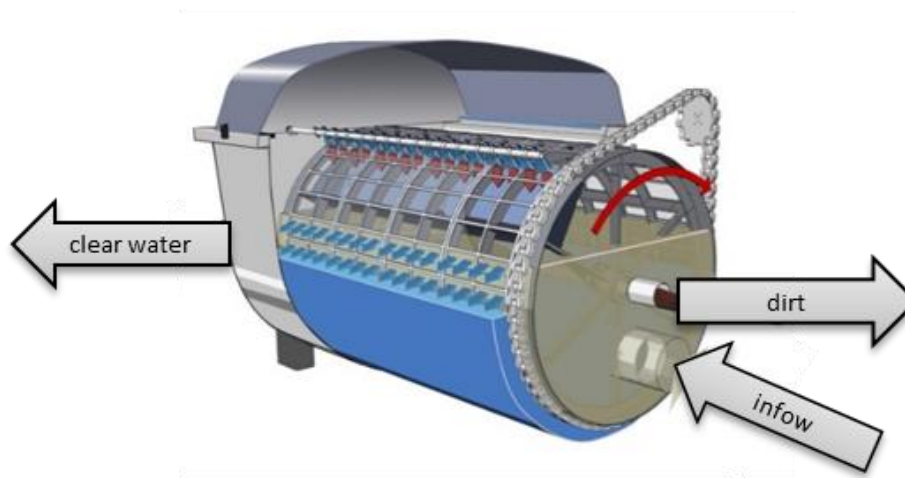


Figura 9: Diagrama de un filtro de tambor (www.nordicwater.com)

Además de los filtros de tambor, a menudo se utilizan fraccionadores de espuma (también llamados *skimmers* de proteínas) (Figura 10). Se utilizan principalmente para eliminar compuestos orgánicos como las proteínas, pero también se ha informado de que reducen una amplia variedad de otras moléculas orgánicas e inorgánicas (por ejemplo, ácidos grasos, detritus, bacterias, metales).

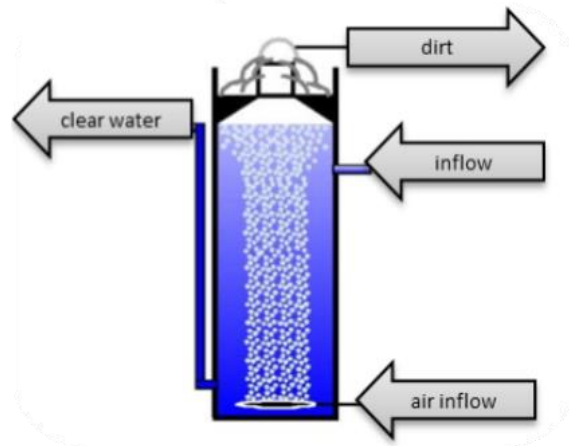


Figura 10: Diagrama de un fraccionador de espuma (www.epd.gov.hk)

Tabla 5: Características de los diferentes sistemas de filtración de sólidos.

	Filtro de sedimentación	Filtro tambor	Filtro flotante
Principio	Densidad (gravedad)	Filtración (tamaño)	Flotación (polaridad/densidad)
Tamaño	>100 μm	>30-100 μm	<30 μm
Cambio presión	Insignificante	20 cm	Insignificante



Figura 8. Diferentes dispositivos para separar sólidos: (izquierda) trampa de lodos; (centro) filtro de desbaste; (derecha) filtro tambor en ZHAW (fotos de U.Strniša)



Figura 9: (izquierda) tanque de almacenamiento de lodo (foto: U.Strniša); (derecha) compost (foto: pixabay)

12.5 El biofiltro

El biofiltro es el corazón de todo sistema de acuicultura de recirculación. La salud de los peces y, por lo tanto, el éxito económico, dependen del correcto funcionamiento del biofiltro. Los altos niveles de amoníaco y nitrito en los tanques pueden deberse a varios factores. Uno de ellos puede ser el mal diseño o el funcionamiento subóptimo del biofiltro (demasiado pequeño, no se mezcla de manera uniforme, los niveles de nitrato son demasiado altos, el pH es demasiado bajo, la intoxicación del biofiltro por sal o tratamiento médico, la aireación es demasiado baja o demasiado alta, etc.). El otro aspecto principal del fallo de diseño es la insuficiente recirculación del agua. El biofiltro sólo puede degradar lo que recibe del tanque. Si la tasa de recirculación es demasiado baja, incluso un biofiltro sobredimensionado no conducirá a una buena calidad de agua. Para evitar esto, siga el ejemplo del Capítulo 2 para calcular la tasa de recirculación correcta para su sistema.

12.5.1 ¿Se necesita un biofiltro separado?

En los sistemas con baja densidad de población de peces, un lecho de cultivo con sustrato puede asumir el papel tanto de la eliminación de sólidos como de la biofiltración. Si la carga de sólidos es demasiado elevada, pueden producirse atascos y zonas anaeróbicas, lo que reduce la eficiencia de la biofiltración. Por lo tanto, si el lecho de cultivo va a funcionar como biofiltro, se recomienda utilizar una reserva de peces muy baja o un dispositivo de eliminación de sólidos independiente.

12.5.2 Elección del biofiltro

El tipo de biofiltro más utilizado en acuaponía y en RAS es el reactor de biofiltro de lecho móvil (MBBR) (Figura 14). El medio de un filtro de lecho móvil consiste en pequeñas estructuras plásticas (1-2 cm) con una gran superficie específica (por ejemplo, Kaldness k1). Este medio filtrante se mantiene en constante movimiento por medio de la aireación (por ejemplo, mediante la entrada de aire a través de placas de aire en el fondo del tanque de biofiltro). El movimiento constante del medio filtrante tiene un efecto autolimpiante en el medio filtrante y evita el crecimiento extensivo

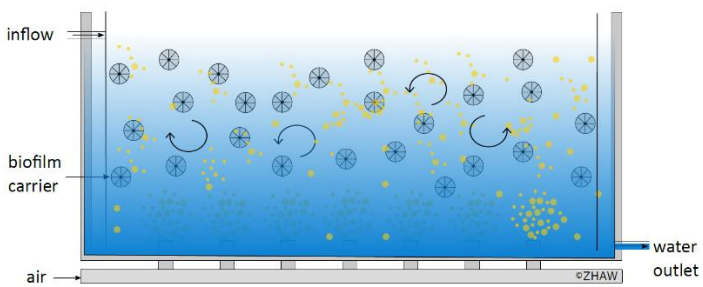
de bacterias. Para la limpieza, el filtro de lecho móvil debe desconectarse del RAS y volverse a lavar aproximadamente una vez por semana.

El medio filtrante favorece el crecimiento de la biopelícula microbiana al proporcionar una gran superficie. Normalmente, los MBBR se llenan entre un 40 y un 60% con bioportadores, creando una superficie absoluta de 300-600 m²/m³ de volumen de biorreactor. El movimiento del aire crea fuerzas de corte en las biopelículas y mantiene el crecimiento y la ruptura de la biopelícula en equilibrio. Si la biopelícula de los portadores se vuelve demasiado gruesa, entonces la aireación es demasiado baja, y si es inexistente, entonces la aireación es demasiado alta. Una gran ventaja del MBBR es la desgasificación y la aireación por flujo de aire, que no es proporcionada por los filtros de lecho fijo.

Los filtros de lecho fijo tienen medios de biofiltro fijos. El filtro de lecho fijo también funciona como un dispositivo de eliminación de sólidos, ya que tiene capacidad de filtración para filtrar los sólidos y compuestos orgánicos sobrantes que no se han filtrado en la unidad de separación de sólidos. Si la carga orgánica es mayor que la degradación natural en la superficie, el filtro puede obstruirse por el crecimiento de partículas y bacterias. El filtro debe ser lavado a contracorriente regularmente y el agua de contracorriente debe ser tratada por separado (por sedimentación, etc.). (Tabla 5).

Los filtros percoladores son el último de los tres tipos de filtros comunes y funcionan por goteo de agua a través de una pila de portadores de biopelícula. El mayor beneficio del goteo es el alto efecto de desgasificación a través de la alta superficie del agua al aire causado por el goteo. La principal desventaja son los altos costes de bombeo necesarios para llevar el agua a la altura requerida. Como estos portadores no se mueven regularmente como en un MBBR, la biopelícula se hace más gruesa en estos portadores y reduce la tasa de nitrificación. Los filtros percoladores son muy comunes en la acuaponía, ya que permiten el intercambio de gases (desgasificación del CO₂ y aireación) en un solo paso. Además, sólo necesitan la circulación de agua y ningún dispositivo de aireación adicional como el MBBR (por ejemplo, un soplador), lo que los convierte en un sistema muy fácil de construir.

Tabla 5: Tipos de biofiltros y sus ventajas y desventajas en términos de rendimiento del sistema: reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR), filtro de lecho fijo y filtro percolador.

Tipo de biofiltro	Construcción básica	Pros y contras
Reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR)		Nitrificación ++ Filtración - Desgasificación +

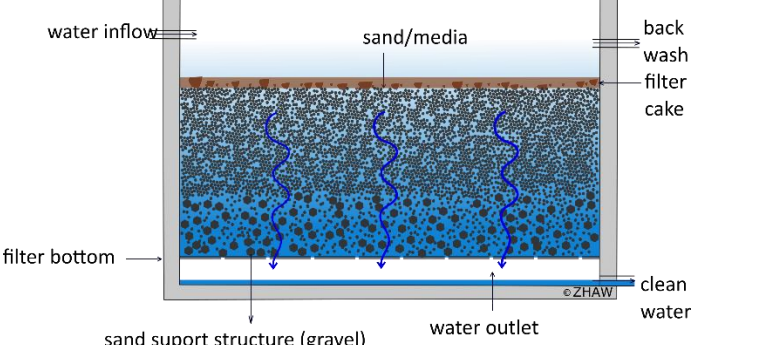
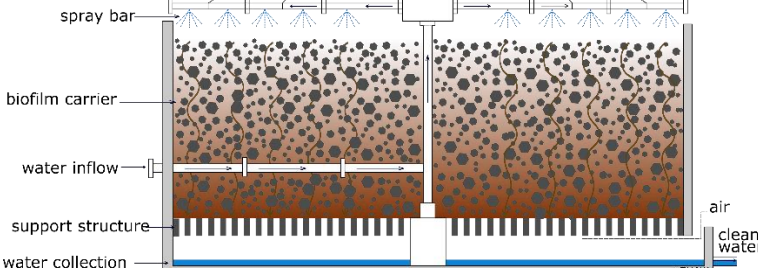
Filtro de lecho fijo		Nitrificación + Filtración + Desgasificación -
Filtro de goteo		Nitrificación + Filtración - Desgasificación ++ (si se airea)



Figura 10: Dos versiones de biofiltros de medios móviles subóptimos: (izquierda) biofiltro que contiene demasiados biochips (foto R. Bolt); (derecha) biofiltro sin aireación (foto U. Strniša)

12.5.3. Desgasificación y aireación

El tanque, el biofiltro y el lecho de cultivo necesitan una aireación adecuada. Hay muchas maneras de proporcionar esto, incluyendo el uso de bombas de transporte aéreo, rociadores de agua, ruedas de paletas, rotores, sopladores y compresores. Al igual que con el bombeo de agua, la aireación del agua debe ser fiable y eficiente en términos de energía. La aireación en sistemas más pequeños se puede proporcionar mediante el uso de una bomba de aire eficiente en energía y de larga duración y tubos de vinilo de calidad alimentaria conectados a piedras de aire colocadas en o cerca del fondo de los tanques y lechos de cultivo. Las bombas de aire no suelen ser lo suficientemente grandes para airear sistemas más grandes, que tienden a utilizar un soplador regenerativo o un generador de oxígeno.

En acuaponía, las bombas de aire y las piedras de aire se utilizan para forzar el aire en el agua para proporcionar oxígeno a las raíces de las plantas y a los peces. Las bombas de aire están disponibles en una amplia gama de tamaños, desde muy pequeñas hasta muy grandes, con una capacidad para funcionar de una a muchas piedras de aire, cada una de las cuales introduce cientos de diminutas burbujas de aire fresco y rico en oxígeno en la solución. Aunque es más fácil expulsar el aire de una piedra de aire que está en aguas poco profundas, no se introduce tanto oxígeno en el agua como si la piedra de aire es más profunda. Cuando el cálculo está más profundo, el gran número de burbujas que salen son más pequeñas debido a la mayor presión del agua, que en conjunto tienen una mayor superficie que menos burbujas grandes, y tienen que viajar más lejos hacia la superficie, con el agua circundante absorbiendo el oxígeno de las burbujas hasta la parte superior del tanque donde estallan en la superficie.

Entrada de oxígeno de alta eficiencia

Las tecnologías de oxigenación básicas son el tubo en U, el cono de oxigenación y el oxigenador de cabezal bajo (Figuras 17-19, Tabla 5).

Tabla 5: Características de las diferentes posibilidades de enriquecimiento de oxígeno de alta eficiencia en el RAS.

	U-Pipe	Cono	LHO
Principio	Aumento de la presión por una columna de agua; larga distancia de contacto agua/oxígeno	Reducción de gérmenes por el DANN dañino	Exceso de presión por una columna de agua, alta superficie de contacto agua/oxígeno
Pérdida de presión	No	Alta (2-3 m, 0.2-0.3 bar)	Media (ca. 1m, 0.1 bar)
Eficiencia	Alta	Alta	Media

Una simple tecnología de oxigenación para disolver el oxígeno en el agua del sistema es el **tubo en U** (Figura 17). El oxígeno se inyecta en el fondo de un tubo de 10 a 30 m de profundidad por el que fluye el agua del sistema. Debido a la alta cabeza hidráulica, la alta presión lleva a una alta disolución del oxígeno en la columna de agua. Sin embargo, como esta técnica requiere que las estructuras se construyan a gran profundidad en el suelo, el método a menudo no se puede aplicar en la práctica.

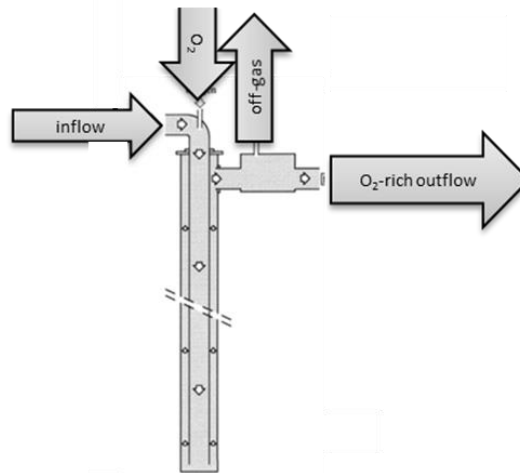


Figura 17: tubo-U

Un cono de oxigenación (figura 18) utiliza el mismo principio que un tubo en U. La diferencia es que la alta presión hidráulica es inducida por una bomba (que utiliza mucha energía). Esta tecnología es especialmente adecuada para cubrir los picos de demanda de oxígeno, y tiene una alta eficiencia en términos de disolución de oxígeno.

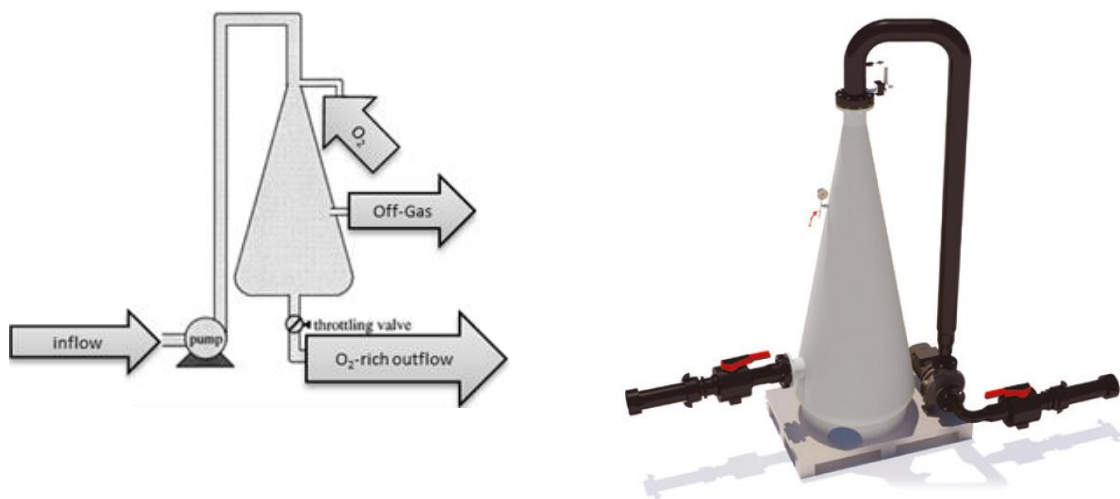


Figura 18: Cono de oxígeno para disolver el oxígeno puro a alta presión Fuente: [Timmons and Ebeling 2007](#) (izquierda), [Bregnballe 2015](#) (derecha).

El oxigenador de baja cabeza (LHO) utiliza otro método de enriquecimiento de oxígeno. El agua fluye a través de una placa perforada y provoca una alta superficie de agua a gas en la cámara de mezcla de abajo. Los LHO funcionan de forma muy económica, aunque no pueden alcanzar concentraciones de oxígeno tan altas como las de los conos.

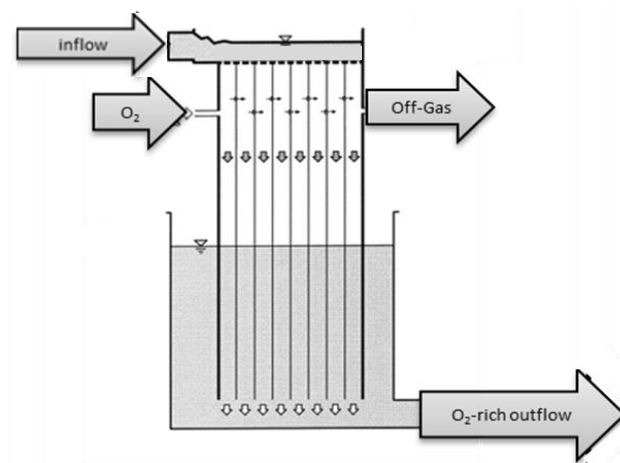


Figura 19: Oxigenador de cabezal bajo

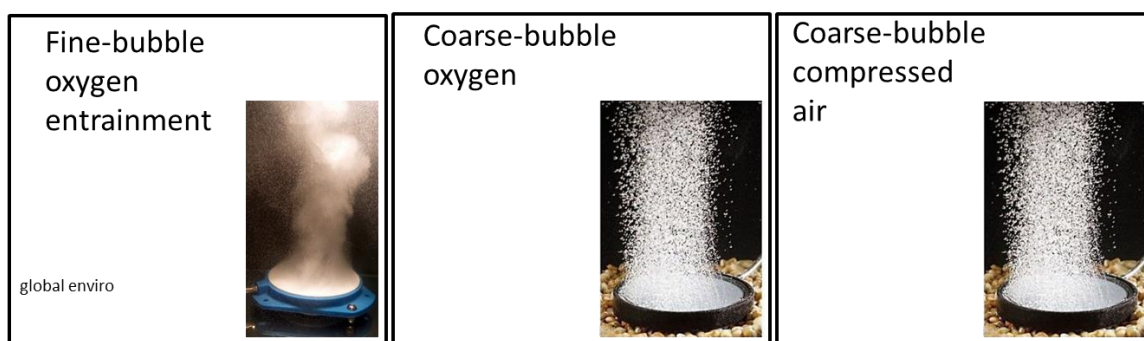


Figura 20: Diferentes posibilidades de enriquecimiento de oxígeno de baja eficiencia en la acuicultura.

Tabla 6: Características de las diferentes posibilidades de enriquecimiento de oxígeno de baja eficiencia en el RAS.

	Arrastre o carga de oxígeno de burbujas finas	Oxígeno de burbuja gruesa	Aire comprimida de burbuja gruesa
Aplicación	Muchas burbujas finas se elevan lentamente. Las burbujas pequeñas tienen una alta relación superficie-volumen	Gradiente de concentración alto (porque es oxígeno puro). La mayoría de las veces se utiliza para la oxigenación de emergencia	No necesita oxígeno puro pero tiene una baja eficiencia porque sólo el 21% es oxígeno. El resto es N ₂ , etc. Puede llevar a la saturación de N ₂
Pérdida de presión	1.5 bar	A partir de 300 mbar + columna de agua	A partir de 300 mbar + columna de agua
Eficiencia	Media (up to 20%)	Baja (5%)	Muy baja (1%)

12.6 Lechos de cultivo

12.6.1 Flujo de agua y posicionamiento de los lechos de cultivo

El flujo de agua es la parte más importante del diseño de un sistema adecuado, y la posición exacta de los lechos de cultivo tiene un gran impacto en esto. Por lo tanto, debe ser considerado cuidadosamente y, si es posible, se debe consultar a un experto. Los lechos de cultivo deben colocarse después del biofiltro y antes de que el agua se recircule en el tanque.

Se debe considerar la forma en que el agua fluirá del lecho de cultivo al tanque. Si es por gravedad, entonces el nivel del agua en el lecho de cultivo debe ser más alto que el del tanque, lo que puede significar que hay que cavar el tanque y las conexiones en el suelo, o que los lechos de cultivo serán tan altos que no se podrá trabajar cómodamente. Por lo general, después del lecho de cultivo se coloca un sumidero con una bomba para poder bombear el agua hacia el tanque. La conexión entre el biofiltro y los lechos de cultivo debe ser lo más corta posible, y la entrada/salida debe colocarse en los lados opuestos de cada lecho de cultivo.

Una de las ventajas de los cultivos sin suelo es la posibilidad de diseñar condiciones adecuadas para trabajar con las plantas. Lo ideal es que el sistema se diseñe a una altura que permita vigilar fácilmente las plantas (Figura 11).



Figura 11: Diferentes niveles de lechos de cultivo: (izquierda) los lechos de cultivo elevados permiten un trabajo cómodo; (derecha) los lechos de cultivo a nivel del suelo no necesitan construcción de soporte, pero siguen siendo perfectos para la producción: fácil acceso, mucha luz y suficiente profundidad para las raíces.

Además, si se necesita pulverizar, está en el nivel perfecto para hacerlo (Foto A. Graber, ZHAW)

12.6.2 Material de construcción

Al igual que con las tanques, los aspectos más importantes son la máxima seguridad tanto para los peces como para las plantas, y el mínimo riesgo de fugas de agua que causen daños. Los

revestimientos de los estanques suelen ser seguros y de bajo costo, pero el riesgo de daños es bastante alto.

12.6.3 Construcción de la entrada y salida de agua

El diámetro de las entradas y salidas de agua debe ser lo suficientemente grande como para permitir cantidades de flujo de agua diseñadas para todo el sistema. Las entradas y salidas deben ser preferentemente todas del mismo diámetro. Cada agujero es un riesgo de fugas de agua si el sellado no es apropiado. Este riesgo debería evitarse perforando el menor número posible de agujeros en el sistema.

12.7 Conexiones, movimiento de agua y aireación

12.7.1 Fontanería

Los tubos de PVC son los más utilizados para la fontanería. Están disponibles en muchos tamaños estándar, son rentables, fáciles de cortar y de adaptar a una amplia gama de adaptadores y conectores, y también suelen durar mucho tiempo. También se pueden utilizar otros materiales, pero deben ser seguros tanto para los peces como para las plantas, y para la producción de alimentos. Algunos consejos generales sobre las tuberías:

- las tuberías tienen que ser "perfectas" - si las tuberías son demasiado pequeñas habrá un problema de fugas, y si son demasiado grandes los sólidos no se expulsarán porque la presión del agua será demasiado baja
- se deben evitar las tuberías flexibles para reducir los riesgos de flujo de agua y la bioincrustación. El biofouling o el ensuciamiento biológico es la acumulación de microorganismos, plantas, algas o animales en superficies húmedas (<https://en.wikipedia.org/wiki/Biofouling>).
- las conexiones entre los diferentes componentes del sistema deben ser tan cortas y rectas como sea posible. Esto permite un movimiento más suave del agua. Cada curva o bucle representa un obstáculo para el flujo suave del agua.

12.7.2 Flujo de agua y bombas

Una vez que los componentes acuapónicos se conectan y se llenan de agua, el agua debe mantener un nivel constante e igual en todos los componentes. Sin embargo, como debe circular, el agua debe ser movida por la gravedad o por bombeo. El diseño de los sistemas hidráulicos sigue el ejemplo del Capítulo 2. Después de dibujar un diagrama de flujo del proceso, en la etapa de diseño detallado hay que dimensionar cada tubería, eligiendo el diámetro en función del flujo volumétrico y la velocidad de flujo (calculada anteriormente), y definirlo por la longitud, los accesorios y los codos/codos. Luego hay que calcular las pérdidas por fricción. Estas pérdidas por fricción tienen que ser compensadas por la diferencia de presión del agua entre las diferentes alturas del nivel del agua. El bombeo sólo debe hacerse en un punto de todo el flujo de recirculación (con dos bombas desacopladas en paralelo) para asegurar condiciones de flujo estables.

La bomba es un componente extremadamente importante del sistema acuapónico, ya que asegura la circulación fiable del agua en todo el sistema. El agua debe recircularse para suministrar a los microorganismos y las plantas los nutrientes necesarios y para proporcionar a los peces un entorno libre de componentes nocivos. Una bomba inadecuada o poco fiable puede dar lugar a un suministro de nutrientes insuficiente o excesivo, lo que puede perjudicar a las bacterias, los peces y las plantas. La falta de recirculación, o una recirculación demasiado rápida o demasiado lenta, afectará rápidamente a toda la vida en el sistema acuapónico.

Existe una amplia gama de bombas en el mercado, pero pueden dividirse en dos categorías principales: bombas sumergibles o bombas en línea (centrífugas). Las bombas sumergibles se sumergen en el agua del tanque, lo que ayuda a mantenerlas frescas. Suelen ser menos eficientes que las bombas en línea y son más adecuadas para sistemas más pequeños. Las bombas en línea o centrífugas son bombas refrigeradas por aire y están ubicadas fuera del tanque. Pueden tener motores de mayor potencia capaces de bombear grandes cantidades de agua.

Cuando se dimensiona la bomba para el sistema acuapónico, primero hay que determinar el caudal, es decir, cuánta agua puede mover la bomba en un período de tiempo determinado. Se suele medir en litros por minuto o en litros por hora. La bomba debe ser capaz de recircular todo el volumen de agua del sistema. Esto puede variar desde 3 veces por hora en sistemas muy intensivos hasta sólo unas pocas veces por día en sistemas extensivos. No hay una regla general. La única manera de calcular la tasa de recirculación de agua requerida es hacer un cálculo adecuado del flujo másico (véase el ejercicio 7). En general, es mejor comprar una bomba más potente, ya que permitirá ajustar el flujo. Sin embargo, tales bombas son costosas.

Para dimensionar la bomba también es importante calcular la altura de la cabeza calculando todas las pérdidas de altura descritas en el Ejercicio 7. Esta pérdida de altura tiene que ser compensada por la diferencia de nivel de agua, que será igual a la altura de los dos niveles de agua que la bomba tiene que elevar el agua en medio. Normalmente, el tanque y el lecho de cultivo estarán en niveles diferentes. Cuanto mayor sea la distancia o la altura, más energía se requiere para bombear el agua. Cualquier cosa que se pueda hacer para minimizar la cabeza hará que todo el sistema sea más eficiente.

El paso final para determinar el tamaño correcto de la bomba es combinar la tasa de flujo y la altura de la cabeza. Generalmente, la mayoría de las bombas vienen con una tabla que combina la tasa de flujo y la altura de la cabeza. Si no es así, entonces generalmente se indica la tasa de flujo máxima (Q_{\max}) y la altura máxima de bombeo (H_{\max}). Las bombas tienen su eficiencia de bombeo óptima en H_{\max}/d , que normalmente está alrededor de $Q_{\max}/2$.

Ejemplo de diseño: Si se tiene que recircular $10 \text{ m}^3/\text{h}$ durante 2 m, entonces primero se decide si se quiere usar una o dos bombas. Si se quiere usar dos bombas en paralelo, cada bomba tiene que

bombear $5 \text{ m}^3/\text{h}$ para 2m incluyendo las pérdidas por fricción en la tubería de bombeo. De modo que necesitas dos bombas, cada una con $H_{\text{max}} = 4\text{m}$ y $Q_{\text{max}} = 10\text{m}^3$.

El coste de la energía utilizada para hacer funcionar la bomba es una parte importante de la estructura de costes para el funcionamiento de un sistema acuapónico. Por lo tanto, es importante conocer el consumo eléctrico de la bomba que se planea comprar, lo que significa conocer el número de vatios que utiliza la bomba. La bomba ideal hará el trabajo usando la menor cantidad de energía posible. Al comprar una bomba no olvide comprar también una bomba de reserva en caso de que la primera se averíe, o hacer funcionar el sistema con dos bombas en paralelo (muy recomendado) y tener una bomba de reserva.

12.7.3.1 Regulación del flujo de agua y del nivel de agua

La velocidad de flujo objetivo en las tuberías es de alrededor de 0,7-1 m/s. Si es inferior a 0,7 m/s existe el riesgo de deposición de lodo, mientras que por encima de 1 m/s hay una pérdida innecesaria de energía por fricción. La velocidad del flujo de agua en el sistema puede ajustarse mediante la instalación:

- una bomba en la que se puede regular el flujo
- una válvula reguladora
- un temporizador eléctrico conectado a la bomba
- un regulador de flotador de nivel de agua con o sin un sensor de nivel de agua

En los sistemas acuapónicos, especialmente en los sistemas de lecho de cultivo de medios, se utiliza ampliamente un sifón de campana para la regulación del flujo y el nivel del agua. Los sifones de campana permiten que el agua del lecho de cultivo se drene automáticamente en el tanque y la bomba lleva el agua del tanque al lecho de cultivo. Además de la regulación automática del agua, que ahorra mucho tiempo y esfuerzo, los sifones de campana tienen otras ventajas cuando se utilizan con sistemas acuapónicos:

- más aireación para las raíces de las plantas
- el movimiento constante y consistente del agua
- el proceso es automático
- asegura la máxima eficiencia
- simple y confiable

Hay otras formas sencillas de regular el nivel del agua mediante mamparas, tubos verticales o sifones de bucle ([Castelo 2018](#)).

12.7.3.2 Problemas con el movimiento del agua

Si el agua no circula o se reduce el caudal, puede haber varias razones; por ejemplo:

- la bomba no funciona
- las hélices de la bomba están desgastadas/dañadas por la arena/medio de cultivo
- no hay suficiente agua en el sistema

- las burbujas de aire interrumpieron el flujo de agua
- las tuberías están obstruidas
- hay peces muertos en las tuberías

12.7.3.3 Pérdidas de agua y reservas de agua

Inevitablemente se perderá algo de agua del sistema debido a la evapotranspiración. Los principales problemas son las pérdidas de agua debido a las fugas (que son causadas por la obstrucción) o las averías de las bombas. Hay que tener en cuenta que cada agujero, cada junta, cada conexión de tubería y cada daño mecánico es un peligro potencial que puede causar una fuga. Sin embargo, si la tubería está diseñada correctamente, y sellada/pegada adecuadamente, entonces esto no debería ser un problema. Es muy importante probar el flujo de agua cuando se pone en marcha el sistema para asegurarse de que no hay fugas.

También hay que considerar lo que sucederá si la bomba deja de funcionar o si hay un corte de energía. ¿Dónde fluirá el agua? El diseño de sistemas adecuados incluye un volumen de reserva en el nivel más bajo del sistema (normalmente el sumidero de la bomba) para almacenar toda el agua que rebose de los puntos más altos del sistema. Si se diseñan adecuadamente, los tanques perderán entre 5 y 10 cm de profundidad de agua que puede ser almacenada por el volumen de reserva del sumidero de la bomba y el biofiltro. Esta es la razón por la que el biofiltro y el sumidero de la bomba suelen parecer bastante vacíos en un sistema adecuadamente diseñado. Hay que instalar alarmas apropiadas y, aún mejor, métodos para encender automáticamente las bombas de reserva, conectadas a un generador eléctrico. El agua perdida tiene que ser rellenada todos los días (1,5% durante el funcionamiento normal, sin incluir los fallos). Por lo tanto, se necesita un depósito de volumen adecuado, o una conexión muy fiable a otra fuente de agua.

