

Evaluación de inversiones de los
prestadores del servicio público de
acueducto.

ESTUDIO PILOTO CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA

Informe final
2021

AUTORES

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE - SEI

Director para América Latina SEI
David Purkey

Equipo elaboración del estudio
Tania Santos
Nilo Lima
Hector Angarita

COLABORADORES

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y
SANEAMIENTO BÁSICO

Director Ejecutivo
Experto Comisionado Leonardo Navarro

Equipo de trabajo CRA
Experto Comisionado Diego Felipe Polanía Chacón
Guillermo Ibarra Prado
Juan Andrés Rojano
Ex Experto Comisionado Javier Moreno Méndez

DOI

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8305690>

Octubre de 2021

LISTA DE CUADROS

<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>7</u>
<u>1. ELEMENTOS CONCEPTUALES</u>	<u>9</u>
<u>2. OBJETIVOS</u>	<u>12</u>
<u>3. METODOLOGÍA</u>	<u>13</u>
3.1. INCERTIDUMBRES EXÓGENAS (X)	13
3.1.1. CAMBIO CLIMÁTICO.	13
3.1.2. CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN.	14
3.2. MODELOS O RELACIONES (R)	14
3.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)	16
3.4. MEDIDAS DE DESEMPEÑO M	16
<u>4. CASO DE ESTUDIO 1: CUENCA DEL RIO CHINCHINA (RESUMEN EJECUTIVO)</u>	<u>19</u>
4.1. INCERTIDUMBRES R: CAMBIO CLIMÁTICO Y CRECIMIENTO POBLACIONAL.	20
4.2. MODELOS O RELACIONES R: MODELO WEAP DE LA CUENCA CHINCHINÁ	20
4.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)	21
4.4. MEDICIÓN DE INDICADORES POR ACCIÓN	22
4.4.1. REGULACIÓN HÍDRICA: OFERTA MEDIA Y EN CONDICIONES DE ESTIAJE (Q95)	22
4.4.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS ESTRATEGIAS EN LA COBERTURA Y CONFIABILIDAD EN LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO	24
4.4.3. ANÁLISIS DE COSTO-EFECTIVIDAD	25
<u>6. CASO DE ESTUDIO 2: CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA</u>	<u>27</u>
6.1. X INCERTIDUMBRES EXÓGENAS.	27

Estudio Piloto Cuenca Río Alto Chicamocha- Informe final 2021

6.1.1. CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN	28
6.2. MODELOS O RELACIONES R: MODELO WEAP DE LA CUENCA CHICAMOCHA	28
6.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)	30
6.3.1. LÍNEA BASE O CONDICIÓN ACTUAL (2020)	31
6.3.2. LÍNEA BASE PROYECTADA (2050)	31
6.3.3. INVERSIONES POMCA.	31
6.3.4. REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LA ADUCCIÓN	32
6.3.5. USO EFICIENTE DE AGUA	32
6.3.6. INCREMENTO EN LA CONCESIÓN POR INVERSIÓN AMBIENTAL	32
6.4. INVERSIONES POR CADA ESTRATEGIA	32
6.5. MEDICIÓN DE INDICADORES POR ACCIÓN	34
6.5.1. ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA OFERTA DEL AGUA	34
<u>A. QUEBRADA SURBA</u>	<u>35</u>
<u>B. QUEBRADA BOYACOGUA</u>	<u>35</u>
6.5.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS ESTRATEGIAS EN LA COBERTURA Y CONFIABILIDAD EN LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO DE ACUEDUCTO (ANÁLISIS BRECHA)	36
6.5.3. ANÁLISIS DE COSTO-EFECTIVIDAD	37
6.6. IMPACTO EN EL ESQUEMA TARIFARIO	38
6.6.1. MUNICIPIO DE DUITAMA	38
6.6.2. MUNICIPIO DE PAIPA	47
<u>7. RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DE INVERSIONES AMBIENTALES ADICIONALES</u>	<u>57</u>
<u>8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</u>	<u>58</u>
<u>9. REFERENCIAS</u>	<u>60</u>