12.8 Funcionamiento de un sistema acuapónico

12.8.1 Procedimientos básicos de mantenimiento y funcionamiento del sistema

Para asegurar que el sistema acuapónico funcione bien, se deben preparar instrucciones claras de funcionamiento, mantenimiento y solución de problemas (manuales), así como listas de verificación de las actividades diarias, semanales y mensuales para las que se deben llevar registros. De esta manera, los diferentes miembros del personal siempre sabrán qué hacer. Todas las observaciones y tareas realizadas deben registrarse (con fechas específicas) en un libro de registro específico, que debe guardarse en un lugar visible. Es especialmente importante registrar los parámetros químicos y físicos del agua, y cualquier cambio en el aspecto y comportamiento de los peces (hoja de puntuación). En la Tabla 6 se enumeran los procedimientos básicos de mantenimiento y funcionamiento del sistema.

Tabla 6: Mantenimiento básico del sistema y procedimientos operativos.

Tareas relacionadas con...	Diario	Semanal	Mensual	Extra
.. alimentación de los peces	Alimentar a los peces dos veces al día. Después de la alimentación, compruebe cuánto alimento se ha comido. Si hay alimento no consumido, reduzca la cantidad en la siguiente alimentación		Pese los peces cada 1-2 meses y ajuste la cantidad de alimento de acuerdo con la tasa de alimentación adecuada para el tamaño de los peces	En caso de un mal funcionamiento del sistema deje de alimentar inmediatamente
...comportamiento de los peces.	Comprueba si todos los peces están vivos. Utilice una hoja de puntuación para evaluar su comportamiento durante los experimentos			Tenga la información de contacto de su veterinario accesible en todo momento
...asegurando la calidad del agua para los peces.	Revisa el color y el olor del agua. No debe haber lodo en el tanque	<p>Analice el agua (T, pH, O₂, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻). Si los niveles superan los valores umbral, tomar las medidas adecuadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si los niveles de NH₄⁺ o NO₂ son demasiado altos, no añada agua dulce. Detenga/reduzca la alimentación y añada sal - Si el O₂ es demasiado bajo, o el NH₃ o el T demasiado alto, aumente la aireación y reduzca la temperatura utilizando un 		Si nota algo inusual, analice inmediatamente el agua. Toma medidas, pero ten en cuenta que a los peces no les gustan los cambios rápidos. Limpie ocasionalmente el tanque y evite el uso de agentes de limpieza químicos

		intercambiador de calor de placas (no el intercambio directo de agua)		
...plantas en crecimiento	Observe las plantas para ver si hay señales de plagas y enfermedades. Retire las hojas con signos de enfermedad o infestación de plagas. Eliminar las hojas muertas. Si detecta plagas o enfermedades, tome medidas (véase el capítulo 8)	Observe las plantas en busca de signos de deficiencia de nutrientes. Compruebe el nivel del agua. Analice el agua. Si los valores se desvían de lo óptimo, tome medidas (añada agua dulce, aumente la aireación, ajuste los nutrientes)		Diseñe un plan de plantación anual
... otro		Remover el lodo de la trampa de lodo. No debe haber lodo en las tuberías		Proporcionar sombra en verano
... biofiltro	... biofiltro Compruebe la aireación (burbujas de aire visibles). Cubrir el biofiltro para protegerlo de la luz (prevención del crecimiento de algas)	Comprobar la cantidad de lodo en el medio del biofiltro		Después de reiniciar el biofiltro, realizar análisis diarios del agua (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) hasta que los niveles de nitrato se estabilicen
... sistema de flujo y recirculación de agua	Observe el flujo de agua (el agua necesita circular constantemente). Verifique el intervalo de la bomba; un intervalo más corto = mejor flujo de agua.		Comprobar si la bomba está sincronizada con las válvulas a través de las cuales el agua entra en los tanques Comprobar (1) el funcionamiento del sistema de bomba y aireador	

			(2) el estado de las tuberías y válvulas (3) el funcionamiento de la lámpara UV	
--	--	--	--	--

12.8.2 Fallos del sistema y sistemas de emergencia

El uso de oxígeno puro como respaldo es la precaución de seguridad número uno. La instalación es simple, y consiste en un tanque de almacenamiento de oxígeno puro y un sistema de distribución con difusores instalados en cada tanque. Si el suministro de electricidad falla, una válvula magnética se retira y el oxígeno presurizado fluye a cada tanque, manteniendo así a los peces vivos. El flujo enviado a los difusores debe ajustarse de antemano, de modo que en una situación de emergencia el oxígeno del tanque de almacenamiento dure lo suficiente para que el fallo se corrija a tiempo. Para respaldar el suministro eléctrico, es necesario un generador eléctrico accionado por combustible. Es muy importante poner en funcionamiento las bombas principales lo antes posible, porque el amoníaco excretado por los peces se acumulará hasta niveles tóxicos cuando el agua no circule por el biofiltro. Por lo tanto, es importante conseguir que el flujo de agua se ponga en marcha en una hora más o menos.

Si hay un corte de energía, siempre sigue este protocolo:

- Revise las líneas de energía
- Revisa el fusible eléctrico
- No añada agua fresca. Esto matará a los peces aumentando el pH y transformando el NH_4 en NH_3 ...
- No alimentar a los peces en condiciones de estrés

Si hay fallos en el sistema de bombeo y/o aireación, siga este protocolo:

- En caso de fallo de la bomba, reemplace la bomba con una de repuesto
- En caso de fallo del aireador, reemplace el aireador
- No alimentar a los peces en condiciones de estrés
- No aumente el flujo de agua

Protocolo en caso de fugas:

- Detener el flujo de agua
- Revisa las tuberías y las válvulas
- Reemplazar la parte que gotea
- Reemplazar el agua perdida
- No alimentar a los peces en condiciones de estrés

12.9 Referencias

- Bregnballe, J. 2015. *A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organisation.
- Castelo, J. 2018. *Why You Should Use a Bell Siphon for Aquaponics*. *World Water Reserve*, October 3, 2018.
- Goddek, S., Schmutz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K.J., Wuertz, S. y Junge, R. 2016. *The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce*. *Agronomy* 6 (2), 37.
- Mann, T. 2017. *Aeration, air pumps, blowers, and airstones*. *Friendly Aquaponics*, March 28, 2017.
- Timmons, M.B. y Ebeling, J.M. 2007. *Recirculating Systems*. Northeastern Regional Aquaculture Center, Ithaca, NY.

13. AGRICULTURA URBANA

13.1 Introducción a la agricultura urbana

La agricultura urbana adopta muchas formas. Éstas pueden ir desde los huertos familiares, escolares y comunitarios hasta las granjas interiores y de azotea. A menudo se hace una distinción fundamental entre la agricultura urbana (que implica la producción de alimentos en una zona urbana) y la agricultura periurbana, que tiene lugar en la periferia de las ciudades. En el caso de esta última, la agricultura se realiza en gran medida por agricultores profesionales en tierras que a menudo ya han sido utilizadas para la agricultura durante décadas. Una explotación agrícola urbana forma parte de un sistema alimentario local en el que los alimentos se cultivan y producen dentro de una zona urbana y se comercializan a los consumidores predominantemente dentro de esa zona urbana. Además del cultivo de frutas y hortalizas, la agricultura urbana también puede incluir la cría de animales, la apicultura, la acuicultura y productos no alimentarios como la producción de semillas, el cultivo de plántulas y el cultivo de flores. Puede caracterizarse por la proximidad geográfica del productor al consumidor y por las prácticas sostenibles de producción y distribución. Las granjas urbanas pueden adoptar diversas formas, entre ellas jardines sin fines de lucro y empresas con fines de lucro. Pueden proporcionar puestos de trabajo, capacitación laboral y educación sanitaria, y pueden contribuir a mejorar la nutrición y la salud de la comunidad proporcionando productos frescos cultivados localmente ([McEldowney 2017](#)). Este capítulo se centra en la producción comercial de alimentos en las zonas urbanas y, concretamente, en los invernaderos de azotea y otros tipos de granjas interiores.

A medida que los pueblos y las ciudades siguen creciendo tanto en población como en superficie, sus necesidades de infraestructura para el transporte y la distribución de alimentos se extienden constantemente, alejando cada vez más la producción de alimentos del consumidor urbano y generando sistemas alimentarios globalizados que contribuyen al 19-29% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero ([Vermeulen et al. 2012](#)). Actualmente, el flujo de alimentos a las ciudades sigue un modelo lineal, lo que da lugar a un elevado consumo de recursos energéticos y a la generación de residuos y emisiones de CO₂. Se prevé que más de dos tercios de la población mundial vivirá en las ciudades en 2050, y dado que algunos expertos se muestran escépticos acerca de la capacidad de la biosfera para producir alimentos suficientes para toda la población humana, ha resurgido entre los encargados de la adopción de decisiones el interés por la producción local para contribuir a sistemas alimentarios urbanos sostenibles. La horticultura urbana siempre ha contribuido históricamente al suministro de productos frescos a los habitantes de las ciudades, pero últimamente ha ido ganando popularidad en el “*Global North*”, con una creciente conciencia de las preocupaciones ambientales y sanitarias. En los últimos años, han surgido granjas comerciales en las principales ciudades del norte, promoviendo una tendencia de alimentos locales respetuosos con el medio ambiente, cultivados en instalaciones de gran eficiencia en la parte superior o interior de los edificios. La agricultura urbana también ofrece oportunidades para un ciclo cerrado de recursos en el metabolismo urbano, en marcado contraste con el tradicional flujo unidireccional. En la Figura 1 se muestra el papel de la agricultura urbana en un sistema ideal de circulación de recursos: las flechas rojas indican el flujo unidireccional del metabolismo urbano clásico, mientras que las flechas verdes

indican el ciclo cerrado en el metabolismo urbano con la producción agrícola urbana, en el que los desechos pueden transformarse en biogás, digestatos y suelos tecnogénicos (hechos por el hombre) que pueden utilizarse luego para una mayor producción agrícola, todo ello dentro de la propia ciudad. Estas ideas se examinarán con más detalle más adelante en este capítulo.

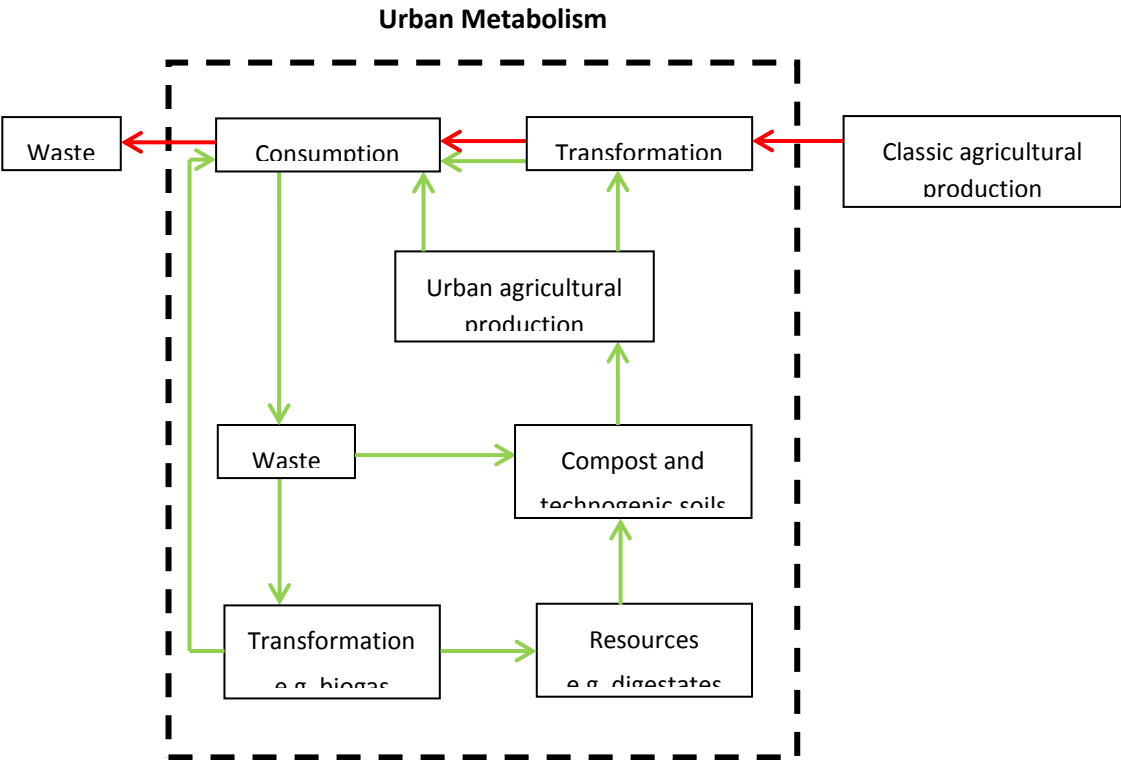


Figura 1: El papel de la agricultura urbana en un sistema ideal de circulación de recursos (de [Nehls et al. 2016](#))

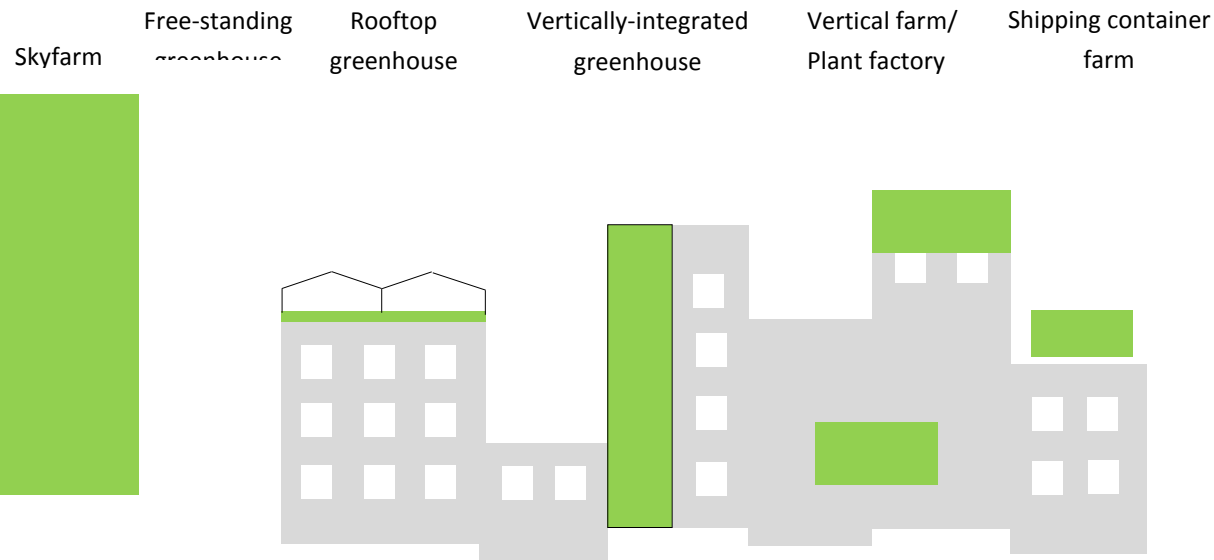




Figura 2: Tipologías de granjas comerciales en interiores.

13.2 Tipología de las granjas urbanas comerciales en interiores

En la agricultura integrada en edificios (BIA, de las siglas en inglés, *building integrated agriculture*) se utilizan predominantemente técnicas de cultivo sin suelo como la hidroponía, la acuaponía o la aeroponía. Los beneficios de la BIA incluyen la producción durante todo el año, mayores rendimientos, un mayor control de la inocuidad de los alimentos y la bioseguridad, y una reducción sustancial de los insumos con respecto al suministro de agua, plaguicidas, herbicidas y fertilizantes, así como una mayor eficiencia energética de los edificios mediante la creación de relaciones simbióticas entre la granja y el edificio que la alberga. Los sistemas BIA pueden aplicarse en la envoltura del edificio - en la azotea o en las fachadas, para aprovechar la disponibilidad de luz natural - o en el interior con luz artificial, o en un edificio independiente (Figura 2), y se controlan todos los parámetros de cultivo. Esto se conoce como Agricultura de Ambiente Controlado, o CEA (*controlled-environment agriculture*), que combina los conocimientos de horticultura e ingeniería para optimizar la producción de cultivos, la calidad de los mismos y la eficiencia de la producción.

13.2.1 Invernaderos de azotea

Entre las diversas formas existentes de BIA, el cultivo en invernaderos de azotea es una de las más populares, ya que los tejados representan una considerable zona urbana no utilizada, y los invernaderos hidropónicos ligeros no necesitan ningún refuerzo estructural significativo del edificio anfitrión ([Benis y Ferrão 2018](#)). La azotea es un paisaje ideal para el cultivo de plantas en las ciudades densas, ya que suele estar más expuesta a la energía solar que el suelo de abajo. Si bien los rendimientos de los invernaderos hidropónicos son más altos que los de las granjas al aire libre en la azotea, la gama de hortalizas que se pueden cultivar es más pequeña y tiende a limitarse a las verduras de hoja, los microverdes, las hierbas, los tomates, los pepinos, las berenjenas, los pimientos y las fresas ([Buehler y Junge 2016](#)). Los invernaderos hidropónicos suelen estar provistos de sistemas de control climático, como ventiladores, calentadores, refrigeración por evaporación, pantallas térmicas y ventanas operables, a fin de acondicionar el aire interior y lograr la temperatura, la humedad relativa y los niveles de dióxido de carbono óptimos, independientemente de las condiciones exteriores. Se calientan con gas natural o electricidad, con un posible respaldo a través de paneles fotovoltaicos (PV). Las instalaciones de última generación captan el calor residual del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado del edificio, y pueden construirse con vidrio solar, que recoge longitudes de onda específicas de la luz solar para generar electricidad, al tiempo que transmite y difunde otras longitudes de onda en el invernadero (Figura 3).

Varias empresas norteamericanas ya han demostrado que se pueden producir cantidades importantes de alimentos durante todo el año para los habitantes de las ciudades en tejados no utilizados en entornos urbanos densos donde la tierra disponible y asequible es un bien escaso. La empresa [Lufa Farms](#) construyó el primer invernadero comercial en azotea del mundo en un edificio industrial en Montreal (Canadá) en 2011. El invernadero de 2880 m² se utiliza para cultivar una variedad de hortalizas diferentes. Desde entonces han construido dos más, uno diseñado para maximizar la producción de tomates (3995 m²), y otro diseñado para el cultivo de verduras de hoja (5853 m²). Cada uno de sus invernaderos, que albergan sistemas hidropónicos NFT, fue diseñado no sólo para ser más grande, sino también más ligero, más barato y más eficiente. En los EE.UU. [Gotham Greens](#) opera 16.000 m² de invernaderos urbanos en la azotea a través de 4 instalaciones en la ciudad de Nueva York y Chicago, también utilizando la hidroponía NFT. Su invernadero insignia, construido en la ciudad de Nueva York en 2011, fue el primer invernadero a escala comercial construido en los Estados Unidos. La instalación de 1394 m² produce más de 45.000 kg de hojas verdes por año. Diseñada y construida con la sostenibilidad como prioridad, las demandas eléctricas de la instalación se compensan con 60 kW de paneles solares fotovoltaicos *in situ*, y las características de diseño de alta eficiencia, como la iluminación LED, el acristalamiento avanzado, la ventilación pasiva y las cortinas térmicas, ayudan a reducir la demanda eléctrica y de calefacción. La integración en el techo reduce aún más el uso de energía, al tiempo que sirve para aislar el edificio que se encuentra debajo. El segundo invernadero de Gotham Greens, construido en 2013, es el primer invernadero a escala comercial que se construye encima de un supermercado. Con una superficie de más de 1858 m², produce más de 90.000 kg de verduras de hoja, hierbas y tomates cada año. Su tercer y más grande invernadero de la ciudad de Nueva York abarca 5574 m² y en él se cultivan más de 5 millones de cabezas de hojas verdes cada año. Esto se ve empujado por su invernadero de Chicago, que con más de 6968 m² representa la granja de azotea más grande y productiva del mundo, donde se cultivan hasta 10 millones de cabezas de hojas verdes y hierbas.

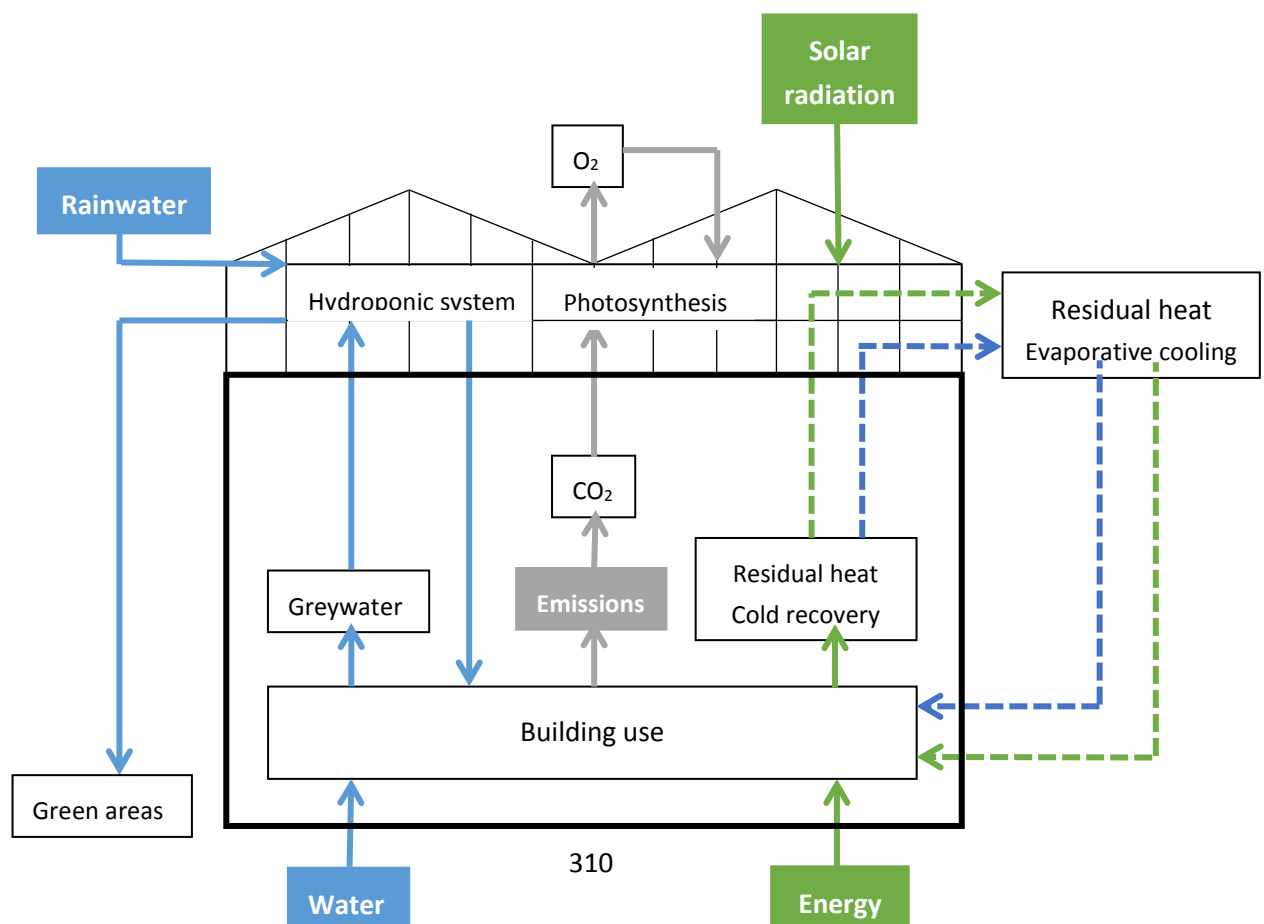


Figura 3: El posible intercambio de flujos de agua, energía y gas entre el invernadero de la azotea y el edificio anfitrión (de [Céron-Palma et al. 2012](#)).

La ciudad de Nueva York alberga otros tres invernaderos hidropónicos en azoteas. [Sky Vegetables](#) cultiva hierbas y verduras, mientras que [The Vinegar Factory](#) cultiva tomates, fresas, hierbas y verduras. Recientemente se ha construido un invernadero en la azotea de [Arbor House](#), un bloque de viviendas asequibles en la ciudad de Nueva York. Situada en un barrio con un número desproporcionadamente elevado de personas de bajos ingresos con altas tasas de obesidad, diabetes y enfermedades cardíacas, la granja hidropónica de 929 m² funcionará como un acuerdo de agricultura con apoyo comunitario (CSA), en el que los residentes pueden comprar los productos mediante un plan de suscripción semanal de cajas de verduras. Alrededor del 40% de los productos se pondrán a disposición de la comunidad local a través de actividades de divulgación en las escuelas, hospitales y mercados cercanos. [Edenworks](#) es una granja acuapónica de invernadero en la azotea, también en la ciudad de Nueva York, en la que se cultivan microverduras.

En Europa, la nueva empresa suiza UrbanFarmers albergó su granja acuapónica comercial piloto, [UF001 LokDepot](#), en un invernadero en la azotea en Basilea. El espacio de cultivo de 260 m² tenía una capacidad de producción anual de 5.000 kg de hortalizas, mientras que el sistema de acuicultura tenía una capacidad de 800 kg de peces. La empresa [ECF Farmsystems](#) con sede en Berlín, ha construido dos invernaderos acuapónicos en la azotea. [Eco Jäger](#), que abrió sus puertas en Bad Ragaz (Suiza) en 2016, cultiva lechugas, hierbas y truchas para restaurantes, hoteles y empresas de catering. [BIGH](#) abrió en Bruselas en 2018, y produce lechuga, hierbas y róbalo rayado híbrido para restaurantes, el mercado de alimentos al por menor, y ventas directas en granjas. El primer invernadero urbano en la azotea en Francia abrió en 2019. [Toit Tout Vert](#) está situado en una zona residencial de París, y los productos de los 1400 m² de espacio de cultivo se venden en tiendas locales.

13.2.2 Invernaderos independientes

Los lotes urbanos vacíos también ofrecen oportunidades para invernaderos independientes. [Metropolitan Farms](#) se encuentra en un antiguo aparcamiento de Chicago. El invernadero acuapónico produce lechuga, albahaca y tilapia que se vende a través de los mercados de los agricultores, las cooperativas locales de alimentos y las tiendas de comestibles especializados. En [ECF Farm Berlin](#), que abrió sus puertas en 2015, tiene una superficie de 1800 m² y se utiliza para cultivar albahaca y perca destinada al mercado minorista de alimentos.

13.2.3 Granjas verticales y fábricas de plantas

El concepto de "agricultura vertical" fue introducido en 2010 por Dickson Despommier en su libro *La Granja Vertical : Alimentando al mundo en el siglo XXI*. Las granjas verticales pueden estar ubicadas en un invernadero o dentro de un edificio, y utilizan varias tecnologías diferentes para cultivar plantas en un plano vertical con el fin de maximizar el rendimiento en relación con la superficie de la unidad de producción (véase el Capítulo 14 para obtener detalles de estas tecnologías de sistemas de cultivo vertical). En teoría, las granjas verticales también pueden colocarse en la fachada de un edificio en forma de invernadero integrado verticalmente (VIG), que consiste en fachadas de edificios de doble piel combinadas con sistemas hidropónicos. Sin embargo, si bien los VIG se han desarrollado como un concepto y se han patentado, todavía no se ha construido ninguno. Las granjas verticales también podrían ser en forma de rascacielos contruidos a propósito (a veces llamados "skyfarms"). Una vez más, tales visiones utópicas aún no se han hecho realidad. Esto se debe, en gran parte, al hecho de que tales proyectos no son económicamente viables.

La empresa [Plantagon](#) con sede en Estocolmo, ha patentado varios diseños de granjas celestes. La construcción del Edificio de Alimentación Mundial (Figura 4), una torre de oficinas de 60 metros de altura que sirve también de granja vertical, comenzó en 2012 en la ciudad sueca de Linköping y debía estar terminada en 2020. El edificio de 40 millones de dólares tenía por objeto demostrar el enfoque de la empresa en materia de arquitectura urbana, que denomina "agritechture", una palabra que combina los términos agricultura, tecnología y arquitectura. El lado norte del edificio contendría 17 pisos de oficinas, mientras que una fachada inclinada de vidrio cubriría el lado sur para permitir que la máxima cantidad de sol pasara a las zonas agrícolas. Una planta cercana de incineración de residuos y biogás proporcionaría al edificio calefacción, así como combustible para la producción de alimentos, mientras que los residuos del invernadero se enviarían a la planta de biogás para el compostaje, creando así un movimiento circular de energía. Sin embargo, la empresa quebró en 2019, lo que plantea dudas sobre si la construcción del Edificio Mundial de Alimentos se completará algún día.

Es más probable que las granjas aéreas se materialicen primero en megalópolis asiáticas como Singapur y Shanghai. Como pequeña isla de sólo 750 km² y una población de más de cinco millones de habitantes, Singapur se enfrenta a posibles problemas de seguridad alimentaria. Con la tierra a precio de oro, sólo 250 acres de la isla se dedican a la agricultura, y Singapur produce sólo el 7% de los alimentos que consume. El resto de las necesidades se satisfacen con importaciones de alimentos de todo el mundo. Sin embargo, los costes de transporte de los alimentos se están volviendo cada vez más prohibitivos y, por estas razones, Singapur ha estado tomando en serio la agricultura vertical. La primera granja de la ciudad, [Sky Greens](#), comenzó a producir en 2012, y el número de granjas verticales creció de seis en 2016 a 26 en 2018 ([Wei 2018](#)).



Figura 4: Renderización del edificio World Food Building en Linköping, Suecia

www.plantagon.com

Shangai es otra ciudad ideal para la agricultura vertical. Con casi 24 millones de habitantes que alimentar y un descenso en la disponibilidad y calidad de las tierras agrícolas, los altos precios de la tierra hacen que la construcción hacia arriba sea más viable económicamente que la construcción hacia afuera. Los planificadores urbanos Sasaki Associates han desarrollado un plan maestro para el [Sungiao Urban Agricultural District](#). Situado entre el principal aeropuerto internacional y el centro de la ciudad, el distrito de 250 acres incluirá 66.611 m² de viviendas, 12.820 m² de espacio comercial, 69.956 m² de granjas verticales y 79.525 m² de espacio público. Si bien responde principalmente a la creciente demanda agrícola de la región, la visión de Sasaki va más allá, utilizando la agricultura urbana como un laboratorio vivo y dinámico para la innovación, la interacción y la educación, y despliega una gama de técnicas agrícolas urbanas favorables, como las granjas de algas, los invernaderos flotantes, los semilleros verticales y las granjas verticales hidropónicas y acuapónicas que se utilizarán para satisfacer la demanda de verduras de hoja en la dieta típica de los shanghaineses (Figuras 5 y 6). La escala del plan aprobado de Sasaki indica el mayor valor que se le da al sector agrícola de China. China es el mayor consumidor y exportador de productos agrícolas del mundo, y la industria proporciona el 22% del empleo del país y el 13% de su producto interno bruto. Por lo tanto, el gobierno chino está muy interesado en preservar, modernizar y exhibir una industria que ha ayudado a reducir significativamente los índices de pobreza. La construcción del distrito comenzó en 2018 y se espera que esté terminada en 2038.



Figura 5: Representación del distrito agrícola urbano de Sunqiao en Shanghai

<http://www.sasaki.com/project/417/sunqiao-urban-agricultural-district/>



Figura 6: Representación del Distrito Agrícola Urbano de Sunqiao en Shanghai

<http://www.sasaki.com/project/417/sunqiao-urban-agricultural-district/>

Si bien las granjas aéreas siguen siendo una visión de futuro, las fábricas de plantas comerciales están en funcionamiento tanto en zonas rurales como urbanas de América del Norte, Europa, Asia oriental y el Oriente Medio. Las fábricas de plantas son un tipo de sistema cerrado de producción de plantas en el que la ventilación se mantiene al mínimo, y se utiliza la luz artificial como única fuente de luz para el crecimiento de las plantas. El entorno puede controlarse con la precisión que se desee, independientemente del clima. Además de la solución de nutrientes en recirculación en un sistema hidropónico, el agua transpirada por las plantas puede condensarse y recogerse en el panel de refrigeración de los acondicionadores de aire y luego reciclarse para el riego. Típicamente las fábricas de plantas consisten en 6 componentes principales: una estructura opaca de tipo almacén, aislada térmicamente y casi hermética; entre 4 y 20 niveles de lechos de cultivo hidropónico apilados verticalmente y equipados con lámparas fluorescentes o LED; acondicionadores de aire (bombas de calor) utilizados para la refrigeración y la deshumidificación para eliminar el calor generado por las lámparas y el vapor de agua transpirado por las plantas, y ventiladores para el aire circulante para mejorar la fotosíntesis y la transpiración, y para lograr una distribución espacial uniforme del aire; una unidad de suministro de CO₂ para mantener la concentración de CO₂ en alrededor de 1000 mmol/L durante el fotoperíodo para mejorar la fotosíntesis; una unidad de suministro de solución de nutrientes con bombas de agua; y una unidad de control ambiental que incluye controladores de conductividad eléctrica (CE) y pH para la solución de nutrientes. Si bien se han utilizado principalmente lámparas fluorescentes debido a su tamaño compacto, los LED se están utilizando cada vez más debido a la baja temperatura de la superficie de la lámpara, la alta eficiencia en el uso de la luz y el amplio espectro de luz. Las últimas fábricas de plantas están utilizando tecnologías robóticas avanzadas que incluyen la teledetección, el procesamiento de imágenes, manos robóticas inteligentes, computación en nube, análisis de grandes datos y modelado en 3-D ([Kozai 2013](#)).

Las plantas que se cultivan en las fábricas de plantas deben tener una altura inferior a unos 30 cm, porque la distancia entre los niveles verticales suele ser de unos 40 cm, que es la altura óptima para maximizar el uso del espacio. Las plantas aptas para la producción comercial mediante fábricas de plantas son las que crecen bien con una intensidad de luz relativamente baja, prosperan con una alta densidad de plantación, son de crecimiento rápido (se pueden cosechar de 10 a 30 días después del trasplante) y para las cuales la mayoría de las partes (85% en peso fresco) son comestibles y vendibles a un precio elevado. Por consiguiente, en Japón y otros países asiáticos, las fábricas de plantas se utilizan para la producción comercial de verduras de hoja, hierbas, plantas medicinales y trasplantes. Las pequeñas fábricas de plantas con una superficie de sólo 15-100 m² también se utilizan ampliamente para la producción comercial de plántulas en Japón, ya que las plántulas pueden producirse en poco tiempo con una alta densidad de plantación. En estas pequeñas fábricas de plantas se producen comercialmente plántulas injertadas y no injertadas de tomate, pepino, berenjena, espinacas y lechuga para el cultivo hidropónico, así como plántulas y esquejes de plantas ornamentales de alto valor ([Kozai 2013](#); [Kozai et al. 2016](#)).

En América del Norte, [Plenty](#), [Planted](#), [Oasis Biotech](#), [FreshBox Farms](#) y [We the Roots](#) operan fábricas de plantas urbanas en antiguos almacenes, mientras que [AeroFarms](#) está en una antigua fábrica de acero. [Fresh Impact Farms](#) está dentro de un centro comercial suburbano, y [Farm.One](#) está en el

sótano de un restaurante. En Europa, [PlantLab](#) en 's-Hertogenbosch, Holanda es una fábrica de 20.000 m² y una instalación de I+D en una fábrica y almacén vacíos. La granja utiliza una avanzada tecnología LED que calibra la composición y la intensidad de la luz según las necesidades precisas, y emplea un sistema automatizado que monitoriza y controla más de 80 variables diferentes, incluyendo la humedad, el CO₂, la intensidad de la luz, el color de la luz, la velocidad del aire, el riego, el valor nutritivo y la temperatura del aire, con el fin de mejorar el rendimiento y la calidad de las plantas. [GROWx](#) en Ámsterdam cultiva microverduras, hierbas y lechuga en un almacén que se cosechan por encargo para restaurantes de élite. En Londres, [GrowUp Urban Farms](#) operaba una granja acuapónica comercial en un almacén, y [Growing Underground](#) cultiva microverduras en un refugio antiaéreo de la Segunda Guerra Mundial a 33 metros bajo el nivel de la calle. [La Caverne](#) es una granja subterránea en un aparcamiento bajo París que cultiva setas, endibias y microverduras.

Las granjas verticales también pueden funcionar en invernaderos, para aprovechar la luz natural; por lo tanto, el medio ambiente sólo está semicontrolado. Algunos ejemplos son [Vertical Harvest](#) en los Estados Unidos y [Sky Greens](#) en Singapur. Inaugurado en 2019, el [Tour Maraichère](#) en el suburbio parisino de Romainville es un invernadero construido especialmente para este fin y que consta de dos unidades, la más alta de las cuales mide 24 metros (figura 7). Los 2060 m² de espacio de cultivo producirán 12 toneladas anuales de frutas, verduras, hongos y flores comestibles, y el invernadero se utilizará para exhibir una cadena de producción de alimentos corta, para proporcionar a los residentes locales alimentos frescos con una baja huella ecológica, para reducir el uso del transporte por carretera y para generar puestos de trabajo.



Figura 7: Renderización de la Tour Maraîchère, París

<http://ilimelgo.com/fr/projets/tour-maraichere.html>

13.2.4 Granjas de contenedores

Otra tendencia emergente en el ámbito de la agricultura urbana son las granjas en contenedores, que también utilizan tecnologías de cultivo vertical. Equipadas con tecnología de control climático de última generación y torres de cultivo hidropónico o canales NFT apilados, las granjas en contenedores permiten la producción durante todo el año y pueden instalarse en terrenos baldíos o en tejados. Las ventajas de los contenedores de transporte marítimo incluyen que sean compactos y modulares, su gran disponibilidad y, si se utilizan contenedores reutilizables, su bajo coste. Como son modulares, pueden apilarse fácilmente, por lo que teóricamente es posible crear una explotación agrícola de muy alta densidad y alto rendimiento, aunque todavía no se ha aprovechado esta oportunidad. El sistema [CropBox](#) es un contenedor de transporte reutilizable que tiene una superficie de 30 m² y utiliza una serie de canales horizontales NFT; puede cultivar 5445 kg de lechuga, 3175 kg de fresas, o 84 toneladas de microverduritas al año. El sistema de [Tiger Corner Farms](#) también utiliza un contenedor de transporte reutilizable, pero se diferencia por el uso de la tecnología aeropónica vertical para cultivar entre 3800 y 7600 cosechas por ciclo de cultivo. [Freight Farms](#) utilizaba originalmente contenedores reutilizados (Leafy Green Machine), pero ahora vende contenedores contruidos especialmente (Greenery) con un mejor aislamiento y un sistema de control climático más eficiente. Ambos sistemas utilizan torres de cultivo verticales y pueden albergar hasta 4500 plantas maduras. La Leafy Green Machine ha sido adoptada por una serie de granjas urbanas en América del Norte para cultivar

verduras de hoja y hierbas, incluyendo [Square Roots](#), [Corner Stalk Farm](#), [Acre in a Box](#), [Very Local Greens](#), [Bright Greens](#) y [Enlightened Crops](#). Una tercera compañía estadounidense, GreenTech Agro, vende el [Growtainer](#), un contenedor hecho a medida que viene en cuatro tamaños - 6, 12, 13,7 y 16 metros - y utiliza una pila patentada de aluminio ligero de lechos de cultivo. Uno de estos sistemas ha sido instalado en el Mercado Central de Dallas, donde se utiliza para cultivar verduras de hoja y hierbas que luego se venden en el supermercado. Los contenedores se fabrican en los EE.UU. y en Rotterdam.

En Europa, [Agricool](#) utiliza contenedores de transporte para cultivar fresas en París. IKEA, el mayor minorista de muebles del mundo, ha comenzado a cultivar lechuga en contenedores fuera de sus tiendas en Suecia, que luego se sirven en los restaurantes de las tiendas ([Thomasson 2019](#)), y el supermercado sueco ICA Maxi ha comenzado a vender verduras de hoja y hierbas cultivadas en contenedores fuera de su tienda en Halmstad ([Jachec 2019](#)). La empresa belga de reciente creación Urban Crop Solutions ha desarrollado dos sistemas de cultivo en contenedores: [FarmFlex](#) y [FarmPro](#). FarmFlex es una granja de contenedores que requiere mano de obra, mientras que FarmPro está totalmente robotizada y se parece más a una fábrica de plantas dentro de un contenedor de transporte.

UrbanFarmers desarrolló un sistema de granja acuapónica urbana que consiste en un contenedor con un invernadero en la parte superior, llamado la [UF Box](#). Este sistema ha sido emulado por la empresa británica GrowUp Urban Farms: la [GrowUp Box](#) puede producir 435 kg de verduras y 150 kg de pescado cada año. El Gembloux Agro-Bio Tech de la Universidad de Lieja, en Bélgica, ha estado probando un sistema similar, la [PAFF Box](#) (Caja de Plantas y Piscicultura) ([Delaide et al. 2017](#)). En Canadá [Ripple Farms](#) produce tilapia, verduras y microverduras utilizando un sistema de contenedores de transporte y de invernaderos de azotea en Toronto.

13.3 La sostenibilidad de las granjas urbanas comerciales en interiores

El suministro a las poblaciones urbanas de alimentos cultivados localmente se considera en general una alternativa más eficiente en cuanto a recursos que la cadena de suministro convencional que utiliza alimentos cultivados en lugares periurbanos o rurales remotos. El cultivo en interiores y sin tierra en las zonas urbanas se presenta como una solución particularmente sostenible, al reducir las millas de alimentos (*food miles*), minimizar el uso de la tierra y el consumo de agua y mejorar los rendimientos. Sin embargo, para garantizar unas condiciones de cultivo óptimas para los cultivos, las granjas de entorno controlado dependen todas ellas del control artificial de la luz, la temperatura, la humedad y los ciclos del agua, por lo que pueden ser muy intensivas en energía, dependiendo de las condiciones climáticas locales y de las características específicas del edificio anfitrión. Por consiguiente, las emisiones de carbono de las granjas urbanas deben sopesarse cuidadosamente con las emisiones potencialmente reducidas, como las procedentes del transporte de alimentos desde las granjas rurales y periurbanas. Los elevados costes económicos de las granjas urbanas, tanto en términos de infraestructura como de costes operacionales, también deben ser cuidadosamente evaluados antes de emprender tal empresa.

13.3.1 Sostenibilidad ambiental

Situada dentro de la ciudad y, por lo tanto, más cerca del consumidor, se suele afirmar que la agricultura urbana de alto rendimiento tiene una huella de carbono menor que la producción rural de alimentos, al reducir las distancias de transporte ("millas de alimentos"). Sin embargo, según las condiciones climáticas locales y la tipología de las explotaciones agrícolas urbanas, la producción de cultivos en entornos controlados también puede ser muy intensiva en energía, lo que puede agravar considerablemente sus impactos ambientales. La huella de carbono neta depende de las emisiones causadas por el uso de energía para el funcionamiento de la explotación agrícola frente a las emisiones evitadas relacionadas con la cadena de suministro existente, incluida la energía operativa de las explotaciones agrícolas que suministran el producto y la energía utilizada en su transporte. Esto puede ilustrarse con dos ejemplos de zonas climáticas muy diferentes en Europa. Cuando se comparó el potencial de calentamiento global (PCM) relacionado con el agua, el transporte y la energía operativa de tres escenarios de agricultura urbana de alta tecnología en Portugal -un invernadero de policarbonato en azotea, una granja vertical con ventanas y tragaluces en el último piso de un edificio, y una granja vertical completamente opaca sin penetración de la luz natural en la planta baja de un edificio- con el PCM de la cadena de suministro actual para los tomates, y con una hipotética granja urbana de azotea no acondicionado de baja tecnología, la granja vertical del último piso y el invernadero de azotea tuvieron el mejor desempeño ambiental general, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero a la mitad y a un tercio, respectivamente, en comparación con la cadena de suministro existente para los tomates ([Benis et al. 2017](#)). Estas conclusiones corroboran los resultados de una evaluación del ciclo de vida de un invernadero en azotea en Barcelona ([Sanyé-Mengual et al. 2013](#); [Sanyé-Mengual et al. 2015a](#)). Por el contrario, [Theurl et al. 2013](#) constataron que la producción de tomates en invernaderos con calefacción en Austria generaba el doble de emisiones de gases de efecto invernadero que la cadena de suministro de tomates importados de España e Italia. Por lo tanto, es esencial tener presente que, si bien se afirma que la agricultura urbana es sostenible para reducir las distancias de transporte, esas instalaciones de uso intensivo de energía tal vez no sean apropiadas para todos los lugares, ya que la primera no compensa sistemáticamente a la segunda.

Sin embargo, el rendimiento ambiental de la agricultura integrada en edificios puede mejorarse potencialmente acoplando los flujos de las prácticas agrícolas -calor, agua, CO₂- con los flujos del edificio anfitrión, y optimizando la eficiencia del sistema mediante la aplicación de métodos de acondicionamiento pasivo, como el aislamiento térmico, la ventilación natural, la refrigeración por evaporación y el uso de tecnologías de gran eficiencia energética, como la iluminación LED.

13.3.2 Sostenibilidad económica

La viabilidad económica de las explotaciones agrícolas comerciales en contextos urbanos debe evaluarse teniendo en cuenta los mayores gastos de capital -en comparación con las explotaciones rurales convencionales- que están intrínsecamente relacionados con su ubicación urbana. En un contexto de urbanización rápida, el espacio urbano es escaso y muy codiciado, y la principal necesidad que generalmente se pretende satisfacer por parte de los municipios es la de vivienda y no la de producción de alimentos, que se aleja cada vez más de los centros urbanos. Mientras que los sistemas agrícolas integrados en los tejados tienen que competir con otras tecnologías integradas en los

tejados, como la energía solar fotovoltaica o la energía solar térmica, los sistemas de cultivo en interiores compiten con otros usos urbanos que suelen ser más atractivos económicamente que la agricultura, como las funciones residenciales o comerciales. Esta alta competencia por las parcelas y edificios urbanos hace que los bienes raíces sean cada vez más caros ([Benis y Ferrão 2018](#)).

En todo el mundo, el precio de la tierra es generalmente alto en las zonas urbanas. Además de los elevados alquileres, la agricultura urbana comercial de alta tecnología es una industria que requiere mucho capital, ya que implica la adaptación del edificio anfitrión para el cultivo, de acuerdo con los reglamentos municipales y los códigos de construcción locales. Esta limitación urbana fue identificada como una de las principales barreras para la aplicación en gran escala de la BIA ([Cerón-Palma et al. 2012](#)). La eficacia en función de los costes de la explotación urbana dependerá de su tipología. Las fábricas de plantas necesitan sólo el 10% de la superficie de la tierra, en comparación con los invernaderos, para obtener la misma productividad/m², y pueden construirse fácilmente en cualquier edificio en desuso. Si bien los costes de capital son elevados -alrededor de un 15% más que los de un invernadero- la productividad anual es de unas 3000 cabezas de lechuga/m²/año, que es 15 veces la de un invernadero (unas 200 cabezas de lechuga/m²/año). Por lo tanto, el coste inicial por unidad de capacidad de producción de una fábrica de plantas es más o menos el mismo que el de un invernadero, aunque esta estimación es aproximada y varía en función de muchos factores ([Kozai et al. 2016](#)).

Además de entrañar altos costes de inversión, los sistemas agrícolas comerciales de alta tecnología a menudo entrañan importantes costes de explotación debido a sus elevadas necesidades de energía ([Thomaier et al. 2015](#)). Además, mientras que las explotaciones agrícolas rurales suelen beneficiarse de agua y energía subvencionadas para la agricultura, las situadas en zonas urbanas tienen que pagar los costes urbanos de abastecimiento de agua y energía, aplicables de acuerdo con la zonificación. Si la explotación está situada en una zona residencial, los costes serán más elevados que si está situada en una zona comercial ([Benis y Ferrão 2018](#)).

Los costes de producción (mano de obra, electricidad, depreciación y otros) varían en todo el mundo. En Japón, por ejemplo, los costes de los componentes de las fábricas de plantas son, en promedio, de 25-30% para la mano de obra, 25-30% para la electricidad, 25-35% para la depreciación, y 20% para otros costes de producción (alquiler de la tierra, semillas, agua, reemplazo de lámparas, artículos de oficina, materiales de empaque, costes de entrega, etc.). Los costes de mano de obra son tan altos porque la mayoría de las fábricas de la planta son de pequeña escala, y por lo tanto las operaciones de manipulación tienen que ser realizadas manualmente. Se estima que una fábrica de planta de 15 niveles con una superficie de 1 ha necesita más de 300 empleados a tiempo completo. En comparación, la mayoría de las operaciones de manipulación en un complejo de invernaderos con una superficie de 10 ha o más están automatizadas, por lo que sólo se necesitan unos pocos empleados por hectárea ([Kozai et al. 2016](#)).

En la Tabla 1 se muestra el proceso de conversión de energía en una sala de cultivo de una fábrica de plantas de alto rendimiento energético. La energía eléctrica fijada como energía química en la parte vendible de las plantas es del 1-2%. La energía eléctrica restante se convierte en energía térmica en la

sala de cultivo, por lo que el coste de calefacción de una fábrica de planta térmicamente bien aislada es cero. En la gestión de los costes de producción de las fábricas, el porcentaje de peso de la parte comestible o utilizable de la planta respecto al peso total de la misma es un índice importante para mejorar el rendimiento de los costes. Dado que se consume energía eléctrica para producir las raíces, si éstas no son vendibles, la masa de las raíces debe reducirse al mínimo sin comprometer el crecimiento de la parte aérea de la planta.

Cantidad de energía consumida por las lámparas	100%
La energía lumínica emitida por las lámparas	25-35%
La energía de la luz absorbida por las hojas	15-25%
Energía química fijada en las plantas	1.5-2%
La energía química contenida en la parte vendible de las plantas	1-2%

Tabla 1: La conversión de energía en una fábrica de planta (de [Kozai et al. 2016](#))

El coste de la electricidad puede reducirse mediante: 1) la utilización de LED avanzados para mejorar el factor de conversión de la energía eléctrica en energía luminosa; 2) la mejora del sistema de iluminación con reflectores bien diseñados para aumentar la relación entre la energía luminosa emitida por las lámparas y la absorbida por las hojas de las plantas; 3) la mejora de la calidad de la luz para potenciar el crecimiento y la calidad de las plantas; 4) el control óptimo de la temperatura, la concentración de CO₂, la solución de nutrientes, la humedad y otros factores; y 5) el aumento del porcentaje de la parte vendible de las plantas mediante la mejora del método de cultivo y la selección de los cultivares ([Kozai et al. 2016](#)).

Los costes de la electricidad también pueden reducirse mediante el uso de paneles solares. Las fábricas de plantas urbanas en edificios independientes, como antiguos almacenes y fábricas, tienen más posibilidades de generar su propia electricidad que las situadas en edificios que forman parte de una densa matriz urbana. La cantidad de energía necesaria para alimentar las fábricas de plantas independientes depende de las dimensiones del edificio. Cuando un edificio ocupa una superficie mayor, las necesidades de iluminación y agua aumentan, pero también lo hace la cantidad de energía disponible a través de los paneles solares en la azotea y, potencialmente, en la fachada. La cantidad de energía que puede ser generada por los paneles solares depende obviamente de la ubicación geográfica de la fábrica de la planta.

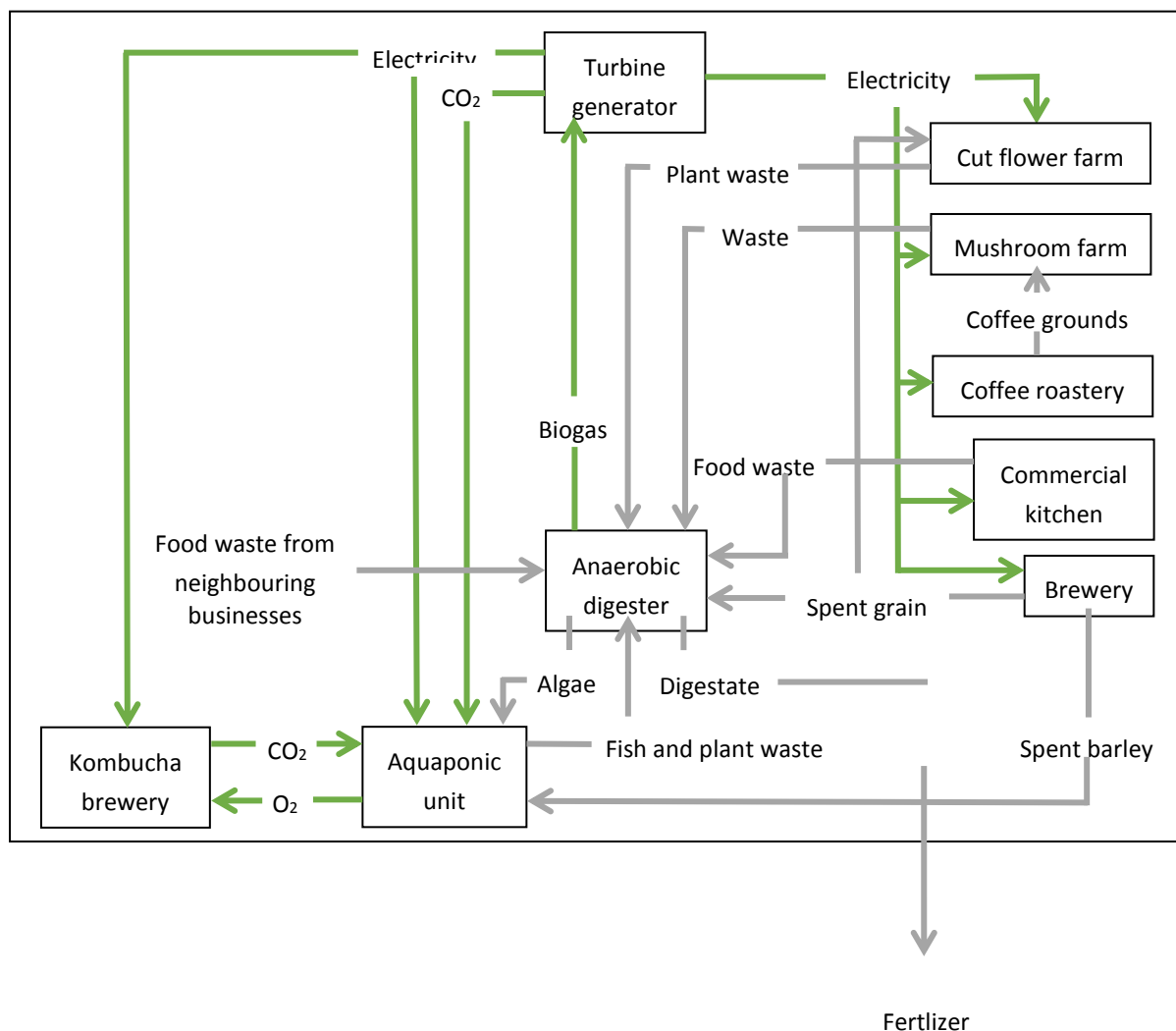
El consumo neto de agua para el riego en una fábrica de plantas es aproximadamente el 2% del de un invernadero, porque alrededor del 95% del vapor de agua transpirado de las hojas de la planta se condensa en el panel de refrigeración (evaporador) de los acondicionadores de aire en forma de agua líquida, que se recoge y luego se devuelve al depósito de solución de nutrientes después de la esterilización. La solución de nutrientes drenada de los lechos de cultivo también se devuelve al tanque de solución de nutrientes después de la esterilización. Así, la cantidad de agua que hay que añadir al tanque es igual a la cantidad de agua que conservan las plantas cosechadas, y la cantidad

que se escapa al exterior en forma de vapor de agua a través de los huecos de aire. Del mismo modo, la cantidad de nutrientes que se añade es igual a la cantidad de nutrientes absorbidos por las plantas cosechadas. Por lo tanto, la eficiencia del uso del agua y de los nutrientes es superior a 0,95 y 0,90 respectivamente ([Kozai et al. 2016](#)).

13.3.3 La agricultura urbana y la economía circular

La economía circular es actualmente uno de los términos más discutidos entre los científicos de economía ambiental y es un tema central de la estrategia Horizonte 2020 de la Unión Europea. Su principal elemento definitorio es el "uso restaurador" de los recursos: en lugar de convertirse en residuos desechados, las materias primas se reciclan y reutilizan ([Geisendorf y Pietrulla 2018](#)). La agricultura urbana ofrece varias posibilidades para adoptar este enfoque, que se ejemplifica mejor con [The Plant](#). En 2010, la empresa social [Bubbly Dynamics LLC](#) adquirió una antigua planta empacadora de carne en Chicago y elaboró un plan para utilizar el edificio como un espacio para incubar empresas de alimentos y agrícolas, con lo que se devolverían empleos muy necesarios a una comunidad convertida en un "desierto de alimentos" que carece de opciones de alimentos saludables. La instalación de 8686 m² alberga actualmente más de una docena de pequeños negocios, incluyendo granjas de interior y exterior, cervecerías de kombucha y cerveza, una panadería, una distribuidora de queso, una tostadora de café y otros productores y distribuidores de alimentos. A principios de 2018, había aproximadamente 85 puestos de trabajo equivalentes a tiempo completo en la instalación. La planta todavía está en construcción y está aproximadamente un 70% arrendada; se espera que esté totalmente ocupada en 2019.

Fundada en un modelo de cierre de los circuitos de residuos, recursos y energía, La Planta está trabajando para mostrar cómo es la producción urbana de alimentos verdaderamente sostenible. El digestor anaeróbico planeado es una característica clave, ya que está diseñado para resolver varias cuestiones críticas mediante la reutilización de lo que convencionalmente se considera "residuos" para crear varios productos valiosos. Los residuos del edificio serán una fracción del volumen de residuos procesados por el digestor, pero el digestor demostrará que incluso las empresas de producción de alimentos, que son típicamente de residuos y energía intensiva, pueden operar de manera sostenible cerrando los circuitos de residuos. La Figura 8 es un diagrama conceptual de los diversos procesos previstos en The Plant a plena ocupación.



13.4 Legislación y gobernanza

Común (como se caracteriza por una agricultura más convencional). Para otros, no se considera suficientemente rural para asegurar el apoyo en el marco de los programas de desarrollo rural mencionados. De cara al futuro, el desafío para la agricultura urbana es cómo lograr la integración necesaria en todas las esferas de política de la Unión Europea durante el próximo período de programación, después de 2020 ([McEldowney 2017](#)). Por consiguiente, el sector de la agricultura urbana en Europa se caracteriza por iniciativas de abajo arriba, que son informales y no institucionalizadas. Aunque la agricultura urbana está empezando a ser reconocida a nivel institucional en algunos países, todavía falta una política pública centrada directamente en ella. En general se considera que la agricultura urbana es responsabilidad de los gobiernos locales, pero como a menudo falta un marco formal, el apoyo a nivel de los gobiernos locales tiende a ser informal y fragmentado. Por ejemplo, el Plan de Londres, que es la estrategia de desarrollo espacial para la zona del Gran Londres, establece simplemente que los municipios deben identificar en sus planes de desarrollo los posibles sitios que podrían utilizarse para la producción comercial de alimentos. Con un marco normativo apropiado, las iniciativas podrían estar mejor fundamentadas y aseguradas. La inclusión de la agricultura integrada en la construcción en las políticas de desarrollo urbano o en los planes marco de planificación urbana aumentaría su importancia para el desarrollo urbano. Por ejemplo, modificar los códigos de zonificación -permitiendo actividades de cultivo de alimentos en determinadas categorías, o adoptando una zona de uso de la tierra de agricultura urbana formal-, reconocer la agricultura urbana como una estrategia de desarrollo económico, facilitar el acceso a la tierra y eliminar las restricciones que se derivan de otras esferas de política, podrían tener un efecto positivo en el desarrollo de la agricultura urbana ([Prové et al. 2016](#)).

Algunas ciudades han dado los primeros pasos para adaptar los códigos locales a fin de promover la agricultura urbana. París ha adoptado un enfoque muy estructurado y proactivo, que comenzó con la realización de una auditoría de todos los edificios públicos subexplotados o vacíos que podrían albergar explotaciones agrícolas urbanas. En 2016 se modificaron las normas de planificación urbana para permitir la construcción por encima de los límites de altura máxima en 7 metros si se trata de construir un invernadero agrícola, y el alcalde de París puso en marcha la iniciativa [Parisculteurs](#) cuyo objetivo es cubrir 247 acres de tejados y paredes de París con vegetación para 2020, de los cuales un tercio se destinará específicamente a la agricultura urbana. Se pidió a los propietarios de terrenos públicos y privados que presentaran espacios adecuados que pudieran utilizarse para esta iniciativa, y los arquitectos y diseñadores presentaron entonces propuestas específicas para cada lugar. Uno de los ganadores de la primera ronda del concurso fue el proyecto [Green'elle](#), que proponía la primera granja acuapónica en azotea de la ciudad. El permiso de construcción se concedió en 2018, y cuando entre en funcionamiento el invernadero de 3000 m² tendrá una capacidad de producción anual de 30 toneladas de frutas y verduras y 3 toneladas de truchas. Los productos se venderán a los residentes locales a través de un plan de cajas de verduras de Agricultura Apoyada por la Comunidad, y a los mercados, y restaurantes y mayoristas. Otro ganador fue [La Caverne](#), una granja vertical en la que se cultivan champiñones, endibias y microverduras en un aparcamiento subterráneo. [HRVST dans le Métro](#) fue uno de los ganadores de la segunda ronda. Situada en un bucle de giro del metro subterráneo en desuso bajo el Parc Monceau, la granja vertical de 5.000 m² cultivará productos destinados a restaurantes de alta gama. Una tercera ronda de la competencia está en marcha en 2019. Otra iniciativa lanzada por el alcalde de París es [Reinventir Paris](#), una convocatoria de proyectos

innovadores de desarrollo urbano para revelar todo el potencial de los espacios subterráneos de París. Aunque su alcance es más amplio que el de la iniciativa Parisculteurs, ya que se invita a los equipos a proponer proyectos que sean a la vez arquitectónicos, económicos, culturales y sociales, uno de los ganadores de la primera ronda fue [FlabFarm](#), una microgranja de insectos y restaurante de 450 m² situada en un sótano de dos plantas que se inaugurará en 2021.

En los últimos años, la ciudad de Nueva York se ha convertido en un epicentro de la agricultura urbana. Antes de 2012 las leyes de zonificación de la ciudad de Nueva York consideraban los invernaderos de azotea como espacio adicional ocupable que contaba para la relación de superficie útil (FAR) calculable de un edificio y, por lo tanto, no se permitían en edificios que ya estuvieran en la relación FAR máxima permitida o cerca de ella. Esto cambió en 2012 cuando el Departamento de Planificación Urbana aprobó una enmienda al Texto Verde de la Zona que fomentaba la construcción de nuevos edificios y la modernización de los existentes para hacerlos más eficientes desde el punto de vista energético y sostenibles, incluidas las renovaciones que fomentan la agricultura urbana. Entre las disposiciones de la enmienda que beneficiaban a la agricultura de medio ambiente controlado figuraban la de permitir que un invernadero de azotea se considerara una "obstrucción permitida", eximiéndolo de las FAR de un distrito de zona siempre que estuviera en un edificio sin viviendas, utilizado principalmente para el cultivo de plantas, de menos de 7,6 metros de altura, en su mayor parte transparente, y alejado del muro perimetral en 1,8 metros si superaba la altura del edificio del distrito ([Goodman y Minner 2019](#)).

Varios funcionarios públicos también han apoyado activamente el desarrollo de la agricultura urbana. Por ejemplo, en 2015 el alcalde de la ciudad de Nueva York introdujo una ley local para enmendar la Carta de la ciudad de Nueva York a fin de crear una junta asesora sobre agricultura urbana, y en 2017 el presidente del distrito de Brooklyn introdujo una legislación en la que se pedía al Departamento de Planificación Urbana de la ciudad de Nueva York que creara un plan amplio de agricultura urbana para aprovechar el movimiento de agricultura urbana y utilizarlo para abordar el empoderamiento de la comunidad y los jóvenes, el desarrollo económico y la atención de la salud. Aunque el plan no ha avanzado, una ley local provisional ha dado lugar a la creación del [New York City urban agriculture website](#) que sirve como página de aterrizaje para los agricultores interesados. No obstante, en lo que respecta a la agricultura de medio ambiente controlado, la atención de las autoridades locales se ha centrado en la financiación de la agricultura hidropónica en las escuelas, más que en el desarrollo de la agricultura comercial. En un estudio reciente se comprobó que, en comparación con 131 instalaciones en escuelas públicas, sólo hay 8 granjas comerciales de CEA en la ciudad: seis invernaderos en la azotea (cinco hidropónicos y uno acuapónico), una fábrica de plantas y una granja de contenedores ([Goodman y Minner 2019](#)).

Si bien el CEA comercial ha dado lugar a la creación de un pequeño número de empleos verdes urbanos, puede que no proporcione suficientes beneficios para garantizar el apoyo del sector público. Los productos cultivados por las granjas comerciales del CEA en la ciudad de Nueva York contribuyen mínimamente a los 1.848.842.500 kilos de frutas y verduras que se calcula que consumen anualmente sus residentes. También hay pocas pruebas de que los productos del CEA cultivados en la ciudad de Nueva York aborden los problemas de inseguridad alimentaria y acceso que afectan a casi tres

millones de neoyorquinos, especialmente los de comunidades de bajos ingresos. Esto puede deberse a que los productos del CEA cultivados localmente son demasiado caros, o no están disponibles en suficientes tiendas de comestibles del vecindario, o por razones aún no identificadas. Los productos que se cultivan en las granjas comerciales de CEA en la ciudad de Nueva York también tienden a tener sólo un valor nutricional moderado: los altos costes de puesta en marcha significan que los agricultores urbanos necesitan recuperar esos costes mediante el cultivo de cosechas de alto valor para consumidores adinerados, como la lechuga y la albahaca, en lugar de productos nutricionales de precio para residentes de bajos ingresos, como las espinacas y la col rizada. Por lo tanto, los productos contribuyen sólo mínimamente al objetivo de los funcionarios electos que apoyan la agricultura urbana de aumentar el consumo de los neoyorquinos de frutas y verduras saludables, especialmente los que corren el riesgo de padecer obesidad, diabetes y otras enfermedades crónicas relacionadas con la salud ([Goodman y Minner 2019](#)).

Si bien las conclusiones de este estudio son específicas de la ciudad de Nueva York, tienen implicaciones para la adopción de la CEA en otros centros urbanos. El apoyo municipal a esos emprendimientos sólo se obtendrá si se pueden demostrar los supuestos beneficios -el potencial ambiental, económico y social- de los proyectos ubicados en azoteas y terrenos de propiedad pública.

13.5 Modelos empresariales de agricultura urbana

Hay muchos tipos diferentes de modelos para el funcionamiento exitoso de un negocio. Un modelo de negocio es una estrategia para que una empresa obtenga beneficios y ayuda a identificar los productos o servicios que la empresa venderá, el mercado objetivo y los gastos previstos. Una nueva empresa en desarrollo necesita tener un modelo de negocio para atraer la inversión, ayudarla a reclutar talento y motivar a la dirección y al personal. Las empresas establecidas tienen que revisar y actualizar sus planes de negocios regularmente para anticipar las tendencias y los desafíos que se avecinan. Jan Wilhelm van der Schans, de la Universidad de Wageningen, identifica cinco tipos de modelo comercial de agricultura urbana ([van der Schans 2015](#); [van der Schans et al. 2014](#)):

1. Diferenciación

Una estrategia de diferenciación se basa en crear distinciones con las cadenas de suministro convencionales. Una empresa agrícola urbana puede distinguirse manteniendo la producción, la elaboración y la distribución en sus propias manos (integración vertical). Al incluir varios pasos de la cadena de suministro, puede ser capaz de captar una mayor parte del margen de beneficios, o al menos mantener un mejor control sobre el carácter distintivo del producto. Una empresa agrícola urbana también puede distinguirse en cuanto a sus productos mediante el cultivo de cosechas inusuales como las verduras “*heirloom*” (no genéticamente modificadas) y las hortalizas étnicas, así como de variedades perecederas que son más difíciles de transportar a grandes distancias, o productos con altos costes de transporte, y haciendo hincapié en el carácter estacional del producto frente a la disponibilidad durante todo el año en los supermercados.

2. Diversificación

Una estrategia de diversificación tiene por objeto proporcionar otros bienes y servicios, además de la producción de alimentos. Una empresa agrícola urbana puede ofrecer una serie de actividades orientadas al mercado de empresa a consumidor, como la educación y la asistencia social, así como actividades de empresa a empresa, como la producción de energía a partir de residuos verdes urbanos y el compostaje. Las iniciativas de agricultura urbana pueden marcar la diferencia al descentralizar la gestión de los desechos.

3. Bajo coste

La estrategia de bajo coste en la agricultura convencional suele consistir en ampliar el negocio para realizar economías de escala. Sin embargo, se trata de una estrategia de desarrollo empresarial para la que hay poco o ningún espacio en el contexto urbano. La agricultura urbana puede realizar una estrategia de bajo coste utilizando recursos urbanos que actualmente están infrautilizados, como las parcelas vacías, los edificios vacíos, los desechos orgánicos urbanos, el exceso de agua de lluvia y los desechos de calor urbano. El uso del trabajo voluntario o el despliegue de personas desfavorecidas es también una forma de reducción de costes. La integración vertical, que elimina el intermediario, también puede considerarse una estrategia de bajo coste.

4. Recuperar los bienes comunes

La agricultura urbana ofrece a los ciudadanos la oportunidad de recuperar el control de su suministro de alimentos y de tomar conciencia de dónde proceden sus alimentos. Reintroduce el sentimiento de propiedad, a veces literalmente cuando los ciudadanos se convierten en copropietarios de un negocio a través de la financiación colectiva. Cada vez son más populares los planes de agricultura con apoyo comunitario, en los que un agricultor ofrece a sus miembros una parte de la producción a cambio de una suscripción fija, y los miembros tienen la oportunidad de ponerse en contacto con los cultivadores, la tierra donde se cultivan sus alimentos, y entre sí en actos sociales periódicos. La cuota puede variar según los caprichos de la producción, de modo que se comparten los riesgos y las recompensas, mientras que la suscripción suele pagarse por adelantado y a un plazo relativamente largo, proporcionando así ingresos seguros al productor.

5. Experiencia

Esta estrategia se basa en la idea de que se añade más valor proporcionando experiencias memorables que proporcionando bienes y servicios básicos (la economía de la experiencia). Los agricultores urbanos son capaces de escenificar experiencias únicas precisamente por la corta distancia entre la granja y el público objetivo. La agricultura urbana es una experiencia de la dinámica rural y urbana en una simbiosis única, y un enriquecimiento del paisaje metropolitano.

Desde el punto de vista de la gestión empresarial, la agricultura urbana es atípica: en la gestión empresarial es una regla de oro que la estrategia de una empresa debe basarse en un modelo de ingresos bien definido. Sin embargo, en el caso de la agricultura urbana, una mezcla de modelos empresariales puede ser una buena base para la supervivencia: por ejemplo, utilizar voluntarios (bajo

coste) y clientes de asistencia social (diversificación) para cultivar, procesar y distribuir un producto distintivo (diferenciación) utilizando un esquema de cajas de verduras CSA (recuperar los bienes comunes), y abrir la granja a visitantes de pago (experiencia) ([van der Schans 2015](#); [van der Schans et al. 2014](#)).

Algunos de los pioneros de la agricultura urbana ([Lufa Farms](#), [Gotham Greens](#)) han perfeccionado su modelo de negocio para impulsar la rentabilidad, ampliando sus invernaderos de azotea para lograr economías de escala, aunque [Sky Vegetables](#) que, como Lufa Farms y Gotham Greens, empezó a producir en 2011, sigue funcionando en un invernadero de azotea comparativamente pequeño (743 m²). Las economías de escala también son importantes para las granjas verticales cubiertas, citándose el pequeño tamaño de la unidad de producción comercial de la [GrowUp Urban Farm](#) en Londres (762 m²) como la razón de su cierre. Sin embargo, en el otro extremo de la escala, FarmedHere, que con 8361 m² de lechos de cultivo se promocionó como la mayor granja cubierta de los Estados Unidos cuando abrió sus puertas en Chicago en 2013, cerró cuatro años más tarde porque los altísimos costes de energía y mano de obra la hicieron no rentable ([Beytes 2017](#)).

Los tres pioneros de las granjas urbanas tienen modelos de negocio muy diferentes. Sky Vegetables cultiva sólo ocho variedades de hierbas y verduras, que vende en línea a minoristas. Gotham Greens cultiva 13 tipos diferentes de hojas de ensalada, albahaca y tomates, que se venden a los consumidores a través de tiendas de comestibles en línea y en más de 500 supermercados, tiendas de comestibles y mercados de agricultores en 15 estados del este. También vende sus productos a 115 restaurantes en la ciudad de Nueva York y Chicago, y a Delta Airlines. Lufa Farms cultiva 89 variedades diferentes de verduras de hoja y cultivos frutales. Esto es posible gracias a la operación de tres grandes invernaderos de azotea con soluciones de nutrientes optimizadas para diferentes plantas: un invernadero se utiliza para cultivar sólo tomates y berenjenas; el segundo se utiliza para cultivar lechugas, verduras y hierbas; y el tercero se utiliza para cultivar pepinos, pimientos picantes, microverduras, hierbas y flores comestibles. El modelo comercial de Lufa Farms utiliza una combinación de venta directa - que elimina los márgenes de venta al por menor y otros costes, suscripción - que permite a la empresa adaptar su producción en relación con la demanda, y venta cruzada - que implica ofrecer productos y servicios complementarios más allá de la propia gama de la empresa con el fin de vender más bienes. Lufa Farms se ha asociado con otros agricultores, en su mayoría locales y orgánicos, para vender una amplia gama de alimentos junto con sus propios productos, entre ellos queso, carne, mariscos y productos de panadería, así como con algunos agricultores de Florida que cultivan productos tropicales (plátanos, aguacates y naranjas).

Los clientes se suscriben a una cesta semanal de productos con un valor mínimo de 15 dólares canadienses utilizando el [online marketplace](#), que se entrega a domicilio por una tarifa, o se puede recoger en cientos de puntos de recogida en los barrios de todo Montreal, incluidas farmacias, peluquerías, supermercados, tiendas de conveniencia, cafeterías y campus universitarios. Este tipo de modelo comercial híbrido es claramente atractivo para los clientes: la granja puede transmitir los ahorros resultantes de la venta directa, mientras que tanto la suscripción como la venta cruzada ahorran tiempo a los clientes. Lufa Farms entrega 10.000 pedidos cada semana.

[Fresh Impact Farms](#) aprovecha el ambiente controlado de su granja en un centro comercial suburbano de Arlington, Virginia, para cultivar flores y hierbas comestibles que se adaptan a las preferencias de los chefs de alto nivel. Los sabores se hacen más intensos, o más sutiles, alterando la mezcla de nutrientes, la temperatura del agua o el espectro de la luz. Desde su lanzamiento en 2016, la granja ha experimentado con 250 variedades de plantas y actualmente crece entre 50 y 60 a la vez. Muchas de las variedades más exitosas fueron sugeridas originalmente por chefs. La granja trabajó con una compañía para desarrollar su propio software que rastrea la retroalimentación recibida de los chefs para cada cultivo, de manera que el sabor pueda ser ajustado en el siguiente lote.

Algunas granjas urbanas han adoptado una mezcla de con fines de lucro y sin fines de lucro para su modelo de negocio. [Vertical Harvest](#) en Jackson (Wyoming), es una empresa impulsada por el impacto que combina la inversión privada, los recursos públicos y la filantropía con el fin de crear un impacto económico y social positivo para la comunidad local. La empresa emplea a personas con discapacidades físicas e intelectuales, y la lechuga, las verduras, los microverduras y los tomates se venden a las tiendas de comestibles y restaurantes locales. [BetterLife Growers](#) es una operación de cultivo de lechugas y hierbas aeropónicas creada para proporcionar nuevos trabajos con salario digno en Houston, Texas, a personas que de otro modo sería difícil contratar, incluidas las que tienen antecedentes penales. Los empleados reciben capacitación en habilidades laborales y conocimientos fiscales, y los productos se venden a instituciones locales como universidades, hospitales e instalaciones gubernamentales, así como a distribuidores mayoristas y tiendas de comestibles al por menor.

El auge de la agricultura urbana ha dado lugar a una gran cantidad de empresas de nueva creación, no sólo de granjas urbanas, sino también de proveedores de equipo y consultoría. Algunas de ellas se han convertido en empresas muy exitosas. Por ejemplo, [Infarm](#) fue fundada por tres jóvenes empresarios en Berlín en 2013 con la ambiciosa visión de alimentar a las ciudades del mañana acercando las granjas al consumidor. La empresa desarrolló un sistema de granja modular hidropónico fácilmente escalable y de rápido despliegue para el cultivo de lechuga, hierbas y microverduras en cualquier espacio urbano de venta al por menor o restaurante. Cada granja es su propio ecosistema, con recetas de cultivo que adaptan los espectros de luz, la temperatura y los nutrientes para asegurar el máximo rendimiento de cada cultivo. Una matriz de sensores recoge y registra los datos de crecimiento de cada granja, y cualquier ajuste necesario se controla a distancia. Desde entonces, la empresa ha crecido hasta tener 250 empleados y está en vías de conseguir más de 100 millones de dólares en contratos en 2019. Infarm se ha asociado con 25 importantes minoristas de alimentos en Alemania, Suiza y Francia y ha desplegado más de 200 granjas en tiendas y 150 granjas en centros de distribución de minoristas de comestibles en línea. Los 100 millones de dólares de nueva financiación obtenidos en 2019 de inversores de capital de riesgo se utilizarán para ampliar el crecimiento de la empresa en Europa y para extenderse a los Estados Unidos y otros países, y para hacer crecer los equipos de I+D, operativos y comerciales ([HortiDaily 2019](#)).

Otras empresas de nueva creación que suministran equipo agrícola urbano son las compañías estadounidenses [Freight Farms](#) y [Vertical Crop Consultants](#), ambas de las cuales venden granjas de contenedores llave en mano. Además, al utilizar diferentes sistemas de cultivo en sus granjas de contenedores - Freight Farm utiliza torres de cultivo mientras que Vertical Crop Consultants utiliza un sistema de lechos apilados horizontales - las dos empresas se diferencian en sus modelos de negocio. Además de su granja de contenedores Greenery™, Freight Farms vende un software de gestión de granjas y una aplicación que permite a los agricultores controlar a distancia los datos de los sensores - desde los niveles de nutrientes y pH hasta la temperatura y el CO₂ - y analizar la relación entre los ajustes de la granja y el rendimiento. Si es necesario, un equipo de servicios al cliente puede acceder a las mediciones para ayudar a solucionar problemas y encontrar soluciones fáciles. Por una tarifa única, Freight Farm ofrece un curso en línea sobre cómo utilizar la granja de contenedores, y una suscripción actual al software de gestión de la granja da acceso de por vida a los materiales en línea. Por consiguiente, Freight Farm ha adoptado el modelo comercial de proveedor de soluciones, que ofrece una cobertura total de productos y servicios en un dominio determinado. Al pagar una suscripción anual por el software de gestión agrícola basado en la nube, en lugar de una cuota de licencia única, el agricultor tiene garantizado el acceso a la última versión. La capacidad de Freight Farm de acceder a las métricas del agricultor le permite aprovechar los datos de los clientes, que luego puede utilizar para optimizar su sistema de explotación de contenedores. Por otra parte, Vertical Crop Consultants vende una cartera de productos mucho más diversificada. Junto con su granja de contenedores CropBox y la aplicación asociada para teléfonos inteligentes, venden sistemas hidropónicos verticales y horizontales a medida, y tienen una tienda en línea que vende más de 5.000 suministros diferentes para cultivos hidropónicos: iluminación, soluciones de nutrientes, bombas, sistemas de riego, dispositivos de aireación, etc. - fabricados por otras empresas.

En Europa, la empresa francesa [Refarmers](#), fundada en 2015, es la distribuidora oficial en Europa del sistema de plantación vertical ZipGrow, fabricado en los Estados Unidos. En el Reino Unido [LettUs Grow](#), fundada en 2015, vende sistemas aeropónicos y granjas modulares, así como software de gestión de granjas para el control automatizado a distancia, la recopilación de datos y el análisis del crecimiento de los cultivos. [V-Farm](#), que comenzó en 2006 como un proyecto para la producción de forraje y pasto agropiro, desarrolló su primer sistema de estanterías escalonadas para el cultivo de hierbas en 2011, y ahora produce una gama de sistemas modulares NFT y de inundación y drenaje adecuados para el cultivo a escala comercial. En Bélgica, [Urban Crop Solutions](#), fundada en 2014, ofrece una ventanilla única en cuanto a equipo de cultivo de plantas de interior llave en mano y servicio posventa. Su departamento de I+D ha desarrollado recetas de cultivo para más de 200 variedades de cultivos.

Establecida en 2018, la empresa sueca [Bonbio](#) se define como un "proveedor llave en mano que opera en el campo de la agricultura circular y la producción de cultivos". Han desarrollado un concepto propio de agricultura circular en el que convierten los residuos de alimentos en nutrientes orgánicos de plantas que han sido optimizados para la agricultura hidropónica. A largo plazo, los nutrientes de Bonbio estarán disponibles en los comercios o en los centros de jardinería, pero mientras tanto la compañía está trabajando con IKEA para convertir los residuos de sus restaurantes en una solución

nutritiva que luego se utiliza para cultivar lechugas en contenedores fuera de las tiendas, y las hojas de ensalada se utilizan en los restaurantes.

[iFarm](#) es una empresa rusa de nueva creación fundada en 2017 que trata de revolucionar la agricultura mediante el suministro de sistemas agrícolas verticales automatizados, invernaderos y módulos de cultivo que utilizan el suelo en lugar de la hidroponía. Dirigido a las pequeñas y medianas empresas, los invernaderos automatizados modulares de iFarm pueden albergar todo tipo de cultivos y están diseñados para adaptarse a diversos espacios urbanos, como terrenos baldíos y tejados, mientras que el sistema de granja vertical modular puede colocarse en cualquier lugar del interior. Los módulos de cultivo están destinados al cultivo de verduras y fresas en restaurantes y tiendas de comestibles. Los tres sistemas funcionan mediante un software conectado a la nube que controla automáticamente todos los aspectos del medio ambiente -incluyendo la temperatura, el suministro de agua, la iluminación y los nutrientes mezclados en el suelo-, lo que permite programar eficazmente las cualidades de las plantas. Mediante una base de datos centralizada, los agricultores urbanos pueden descargar recetas de cultivo diseñadas para maximizar la calidad de cultivos específicos, basadas en los datos recogidos que son analizados por un equipo de científicos de iFarm. Se recogen más de 50 parámetros de datos diferentes de cada metro cuadrado de suelo: éstos verifican las etapas de crecimiento y señalan cuándo cosechar y qué hacer con cada cultivo. Debido a que las recetas se pueden descargar fácilmente, este tipo de sistema está diseñado para atraer a un nuevo tipo de agricultor urbano, uno que puede ser experto en tecnología pero que no sabe mucho de horticultura. También atraerá a los cultivadores que quieren ser capaces de certificar sus productos como orgánicos, lo que actualmente no es posible en Europa para los productos cultivados en hidroponía. La compañía también ha desarrollado un robot de plantación.

En 2019, iFarm obtuvo un millón de dólares de apoyo de Gagarin Capital, una empresa rusa de capital de riesgo que invierte en nuevas empresas de alta tecnología, que utilizará para hacer crecer su negocio en Rusia y expandirse en Europa. En cuanto a las granjas urbanas, ha habido una serie de inversiones de alto perfil en la industria en los últimos años. La empresa Plenty, con sede en San Francisco, recaudó un récord de 200 millones de dólares del conglomerado japonés SoftBank Group Corp ([Cosgrove 2017](#)). Una de las nuevas empresas agrícolas urbanas de Francia que ha logrado atraer millones de fondos es [Agricool](#), que cultiva fresas en contenedores en París. Fundada en 2015, la empresa ha recaudado 12 millones de euros de inversores privados, una primicia en la historia de la agricultura urbana francesa. Las fresas se venden a mayoristas locales, supermercados y tiendas de alimentos gourmet. La empresa tiene cuatro contenedores operativos que producen una media de 200 cajas de fresas al día, lo que todavía no es suficiente para obtener beneficios. Con la ampliación de sus operaciones, se espera que sea rentable para 2021 ([Luquet 2018](#)).

Pero mientras que algunas empresas agrícolas urbanas están prosperando, un gran número de ellas también han fracasado. En Vancouver, Alterrus se declaró en bancarrota después de menos de dos años de funcionamiento. Cuando el negocio se puso en marcha en noviembre de 2012, había prometido producir unos 68.000 kg de verduras y hierbas al año en el invernadero hidropónico de la azotea. El modelo de negocio de la granja consistía en vender verduras y hierbas sin plaguicidas a restaurantes de alto nivel ([Howell 2014](#)). La empresa [Plantagon](#) con sede en Estocolmo, tenía la

intención de trasladar la producción de alimentos a las ciudades de alta densidad a gran escala mediante el desarrollo y la explotación de granjas integradas en la infraestructura urbana existente - en torres de oficinas, aparcamientos subterráneos y en las fachadas de los edificios existentes. Las granjas podrían ser remodelaciones o extensiones de los bienes inmuebles existentes, o nuevas construcciones, y se aplicarían como sistemas simbióticos utilizando la infraestructura existente, como la refrigeración/calefacción, la producción de biogás, la gestión de residuos/agua y la producción de energía para producir alimentos. La primera granja de Plantagon, la Plantagon CityFarm, se inauguró en el sótano de un edificio de oficinas en Estocolmo en 2018 y la empresa tenía la intención de implantar 10 CityFarms más en la ciudad para 2020. La granja subterránea, en la que se esperaba cultivar 100 kg de verduras al día, almacenaba el calor emitido por los focos LED y luego reutilizaba esa energía para calentar las oficinas de arriba, lo que le permitía no pagar nada en concepto de alquiler. Sin embargo, la granja tenía dificultades para vender los productos que cultivaba por el precio que necesitaba, y Plantagon se declaró en quiebra en 2019, alegando problemas de flujo de caja y la dificultad de atraer suficiente capital para seguir siendo financieramente sostenible. Plantagon puede haber estado adelantado a su tiempo en cuanto a la magnitud de sus proyectos y la velocidad con que quería realizar sus ambiciones. El desfase entre la innovación prometedora y su realización efectiva es algo que hace que la industria agroalimentaria se dispare una y otra vez ([Marston 2019](#)).

Muchas de las empresas emergentes que han fracasado eran granjas acuapónicas urbanas. Uno de los principales factores que determinan el posible éxito de la acuaponía es su competitividad frente a los métodos de producción alternativos. Los costes de inversión en las granjas acuapónicas son casi el doble de los de las granjas hidropónicas, y para ser rentables, la granja necesita maximizar tanto la producción de plantas y peces como los ingresos. Ya se ha mencionado la desaparición de la granja urbana "FarmedHere and GrowUp". Green y Gills, situada en el sótano de The Plant, en Chicago, estuvo en funcionamiento sólo tres años, de 2012 a 2015. Urban Organics, una granja acuapónica de 8083 m² en St. Paul, Minnesota, cultivaba verduras de hoja y hierbas en una antigua cervecería, y vendía las verduras a los mayoristas y la tilapia, la trucha ártica y la trucha arco iris a los restaurantes; cerró en 2019 después de seis años de funcionamiento. UF002 De Schilde, una granja acuapónica dirigida por UrbanFarmers en La Haya (Países Bajos), estuvo en funcionamiento de 2015 a 2018. En el invernadero de azotea se cultivaban tomates, pepinos, pimientos y verduras de hoja, mientras que el componente de acuicultura alojado en el último piso del antiguo edificio de seis pisos de Philips se utilizaba para criar tilapia. De aquí surgió la idea de llenar todo el edificio con nuevas empresas para actuar como centro de innovación y conocimiento para la agricultura urbana. Irónicamente, [New Urban Farm](#) abrió en el mismo mes en que Urban Farmers quebró. Los actuales inquilinos del cuarto piso son [HaagseZwam](#) que cultiva hongos en los posos de café, y vende kits de cultivo de hongos. Las otras nuevas empresas presentes cuando el centro abrió en 2018 - Rebel Urban Farms y Uptown Greens - ya no parecen estar activas en el edificio.

UF002 De Schilde estaba perdiendo dinero desde el principio, ya que los costes eran altos y los ingresos demasiado bajos, y los inversores ya no estaban dispuestos a financiar la granja. Podría decirse que el modelo de negocio era defectuoso; un cultivo de mayor valor y más especializado como los microverduras, que pueden venderse a restaurantes de alto nivel y otros consumidores, podría

haber sido una mejor opción que los tomates y otros cultivos frutales que se producen a gran escala en el campo holandés y están disponibles en los supermercados a precios muy competitivos. La pregunta más fundamental que deben hacerse todos los nuevos agricultores, independientemente de su técnica de cultivo, es ¿qué van a cultivar y para quién? Si no pueden venderlo, no deberían cultivarlo. Por lo tanto, para poder responder a esta pregunta hay que hacer un estudio de mercado para saber qué es lo que los mercados no pueden obtener o necesitan más, quiénes serán los clientes y los precios potenciales que se podrían cobrar. La aceptación social y las preferencias de los consumidores potenciales son factores decisivos para el éxito o el fracaso de un negocio empresarial. Una encuesta en gran escala realizada en Berlín para determinar las actitudes de los consumidores hacia las diferentes formas de agricultura urbana reveló un bajo nivel de aceptación de las granjas verticales y acuapónicas en comparación con los invernaderos de azotea ([Specht et al. 2016b](#)). Estos resultados son coherentes con los de estudios anteriores en los que se investigaron las percepciones de los interesados sobre los invernaderos de azotea en Barcelona ([Sanyé-Mengual et al. 2015b](#)) y Berlín ([Specht et al. 2016a](#)). Una encuesta sobre las actitudes de los consumidores de Adelaida (Australia) respecto de las granjas acuapónicas urbanas también reveló un bajo nivel de aceptación, que se correlacionó positivamente con el nivel de ignorancia de los encuestados respecto de la acuaponía ([Pollard et al. 2017](#)). Esto corrobora las conclusiones de una encuesta paneuropea sobre la aceptación de la acuaponía por parte de los consumidores ([Milicic et al. 2017](#)).

Todas estas encuestas revelan una percepción de la agricultura sin suelo como una técnica de cultivo "antinatural", y sólo unos pocos interesados tienen una opinión neutral al respecto. En general, la aceptaron o la rechazaron radicalmente. Esto puede explicar la falta de demanda, lo que significa que muchas operaciones agrícolas urbanas no están todavía en plena producción durante todo el año, a pesar de que se pregona la temporada de cultivo de 12 meses como uno de los principales beneficios de la industria. Las granjas de interior que han logrado las ventas para producir continuamente, como Gotham Greens con sus invernaderos de azotea en Nueva York y Chicago, tienen una base de clientes que responde a una fuerte marca "local" más que a la tecnología que hay detrás de los alimentos.

Las granjas de hongos urbanas como [HaagseZwam](#) deben el secreto de su éxito al empleo de los principios de la economía circular. En París, [La Boîte à Champignons](#) utiliza los posos de café para cultivar hongos ostra en el sótano de un supermercado y vende sus productos a ese y otros supermercados y restaurantes cercanos. Diversifican aún más sus operaciones vendiendo kits de cultivo casero que se pueden pedir en línea, así como kits educativos para estudiantes escolares. [RotterZwam](#), que se encuentra en una antigua piscina de Rotterdam, también cultiva hongos ostra. Además de los posos de café, también utilizan la cáscara de café - otro producto de desecho - como sustrato. Han hecho acuerdos de suministro con la mayoría de los micro tostadores de Rotterdam, así como con los tostadores de la región circundante, con el fin de asegurar la cantidad que necesitan para su producción, que recogen gratuitamente cada semana. Dado que la mayoría del café se consume en casa (alrededor del 70%), han desarrollado un kit de cultivo para que la gente pueda utilizar sus propios residuos de café para cultivar hongos. También venden entradas para visitas a la granja. [GroCycle](#) en Exeter, Reino Unido, cultiva sus setas ostras en los posos de café en un edificio de oficinas no utilizado (Figura 9). Además de vender sus productos a restaurantes y tiendas de alimentos, también venden kits de setas para cultivo casero, convierten los residuos de su ciclo de cultivo en

abono y ofrecen un curso en línea sobre cultivo de setas de baja tecnología. [Hut und Stiel](#) de Viena, que también utiliza los granos de café para cultivar hongos de ostra, vende los productos de mejor aspecto a los colmados, mientras que los hongos de menor calidad se utilizan para pastas y salsas en colaboración con una tienda de delicatessen vienesa. También venden cultivos iniciales para el cultivo doméstico.



Figura 9: Micelio de hongo de ostra que crece en los posos de café en bolsas de 12 kg con columna colgante
<https://grocycle.com/>

Estos ejemplos de granjas de hongos urbanas ilustran la gama de diferentes productos y servicios que pueden generarse, además de los propios hongos. Las variedades de hongos gourmet como la ostra y el shiitake son un producto de primera calidad. Por ejemplo, en el Reino Unido el precio de venta al público es de unos 13 euros/kg, en comparación con los 3 euros/kg de los tomates cherry. Los champiñones pueden crecer en sólo 3 o 4 semanas de principio a fin, y una superficie de cultivo de 10 m² puede producir 10 kg de champiñones a la semana. Además de poder reducir sus costes mediante el uso de sustrato gratuito para cultivar sus productos, las granjas urbanas de hongos tienen costes de operación mucho más bajos en comparación con las granjas urbanas que cultivan verduras de hoja y cultivos frutales: a diferencia de las plantas, los hongos pueden crecer sin luz, por lo que no hay necesidad de costosos focos de crecimiento LED, aunque las variedades de ostras de color sí requieren luz para colorear. Los sótanos son perfectos para el cultivo de hongos porque es relativamente fácil estabilizar tanto la temperatura como la humedad, siempre que se pueda mantener un buen flujo de aire, y también son un espacio muy común en las ciudades.

13.6 Conclusiones

La agricultura urbana comercial en interiores requiere de ingenieros, horticultores, científicos especialistas en el manejo de datos, especialistas en HVAC, científicos de plantas y más, todos ellos con el conocimiento y la comprensión de la agricultura de ambiente controlado. El agricultor urbano también se enfrenta a una logística específica y a la gestión de la cadena de suministro en sentido

descendente, por lo que necesita conocer tanto el aspecto empresarial como el operativo de la agricultura urbana. Temas como el análisis de mercado, la gestión operacional, la modelización de la mano de obra, la comercialización, la determinación de los puntos de precio, la logística y la distribución son componentes clave que todas las granjas urbanas utilizan. La agricultura urbana comercial en interiores es un campo de negocios nuevo y relativamente no probado. En las megalópolis de Asia oriental y el Oriente Medio, tiene el potencial de hacer una contribución importante a la cadena de suministro de alimentos en las zonas urbanas. En América del Norte y Europa, en cambio, las explotaciones agrícolas urbanas simplemente no pueden competir con las explotaciones periurbanas y rurales debido a su tamaño limitado y a los mayores costes de producción por unidad de producción, por lo que es poco probable que se produzcan cambios generalizados en la legislación y la gobernanza que los faciliten. Sin embargo, sí ofrecen oportunidades para crear productos de alto valor y de primera calidad que pueden ser muy rentables. Si bien los productos de frutas y hortalizas no pueden comercializarse como "orgánicos" en Europa, ya que la certificación se limita a las explotaciones agrícolas basadas en el suelo, todavía pueden obtener precios de primera calidad si se hace hincapié en el carácter local de la producción, en lugar de la tecnología que se utilizó para producirlos. Otros productos de alto valor que podría ser rentable cultivar en granjas urbanas cubiertas incluyen plantas medicinales, crocus (para el azafrán), hinojo marino, berros y caracoles comestibles. Cualquiera que sea el producto, la tipología de la granja -invernadero en la azotea, fábrica de plantas, granja de contenedores, etc. - debe estar adaptada a ella, y el producto debe estar adaptado a la base de clientes. Sin embargo, aunque los productos y procesos de calidad son de gran importancia, no decidirán el éxito o el fracaso de una empresa: el destino de una empresa depende cada vez más de su capacidad para aplicar el modelo empresarial innovador adecuado que la diferencie de sus competidores.

13.7 Referencias

- Benis, K. y Ferrão, P. 2018. [Commercial farming within the urban built environment – Taking stock of an evolving field in northern countries](#). *Global Food and Security* 17, 30-37.
- Benis, K., Reinhart, C. y Ferrão, P. 2017. [Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture \(BIA\) in urban contexts](#). *Journal of Cleaner Production* 147, 589-602.
- Beytes, C. 2017. [FarmedHere shuts down](#). Grower Talks.
- Buehler, D. y Junge, R. 2016. [Global trends and current status of commercial urban rooftop farming](#). *Sustainability* 8 (11), 1108.
- Cerón-Palma, I., Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J.I y Rieradevall, J. 2012. [Barriers and opportunities regarding the implementation of Rooftop Eco.Greenhouses \(RTEG\) in Mediterranean cities of Europe](#). *Journal of Urban Technology* 19, 1-17.
- Cosgrove, E. 2017. [SoftBank invests in largest ever agtech deal, a \\$200m Series B for indoor ag startup Plenty](#). AgFunder News.
- Delaide, B., Delhay, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. y Jijakli, M.H. 2017. [Plant and fish production performance, nutrient mass balance, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponics system](#). *Aquacultural Engineering* 78, 130-139.

- Despommier, D. 2010. *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*. St Martin's Press, New York.
- Geisendorf, S. y Pietrulla, F. 2018. [The circular economy and circular economic concepts – a literature analysis and redefinition](#). *Thunderbird International Business Review* 60, 771-782.
- Goodman, W. y Minner, J. 2019. [Will the urban agricultural revolution be vertical and soilless? A case study of controlled environment agriculture in New York City](#). *Land Use Policy* 83, 160-173.
- HortiDaily 2019. [Infarm gets \\$100 million financial boost](#). HortiDaily.com.
- Howell, M. 2014. [Alterrus bankruptcy soils garden vision](#). Vancouver Daily.
- Jachec, H. 2019. [Swedish grocery store reveals line of produce grown on-site](#). iGrow.
- Kozai, T. 2013. [Plant factory in Japan – current situation and perspectives](#). *Chronica Horticulturae* 53 (2), 8-11.
- Kozai, T., Niu, G. y Takagaki, M. 2016. [Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production](#). Academic Press, London.
- Luquet, A. 2018. [Paris leads the way in France's growing urban farming history](#). The Epoch Times.
- Marston, J. 2019. [What Plantagon's bankruptcy could tell us about the future of large-scale vertical farming](#). The Spoon.
- McEldowney, J. 2017. [Urban agriculture in Europe: Patterns, challenges and policies](#). European Parliamentary Research Service.
- Miličič, V., Thorarinsdottir, R., Dos Santos, M. y Turnšek Hančič, M. 2017. [Commercial aquaponics approaching the European market: To consumers' perceptions of aquaponics products in Europe](#). *Water* 9 (2), 80.
- Nehls, T., Jiang, Y., Dennely, C., Zhan, X. y Beesley, L. 2016. From waste to value: Urban agriculture enables cycling of resources in cities. In F. Lohrberg, L. Lička, L. Scazzosi y A. Timpe (eds.) [Urban Agriculture in Europe](#), pp. 170-173. Jovis, Berlin.
- Pollard, G., Ward, J.D. y Koth, B. 2017. [Aquaponics in urban agriculture: Social acceptance and urban food planning](#). *Horticulturae* 3 (2), 39.
- Prové, C., Kemper, D., Loudiyi, S., Mumenthaler, C. y Nikolaidou, S. 2016. Governance of urban agriculture initiatives: insight drawn from European case studies. In F. Lohrberg, L. Lička, L. Scazzosi y A. Timpe (eds.) [Urban Agriculture in Europe](#), pp. 64-69. Jovis, Berlin.
- Sanyé-Mengual, E., Céron-Palma, I., Oliver-Solà, J., Montero, J.I y Rieradevall, J. 2013. [Environmental analysis of the logistics of agricultural products from rooftop greenhouses in Mediterranean urban areas](#). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93, 100-109.
- Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J.I. y Rieradevall, J. 2015a. [An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse \(RTG\) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level](#). *International Journal of Life Cycle Assessment* 20, 350–366.
- Sanyé-Mengual, E., Anguelovski, I., Oliver-Solà, J., Montero, J.I. y Rieradevall, J. 2015b. [Resolving differing stakeholder perceptions of urban rooftop farming in Mediterranean cities: promoting food production as a driver for innovative urban forms](#). *Agriculture and Human Values* 33, 101-120.
- Specht, K., Siebert, R. y Thomaier, S. 2016a. [Perception and acceptance of agricultural production in and on buildings \(ZFarming\): a qualitative study from Berlin, Germany](#). *Agriculture and Human Values* 33, 753-769.

- Specht, K., Weith, T., Swoboda y Siebert, R. 2016b. [Socially acceptable urban agriculture businesses](#). *Agronomy for Sustainable Development* 36, 17.
- Theurl, M.C., Haberl, H., Erb, K.-H. y Lindenthal, T. 2013. [Contrasted greenhouse emissions from local versus long-range tomato production](#). *Agronomy for Sustainable Development* 34 (3), 593-602.
- Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U.B. y Sawicka, M. 2015. [Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming \(ZFarming\)](#). *Renewable Agriculture and Food Systems* 30, 43–54.
- Thomasson, E. 2019. [IKEA to start serving salad grown at its stores](#). Reuters.
- van der Schans, J.W. 2015. [Business Models Urban Agriculture](#). Wageningen University.
- van der Schans, J.W., Renting, H. y van Veenhuizen, R. 2014. [Innovations in urban agriculture](#). *Urban Agriculture Magazine* 28, 3-12.
- Wei, L.D. 2018. [Berry fresh prospects for vertical farming](#). The Straits Times.
- Vermeulen, S., Campbell, B.M. y Ingram, J.S.I. 2012. [Climate change and food systems](#). *Annual Review of Environment and Resources* 37, 195-222.

14.ACUAPONÍA VERTICAL

14.1 Introducción

La mayoría de los sistemas acuapónicos utilizan lechos de cultivo horizontales, emulando así las prácticas tradicionales basadas en el suelo para el cultivo de hortalizas. Sin embargo, en los últimos años han surgido nuevas tecnologías de cultivo vertical que, cuando se vinculan a la parte de acuicultura de un sistema acuapónico, pueden permitir el cultivo de más plantas en comparación con los lechos horizontales, utilizando el espacio vertical que normalmente no se utiliza en las unidades de producción y los invernaderos, y que por lo tanto podrían hacer que los sistemas fueran más productivos, especialmente en las zonas urbanas donde el espacio de cultivo puede ser costoso ([Palm et al. 2018](#)). Esta premisa parece estar respaldada por estudios comparativos de sistemas hidropónicos verticales y horizontales, que mostraron una productividad significativamente mayor en los sistemas verticales en cuanto a la relación entre el rendimiento y la superficie de suelo ocupada ([Liu et al. 2004](#); [Neocleous et al. 2010](#); [Ramírez-Arias et al. 2018](#); [Ramírez-Gómez et al. 2012](#); [Touliatos et al. 2016](#)).

Sin embargo, si bien la utilización óptima del espacio es la ventaja más comúnmente citada de la acuaponía vertical, ésta se ve potencialmente superada por las diversas desventajas. El *biofouling* (ensuciamiento) en un sistema acuapónico es típico, y los sistemas verticales son particularmente susceptibles a la obstrucción y a la reducción de los caudales que pueden privar de agua a las plantas, por lo que será necesario un lavado rutinario a presión de los componentes del sistema para evitarlo ([Patillo 2017](#)). Además, mientras que un sistema de flujo horizontal sólo utiliza la electricidad para bombear el agua a los tanques, se requiere un bombeo adicional para elevar el agua a la parte superior de los sistemas acuapónicos verticales. El cultivo de plantas en lechos horizontales tiene la ventaja de que, en teoría, la luz natural se transmite por todos los lados en un invernadero autónomo sin que se produzcan bloqueos de otros equipos y componentes del sistema y, cuando se necesita iluminación, estos sistemas de iluminación pueden situarse fácilmente inmediatamente por encima de las plantas sin ningún impedimento. Sin embargo, con la acuaponía vertical la luz natural desde arriba será mayor hacia la parte superior del sistema que hacia la inferior, y los propios elementos verticales bloquearán la luz que entra en el invernadero. Por lo tanto, se necesitará iluminación artificial para compensar estas pérdidas ([Khandaker y Kotzen 2018](#)). Antes de embarcarse en la acuaponía vertical es necesario realizar cuidadosos análisis de coste-beneficio, sopesando los beneficios de los rendimientos potencialmente más altos frente a los costes adicionales de la electricidad.

Hay muchos diseños diferentes de sistemas hidropónicos verticales que podrían combinarse potencialmente con una unidad de producción de peces. El cultivo vertical puede implicar múltiples capas de cultivo en aguas profundas, NFT, sistemas de inundación y drenaje, o torres de cultivo que implican métodos de cultivo aeropónicos, en los que las raíces de las plantas se suspenden en el aire y se rocían con agua rica en nutrientes. El diseño del sistema dictará cuántas plantas se pueden cultivar por metro cuadrado, y también influirá en los rendimientos. Numerosos estudios han demostrado que el crecimiento de las raíces y los brotes, las relaciones planta-agua, la absorción de nutrientes, la transpiración y el rendimiento se ven afectados por la restricción de las raíces en el cultivo sin suelo. Las plantas pueden ser más susceptibles a las anomalías de crecimiento, como la pudrición del

extremo de la flor en los tomates y los pimientos, y la quemadura de la punta de la hoja en la lechuga. Cuanto más pequeña sea la zona de las raíces, más intensamente deberá gestionarse el sistema de producción para proporcionar un entorno de rizosfera libre de estrés para el crecimiento óptimo de la planta ([Heller et al. 2015](#)).

14.2 Torres de crecimiento

Las torres de cultivo son tubos verticales a través de los cuales el agua rica en nutrientes se difunde desde la parte superior, generalmente a través de un emisor de goteo, creando así la "lluvia" dentro de la torre al gotear sobre las raíces de las plantas que están suspendidas en el aire. Las torres o columnas pueden ser huecas o estar llenas de un sustrato que proporciona apoyo a las raíces y ayuda a la dispersión del agua. En su forma más simple, una torre de cultivo puede ser una sección de tubería de PVC con agujeros cortados en los lados. En su estudio comparativo de la lechuga cultivada en un sistema de torre hidropónico y un sistema convencional de NFT horizontal, [Touliatos et al. 2016](#) encontraron que el sistema de torre producía 13,8 veces más cosecha que el sistema horizontal, calculado como una relación entre el rendimiento y la superficie de suelo ocupada. Sin embargo, el peso fresco medio de las lechugas cultivadas en el sistema horizontal era significativamente mayor que el de las lechugas cultivadas en el sistema vertical. Si bien la productividad de los cultivos era uniforme en el sistema horizontal, el peso fresco de los brotes disminuyó desde la parte superior hasta la base de la torre, muy probablemente como resultado de los gradientes en la disponibilidad de nutrientes y la intensidad de la luz. Se han informado sobre gradientes de luz similares en otros ensayos de invernaderos que utilizan sistemas de torres hidropónicas ([Liu et al. 2004](#); [Ramírez-Gómez et al. 2012](#)). Las fresas cultivadas en torres verticales de PVC rellenas de perlita con una densidad de plantas de 32 plantas/m² produjeron un rendimiento comercial de 11,8 kg/m²; sin embargo, el rendimiento por planta se redujo en 40 g con cada 30 cm de disminución de la altura de la torre, como resultado de condiciones de luz subóptimas en las secciones inferiores de la torre ([Durner 1999](#)). El diámetro de las torres también tendrá un efecto en el crecimiento de las plantas. Los valores del contenido de agua en las torres altas y estrechas serán inferiores a los de las torres más cortas y anchas que tienen un volumen igual de medio de cultivo por unidad de longitud, y las raíces de las plantas estarán sometidas a mayores variaciones diarias de temperatura que pueden afectar a la absorción de nutrientes y perturbar el metabolismo de los hidratos de carbono en la raíz, lo que dará lugar a un crecimiento inhibido ([Heller et al. 2015](#)).

El sistema aeropónico [Tower Farms](#) es modular: una torre de tres metros de altura podría cultivar 52 verduras de hoja, hierbas o cultivos frutales, o 208 microverdes. Cada torre de PVC para uso alimentario está equipada con una pequeña bomba de 50 W y un temporizador que enciende la bomba durante 3 minutos y la apaga durante 12 minutos en un ciclo continuo. Aunque técnicamente cada torre tiene una huella de menos de 1 m², 2 m² por torre incluirían suficiente espacio para las torres, la estación de dosificación, el espaciado de los pasillos y el área del banco de propagación. En Europa, el sistema de granjas-torre está distribuido por [Ibiza Farm](#).



Figura 1: El sistema Tower Farm

<https://ibiza.farm/>

En su encuesta a los productores comerciales de acuaponía, [Love et al. \(2015\)](#) observaron que casi un tercio de ellos utilizaban torres de cultivo. Sin embargo, faltan datos comparativos sobre los rendimientos de los sistemas de torres acuapónicas y los sistemas acuapónicos horizontales convencionales. [ZipGrow](#) es una tecnología hidropónica vertical diseñada para la producción de cultivos verticales de alta densidad por Bright Agrotech, que opera un sistema acuapónico vertical de 400 torres en Laramie, Wyoming (Figura 2). Su densidad de espaciado es de una torre por cada 0,7 m². El cultivo se planta en un canal que recorre la longitud de un lado de cada tubo cuadrado rígido de PVC resistente a los rayos UV. Las plantas crecen en el propio medio de cultivo patentado de la compañía llamado Matrix Media, que está hecho de botellas de agua recicladas y un aglutinante de óxido de silicona. El medio de cultivo, que se riega desde la parte superior mediante goteros, proporciona muchos beneficios al sistema acuapónico. En primer lugar, tiene una superficie biológica extremadamente alta de unos 82-88 m²/m³, lo que permite que el sistema tenga tasas de nitrificación muy altas y fomenta el crecimiento saludable de las plantas. En segundo lugar, tiene un índice de vacío del 91% debido a su naturaleza fibrosa. Esta elevada porosidad crea un entorno muy aeróbico para las raíces de las plantas y un enriquecimiento en oxígeno del agua nutritiva que se filtra a través de la torre, y también permite altas tasas de percolación. Además, debido al entorno aeróbico, los sólidos pueden acumularse y descomponerse en el medio sin crear un microambiente anaeróbico ([Michael 2016](#)). En Europa, el sistema ZipGrow es distribuido por [Refarmers](#). Una torre estándar de 152 cm (5 pies) proporciona filtración mecánica y biológica para 0,7 a 1,1 kg de peces maduros. Se recomienda una densidad de población de entre 12 y 15 kg por m³.



Figura 2: El Sistema ZipGrow

<https://www.greenlifeplanet.net/product-page/zipgrow-tower>

Como se ha señalado anteriormente, la mayoría de los sistemas de torres experimentan una gran pérdida de luz. Esto es especialmente cierto en los sistemas de 4 lados, que experimentan casi un 90% de pérdida de luz desde la parte delantera superior de la masa de la torre hasta la parte trasera inferior de la masa de la torre, incluso cuando están generosamente espaciados. Sin embargo, cuando las torres de ZipGrow se agrupan y gestionan adecuadamente, la pérdida de luz es muy baja, incluso a razón de 0,5-0,8 metros cuadrados por torre. Hay tres configuraciones que un cultivador puede utilizar, dependiendo de sus instalaciones y tipos de cultivo: configuración en masa, configuración en línea y pasillos orientados. Los cultivadores también pueden conservar la luz mediante el uso de cultivos transportados (Figura 3).

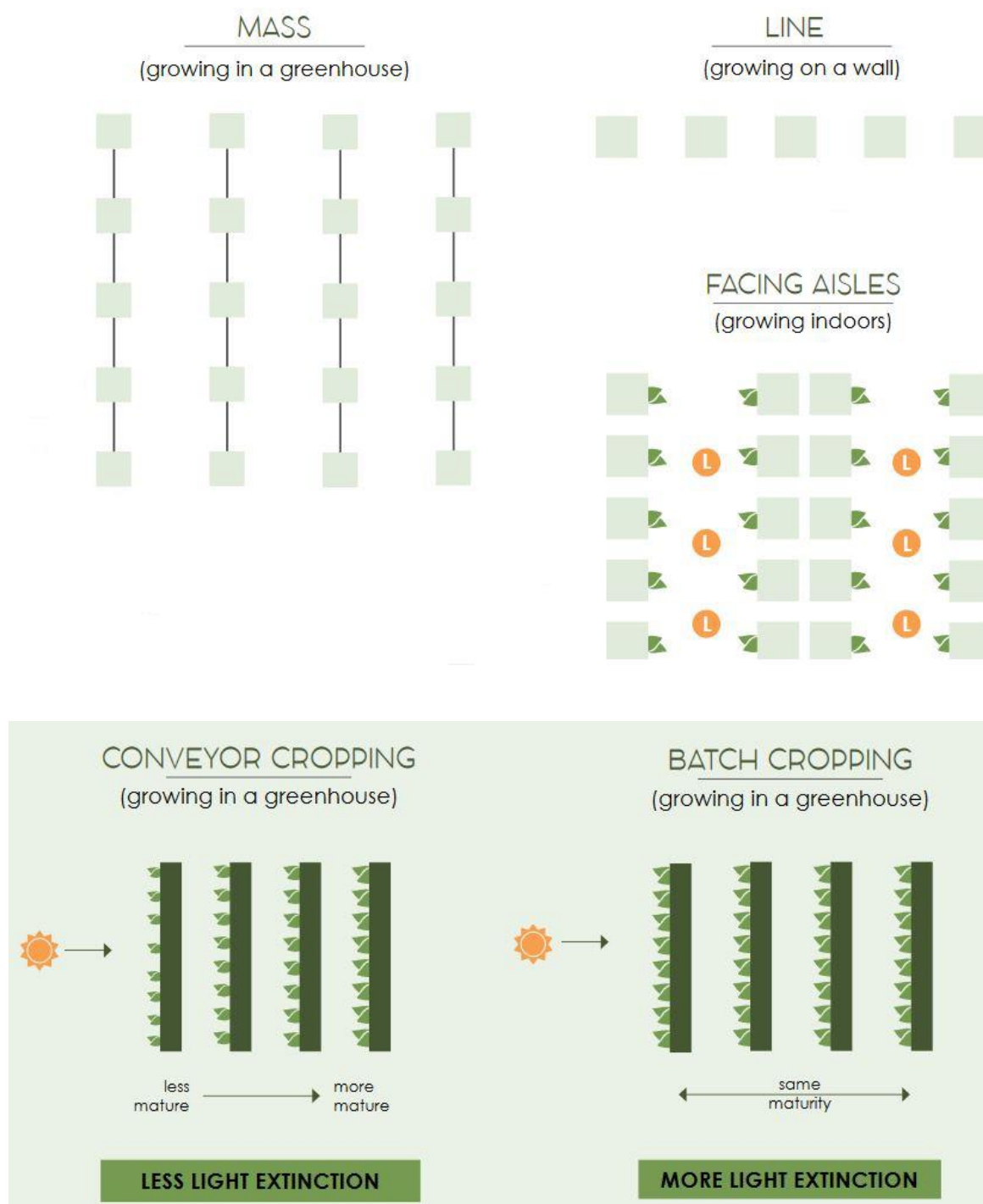


Figura 3: Configuraciones y regímenes de cultivo para las torres ZipGrow

https://info.brightagrotech.com/hubfs/blog-files/Infographics/ZipGrow_Tower_Spacing_Guide_-_Bright_Agrotech.pdf

En una torre ZipGrow de 1,5 metros pueden crecer de 8 a 10 plantas del tamaño de una lechuga o de 5 a 8 plantas del tamaño de una albahaca, dependiendo de la variedad. Las configuraciones masivas de torres colgadas en hileras en un bastidor son generalmente la mejor opción para los productores comerciales que buscan altos rendimientos. Cuando las torres están masificadas y administradas adecuadamente, 0,7 m² por torre es más que suficiente para obtener buenos cultivos con luz natural.

50 cm de espacio entre las filas permiten el acceso a las torres. Las torres también pueden ser montadas en las paredes (Figura 4).



Figura 4: Sistema sobre muro ZipGrow

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Urban_Vertical_Farm_With_Woman_%26_Child.jpg

El sistema ZipGrow se utilizó en el [GrowUp Box](#), una granja acuapónica comunitaria de contenedores de transporte con un invernadero en la azotea en el centro de Londres (Figura 5). La GrowUp Box tiene una superficie de sólo 14 metros cuadrados y puede producir más de 435 kg de ensaladas y hierbas y 150 kg de pescado anualmente.



Figura 5: El sistema GrowUp Box

<https://www.timeout.com/london/things-to-do/growup-box-tours>

En los Estados Unidos, NaturePonics ha desarrollado [BooGardens](http://www.natureponics.net/boo-gardens/) (Figura 6), un sistema vertical que utiliza el bambú cultivado en Indonesia y Filipinas y que puede utilizarse para aplicaciones acuapónicas, hidropónicas o aeropónicas residenciales y comerciales. El bambú cosechado para hacer las torres vuelve a crecer y puede volver a cosecharse tres años después, lo que lo convierte en el sistema de torres de crecimiento más sostenible que existe actualmente en el mercado.



Figura 6: Unidades acuapónicas del sistema comercial BooGardens.

<http://www.natureponics.net/boo-gardens/>

Una variación de las torres de cultivo es el sistema de macetas apiladas, como la producida por [Verti-Gro](#) para el cultivo hidropónico. Las macetas de EPS de cinco litros, que proporcionan aislamiento para mejorar el crecimiento de las raíces, pueden apilarse hasta diez macetas de altura, y cada maceta proporciona espacio suficiente para cuatro plantas. Las macetas están montadas en placas de rotación sobre un elevador de PVC, lo que significa que pueden girarse fácilmente para recibir incluso la luz (Figura 7). El sistema, que fue patentado en 1994, ha sido objeto de varias evaluaciones científicas. Se comprobó que las pilas de 6 macetas tenían un rendimiento significativamente mejor que las pilas de 7 u 8 macetas, tanto en términos de biomasa como de rendimiento y calidad de los frutos, porque la composición de la solución de nutrientes cambiaba al pasar por la columna y afectaba negativamente al crecimiento de las plantas en la sección inferior ([Al-Raisy et al. 2010](#)). La luz también puede ser un problema: la intensidad de la luz solar que llegaba al dosel de la planta en la parte inferior de una torre de siete macetas era sólo el 10% de la que llegaba a la parte superior, y las condiciones de luz subóptimas en las secciones media e inferior afectaban negativamente al crecimiento de la planta de fresa y al rendimiento de los frutos. Las plantas de estas secciones no desarrollaron un número óptimo de coronas de ramas y, por consiguiente, produjeron menos frutos en comparación con las plantas de la sección superior ([Takeda 2000](#)). La calidad de los frutos también se ve influida por la posición de las plantas en la torre, ya que las del nivel superior tienen mayores sólidos solubles totales (SST) y menor acidez en comparación con las producidas en los niveles inferiores ([Murthy et al. 2016](#)). Un estudio comparativo de la producción hidropónica de fresas utilizando pilas de cuatro macetas Verti-Gro y dos tipos de sistemas horizontales encontró que la menor intensidad de luz en la base de la torre, y la consiguiente menor tasa de fotosíntesis, se traducían en un menor número de frutos, un menor peso de los frutos y menos frutos comercializables en comparación con los sistemas horizontales. Los bajos

niveles de luz causan esterilidad de los estambre y una mala calidad del polen, y por lo tanto una reducción de la tasa de fecundación, lo que puede contribuir a la producción de frutos malformados ([Karimi et al. 2013](#)).

Los beneficios de poder cultivar altas densidades de plantas en torres de cultivo deben equilibrarse con la cantidad de espacio que se requiere para proporcionar una distribución uniforme de la luz, así como el espacio en hileras necesario para la gestión y el mantenimiento. El ancho de las hileras debe garantizar que los productos no se vean comprometidos por elementos en movimiento como carros y elevadores de tijera. Las luces de cultivo impedirán los movimientos de las personas y, por lo tanto, deben ser parte de la estructura de cultivo, o ser retráctiles o móviles para que los trabajadores puedan realizar las tareas con facilidad, o las estructuras de cultivo deberá ser móviles y las luces permanecerán estáticas.

Typical Tower for in-ground installation

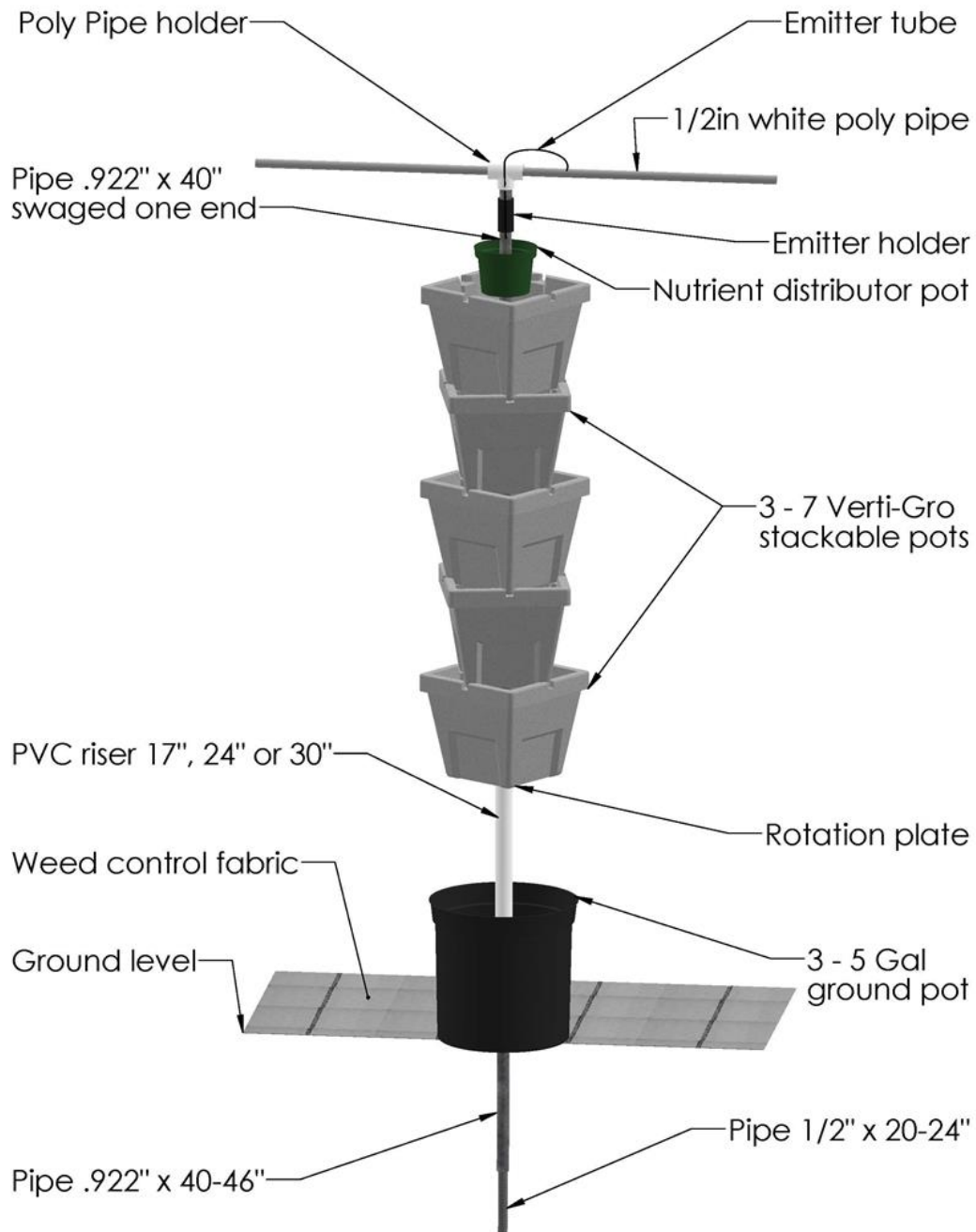


Figura 7: El Sistema Verti-Gro

<https://www.vertigro.com/Verti-Gro-4-Tower-System-Automatic-p/vgk-16agp.htm>

Los sistemas de macetas apiladas son los más adecuados para el cultivo de plantas grandes y pesadas, como los cultivos frutales. [Grow with the Flow](#) aquaponics es una empresa de Denton, Nebraska, y

utilizan torres hechas de macetas apiladas para cultivar tomates y pepinos, así como hierbas (Figura 8).



Figura 8: Torres de cultivo en el invernadero de Grow with the Flow aquaponics
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vertical_Tower_Aquaponic_System.jpg

14.3 Lechos horizontales apilados

En este tipo de sistema, los lechos de cultivo horizontales se apilan verticalmente en hileras. Esta disposición significa que en un invernadero, sólo el lecho superior estará orientado hacia la luz natural directa, y es necesario proporcionar una iluminación suplementaria para los lechos inferiores, generalmente a partir de luces fijadas a la base del lecho superior. Si bien en principio esto significa que los lechos de cultivo podrían apilarse tan alto como lo permita el invernadero o la unidad de producción, en la práctica el cultivo en altura significa que el sistema es más difícil de manejar, lo que requiere el uso de elevadores de tijera para la plantación, el mantenimiento y la cosecha, y energía adicional para bombear el agua a todos los niveles. Cuanto menor es la estatura del cultivo, más niveles pueden insertarse en el sistema, lo que significa que la mayoría de los lechos horizontales apilados se utilizan para el cultivo de microverdururas. Los lechos de cultivo pueden ser DWC, NFT o camas de medios. Por ejemplo, en el Reino Unido, Hydrogarden produce varios modelos de la [V-Farm](#): el sistema NFT de cuatro y cinco niveles adecuado para hierbas, verduras de hoja y fresas puede cultivar hasta 35 plantas/m², mientras que el sistema de inundación y drenaje de cinco niveles puede cultivar 4,6 m² de microverdururas en una huella de 1m².

La empresa canadiense [VertiCrop](#) ha desarrollado un sistema de cultivo hidropónico vertical NFT de alta densidad, totalmente automatizado y de circuito cerrado (Figura 9). El sistema ha sido instalado en el invernadero de azotea del [Local Garden](#) en Vancouver para cultivar microverduras, verduras de hoja y hierbas. 3000 bandejas de plantas apiladas a 12 alturas se mueven en un sistema de transporte aéreo, asegurando así la máxima luz solar para cada planta.



Figura 9: El Sistema VertiCrop

<https://grow.verticrop.com/vertical-farming/>

El sistema [Verticalis](#) (Figura 10), desarrollado por Friendly Aquaponics en los EE.UU., está diseñado para ser desplegado en filas dentro de un invernadero, con las unidades de canales NFT apiladas una contra otra, de lado a lado, a fin de maximizar el uso del espacio; en tal configuración, que requiere el uso de luz artificial, puede producir 300 plantas/m². Las ruedas en la base de las unidades permiten moverlas fácilmente, y cada bastidor de canales puede deslizarse fuera de la unidad para facilitar las operaciones de plantación, mantenimiento y cosecha.



Figura 10: El sistema Verticalis

<https://www.friendlyaquaponics.com/product/vertical-aquaponics-growing/>

Ha habido pocos intentos de integrar la acuaponía con las granjas verticales comerciales. Con 8361 m², FarmedHere en Chicago (Figura 11) fue promocionada como la primera de su tipo y la mayor granja vertical cubierta de América. Fue inaugurada en 2013 y se esperaba que se convirtiera en un nuevo modelo para cultivar productos de manera eficiente y con alta tecnología. Sin embargo, cerró en 2017 debido a los altos costos de energía y mano de obra. La granja estaba ubicada en un almacén de dos pisos sin ventanas. Al apilar las tanques y los lechos de cultivo de DWC en forma vertical, la instalación contenía 13.935 m² de espacio de cultivo (1,4 hectáreas), y producía 136.000 kg de verduras y hierbas frondosas por año (Al-Kodmany 2018).



Figura 11: Sistema Farmed Here, Chicago

<https://www.wsj.com/articles/vertical-farming-takes-root-1449237679>

[Greens and Gills](#) abrió en el sótano de The Plant, Chicago (véase también el capítulo 13) en 2012. La granja de 300 m² utilizó un sistema acuapónico de 6 niveles de DWC para cultivar verduras de hoja, hierbas y microverdes. La tilapia y las verduras se vendieron a restaurantes, tiendas de comestibles y distribuidores locales. La empresa cerró en 2015 y la instalación se puso en el mercado con un precio de venta de 255.000 dólares ([Sijmonsma 2015](#)). Sin embargo, no se vendió y el sistema acuapónico es utilizado actualmente por Plant Chicago para impartir cursos de capacitación mensuales.

En el Reino Unido, [GrowUp Urban Farms](#) combina la acuaponía con tecnologías de cultivo vertical y Producción en Entorno Controlado (CEP) para producir cosechas de ensaladas y hierbas durante todo el año. A partir de 2015 GrowUp operó "Unit 84", una granja urbana de acuaponía a escala comercial en un almacén industrial en el este de Londres (Figura 12). Los 762 m² de espacio de cultivo podían producir más de 20.000 kg de lechugas y hierbas (suficiente para 200.000 bolsas de lechuga) y 4000 kg de pescado cada año. La unidad cerró en 2017, ya que el volumen comparativamente pequeño de productos no hizo que el negocio fuera rentable.



Figura 12: Sistema de Unit 84, Londres

<https://www.growup.org.uk/gallery/62tsypmu00xml48fks0sjme3rhdg2s>

[Edenworks](#) en Nueva York cultiva microverdes usando cuatro niveles de camas apiladas de DWC en un almacén sin ventanas. Sus mezclas de microverduras listas para comer - brócoli, col roja y col rizada, y rábano, col roja y hojas de mostaza - se venden en las tiendas de comestibles locales, mientras que las tilapias se donan a organizaciones locales o se sirven en eventos de la empresa. Edenworks también ha desarrollado el sistema "Farmstack" para invernaderos de azotea. El sistema prototipo de 75 m² está situado en la parte superior de un edificio industrial en Brooklyn (Figura 13). El agua de las tanques de tilapia situadas en la parte inferior de cada pila de 3 metros de altura se bombea hasta la parte superior, y luego se filtra a través de los diferentes niveles y vuelve a la tanque.

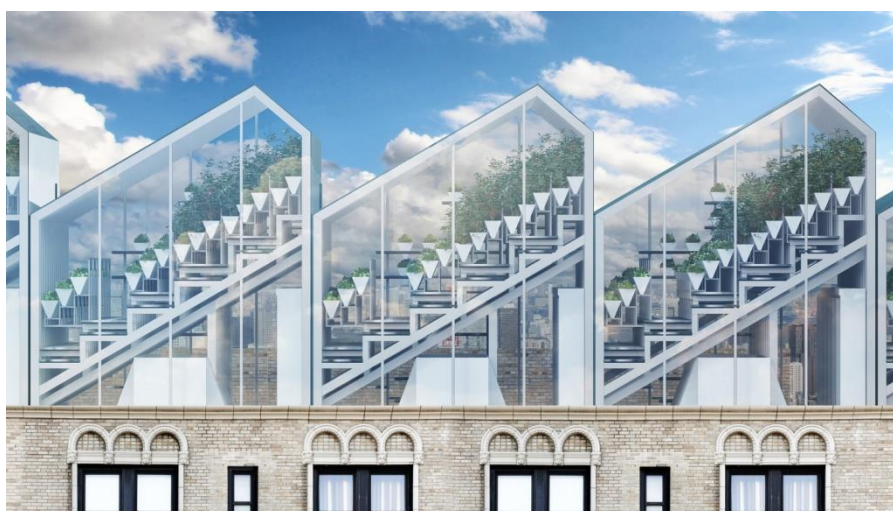


Figura 13: El invernadero acuapónico de azotea de Edenworks

<https://viewing.nyc/edenworks-rooftop-aquaponic-farmlab-uses-tilapia-fish-to-grow-fresh-produce/>

14.4 Sistemas de armazón en A

Los sistemas de marco en A consisten en una disposición escalonada de canales hidropónicos ([Sánchez-Del-Castillo et al. 2014](#)), o paneles angulares de geotextil para el cultivo aeropónico ([Hayden 2006](#)). Los cultivos frutales que crecen en las secciones inferiores de un sistema de marco en A pueden experimentar un sombreado parcial y, por consiguiente, producir un gran número de frutos pequeños y malformados, experimentar un aumento de la putrefacción de los frutos y presentar problemas de coloración de los frutos. Esto puede evitarse utilizando sistemas con camas de cultivo que giran lentamente alrededor del marco A para asegurar que las plantas obtengan luz solar, riego y nutrientes uniformes a medida que pasan por diferentes puntos de la estructura. Por ejemplo, el sistema A-Go-Gro (AGG) desarrollado por [Sky Greens](#) en Singapur (Figura 14) consiste en altos marcos A de aluminio y acero que pueden llegar a tener hasta 9 metros de altura, con 38 niveles de canales de cultivo que pueden contener suelo o solución hidropónica. Cada marco tiene una huella de sólo 5,6 m², y el sistema es capaz de producir 1000 toneladas de vegetales por hectárea/año. Los marcos están alojados en invernaderos translúcidos y la rotación de los alimentadores a una velocidad de 1 mm/s significa que cada alimentador gira alrededor del marco tres veces al día, lo que asegura una distribución uniforme de la luz solar y un buen flujo de aire, y reduce o incluso elimina la necesidad de iluminación artificial en algunas zonas del invernadero. La rotación es impulsada por un sistema hidráulico patentado de bajo carbono que hace un uso eficiente de la gravedad y, por lo tanto, consume poca energía; sólo se requieren 60 W para alimentar un bastidor. El agua de lluvia recogida en un depósito aéreo pasa por el sistema de poleas de agua y luego es redirigida de vuelta al depósito mediante una bomba alimentada por un generador ([Al-Kodmany 2018](#)).



Figura 14: Un sistema "A-frame" en Sky Greens, Singapur

<http://www.skygreens.com/wp-content/uploads/2014/05/Skygreens-Vertical-Farm1.jpg>

[THORILEX Ltd](#) ha desarrollado un sistema acuapónico con patente en trámite en el que las plantas se cultivan en marcos de acero inoxidable en forma de A que van de 3 a 8 metros de altura (Figura 15). Las cestas de plantación diseñadas para optimizar el crecimiento de las raíces y maximizar la absorción de nutrientes se colocan en filas dobles en canales de acero inoxidable. Las bandejas de plantas giran entonces alrededor del marco para que reciban una cantidad igual de luz de los LEDs colocados encima de cada marco. Las tanques de acero inoxidable autolimpiables vienen en dos tamaños, para peces jóvenes y para peces de tamaño de mercado. Por lo tanto, el sistema es ajustable y escalable para el cultivo a escala comercial (Figura 16). Actualmente el sistema sólo se puede encontrar en la granja de exhibición de 2 hectáreas THORILEX en la República Checa, pero la intención es llevar este innovador sistema a los mercados de todo el mundo. Es por eso que THORILEX diseña productos utilizando el "modelo IKEA": al ser altamente modulares, pueden ser fácilmente empacados, enviados y entregados con costes mínimos.

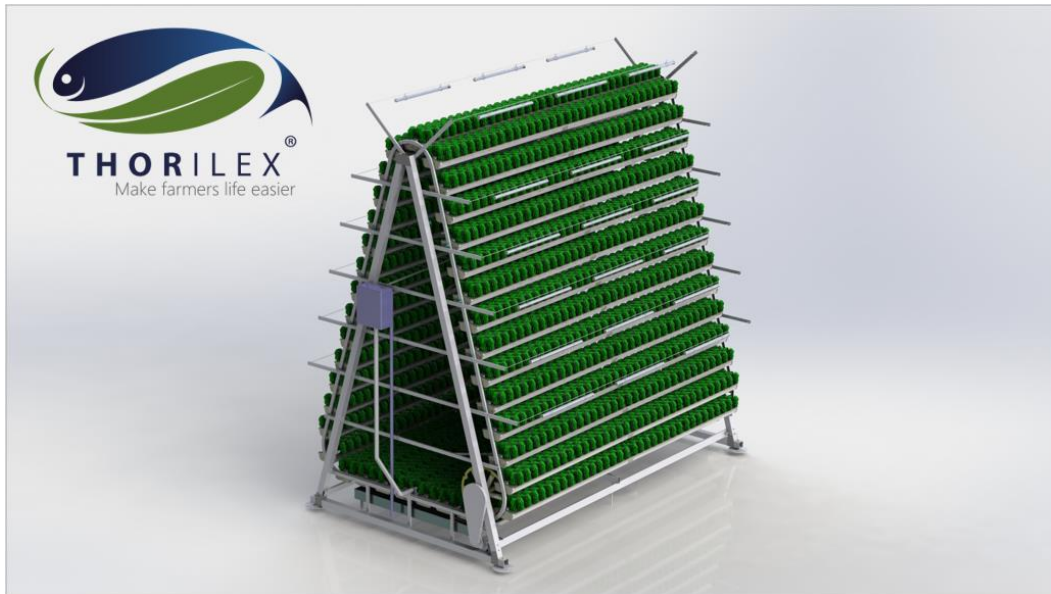


Figura 15: El sistema THORILEX <http://thorilex.com/>



Figura 16: El sistema comercial THORILEX para acuaponía, <http://thorilex.com/>

El sistema hidropónico de marco A desarrollado por la Compañía China [Jiangsu Skyplant Greenhouse Technology Company](http://www.jiangsu-skyplant.com/) Figura 17) también podría utilizarse para la acuaponía. La estructura tiene una huella de 5 m², y cada uno de los canales de PVC-U de uso alimentario contiene 25 agujeros, lo que resulta en 250 plantas por estructura, o 50 plantas/m²



Figura 17: El sistema de la Compañía de Tecnología de Invernaderos de Jiangsu Skyplant

<http://thorilex.com/>

14.5 Muros vivos

Las paredes vivas se utilizan a menudo en la arquitectura para proporcionar beneficios estéticos, ecológicos y ambientales en las zonas urbanas. Los paneles modulares, compuestos por contenedores de plástico de polipropileno o alfombras de geotextil, sirven de soporte a las plantas que proporcionan beneficios no sólo en términos visuales, sino también en lo que respecta a la comodidad, la biodiversidad, la eficiencia térmica y la mejora de los contaminantes atmosféricos, todo ello con una huella muy pequeña a nivel del suelo ([Manso y Castro-Gomes 2015](#); [Perini et al. 2013](#)).

Dos universidades han estado investigando el potencial de las paredes vivas para el cultivo de plantas comestibles mediante la acuaponía. En la Universidad de Greenwich (Reino Unido) se llevó a cabo una serie de experimentos para identificar el tipo de sistema más adecuado y el mejor medio de cultivo ([Khandaker y Kotzen 2018](#)). En el primer experimento se utilizó un panel de pared viva llamado [Terapia Urbana Fytotextile living wall](#). Este sistema de paneles modulares semi hidropónicos está hecho de un tejido geotextil patentado compuesto de tres capas de material sintético y orgánico, incluyendo PVC, Fitotextil y Poliamida. Cada metro cuadrado contiene hasta 49 plantas en bolsillos individuales. Por lo tanto, dependiendo de la especie vegetal cultivada, se pueden cultivar aproximadamente 98 plantas/m² utilizando elementos espalda contra espalda de este sistema de paredes vivas, en comparación con 20-25 hojas verdes por metro cuadrado en un sistema horizontal. El panel de fieltro se fijó a un muro exterior orientado hacia el este y se plantó con siete plantas diferentes (espinaca,

albahaca, achicoria, espárrago, lechuga, menta y tomate) en siete medios de cultivo diferentes (lana mineral de calidad hortícola, vermiculita, carbón vegetal, fibra de coco, musgo esfagno, algas cultivadas en estanques y paja). Cada especie de planta fue dispuesto verticalmente en columnas, y el medio de cultivo estaba dispuesto horizontalmente en filas (Figura 18). El agua fue bombeada a un tubo de riego por goteo interno desde un tanque de acuaponía con nutrientes hidropónicos añadidos. El agua fluía entonces por la parte posterior del panel donde se ponía a disposición del sustrato y las raíces de las plantas. El exceso de agua goteaba desde la parte inferior del panel de la pared viviente a una canaleta y luego volvía al tanque de agua ([Khandaker y Kotzen 2018](#)).



Figura 18: El muro vivo de Terapia Urbana
(Fotos: M. Khandaker)

Los resultados del primer experimento demostraron que la lana mineral y la vermiculita eran los mejores sustratos, lo que se traducía en un mayor rendimiento y un mejor crecimiento de las raíces. Las plantas situadas en la parte superior y a lo largo de los lados tuvieron un mejor rendimiento, lo que sugiere que la sombra era un problema para las plantas en el centro del muro. Sin embargo, el principal problema de este tipo de muro viviente era que las raíces de las plantas crecían dentro del geotextil, lo que dificultaba la cosecha. Si se cultivaran variedades de corte y vuelta, esto no sería un problema ([Khandaker y Kotzen 2018](#)).

El segundo experimento se estableció junto al Experimento 1 utilizando el sistema de macetas de la [Green Vertical Garden Company](#) (GVGC). Las macetas individuales se fijaron a un panel de malla de refuerzo de acero inoxidable, con cinco filas horizontales y ocho columnas verticales de macetas. Sólo se utilizó una planta (albahaca) en todo el muro vivo, y en las columnas verticales se utilizaron diferentes medios de cultivo (dos columnas de hidroleca, vermiculita, lana mineral de calidad hortícola y fibra de coco) (Figura 19). El sistema se regaba utilizando un tubo de riego para suministrar agua rica en nutrientes a la hilera superior de macetas y el agua fluía luego a través de cada maceta hasta la inferior por medio de un pequeño tubo de riego desde un agujero situado en la parte inferior de cada

maceta. En el tercer experimento se utilizó el sistema GVGC y una planta (achicoria) plantada en dos columnas cada una de hidroleca, vermiculita, lana mineral de grado hortícola y fibra de coco ([Khandaker y Kotzen 2018](#)).

En los experimentos segundo y tercero, la albahaca y la achicoria obtuvieron mejores resultados en la fibra de coco y la lana mineral. Hay ventajas y desventajas en el uso de ambos sustratos. Si bien la fibra de coco y las raíces en su interior pueden ser fácilmente compostadas, pueden producirse bloqueos si se utiliza en un sistema con pequeñas tuberías de irrigación. La lana mineral de calidad hortícola tiene un buen rendimiento, pero no puede reciclarse fácilmente y, por lo tanto, es probable que se considere menos sostenible. La hidroleca y la vermiculita son más difíciles de trabajar, ya que el material se desplaza fácilmente en la plantación y en la cosecha. Una vez más, la sombra hizo que las plantas del centro del muro crecieran menos bien ([Khandaker y Kotzen 2018](#)).



Figura 19: El Muro vivo del Green Vertical Garden Company, Fotos: M. Khandaker

Investigadores de la Universidad de Sevilla, España, han comparado el rendimiento de un sistema de pared viva de bolsillo de fieltro con sistemas de NFT y DWC de pequeña escala para el cultivo de lechugas y peces de colores en un invernadero ([Pérez-Urrestarazu et al. 2019](#)). El sistema de paredes vivas está compuesto por dos capas, la exterior de material poroso para favorecer la aireación de las raíces y la interior de geotextil que ayuda a distribuir el agua. El panel estaba inclinado a 20° con respecto al plano vertical. Las bolsas de plantación se rellenaron con arcilla expandida para favorecer una mejor aireación de la zona de las raíces, ya que el fieltro estaba destinado a recibir agua en todo momento. Aunque el muro vivo tiene una capacidad máxima de 20 plantas/m², no se utilizaron todos los bolsillos para tener una densidad de plantación equivalente a los otros dos sistemas. En cuanto a la productividad de las plantas, el muro vivo tuvo el peor rendimiento de los tres sistemas. En parte, esto puede haberse debido a una menor afluencia de radiación debido a la naturaleza vertical del espacio de cultivo, aunque tenía una ligera inclinación. Aunque el agua se distribuía a través del fieltro, la tasa de evaporación era alta, y la arcilla expandida dentro de las bolsas no recibía suficiente agua y

nutrientes, debido a la pendiente; un sustrato de mayor acción capilar, como la perlita, podría haber ayudado a aliviar este problema. Otro problema era el crecimiento de algas en el fieltro, causado por el ambiente húmedo y los altos niveles de nutrientes y luz. Esto provocó una competencia con el cultivo que dio lugar a un mayor consumo de agua, causó obstrucciones en los emisores de riego y dio lugar a que se necesitaran más horas para mantener el sistema. Por otra parte, en términos de producción de peces, el sistema de paredes vivas superó a los sistemas de NFT y DWC. Esto es muy probable porque el agua tenía que ser añadido con mayor frecuencia debido a la alta tasa de evaporación, lo que redundaba en una mejor calidad del agua ([Peréz-Urrestarazu et al. 2019](#)).

Los resultados de los estudios experimentales de [Khandaker y Kotzen 2018](#) y [Peréz-Urrestarazu et al. 2019](#) sugieren que las paredes vivas geotextiles tal vez no sean el tipo de sistema más adecuado para utilizar en la acuaponía vertical, a pesar del número potencialmente elevado de plantas que pueden crecer en ellas en relación con la superficie de suelo ocupada, debido a los problemas encontrados con el crecimiento de las algas, la biomasa y el rendimiento desiguales y las dificultades para cosechar las plantas. Además, es importante tener presente que la mayoría de los geotextiles consisten en un polímero de la familia de las poliolefinas, el poliéster o la poliamida, y en aditivos para mejorar su estabilidad. Con el tiempo y en diversas condiciones el polímero puede degradarse en partículas microplásticas, que podrían ser ingeridas por los peces. Por lo general, una temperatura ambiente más elevada acelera la tasa de degradación, y diferentes mecanismos de degradación pueden actuar en sinergia. La lixiviación de los aditivos también es probable cuando se han formado partículas plásticas de tamaño micro, e incluso puede ocurrir a partir de material no degradado, ya que los aditivos a menudo no están unidos covalentemente a la espina dorsal del polímero ([Vé Wiewel y Lamoree 2016](#)). Por lo tanto, la ecotoxicología de una pared viva geotextil debe ser probada antes de ser utilizada con un sistema acuapónico. Un geotextil hecho de biopolímeros construidos con fibras naturales, como el yute y el bonote, sería más adecuado que un geotextil sintético. También podrían ser adecuados otros tipos de pared viva, como el sistema hidropónico producido por [Biotecture](#), que consiste en paneles de plástico rígido rellenos de lana de roca de calidad hortícola.

14.6 Conclusiones

Si bien los sistemas acuapónicos verticales pueden aumentar el número de plantas que pueden cultivarse por unidad de superficie en comparación con los sistemas horizontales, es importante que también den lugar a un aumento de los rendimientos. Desde el punto de vista comercial, los efectos de los gradientes dentro de algunos tipos de sistemas verticales sobre el valor del cultivo dependerán de la forma en que el cultivo vaya a ser procesado y comercializado. Por ejemplo, si se cultiva la lechuga para venderla como cabezas individuales, la productividad no uniforme de las torres de cultivo, las paredes vivas y los sistemas estáticos de armazón en A serían una posible debilidad en comparación con los sistemas acuapónicos horizontales convencionales o los sistemas de lechos apilados verticales. Sin embargo, si el cultivo se destina a bolsas de ensalada precortadas, entonces la uniformidad del cultivo puede ser irrelevante, y el aumento del rendimiento por unidad de superficie podría ser una ventaja significativa. Además de afectar al rendimiento y la calidad del cultivo, la eficiencia de la cosecha en los sistemas verticales y horizontales de varios niveles también puede verse

afectada negativamente, ya que será necesario trabajar a diferentes alturas. Los costes de los diferentes tipos de sistemas de cultivo verticales también varían mucho, según su complejidad y el grado de automatización. Por consiguiente, la utilización de los cultivos y la comerciabilidad, así como una investigación de la relación coste-beneficio de esos sistemas de cultivo, serán los criterios definitivos para decidir si la acuicultura vertical puede constituir una alternativa viable a los sistemas horizontales convencionales.

14.7 Referencias

- Al-Kodmany, K. 2018. [The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city](#). *Buildings* 8, 24.
- Al-Raisy, F.S., Al-Said, F.A., Al-Rawahi, M.S., Khan, I.A., Al-Makhmari, S.M. y Khan, M. 2010. [Effects of column sizes and media on yield and fruit quality of strawberry under hydroponic vertical system](#). *European Journal of Scientific Research* 43, 48-60.
- Durner, E.F. 1999. [Winter greenhouse strawberry production using conditioned plug plants](#). *HortScience* 34 (4), 615-616,
- Hayden, A. 2006. [Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crop](#). *HortScience* 41, 536-538.
- Heller, H., Bar-Tal, A., Assouline, S., Narkis, K., Suryano, A., de la Forge, A., Barak, M., Alon, H., Bruner, M., Cohen, S. y Tsohar, D. 2015. [The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study](#). *Irrigation Science* 33, 53-65.
- Sijmonsma, A. 2015. [For sale: urban aquaponics farm of Greens y Gills in Chicago](#). HortiDaily.com.
- Karimi, F., Arunkumar, B., Asif, M., Murthy, B.N.S. y Venkatesha, K.T. 2013. [Effect of different soilless culture systems on growth, yield and quality of strawberry cv. Strawberry Festival](#). *International Journal of Agricultural Sciences* 9, 366-372.
- Khandaker, M. y Kotzen, B. 2018. [The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates](#). *Aquaculture Research* 2018, 1-15.
- Liu, W., Chen, D.K. y Liu, Z.X. 2004. [High efficiency column culture system in China](#). *Acta Horticulturae* 691, 495-500.
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K. y Thompson, R.E. 2015. [Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey](#). *Aquaculture* 435, 67-74.
- Manso, M. y Castro-Gomes, J. 2015. [Green wall systems: A review of their characteristics](#). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 863-871.
- Michael, C. 2016. [Understanding biological surface area in aquaponics](#). ZipGrow.
- Murthy, B.N.S., Karimi, F., Laxman, R.H. y Sunoj, V.S.J. 2016. [Response of strawberry cv. Festival grown under vertical soilless culture system](#). *Indian Journal of Horticulture* 73 (2), 300-303.
- Neocleous, D., Kaittanis, C., Seraphides, N. y Polycarpou, P. 2010. [Horizontal and vertical soilless growing systems under Cyprus conditions](#). *Journal of Applied Horticulture* 12 (2), 140-144.
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Jijakli, M.H. y Kotzen, B. 2018. [Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature](#). *Aquaculture International* 26, 813-842.

- Pattillo, D.A. 2017. [*An overview of aquaponic systems: hydroponic components*](#). NCRAC Technical Bulletin 19.
- Peréz-Urrestarazu, L., Lobillo-Eguibar, J., Fernández-Cañero, R. y Fernández-Cabanás, V.M. 2019. [*Suitability and optimization of FAO's small-scale aquaponics systems for joint production of lettuce \(*Lactuca sativa*\) and fish \(*Carassius auratus*\)*](#). *Aquacultural Engineering* 85, 129-137.
- Perini, K., Ottelé, M., Haas, E.M. y Raiteri, R. 2013. [*Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls*](#). *Urban Ecosystems* 16 (2), 265-277.
- Ramírez-Arias, J.A., Hernández-Ibarra, U., Pineda, J. y Fitz-Rodríguez, E. 2018. [*Horizontal and vertical hydroponic systems for strawberry production at high densities*](#). *Acta Horticulturae* 1227, 331-338.
- Ramírez-Gómez, H., Sandoval-Villa, M., Carrillo-Salazar, A. y Muratalla-Lúa, A. 2012. [*Comparison of hydroponic systems in the strawberry production*](#). *Acta Horticulturae* 947, 165-172.
- Sánchez-Del-Castillo, F., Bastida-Cañada, O.A., Moreno-Pérez, E.C., Contreras-Magaña, E. y Sahagún-Castellanos, J. 2014. [*Tomato yield with different hydroponic production methods based on ladder-shaped canopies*](#). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 20 (3), 239-251.
- Takeda, F. 2000. [*Out-of-season greenhouse strawberry production in soilless substrate*](#). *Advances in Strawberry Research* 18, 4-15.
- Touliatos, T., Dodd, I.C. y McAinsh, M. 2016. [*Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics*](#). *Food and Energy Security* 5 (3), 184–191.
- Vé Wiewel, B. y Lamoree, M. 2016. [*Geotextile composition, application and ecotoxicology – A review*](#). *Journal of Hazardous Materials* 317, 640-655.

15. ASPECTOS SOCIALES DE LA ACUAPONÍA

15.1 Introducción

La acuaponía puede utilizarse como vehículo para abordar una serie de cuestiones sociales. Muchas personas con problemas de salud mental y física se enfrentan a la exclusión social porque no tienen igualdad de acceso a las oportunidades de la sociedad, como el empleo remunerado, la vivienda, la educación y el ocio. El funcionamiento de un sistema de acuaponía brinda oportunidades para los elementos de hacer (participar en una actividad significativa), ser (tener autoestima y respeto por sí mismo), llegar a ser (desarrollar aptitudes y autoeficacia) y pertenecer (tener aceptación y conexión interpersonal) que son necesarios para fomentar un sentido de inclusión social. La acuaponía también ofrece una forma innovadora de horticultura terapéutica, un enfoque basado en la naturaleza que puede promover el bienestar de las personas con problemas de salud mental. Hay cualidades particulares de la relación planta-persona que promueven la interacción de las personas con su entorno y, por consiguiente, su salud, nivel funcional y bienestar subjetivo ([Fieldhouse 2003](#); [Heliker et al. 2001](#)). Se considera que las plantas otorgan recompensas no discriminatorias a su cuidador sin imponerle la carga de una relación interpersonal y, al responder a la atención o al descuido, pueden reforzar inmediatamente el sentido de la agencia personal. Las redes sociales como las que proporcionan las iniciativas comunitarias de acuaponía pueden actuar como amortiguadores de los factores estresantes, proporcionar una estructura para la adquisición de aptitudes y validar y mejorar el sentido de autoestima de un individuo ([Cohen y Wills 1985](#)). La acuaponía también puede utilizarse para mejorar el bienestar de los ciudadanos de más edad, facilitando diversas funciones cognitivas mediante la estimulación sensorial y mejorando su equilibrio y movilidad, ayudando así a prevenir las caídas. La acuaponía puede utilizarse para promover los conocimientos científicos, ya que constituye un instrumento útil para la enseñanza de las ciencias naturales en todos los niveles, desde la enseñanza primaria hasta la terciaria. Proporciona múltiples formas de enriquecer las clases de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) ([Brown et al. 2011](#)), y también se puede utilizar para la enseñanza de temas como la empresa y la economía, y para abordar cuestiones como el desarrollo sostenible, la ciencia ambiental, la agricultura, los sistemas alimentarios y la salud. Y la acuaponía puede utilizarse para integrar estrategias de medios de vida para asegurar alimentos y pequeños ingresos para los hogares pobres y sin tierra ([Pantanella et al. 2010](#)). La producción doméstica de alimentos, el acceso a los mercados y la adquisición de habilidades son herramientas inestimables para asegurar el empoderamiento y la emancipación de las mujeres en los países en desarrollo, y la acuaponía puede proporcionar la base para un crecimiento socioeconómico justo y sostenible.

15.1.1 Seguridad alimentaria

Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfagan sus necesidades dietéticas y sus preferencias alimentarias y les permitan llevar una vida activa y sana ([FAO Policy Brief](#)). Los cuatro pilares de la seguridad alimentaria son: la disponibilidad de alimentos, el acceso a los alimentos, la utilización y la estabilidad. La disponibilidad de alimentos se logra cuando las personas tienen en todo

momento alimentos nutritivos a los que pueden acceder, mientras que la accesibilidad a los alimentos se logra cuando las personas tienen en todo momento la capacidad económica de obtener alimentos nutritivos de acuerdo con sus preferencias dietéticas. La utilización de los alimentos se logra cuando todos los alimentos consumidos son absorbidos y utilizados por el cuerpo para hacer posible una vida activa saludable, y la estabilidad de los alimentos se logra cuando se han alcanzado todos los demás pilares.

Cada vez se reconoce más que la agricultura urbana y periurbana es un medio por el cual las ciudades pueden alejarse de los actuales sistemas alimentarios no equitativos y dependientes de los recursos, reducir su huella ecológica y aumentar su habitabilidad ([Malano et al. 2014](#)). Debido a su dependencia casi total de los productos importados de otras regiones, los consumidores urbanos son especialmente vulnerables a la inseguridad alimentaria. Para quienes tienen un nivel socioeconómico bajo, esta dependencia significa que cualquier fluctuación de los precios de los alimentos se traduce en un poder adquisitivo limitado, una mayor inseguridad alimentaria y opciones dietéticas comprometidas.

Para garantizar la seguridad alimentaria en el siglo XXI dentro de unos límites planetarios sostenibles ([Rockström et al. 2009](#)) será necesario intensificar de forma polifacética la producción de alimentos ([Godfray et al. 2010](#)) desvinculada del uso insostenible de los recursos. La acuaponía puede ser parte de la solución. La nutrición, que forma parte integral del concepto de seguridad alimentaria, se mejora incorporando pescado y verduras frescas en la dieta. El pescado proporciona una fuente importante de proteínas y vitaminas y, aun cuando se consume en pequeñas cantidades, puede mejorar la calidad de la dieta al aportar aminoácidos esenciales que a menudo faltan o están insuficientemente representados en las dietas basadas en vegetales. Además, los aceites de pescado son una fuente de ácidos grasos omega-3 que son cruciales para el desarrollo normal del cerebro de los bebés en desarrollo y los lactantes.

Diversas iniciativas en todo el mundo ilustran la forma en que la acuaponía está empezando a utilizarse en los esfuerzos por aumentar la seguridad alimentaria. Byspokes Community Interest Company, una empresa social con sede en el Reino Unido, ha establecido [un sistema piloto de acuaponía y programa de formación](#) en el Centro Al-Basma de Beit Sahour, en los territorios palestinos ocupados, región en la que la disponibilidad de espacio para la producción de alimentos es un problema grave, en particular en las zonas urbanas y los campamentos de refugiados. Incluso en las zonas agrícolas se está perdiendo el acceso a la tierra debido a los controles israelíes y a la anexión efectiva por parte de la "valla de seguridad" israelí. El 40% de la población de los TPO (25% en Cisjordania) está clasificada como "crónicamente insegura en materia de alimentos", y el desempleo se sitúa en torno al 25%, con máximos del 80% en algunos campos de refugiados. Desde el punto de vista económico, el proyecto demostró que un sistema de acuaponía podría contribuir significativamente a los ingresos de los hogares y así ayudar a sacar a las familias de la pobreza, a la vez que proporcionaría una gama de verduras y pescado fresco a las familias menos capaces de permitirse alimentos de tan alta calidad.

Desde 2010 la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) viene ejecutando un proyecto de apoyo a la [producción alimentaria de emergencia](#) para familias pobres de

la Franja de Gaza, donde 11 años de bloqueo marítimo, terrestre y aéreo por parte de Israel, combinados con escasas precipitaciones que han dado lugar a sequías, han comprometido gravemente las posibilidades de producción alimentaria nacional en una de las zonas más densamente pobladas del mundo. Con tantas restricciones, las verduras frescas son caras y difíciles de encontrar. El 97% de la población de la Franja de Gaza vive en zonas urbanas o en campamentos y, por lo tanto, no tiene acceso a la tierra. La pobreza afecta al 53% de la población, y el 39% de las familias encabezadas por mujeres no tienen seguridad alimentaria. Por lo tanto, permitir que las familias produzcan sus propios alimentos frescos a precios asequibles es una respuesta muy apropiada y eficaz a la situación actual. A los hogares encabezados por mujeres con inseguridad alimentaria que viven en zonas urbanas se les proporcionaron unidades acuapónicas de azotea, y se instalaron otras unidades en establecimientos educativos y comunitarios. El hecho de tener una unidad de acuaponía significa que las mujeres pueden mejorar simultáneamente la seguridad alimentaria y los ingresos de sus hogares, sin dejar de cuidar de sus hijos y de sus hogares. Como resultado, todas las beneficiarias han aumentado su consumo de alimentos en el hogar.

A través de su Programa de Agricultura Adaptable, INMED Partnerships for Children se dedica a establecer programas alimentarios sostenibles que mejoran la seguridad alimentaria, conservan los recursos naturales, promueven estrategias de adaptación al cambio climático y ofrecen oportunidades de generación de ingresos en los países en desarrollo. INMED ha desarrollado un sistema de acuaponía sencillo y asequible para los pequeños agricultores, las escuelas, las instituciones gubernamentales y los jardineros domésticos, utilizando materiales locales de fácil acceso. En el último decenio, el INMED ha establecido un programa de [Acuicultura y Acuaponía Adaptativa](#) de gran éxito en Sudáfrica, Jamaica y Perú. En Sudáfrica, el INMED se centra en lograr la seguridad alimentaria y la generación de ingresos sostenibles mediante el fortalecimiento de la capacidad local para comprender y hacer frente al cambio climático, al tiempo que resuelve cuestiones interrelacionadas de degradación ambiental, creciente escasez de agua y pobreza. Ofrece vínculos de planificación empresarial con los mercados y asistencia con las solicitudes de subvenciones y préstamos para el desarrollo de empresas en expansión y crecimiento. En el centro de esta visión de largo alcance, además del cultivo tradicional intensivo, se encuentra la acuaponía. Se han ejecutado con éxito varios proyectos en diferentes provincias del país. Se instaló un sistema de acuaponía en la Asociación Cristiana Thabelo para los Discapacitados en una zona remota de la región de Venda, en la provincia de Limpopo. Dado que el sistema del INMED no requiere una mano de obra pesada ni sistemas mecánicos complejos, es ideal para las personas con discapacidades y para las que no pueden realizar las actividades agrícolas tradicionales. Desde su instalación, la cooperativa ha aumentado sus ingresos en más de un 400%. Los miembros de la cooperativa reciben salarios mensuales estables y han invertido en la cría de animales para obtener ingresos adicionales. Las comunidades que han adoptado esta nueva forma de agricultura han reforzado su capacidad para garantizar la seguridad alimentaria y proporcionar nuevas oportunidades de adaptación para la generación de ingresos.

Otro buen ejemplo de “elevación de la comunidad” en Sudáfrica es [Eden Aquaponics](#). Eden Aquaponics (Pty) Ltd es una creación de Jack Probart quien, al darse cuenta de que la seguridad alimentaria se está convirtiendo rápidamente en algo tan vital como una economía sana, tuvo la visión

de desarrollar un negocio comercial con un enfoque comunitario. Utilizando acuaponía para producir pescado y verduras en la zona de Eden de la Garden Route en el Cabo Occidental, Eden Aquaponics suministra pescado para el consumo, así como alevines para la piscicultura, y cultiva una variedad de verduras orgánicas para su distribución en los mercados de granjeros, restaurantes y minoristas locales. La división de Community Upliftment fabrica e instala sistemas comerciales personalizados de varios tamaños, incluido el equipo de acuaponía de jardín, y suministra plantas de semillero y alevines. También enseñan a las comunidades menos afortunadas a ser autosuficientes en el cultivo, la comercialización y la venta de sus productos, permitiendo así a personas previamente desempleadas desarrollar habilidades, confianza en sí mismas, autoestima y la capacidad de mantenerse por sí mismas.

La inseguridad alimentaria no sólo es pertinente para el mundo en desarrollo. En Sevilla (España), la empresa social [Asociación Verdes del Sur](#) ha establecido un invernadero de acuaponía en los terrenos de una escuela del Polígono Sur, la zona más desfavorecida socialmente de la ciudad, que se caracteriza por un desempleo de larga duración y una alta incidencia de delitos relacionados con las drogas. La unidad de acuaponía se utiliza como parte de un programa de educación ambiental para los residentes locales, que incluye la enseñanza de los beneficios de comer alimentos frescos cultivados localmente y el desarrollo de aptitudes para los desempleados. También se ha establecido un prototipo de unidad doméstica en la casa de uno de los residentes locales.



Figura 1: Instalaciones de acuaponía en el Polígono Sur - en sentido contrario a las agujas del reloj desde arriba a la izquierda: el invernadero de acuaponía en la escuela; Soledad con una tilapia congelada criada en su unidad doméstica; tomates y una berenjena guardados para sus semillas; la unidad doméstica de acuaponía (Fotografías: Sarah Milliken).

15.1.2 Desiertos alimentarios

Los entornos alimentarios saludables son imperativos para la salud pública. El acceso a los supermercados que ofrecen productos alimenticios sanos a precios bajos varía en función del espacio, y está correlacionado con la situación socioeconómica y el origen étnico. Las zonas que se caracterizan por el escaso acceso a frutas y verduras frescas y otros alimentos saludables a precios asequibles se conocen como "desiertos alimentarios" ([Rex y Blair 2003](#)). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) designa los desiertos alimentarios basándose en las características de bajos ingresos, raza/etnia, larga distancia a una tienda de comestibles, falta de acceso a alimentos frescos y asequibles, y dependencia del transporte público. Los residentes de estos desiertos dependen de la comida rápida, las tiendas pequeñas de alimentos (mini-supermercados), las gasolineras y los bancos de alimentos para la mayoría de sus alimentos básicos. Debido a estos factores, muchas personas se enfrentan a importantes desafíos en cuanto a la seguridad alimentaria y el acceso a los alimentos, lo que da lugar a un aumento drástico de los problemas de salud conexos, en particular la obesidad. Los desiertos alimentarios son especialmente problemáticos para las personas de bajos ingresos y para las personas vulnerables, como las que tienen una discapacidad que limita su capacidad para viajar. El hecho de no tener acceso a un automóvil en un desierto de alimentos puede limitar la capacidad de una persona para llegar a las tiendas de alimentos que ofrecen productos frescos a precios asequibles.

La evidencia empírica de los desiertos alimentarios en los Estados Unidos y también en el Reino Unido es amplia ([Walker et al. 2010](#)). Los desiertos alimentarios tienden a tener poblaciones más pequeñas, tasas más altas de hogares abandonados o vacíos y residentes con niveles de educación más bajos, ingresos más bajos y mayor desempleo ([Dutko et al. 2012](#)). En 2017, 15 millones de hogares estadounidenses (11,8%) fueron clasificados como de inseguridad alimentaria, lo que significa que en algún momento del año tuvieron dificultades para proporcionar alimentos suficientes para todos los miembros del hogar debido a la falta de recursos. Más de un tercio de esos hogares (5,8 millones) se clasificaron como de muy baja seguridad alimentaria, lo que significa que la ingesta de alimentos de algunos miembros del hogar se redujo y las pautas normales de alimentación se vieron alteradas en algún momento del año debido a la limitación de los recursos. Las tasas de inseguridad alimentaria eran superiores a la media nacional en los hogares con ingresos cercanos o inferiores al umbral de pobreza, en los hogares monoparentales, entre las personas que vivían solas, en los hogares de la población negra e hispana y en las grandes ciudades ([Coleman-Jensen et al. 2018](#)).

El debate sobre los desiertos alimentarios en el Reino Unido fue particularmente destacado en el decenio de 1990, en medio de un debate más amplio sobre la pobreza y las privaciones. Este debate se concentró en las zonas relativamente desfavorecidas económicamente, como las urbanizaciones de viviendas sociales, y muchos plantearon la hipótesis de que los supermercados podrían prestar

servicios insuficientes a esas zonas, habida cuenta de los menores beneficios que podrían obtenerse al instalar una tienda en una zona donde los ingresos de los residentes son relativamente bajos. Los residentes que no tienen coche, que no pueden llegar a los supermercados de fuera de la ciudad, dependen de la tienda de la esquina donde los precios son altos, los productos son procesados y las frutas y verduras frescas son de mala calidad o inexistentes ([Wrigley 1998](#)). Podría decirse que el aumento de las entregas de comestibles en línea puede limitar la medida en que los desiertos de alimentos son un problema importante, aunque no está claro si las entregas en línea se utilizan por igual en toda la sociedad. Aproximadamente 10,2 millones de personas en el Reino Unido (16% de la población) viven en desiertos alimentarios, de los cuales 1,2 millones viven en zonas económicamente deprimidas. Estos desiertos se extienden por todo el país y abarcan tanto las zonas rurales como las urbanas. Sin embargo, alrededor de tres cuartas partes (76%) de los desiertos alimentarios de Inglaterra y Gales se encuentran en zonas urbanas. Los desiertos alimentarios son en gran medida un problema local más que un problema nacional o incluso de un pueblo o ciudad, lo que sugiere que se necesitan intervenciones de política locales, más que nacionales, para hacer frente al problema ([Corfe 2018](#)).

Aplicada ya sea como agricultura urbana profesional o como agricultura comunitaria, la acuaponía podría ayudar a aliviar los desiertos alimentarios, especialmente en las zonas urbanas donde los edificios y los tejados vacíos ofrecen oportunidades para crear espacios de crecimiento en el centro de las ciudades. Sin embargo, esto requerirá que los gobiernos municipales introduzcan cambios en la legislación vigente sobre el uso de la tierra a fin de facilitar la agricultura urbana y facilitar el acceso de las poblaciones vulnerables a alimentos sanos y productos frescos ([Tomlinson 2017](#)).

15.1.3 Soberanía alimentaria

El [movimiento de soberanía alimentaria](#) es una alianza mundial de agricultores, cultivadores, consumidores y activistas. Afirma que la gente debe reclamar su poder en el sistema alimentario reconstruyendo las relaciones entre la gente y la tierra, y entre los proveedores de alimentos y los que comen. La soberanía alimentaria es el derecho de los pueblos a una alimentación sana y culturalmente apropiada, producida con métodos ecológicamente racionales y sostenibles, y su derecho a definir sus propios sistemas alimentarios y agrícolas. Coloca las aspiraciones y necesidades de quienes producen, distribuyen y consumen alimentos en el centro de los sistemas y políticas alimentarios, en lugar de las demandas de los mercados y las empresas. Por consiguiente, la soberanía alimentaria va mucho más allá de garantizar que las personas dispongan de alimentos suficientes para satisfacer sus necesidades físicas.

Si se aplican como un programa que ha de ser gestionado por la población local, las empresas comunitarias de acuicultura ofrecen un nuevo modelo para combinar los organismos locales con la innovación científica a fin de abordar la soberanía alimentaria, al volver a comprometerse y dar a las comunidades más control sobre su producción y distribución de alimentos. Acercar la producción de alimentos a los lugares donde vive la gente y ayudarla a adoptar diferentes enfoques agrícolas podría

alentarla a introducir cambios positivos en su dieta, contribuyendo así a la seguridad alimentaria. El acceso a la producción de alimentos también puede considerarse una forma de alentar a las personas a desperdiciar menos alimentos. Una encuesta realizada en el Reino Unido ([Vanson y Georgieva 2016](#)) reveló un alto nivel de aceptación social de la acuaponía como método eficiente, autosuficiente y limpio de producción urbana de alimentos. Sin embargo, estas conclusiones contradicen las de una encuesta realizada en Berlín (Alemania) ([Specht et al. 2016](#)), en la que se constató una aceptación social comparativamente baja de la acuaponía en comparación con las formas de agricultura urbana de más baja tecnología, como la jardinería en tejados, aunque esto podría explicarse por una falta general de conocimientos sobre ese tipo de sistema de producción.

15.1.4 Redes alimentarias alternativas

Las redes alimentarias alternativas (AFN) han surgido como parte del movimiento de soberanía alimentaria ([Maye y Kirwan 2010](#)). Las AFN representan esfuerzos concretos para re-espaciar y resocializar la producción, distribución y consumo de alimentos. Las AFN pueden definirse como los sistemas o canales de producción, distribución y consumo de alimentos que se construyen a partir de la reconexión o la estrecha comunicación entre el productor, el productor y el consumidor, y que están comprometidos con las dimensiones sociales, económicas y ambientales de la producción, distribución y consumo sostenibles de alimentos. Las redes de distribución de alimentos se caracterizan típicamente por:

(1) Distancias más cortas entre productores y consumidores. Al cultivar los alimentos en la proximidad de donde la gente compra y come sus alimentos, las AFN minimizan las distancias de transporte y el consumo de combustible, y evitan los intermediarios en la cadena de distribución. Esta forma de comercialización directa permite a los agricultores captar y mantener más beneficios, y conserva el combustible fósil tanto en la producción como en el transporte. La comercialización directa acerca a los agricultores y los comedores, desarrollando así los lazos de confianza y cooperación.

2) El tamaño y la escala de las explotaciones agrícolas pequeñas y los métodos de agricultura orgánica, se contrastan con la agroindustria convencional en gran escala. La mayoría de las granjas de las AFN son pequeñas tanto en términos de superficie (menos de 50 acres) como en términos de ingresos. Dependen de la mano de obra doméstica, aprendices y pasantes y, en algunos casos, de trabajadores agrícolas estacionales. Las explotaciones agrícolas más grandes pueden emplear trabajadores durante todo el año, y pueden permitir a sus propietarios ganarse la vida únicamente a través de la agricultura. La agricultura alternativa también hace hincapié en el cultivo de alimentos con conciencia ambiental, y los agricultores de las zonas rurales practican técnicas de cultivo orgánico, aunque es posible que sus alimentos no estén oficialmente certificados como tales.

(3) La distribución de alimentos usando cooperativas de alimentos, mercados de agricultores, servicios de entrega de cajas de alimentos para la agricultura con apoyo comunitario ([Community Supported Agriculture CSA](#)); En lugar de contratar sus ventas de alimentos con corredores, mayoristas, empresas,

procesadores o supermercados, los agricultores de las AFN adoptan [estructuras integradas verticalmente](#) en las granjas que involucran a la granja y al hogar agrícola directamente en la distribución y las actividades de venta al por menor que tienen lugar cerca de la granja.

Las AFN tratan de localizar los sistemas alimentarios y de fomentar el contacto entre los productores de alimentos y los consumidores, tratando de re-espaciar los sistemas alimentarios que se perciben como "sin lugar". Por lo tanto, las AFN se denominan a veces "redes alimentarias locales". Se considera que la "localización" de los sistemas alimentarios se encuentra en un marcado contraste con el sistema alimentario agroindustrial y mundial dominante, caracterizado por los "alimentos de la nada". Sin embargo, la geografía de los sistemas alimentarios locales es sólo un aspecto clave. Además de estar arraigados en un lugar, los sistemas alimentarios locales tienen por objeto ser económicamente viables para los agricultores y los consumidores, utilizar prácticas de producción y distribución ecológicamente racionales y mejorar la equidad social y la democracia para todos los miembros de la comunidad.

La acuaponía encaja bien con el concepto de Redes Alimentarias Alternativas/Redes Alimentarias Locales. Se trata de un método de producción de alimentos con conciencia ecológica que consume menos agua que los métodos convencionales de producción de cultivos y que prácticamente no produce desechos: el lodo puede convertirse fácilmente en abono orgánico y en productos valiosos. Como sistema de circuito cerrado, el único insumo necesario para una explotación acuícola son el agua y el alimento que alimenta a los peces y, por lo tanto, a diferencia de la mayoría de las prácticas agrícolas tradicionales, no requiere ningún fertilizante o pesticidas de base química, o los reduce considerablemente, para facilitar el crecimiento de las plantas. Esto implica que las plantas cosechadas de un sistema acuapónico se cultivan en un sistema que es equivalente a la producción orgánica, aunque en la UE el producto no puede certificarse como tal, ya que el sistema de certificación actualmente sólo se refiere a los cultivos cultivados en el suelo.

La acuicultura y la agricultura convencionales pueden implicar largas cadenas de valor. Los límites del sistema son la pesca y el invernadero o campo en un extremo, y el consumidor en el otro. Entre ambos se encuentran el procesamiento, la venta al por menor, la venta al por mayor y el transporte, cada uno de los cuales tiene repercusiones ambientales, sociales y económicas asociadas. El desarrollo de cadenas de valor cortas por parte de los productores urbanos de acuicultura -por ejemplo, la venta directa a los consumidores, restaurantes o supermercados- puede reducir estos impactos.

El [GrowHaus](#) en Colorado es una empresa social que se centra en la producción comunitaria de alimentos de forma saludable, equitativa y dirigida por los residentes. El 97% de los alimentos que se consumen en Colorado se producen fuera del estado, y el vecindario donde se encuentra la GrowHaus ha sido designado desierto de alimentos. Inicialmente en asociación con [Colorado Aquaponics](#), y desde 2016 de forma independiente, la GrowHaus opera una granja de 297 metros cuadrados de acuaponía y los productos se venden a través de un programa semanal de cestas de alimentos frescos de granja a un precio comparable al de Walmart, así como a restaurantes, con una porción donada a la

comunidad local. Para ayudar a la transición hacia una alimentación más saludable, la GrowHaus también organiza capacitación gratuita y eventos comunitarios centrados en los alimentos.

El Well Community Allotment Group (Crookes Community Farm) es una empresa social dirigida por voluntarios en Sheffield (Reino Unido), que tiene la misión de conectar a la comunidad local con sus alimentos, haciéndolos participar activamente en su producción y educándolos sobre los beneficios de los alimentos locales. En 2018, la asociación recibió el premio del [Aviva Community Fund Award](#) para construir una unidad de acuaponía que se utilizará para educar a personas, escuelas, grupos de jóvenes y otras organizaciones.

15.2 Acuaponía y la empresa social

Las empresas sociales, a diferencia de las empresas privadas o corporativas tradicionales, tienen por objeto suministrar productos y servicios que satisfagan las necesidades humanas básicas. En el caso de una empresa social, la motivación principal no es la maximización de los beneficios sino la creación de capital social; por lo tanto, el crecimiento económico es sólo una parte de un mandato mucho más amplio que incluye servicios sociales como la rehabilitación, la educación y la capacitación, así como la protección del medio ambiente. Existe un interés creciente en la acuaponía entre las empresas sociales, porque representa un instrumento eficaz para ayudarlas a cumplir su mandato. Por ejemplo, la acuaponía puede integrar estrategias de medios de vida para asegurar alimentos y pequeños ingresos para los hogares pobres y sin tierra. La producción doméstica de alimentos, el acceso a los mercados y la adquisición de conocimientos especializados son instrumentos inestimables para asegurar el empoderamiento y la emancipación de la mujer en los países en desarrollo, y la acuaponía puede sentar las bases de un crecimiento socioeconómico justo y sostenible.

La creciente familiaridad del público con la acuaponía ha dado lugar a una variedad de empresas sociales en todo el mundo. En los Estados Unidos, varias empresas sociales han empezado a utilizar la acuaponía como parte de un creciente movimiento social centrado en la utilización de la agricultura urbana para aumentar la seguridad alimentaria y la cohesión de la comunidad. Una de las primeras fue Growing Power, fundada por Will Allen en 1995 con el objetivo de utilizar la agricultura urbana como vehículo para mejorar la seguridad alimentaria en la zona central de Milwaukee y para el fortalecimiento a largo plazo de sus barrios, así como para dar a los jóvenes de los centros urbanos la oportunidad de adquirir conocimientos prácticos para la vida cultivando y comercializando productos orgánicos. Growing Power proporcionó instalaciones o tierras, orientación en el cultivo de alimentos y mantenimiento general del proyecto, y los productos fueron donados a programas de alimentación y proveedores de alimentos de emergencia, o vendidos por los jóvenes en tiendas agrícolas y mercados de granjeros locales, con la estipulación de que una cuarta parte de los ingresos se devolviera a la comunidad local.

En 2010 Will Allen fue reconocido por la revista *Time* como una de las 100 personas más influyentes del mundo, y aunque Growing Power se derrumbó en 2017 debido a la creciente deuda, el legado de la empresa sigue vivo en forma de otros emprendimientos sociales que se inspiraron para iniciar iniciativas similares. Uno de esos emprendimientos, que reconoce la influencia de Will Allen, es la [Rid-All Green Partnership](#) en Cleveland, Ohio, cuya misión es educar a la próxima generación no sólo para que aprendan a cultivar y comer alimentos frescos, sino también para que operen y desarrollen sus propios negocios en la industria alimentaria, que van desde la venta de productos frescos y pescado a los distribuidores de alimentos, hasta la elaboración y el envasado de productos alimenticios frescos.

El movimiento de agricultura urbana en los Estados Unidos ha sido impulsado por el programa de subvenciones competitivas del Proyecto de Alimentos para la Comunidad (CFP) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que se estableció en 1996 con el objetivo de luchar contra la inseguridad alimentaria mediante el desarrollo de proyectos de alimentos para la comunidad que promuevan la autosuficiencia de las comunidades de bajos ingresos. Desde 1996 este programa ha concedido aproximadamente 90 millones de dólares en subvenciones. Una empresa social que se ha beneficiado de este programa es [Planting Justice](#), que construyó un sistema de acuaponía en un terreno baldío en East Oakland, California, que es administrado por antiguos reclusos. Se han creado 12 puestos de trabajo con salarios dignos, se han entregado 2268 kilos de productos gratuitos a la comunidad y el proyecto ha devuelto al vecindario 500.000 dólares en salarios y 200.000 dólares en prestaciones ([New Entry Sustainable Farming Project 2018](#)).

[Trifecta Ecosystems](#) (anteriormente Fresh Farm Aquaponics) en Meriden, Connecticut, tiene por objeto abordar la seguridad alimentaria urbana mediante la creación de incentivos para que las comunidades cultiven sus propios alimentos y, al mismo tiempo, crear conciencia sobre la agricultura sostenible a través de la educación, los talleres y los proyectos de la ciudad. La empresa emplea a seis personas que proporcionan sistemas de acuaponía a las organizaciones con fines educativos, desarrollo de la fuerza de trabajo, jardinería terapéutica y producción de alimentos de alta calidad. Los sistemas acuapónicos van desde instalaciones de producción a escala comercial hasta pequeñas unidades educativas para su uso en las aulas. En 2018, la Autoridad Regional del Agua del Centro Sur otorgó una subvención de 500.000 dólares para facilitar la creación de una serie de sistemas acuapónicos de agricultura de ambiente controlado, una plataforma tecnológica de agricultura urbana y programas de capacitación de la fuerza de trabajo destinados a mejorar la seguridad alimentaria.

La empresa social [SchoolGrown](#) fue creada en 2014 por entusiastas de la acuaponía que sentían que los niños no estaban teniendo suficientes experiencias prácticas en el cultivo de alimentos y aprendiendo sobre su conexión con el mundo que los rodea. Situada junto a la operación comercial de acuaponía en [Ouroboros Farms](#), California, el "aula" de acuaponía está dirigida por voluntarios y se utiliza para proporcionar formación. Su principal objetivo, sin embargo, es difundir los sistemas de acuaponía en escuelas y comunidades de todo el territorio de los Estados Unidos, a fin de enseñar prácticas agrícolas sostenibles, gestión ambiental y conservación de recursos, y al mismo tiempo producir alimentos frescos y locales, estableciendo así una conexión más profunda entre las comunidades y los alimentos que consumen. El LEAF (Living Ecosystem Aquaponic Facility) es un

invernadero de 167 metros cuadrados con un sistema de acuaponía alimentado por energía solar que fue diseñado específicamente para este propósito. Con un coste de 75.000 dólares, que incluye los sueldos de dos empleados a tiempo parcial responsables del mantenimiento del sistema y la cosecha, los invernaderos se financian mediante una combinación de un plan de cajas de hortalizas de Agricultura Apoyada por la Comunidad (CSA), el patrocinio de la comunidad local o de empresas y la financiación colectiva. Se pretende que cada LEAF sea financieramente autosuficiente mediante la generación de ingresos a partir del producto.

Los ejemplos anteriores ilustran algunos de los diferentes modelos de negocio adoptados por las empresas sociales de acuaponía. Queda por ver si continuarán prosperando y creciendo o, como Growing Power, acabarán fracasando. Un análisis en profundidad de dos empresas sociales de acuaponía realizadas en 2012-13 reveló cuatro factores distintos que fueron significativos para su supervivencia ([Laidlaw y Magee 2016](#)). Sweet Water Organics (SWO) comenzó como una granja urbana de acuaponía en un gran edificio industrial en desuso en el centro de la ciudad de Milwaukee en 2008. Fue financiada principalmente por sus fundadores con el fin de desarrollar la capacidad creativa, las oportunidades de empleo y los alimentos sin productos químicos, frescos y asequibles para la comunidad local. En 2010, una nueva organización, Sweet Water Farms (SWF), se separó de SWO, con la idea de que creciera como una organización híbrida cohesiva y de apoyo mutuo, que incluyera tanto una granja urbana comercial (SWO) con fines de lucro como una 'academia' de acuaponía (SWF) sin fines de lucro. La SWF gestionaba las operaciones de los voluntarios y organizaba programas de formación y educación en la granja urbana Sweet Water, al tiempo que desarrollaba programas a escala local (Milwaukee y Chicago), regional, nacional e internacional. Sweet Water tenía un fiel seguimiento entre los restauradores locales y las tiendas de alimentos frescos por sus productos de lechuga y brotes, y vendía su pescado a un solo mayorista. Sin embargo, el modelo híbrido de empresa sin ánimo de lucro/de lucro resultó ser un reto, ya que ambas partes de la organización se esforzaron por identificar su papel en relación con el otro. Aunque cada lado tenía una estructura diferente en relación con su carácter operativo, y aunque sus operaciones se solapaban con frecuencia, su planificación estratégica y sus visiones a veces no lo hacían. Después de tres años de funcionamiento, la SWO todavía no había logrado obtener beneficios, y en 2011 el gobierno municipal de Milwaukee concedió un préstamo de 250.000 dólares con la condición de que se crearan 45 puestos de trabajo para 2014. En octubre de 2012, la SWO tenía entre 11 y 13 empleados permanentes, pero todavía se mantenía mediante la financiación de préstamos e inversiones de capital. En junio de 2013, cuando vencieron los reembolsos de los préstamos y no se cumplieron los objetivos de creación de empleo, la rama con fines de lucro de Sweet Water entró en liquidación, y la SWF se hizo cargo como principal operador de la granja urbana de Sweet Water. En la actualidad, la SWF funciona enteramente como una empresa educativa y de asesoramiento dirigida por voluntarios y un pequeño equipo de empleados a tiempo parcial, y ya no suministra productos a los restaurantes ([Laidlaw y Magee 2016](#)).

El Centro de Educación e Investigación (CERES) de Melbourne, Australia, inauguró sus instalaciones de acuaponía en 2010. El sistema fue diseñado como un sistema comercial suboptimizado con la capacidad de producción para mantener un salario único para el agricultor que lo mantiene. Su salario

varía en función de cuánto produce, y las hortalizas se venden a través del servicio de entrega de cajas orgánicas de CERES Fair Food. La escala de la operación no genera un retorno que permita el establecimiento de una instalación de procesamiento de pescado ([Laidlaw y Magee 2016](#)).

Los interesados en Sweet Water Farms y CERES identificaron que el principal factor de su supervivencia era el compromiso permanente, en forma de apoyo continuo de personal con conocimientos técnicos y de gestión empresarial, combinados con un liderazgo duradero, y la voluntad de los interesados de seguir participando y dispuestos a cooperar sin fuertes incentivos financieros. El segundo factor fue el contexto político local. Si bien la ciudad de Milwaukee apoyaba a Sweet Water tanto mediante iniciativas de política como mediante ayuda financiera directa, lo que le permitía ampliar sus activos fijos y recursos humanos, crear conciencia en el mercado y adquirir una considerable base de clientes comerciales habituales, el proyecto CERES contaba con poco apoyo de ese tipo, más allá de un subsidio inicial, y había luchado por generar ingresos que le hubieran permitido expandirse. Los costes de cumplimiento y de licencias también dificultaron la participación en los mercados locales de una manera más que simbólica, lo cual disminuyó su motivación para comercializar y vender el producto, e hizo insostenible que la operación se desarrollara más allá de una pequeña empresa generadora de ingresos a tiempo parcial. El tercer factor fue la disponibilidad de mercados para los productos acuapónicos urbanos. Si bien la acuaponía urbana resulta atractiva para una base de clientes que responde cada vez más a las cuestiones de seguridad alimentaria y consumo ético, como en Milwaukee, no fue así en Melbourne. El factor final fue la diversificación. Tanto CERES como SWO/SWF se beneficiaron de la traducción de la experimentación social y técnica en una gama de servicios de capacitación y educación. SWO/SWF, al ser una preocupación mayor, obviamente tenía mayor capacidad para desarrollar estos servicios, y estos resultaron ser vitales para sostener la empresa social cuando los planes comerciales no se materializaron. Por lo tanto, la viabilidad de las empresas sociales de acuaponía depende no sólo del compromiso de las partes interesadas, de un análisis de mercado exhaustivo, de estructuras de gobierno claras y de un plan de negocios sólido, sino también de factores externos, como el contexto político y la normativa local ([Laidlaw y Magee 2016](#)).

15.3 La acuaponía como herramienta educativa

La acuaponía promueve los conocimientos científicos y constituye un instrumento útil para la enseñanza de las ciencias naturales en todos los niveles, desde la enseñanza primaria hasta la terciaria. Un sistema modelo de aula de acuaponía proporciona múltiples formas de enriquecer las clases de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM). El mantenimiento diario de un sistema de acuaponía también permite el aprendizaje experimental, que es el proceso de aprendizaje a través de la experiencia física y, más precisamente, el proceso de "dar sentido" a la experiencia directa de un individuo. La acuaponía puede convertirse así en una forma agradable y eficaz para que los estudiantes estudien el contenido de STEM. También puede utilizarse para la enseñanza de temas como la empresa y la economía, y para abordar cuestiones como el desarrollo sostenible, la ciencia ambiental, la agricultura, los sistemas alimentarios y la salud.

Hay muchos tipos de sistemas acuapónicos disponibles en Internet que pueden adquirirse como un kit, o bien puede entregarse e instalarse un sistema completo. Sin embargo, la construcción de un sistema acuapónico es en sí misma una valiosa experiencia educativa. Un sistema acuapónico básico también puede construirse fácilmente y a bajo coste a partir de materiales recuperados. Incluso un microsistema (1,5 m²) puede imitar una unidad a escala completa en términos de calidad y consumo de agua, convirtiéndolo así en un instrumento didáctico eficaz ([Maucieri et al. 2018](#)). Sin embargo, la aplicación de la acuaponía en las aulas no está exenta de dificultades. Las dificultades técnicas, la falta de experiencia y conocimientos, y el mantenimiento durante los períodos de vacaciones pueden suponer importantes obstáculos para que los profesores utilicen la acuaponía, y el desinterés por parte del profesor también puede ser un factor crucial ([Hart et al. 2013](#); [Hart et al. 2014](#)). Sin embargo, otros estudios revelaron que muchos educadores están dispuestos a incorporar la acuaponía en el aula, en particular cuando ofrece una oportunidad de aprendizaje experimental ([Clayborn et al. 2017](#)). Los profesores estuvieron muy de acuerdo en que llevar una unidad de acuaponía al aula es inspirador para los estudiantes y condujo a una mayor interacción entre los estudiantes y los profesores, contribuyendo así a un diálogo sobre la ciencia ([Wardlow et al. 2002](#)). Una encuesta sobre la utilización de la acuaponía en la educación en los Estados Unidos reveló que en las escuelas primarias y secundarias tiende a estar orientada a proyectos y a utilizarse para enseñar asignaturas de una sola disciplina, como la química o la biología, mientras que los sistemas acuapónicos de las escuelas superiores y universidades se utilizaban generalmente para enseñar asignaturas interdisciplinarias como los sistemas alimentarios y las ciencias ambientales. En las escuelas profesionales y técnicas, los sistemas acuapónicos rara vez se utilizan para enseñar asignaturas distintas de la acuaponía ([Genello et al. 2015](#)).

15.4 La acuaponía y el bienestar (humano)

La acuaponía ofrece una forma innovadora de horticultura terapéutica, un enfoque basado en la naturaleza que puede promover el bienestar de las personas con problemas de salud mental mediante el uso de una serie de actividades ecológicas como la jardinería y el contacto con animales. En el último decenio han surgido varias empresas sociales que ofrecen programas de horticultura terapéutica para mejorar el bienestar de las comunidades locales. El enfoque de las empresas sociales se basa en las "Empresas Sociales" facilitando a las personas con problemas de salud mental el desarrollo de nuevas aptitudes y la reincorporación al lugar de trabajo. Una empresa social es un tipo específico de empresa social en la que la misión social es crear empleo, experiencia laboral, capacitación y oportunidades de voluntariado, dentro de un entorno de apoyo e inclusión, para las personas que se enfrentan a importantes obstáculos para el empleo, y en particular para las personas con una discapacidad (incluidas las enfermedades mentales y los problemas de aprendizaje), problemas de abuso, antecedentes penales o problemas de falta de vivienda ([Howarth et al. 2016](#)).

Hay cualidades particulares de la relación planta-persona que promueven la interacción de las personas con su entorno y, por ende, su salud, nivel funcional y bienestar subjetivo. Se considera que las plantas otorgan recompensas no discriminatorias a su cuidador sin imponerle la carga de una

relación interpersonal y, al responder a la atención o al descuido, pueden reforzar inmediatamente el sentido de la agencia personal. También se ha demostrado la eficacia de la práctica de la horticultura en un contexto de grupo. Muchas personas con problemas de salud mental y física se enfrentan a la exclusión social porque no tienen acceso en condiciones de igualdad a las oportunidades de la sociedad, incluidos el empleo remunerado, la vivienda, la educación y el ocio. Las redes sociales como las que ofrecen las iniciativas de horticultura comunitaria pueden actuar como amortiguadores de los factores estresantes, proporcionar una estructura para la adquisición de aptitudes y validar y mejorar el sentido de autoestima de un individuo ([Diamant y Waterhouse 2010](#); [Fieldhouse 2003](#)).

Hasta la fecha hay pocos ejemplos del uso de la acuaponía en la horticultura terapéutica. En los Estados Unidos, una pequeña empresa agrícola llamada [Green Bridge Growers](#) en Indiana cultiva productos durante todo el año, utilizando principalmente la acuaponía. La empresa emplea ahora a varias personas con trastornos del espectro autista y considera que la programación, la precisión y la supervisión necesarias en la acuaponía se ajustan perfectamente a sus aptitudes. De manera similar, el [ACRES Project](#) (Adults Creating Residential and Employment Solutions) en Pensilvania utiliza acuaponía para proporcionar terapia hortícola, empleo e integración comunitaria para adultos con autismo y discapacidades intelectuales. Están involucrados en todas las facetas del sistema acuapónica, desde el cuidado y mantenimiento hasta la cosecha y las ventas, y los procedimientos programados y las rutinas diarias que acuaponía requiere les proporciona la estabilidad y la estructura que encuentran tranquilizadora. Por lo tanto, al fomentar las aptitudes sociales, vocacionales y de autodefensa, ACRES utiliza la acuaponía para ayudar a los individuos autistas a optimizar su potencial, desarrollar aptitudes prácticas para la vida, aumentar la capacidad social y hacer la transición al trabajo y la independencia.

El [FabLab Nerve Centre](#) de Irlanda del Norte ha creado una granja digital acuapónica de empresa social para enseñar a las personas con dificultades de aprendizaje habilidades empresariales y digitales. Utilizando equipos digitales de última generación del FabLab del Centro Nervioso, como impresoras 3D, routers CNC y cortadoras láser, los estudiantes recibirán formación práctica y experiencia en una serie de técnicas de diseño y fabricación digital que les permitirán diseñar, construir y gestionar una granja acuapónica. Como parte del proyecto, los jóvenes crearán una empresa social de reciente creación que les permitirá vender los productos de la granja a las empresas locales, desarrollando así sus aptitudes en materia de iniciativa empresarial social, negocios y comercialización.

[Solutions for Change](#), una empresa social que se dedica a resolver el problema de la falta de vivienda de las familias, dirige Solutions Farms en California. La granja de acuaponía proporciona capacitación a las familias sin hogar en el cultivo de tilapia y de hierbas y hojas de temporada que luego se venden a los restaurantes, mercados y escuelas locales. Funciona como un laboratorio para enseñar importantes valores laborales y preparar a las personas para su reincorporación al lugar de trabajo, con lo que se aumenta la esperanza, así como los productos.

[Asociación Huerto Lazo](#) es una empresa social de la provincia de Málaga (España) que ofrece pasantías a jóvenes con antecedentes problemáticos. Los pasantes reciben formación práctica en acuaponía en un entorno seguro. El bagre, la tilapia y la tenca se venden al restaurante El Sollo de Fuengirola.



Figura 2: Instalaciones de acuaponía en la Asociación Huerto Lazo - en sentido contrario a las agujas del reloj desde arriba a la izquierda: tanques de bagre en el invernadero de acuaponía; tanques de tilapia con *Gynostemma pentaphyllum* que se vende con fines medicinales; los tanques de filtración de agua en Huerto Lazo; Ulrich Eich enseñando su sistema de acuaponía (Fotografías: Sarah Milliken).

15.5 El potencial de la acuaponía para el bienestar de los ancianos

La acuaponía puede proporcionar un entorno óptimo para alcanzar varios objetivos terapéuticos en una variedad de clientes con discapacidades cognitivas y/o físicas, y grupos de población especiales como los ancianos, los niños o las personas con problemas de desarrollo. Los objetivos terapéuticos de los profesionales de la salud, como los terapeutas ocupacionales y los fisioterapeutas, son la promoción y/o el tratamiento del bienestar.

El objetivo principal de la terapia ocupacional es permitir que las personas participen en las actividades de la vida cotidiana. Los terapeutas ocupacionales logran esto trabajando con las personas y las comunidades para mejorar su capacidad de participar en las ocupaciones que desean, necesitan o se espera que hagan, o modificando la ocupación o el entorno para apoyar mejor su participación ocupacional ([WFOT 2012](#)). En la terapia ocupacional, las ocupaciones se refieren a las actividades cotidianas que las personas realizan como individuos, en familias y con comunidades para ocupar el tiempo y dar sentido y propósito a la vida. Las ocupaciones incluyen las cosas que las personas necesitan, quieren y se espera que hagan ([WFOT 2012](#)).

Los fisioterapeutas proporcionan servicios que desarrollan, mantienen y restauran el máximo movimiento y la capacidad funcional de las personas. Pueden ayudar a las personas en cualquier etapa de la vida, cuando el movimiento y la función se ven amenazados por el envejecimiento, las lesiones, las enfermedades, los trastornos, las condiciones o los factores ambientales. Los fisioterapeutas ayudan a las personas a maximizar su calidad de vida, buscando el bienestar físico, psicológico, emocional y social ([WCPT 2016](#)).

Desde el punto de vista terapéutico, una unidad acuapónica es una herramienta que puede promover el desarrollo del comportamiento cognitivo, la integración sensorial-motora y las habilidades motoras. Las actividades que pueden utilizarse como medio terapéutico implican la participación en la selección de las plantas y los peces, y su cuidado y observación diarios. El efecto terapéutico previsto de la acuaponía con respecto al bienestar puede encontrarse en diferentes ámbitos del funcionamiento de una persona.

15.5.1 Capacidades cognitivas-conductuales

Durante el proceso de gestión y cuidado de los peces y las plantas en una unidad acuapónica, se pueden facilitar las funciones cognitivas como la toma de decisiones, la memoria a corto plazo, la memoria a largo plazo, el tiempo de atención, el tiempo de reacción, el cambio entre las tareas, la planificación y la resolución de problemas. La toma de decisiones es el proceso de identificación y elección de alternativas basadas en los valores, preferencias y creencias de la persona que toma las decisiones. Al igual que la función cognitiva, la toma de decisiones a lo largo de la vida muestra profundos cambios relacionados con la edad ([Tymula et al. 2013](#)). La memoria a corto plazo, es un sistema para almacenar y gestionar temporalmente la información necesaria para llevar a cabo tareas cognitivas complejas como el aprendizaje, el razonamiento y la comprensión. La memoria a corto plazo es la capacidad de mantener una pequeña cantidad de información en la mente en un estado activo y fácilmente disponible durante un corto período de tiempo. Por ejemplo, la memoria a corto plazo puede utilizarse para recordar un número de teléfono que acaba de ser recitado. Se cree que la duración de la memoria de corto plazo (cuando se evita el ensayo o el mantenimiento activo) es del orden de los segundos (normalmente unos 18 a 30 segundos) ([APA 2006](#)).

Con el envejecimiento, la capacidad de almacenamiento de la memoria no es el problema; el cerebro no es un disco duro sobrecargado. Más bien, los cambios parecen venir en la forma en que las

personas codifican y recuperan la información. La interferencia, como la distracción, y un procesamiento más lento pueden impedir la recuperación, como la capacidad de recordar nombres y fechas. Sin embargo, incluso con estos sutiles cambios, la mayoría de los adultos mayores todavía parecen ser capaces de adquirir eficientemente nueva información y aparcarla en la memoria a largo plazo. Y el aprendizaje implícito, el aprendizaje sin esfuerzo consciente, parece más o menos no verse afectado en la vejez.

Se cree que un estilo de vida saludable mejora la salud del cerebro. Se ha demostrado que el ejercicio aeróbico regular ayuda a la cognición, probablemente porque aumenta el flujo sanguíneo y trae más oxígeno al cerebro. El período de atención es la cantidad de tiempo concentrado que una persona puede dedicar a una tarea sin distraerse. La mayoría de los educadores y psicólogos están de acuerdo en que la capacidad de concentrarse y mantener la atención en una tarea es crucial para lograr objetivos. El período de atención puede tener un gran impacto en el rendimiento en el trabajo y en la capacidad de hacer frente a las tareas de la vida cotidiana: un lapso de atención puede dar lugar a que se pierda información importante, se cometan errores o algo peor ([APA 2006](#)).

El tiempo de reacción es el tiempo transcurrido entre la presentación de un estímulo sensorial y la subsiguiente respuesta conductual. En la psicología psicométrica se considera un índice de la velocidad de procesamiento: indica la rapidez con la que el individuo puede ejecutar las operaciones mentales necesarias para la tarea en cuestión. A su vez, la velocidad de procesamiento se considera un índice de eficiencia de procesamiento. El tiempo de reacción simple se acorta desde la infancia hasta finales de los 20 años, luego aumenta lentamente hasta los 50 y 60 años, y luego se alarga más rápidamente a medida que la persona llega a los 70 años y más. En otras palabras, en contra de su ferviente creencia, los adolescentes probablemente tendrán tiempos de reacción más lentos que los adultos. El tiempo de reacción también se vuelve más variable con la edad y con la enfermedad de Alzheimer. La razón de la disminución del tiempo de reacción con la edad no son sólo simples factores mecánicos como la velocidad de la conducción nerviosa, sino que puede estar relacionada con la tendencia de las personas mayores a ser más cuidadosas y a controlar sus respuestas más minuciosamente. Se descubrió que las personas mayores que tienden a caerse en las residencias de ancianos tenían un tiempo de reacción significativamente más largo que las que no tendían a caerse.

15.5.2 Integración sensorial-motora

Los estímulos sensoriales aumentan durante el proceso de gestión y cuidado de los peces y las plantas en una unidad acuapónica, especialmente en las modalidades olfativas y somato-sensoriales. Se utilizan objetos cotidianos para la estimulación sensorial, que en una unidad acuapónica serían las plantas y los peces. El objetivo de la estimulación sensorial es promover la integración sensorial-motora, evocar sentimientos positivos, influir en el estado de ánimo y mejorar la autoestima y el bienestar. El contacto repetitivo con estímulos intensivos promueve la integración sensorial y permite a las personas desarrollar habilidades cognitivas-comportamentales. Las hierbas aromáticas proporcionan estímulos olfativos intensivos que se sabe que están involucrados en el sistema límbico o en el llamado cerebro emocional (Figura 3).

Las dificultades en el desempeño ocupacional debidas a los problemas de modulación sensorial o a la mala integración de las sensaciones pueden ser resultado de las dificultades en la forma en que el sistema nervioso recibe, organiza y utiliza la información sensorial del cuerpo y del entorno físico para la autorregulación, la planificación motriz y el desarrollo de aptitudes. Estos problemas repercuten en el concepto de si mismo, la regulación emocional, la atención, la solución de problemas, el control del comportamiento, el rendimiento de las habilidades y la capacidad de desarrollar y mantener relaciones interpersonales. En los adultos, pueden tener un impacto negativo en la capacidad de criar a los hijos, trabajar o participar en actividades domésticas, sociales y de ocio. Las preocupaciones sobre el desempeño ocupacional debidas a la mala integración y el procesamiento de las sensaciones pueden ocurrir de manera aislada, contribuir a la aparición de otras afecciones como los trastornos de ansiedad y pánico, la depresión, el trastorno de estrés postraumático o la esquizofrenia, o coexistir con ellas. Las personas con problemas de aprendizaje, trastorno de déficit de atención, discapacidades del desarrollo o trastornos del espectro autista también pueden experimentar estas dificultades. La deficiente integración sensorial puede observarse en diversos aspectos de la vida humana a lo largo de la vida (Tabla 15.1). Utilizada en Europa desde el decenio de 1960, la integración sensorial se concibió originalmente para ayudar a las personas con discapacidades de aprendizaje. Era una forma de explorar un entorno seguro y estimulante que proporcionaba actividades apropiadas para la edad y agradables. También se ha descubierto que esta técnica puede utilizarse para reducir hasta 30 años de envejecimiento cognitivo ([WFOT 2012](#)).



Figura 3: Estimulación sensorial del tacto y el olfato durante el manejo de hierbas y otras plantas.

Tabla 15.1: Consecuencias de la mala organización sensorial en la edad adulta ([WFOT 2012](#)).

Sensación corporal (tacto y movimientos)	Rendimiento motriz
<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a la textura y al ajuste, lo que hace que se eviten algunos tipos de prendas de vestir (por ejemplo, corbatas, cuellos de tortuga, medias) • Desagrado por las multitudes o los empujones en lugares públicos (por ejemplo, hacer cola o ir de compras) • Se irrita con el toque ligero o inesperado. Puede tener dificultades con el tacto íntimo • Participación limitada en la preparación de alimentos y comidas y/o variedad en la dieta • No puede discriminar cuando la ropa está torcida o cuando tiene restos de comida en la cara 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad para conducir, aparcarse, cambiar de marcha o entrar en una autopista con un coche • Dificultad para manejar dispositivos comunes de casa y de la oficina • Torpe o incómodo con las actividades motrices (por ejemplo, ejercicio, ocio, tareas de autocuidado) • Dificultad para organizar y planificar los materiales y el entorno, lo que posiblemente repercuta en el rendimiento laboral y en la salud y la seguridad en el hogar • Dificultad para seguir las instrucciones cuando se navega al aire libre
Vestibular (equilibrio del oído interno)	Rendimiento social
<ul style="list-style-type: none"> • Dificultades con el equilibrio, aversión a caminar sobre superficies irregulares • Desagrado o desorientación en los ascensores o en las escaleras mecánicas • Náuseas al montar en coche. Necesita ir en el asiento delantero o ser el conductor • Temeroso de salir de casa o de volar 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad para discriminar señales visuales y auditivas, impactando las interacciones sociales y el desempeño de los roles • Dificultad con la conciencia del cuerpo, afectando los límites del cuerpo y la imagen corporal • Dificultad para discriminar los sonidos y seguir las instrucciones verbales • Dificultad para manejar el autocuidado y la higiene
Auditivo	Regulación de las emociones
<ul style="list-style-type: none"> • Irritado por sonidos que no suelen molestar a los demás (por ejemplo, lápices o bolígrafos que rascan, luces que zumban, otros que comen, envoltorios de dulces que crujen) • Sensible a los sonidos fuertes 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad para discriminar las señales visuales y auditivas, disminuyendo la capacidad de entender las expresiones emocionales de los demás, lo que resulta en frustración, ansiedad y problemas de control de la ira. • Dificultad para desarrollar apoyos físicos adaptativos basados en los sentidos (es decir, ejercicio, adaptaciones ambientales) para la regulación emocional

15.5.3 Habilidades motoras

La movilidad es la habilidad básica que permite a alguien adaptarse a su entorno y satisfacer sus necesidades fisiológicas y psicológicas. Las habilidades de movilidad pueden disminuir debido a lesiones, enfermedades o envejecimiento. La disminución de la movilidad lleva a la pérdida de la vida independiente y a la disminución de la calidad de vida. Una consecuencia de la falta de capacidad de movilidad suele ser una caída repentina e involuntaria con diversos resultados. Las lesiones relacionadas con las caídas son más comunes entre las personas de edad y son una de las principales causas de dolor, discapacidad, pérdida de independencia y muerte prematura ([WHO 2007](#)). Los costes financieros son considerables y están aumentando en todo el mundo. Las repercusiones personales, familiares y sociales de los traumatismos relacionados con las caídas para las personas de edad, sus familias y la sociedad, así como la posibilidad de realizar intervenciones eficaces, hacen que éste sea

un importante problema de salud a nivel mundial. La asignación eficaz de recursos para la prevención de caídas y lesiones conexas requiere el conocimiento de la escala y la naturaleza del problema, así como pruebas de intervenciones eficaces. Para ello es necesario aumentar la conciencia sobre la magnitud de las caídas de los adultos mayores, intensificar los esfuerzos de investigación y alentar la adopción de medidas de prevención en todo el mundo.

El aumento del número de adultos mayores, su necesidad de mantener un estilo de vida activo y saludable, y el aumento de los costes de rehabilitación después de las caídas son la principal fuerza impulsora para los encargados de formular políticas, las autoridades sanitarias y los médicos en la asignación de recursos financieros y humanos para encontrar programas eficaces de prevención de caídas y de mejora o mantenimiento del equilibrio. Los déficits de equilibrio pueden derivarse de deficiencias en las sensaciones corporales, el equilibrio del oído interno, los músculos y los huesos, y la visión, y tienen un importante impacto negativo en la movilidad y la independencia funcional. El ejercicio físico regular ha demostrado su efecto beneficioso para aumentar la capacidad funcional, la movilidad general, el equilibrio y la marcha ([Gheysen et al. 2018](#)). Todos estos son componentes clave de los programas de prevención de caídas ([WHO 2007](#)).

El paso de un terreno plano a una superficie elevada, como subir escaleras o el entrenamiento aeróbico de escalones, es una actividad de equilibrio compleja. Requiere el desplazamiento del peso de una pierna a la otra y la estabilización de la pierna cargada, estabilidad dinámica durante los desplazamientos del peso, percepción de la altura y la profundidad, coordinación ojo-pierna para la negociación de la altura y la profundidad de las escaleras, suficiente potencia muscular concéntrica para levantar el peso del cuerpo durante el ascenso y suficiente potencia muscular excéntrica para bajar el cuerpo durante el descenso. Así pues, la escalera incluye ocho de los nueve componentes de equilibrio identificados. La doble tarea se ha convertido en una demanda creciente de la vida cotidiana. La doble tarea se define como la realización simultánea de dos tareas que se pueden realizar de forma independiente y que tienen objetivos distintos y separados. Cuando los humanos intentan hacer más de una cosa al mismo tiempo, el rendimiento suele verse afectado. Esto se llama coste de la doble tarea. Se supone que estos costes se producen en el nivel de procesamiento de la información dentro del sistema nervioso central. La disminución de la calidad y la velocidad en la ejecución simultánea de dos tareas se explica por las tareas que compiten por un conjunto limitado de recursos. En particular, la función de atención es importante, ya que una mayor atención está implícitamente asociada con el aumento del nivel de procesamiento cognitivo necesario para realizar la tarea deseada. La persona debe aumentar el nivel de atención dedicado a una tarea para adaptarse a su mayor complejidad. La disminución de la calidad del rendimiento en la doble tarea se explica por dos teorías ([Agmon et al. 2014](#)). La teoría de la capacidad supone que la consecuencia del uso simultáneo de recursos de atención limitados se reduce y la persona cambia la atención de una a otra tarea. La teoría del cuello de botella, por otra parte, supone que el procesamiento paralelo es más difícil cuando se requieren las mismas operaciones cognitivas, y una persona prioriza una tarea sobre otra y las trata secuencialmente.

En la vida cotidiana las personas se dedican a la realización simultánea de varias actividades diferentes, manteniendo el control postural y la marcha. Entre las tareas funcionales comunes que se realizan al mismo tiempo que se está de pie y se camina se encuentran cocinar, hablar por teléfono mientras se

camina y hablar al cruzar la calle. Aunque el equilibrio y la marcha son habilidades básicas para una vida independiente y activa, todavía no hay consenso sobre hasta qué punto el control postural y la marcha están automatizados, o cuánta atención se necesita para su mantenimiento. Por lo tanto, se han desarrollado varios enfoques terapéuticos en los que se practican con seguridad situaciones de doble tarea. Los pares de tareas pueden ser dos tareas motoras (llevar objetos mientras se camina) y una tarea motora y otra cognitiva (estar de pie o caminar mientras se habla o se toman decisiones). Las investigaciones actuales indican que hay una disminución del coste de la doble tarea después del entrenamiento, aunque se limita a los pares de tareas entrenadas ([Agmon et al. 2014](#)).

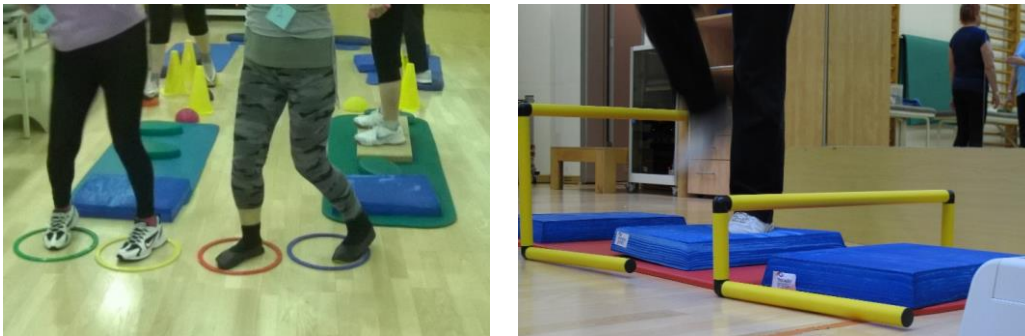


Figura 4: Un ejemplo de camino de negociación de obstáculos como parte de la formación específica de equilibrio de los ancianos de la vivienda comunitaria (Fotografías de Darja Rugelj)

La unidad acuapónica puede diseñarse de manera que proporcione un entorno de alcance para el entrenamiento de habilidades de movilidad como el entrenamiento de equilibrio, la negociación de obstáculos y la evitación durante la marcha, así como para el entrenamiento de tareas dobles. Las habilidades más destacadas que se sabe que disminuyen la incidencia de las caídas en las personas de edad avanzada son la escalada, la subida de escaleras, la negociación de obstáculos y el giro en torno a ejes verticales ([Guirguis-Blake et al. 2018](#)). Sin embargo, deben reconocerse los factores de riesgo ambiental, y el entorno de una unidad acuapónica debe cumplir las normas conocidas de seguridad ambiental. El sistema microacuático parece ser un instrumento ideal para fines terapéuticos y educativos, dado su bajo coste y sus escasas necesidades de espacio ([Maucieri et al. 2018](#)). Además, el funcionamiento de un sistema acuapónico requiere una variedad de profesionales diferentes y, por lo tanto, es un entorno ideal para fomentar la capacidad de comunicación interpersonal y el trabajo en equipo en las escuelas o con grupos con discapacidades físicas o mentales ([Morano et al. 2017](#)).

15.6 Referencias

Agmon, M., Belza, B., Nguyen, H.Q., Logsdon, R.G. y Kelly, V.E. 2014. [A systematic review of interventions conducted in clinical or community settings to improve dual-task postural control in older adults](#). *Clinical Interventions in Aging* 9, 477-492.

APA 2006. [Memory Changes in Older Adults](#). American Psychological Society.

- Brown, J., Brown, R. y Merrill, C. 2011. [Science and technology educators' enacted curriculum: Areas of possible collaboration for an integrative STEM approach in public schools](#). *Technology and Engineering Teacher* 71 (4), 30.
- Clayborn, J., Medina, M. y O'Brien, G. 2017. [School gardening with a twist using fish: Encouraging educators to adopt aquaponics in the classroom](#). *Applied Environmental Education y Communication* 16 (2), 93-104.
- Cohen, S. y Wills, T.A. 1985. [Stress, social support, and the buffering hypothesis](#). *Psychological Bulletin* 98 (2), p.310.
- Coleman-Jensen, A., Rabbitt, M.P., Gregory, G.A. y Singh, A. 2018. [Household Food Security in the United States in 2017](#). United States Department of Agriculture Economic Research Service.
- Corfe, S. 2018. [What are the Barriers to Eating Healthily in the UK?](#) The Social Market Foundation.
- Diamant, E. y Waterhouse, A. 2010. [Gardening and belonging: reflections on how social and therapeutic horticulture may facilitate health, wellbeing and inclusion](#). *British Journal of Occupational Therapy* 73 (2), 84-88.
- Dutko, P., Ver Ploeg, P. y Farrigan, T. 2012. [Characteristics and Influential Factors of Food Deserts](#). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service ERR-140.
- Fieldhouse, J. 2003. [The impact of an allotment group on mental health clients' health, wellbeing and social networking](#). *British Journal of Occupational Therapy* 6 (7), 286-296.
- Genello, L., Fry, J.P., Frederick, J.A., Li, X. y Love, D.C. 2015. [Fish in the classroom: A survey of the use of aquaponics in education](#). *European Journal of Health y Biology Education* 4 (2), 9-20.
- Gheysen, F., Poppe, L., DeSmet, A., Swinnen, S., Cardon, G., De Bourdeaudhuij, I., Chastin, S. y Fias, W. 2018. [Physical activity to improve cognition in older adults: can physical activity programs enriched with cognitive challenges enhance the effects? A systematic review and meta-analysis](#). *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 15, 63.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M. y Toulmin, C. 2010. [Food security: the challenge of feeding 9 billion people](#). *Science* 327 (5967), 812-818.
- Guirguis-Blake, J.M., Michael, Y.L., Perdue, L.A., Coppola, E.L. y Beil, T.L. 2018. [Interventions to prevent falls in older adults updated evidence. Report and systematic review for the US Preventive Services Task Force](#). *Jama-Journal of the American Medical Association* 319 (16), 1705-1716.
- Hart, E.R., Webb, J.B. y Danylchuk, A.J. 2013. [Implementation of aquaponics in education: An assessment of challenges and solutions](#). *Science Education International* 24 (4), 460-480.
- Hart, E.R., Webb, J.B., Hollingsworth, C. y Danylchuk, A.J. 2014. [Managing expectations for aquaponics in the classroom: Enhancing academic learning and teaching an appreciation for aquatic resources](#). *Fisheries* 39 (11), 525-530.
- Heliker, D., Chadwick, A. y O'Connell, T. 2001. [The meaning of gardening and the effects on perceived well being of a gardening project on diverse populations of elders](#). *Activities, Adaptation y Aging* 24 (3), 35-56.
- Howarth, M.L., McQuarrie, C., Withnell, N. y Smith, E. 2016. [The influence of therapeutic horticulture on social integration](#). *Journal of Public Mental Health* 15 (3), 136-140.
- Laidlaw, J. y Magee, L., 2016. [Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne](#). *Local Environment* 21 (5), 573-590.

- Malano, H., Maheshwari, B., Singh, V.P., Purohit, R. y Amerasinghe, P. 2014. [Challenges and opportunities for peri-urban futures](#). In Maheshwari, B., Purohit, R., Malano, H., Singh, V.P. y Amerasinghe, P. (eds.) *The Security of Water, Food, Energy and Liveability of Cities*, pp. 3-10. Springer, Dordrecht.
- Maucieri, C., Forchino, A.A., Nicoletto, C., Junge, R., Pastres, R., Sambo P. y Borin, M. 2018. [Life cycle assessment of an aquaponic system built using recovered material for learning purposes](#). *Journal of Cleaner Production* 172, 3119-3127.
- Maye, D. y Kirwan, J. 2010. [Alternative food networks](#). Scociopedia.isa.
- Morano, L. y Tzouanas, V. 2017. [Urban agricultural and sustainability program at Houston's downtown university: Combining new curriculum, hands-on projects, and a hurricane](#). *Journal of Agriculture Food Systems and Community Development* 7 (4), 23-33.
- New Entry Sustainable Farming Project 2018. [Community Food Projects: Indicators of Success FY 2017](#).
- Pantarella, E., Cardarelli, M., Danieli, P.P., MacNiven, A. y Colla, G. 2010. [Integrated aquaculture-floating agriculture: is it a valid strategy to raise livelihood?](#) XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Horticulture for Development. *ISHS Acta Horticulturae* 921, 79-86.
- Rex, D. y Blair, A. 2003. [Unjust des\(s\)erts: food retailing and neighbourhood health in Sandwell](#). *International Journal of Retail y Distribution Management* 31 (9), 459-465.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J. y Nykvist, B. 2009. [Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity](#). *Ecology and Society* 14 (2), 32.
- Specht, K., Weith, T., Swoboda, K. y Siebert, R. 2016. [Socially acceptable urban agriculture businesses](#). *Agronomy for Sustainable Development* 36, 17.
- Tomlinson, L. 2017. [Indoor aquaponics in abandoned buildings: A potential solution to food deserts](#). *Sustainable Development Law y Policy* 16 (1), 16-40.
- Tymula, A., Rosenberg Belmaker, L.A., Ruderman, L., Glimcher, P.W. y Levy, I. 2013. [Like cognitive function, decision making across the life span shows profound age-related changes](#). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (42), 17143-17148.
- Vanson, T. y Georgieva, I. 2016. [Urban Agriculture Project](#). Global Food Security Food Futures Panel report.
- Walker, R.E., Keane, C.R. y Burke, J.G. 2010. [Disparities and access to healthy food in the United States: A review of food deserts literature](#). *Health y Place* 16 (5), 876-884.
- Wardlow, G.W., Johnson, D.M., Mueller, C.L. y Hilgenberg, C.E. 2002. [Enhancing student interest in the agricultural sciences through aquaponics](#). *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education* 31, 55-58.
- WCPT 2016. [What is Physical Therapy](#). World Confederation for Physical Therapy.
- WFOT 2012. [About Occupational Therapy](#). World Federation of Occupational Therapists.
- WHO 2007. [WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age](#). World Health Organization, Geneva.
- Wrigley, N. 1998. [How British retailers have shaped food choice](#). In Murcott, A. (ed.) *The Nation's Diet: The Social Science of Food Choice*, pp.112-128. Routledge, Abingdon.