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medidas de desempeño (M) para evaluar el comportamiento de cada estrategia, al horizonte de planificación	17
Tabla 2. Acciones de intervención evaluadas	21
Tabla 3. Análisis del indicador de Brecha para diferentes escenarios de acción, respecto a la condición actual proyectada a 2050	25
Tabla 4. Datos de entrada para estimar la demanda agua	28
Tabla 5. Datos de entrada para simular el suministro de agua	28
Tabla 6. Parámetros del SMM calibrados para las cuencas de suministro estudiados	29
Tabla 7. Factor de ajuste para la regionalización de Sw y F a escala de microcuenca	30
Tabla 8. Acciones de intervención evaluadas	31
Tabla 9. Costos unitarios establecidos para cada inversión, de acuerdo con la información regional disponible.	33
Tabla 10. Brecha (l/s) entre oferta y demanda de agua en los sistemas de suministro de agua en Duitama y Paipa, y Delta de la brecha entre la línea base al año 2050 y cada una de las estrategias	37
Tabla 11. Gastos en los incurrió la empresa prestadora en el año anterior	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Comparación de los beneficios de diferentes tipos de inversiones en un sistema de abastecimiento de agua.	11
Figura 2. Metodología del caso de estudio.	13
Figura 3 Ejemplo de los componentes del balance hídrico típicamente representados en WEAP.	15
Figura 4 Ubicación de la cuenca del río Chinchiná. Caso de Estudio 1	19
Figura 5. Caudal medio diario de las cuencas abastecedoras bajo diferentes estrategias	22
Figura 6. Cambio proyectado a 2050 en el caudal medio anual	23
Figura 7. Q95 en cuencas abastecedoras para diferentes escenarios de acción	23
Figura 8. Cambio proyectado a 2050 en el caudal de estiaje.	24
Figura 9. Costo-Efectividad de acciones en (M\$/hm ³) para Delta B95	26
Figura 10 Ubicación Cuenca Hidrográfica del río Chicamocha	27
Figura 11. Curva de duración de caudales diarios modelados y medidos en la estación hidrométrica Las Vegas para el periodo 2004-2014.	30
Figura 12. Cobertura actual cuenca alta río Chicamocha	31
Figura 13. Microcuencas abastecedoras y cambio en la cobertura en el POMCA	32
Figura 14. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en la Quebrada Toibita.	35
Figura 15. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en las quebradas a. Surba y b. Boyacogua.	35
Figura 16. Cambio en el caudal de estiaje (Q95) de las diferentes estrategias respecto al caudal en la condición actual	36
Figura 17. Costo efectividad $C/\Delta B_{95}$ para los prestadores de servicio de a. Duitama y b. Paipa	38

INTRODUCCIÓN

Como parte de la Agenda Regulatoria Indicativa-ARI 2018-2019, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA incluyó el proyecto regulatorio denominado “*Medidas regulatorias asociadas a inversiones ambientales que puedan ser incluidas en las tarifas del servicio público domiciliario de acueducto*”, el cual se trabajó bajo la Metodología de Análisis de Impacto Normativo - AIN. En este marco, el objetivo principal identificado fue disminuir la vulnerabilidad de los sistemas de acueducto, asociada al desabastecimiento.

Lo anterior, con fundamento en las disposiciones del artículo 164 de La Ley 142 de 1994, que permite que se incluyan costos especiales de protección de cuencas y fuentes de abastecimiento en las fórmulas tarifarias del servicio público domiciliario de acueducto, que permitan garantizar la prestación eficiente y continua del servicio.

En este sentido, se consideró necesario la realización de un estudio piloto que brindara mayor conocimiento sobre temas relacionados con la gobernanza del agua y la realización de proyectos ambientales en las cuencas para el mantenimiento o mejora de los servicios ecosistémicos relacionados con la hidrología y los cuerpos de agua. Para dicho estudio, se realizó un Memorando de Entendimiento con el Stockholm Environment Institute – SEI, con el fin de aprovechar sus conocimiento y herramientas de análisis para el manejo y planificación de cuencas, que permiten evaluar alternativas para mejorar la disponibilidad del agua y su regulación.

Del Memorando de Entendimiento se realizó un Convenio de Cooperación para el primer estudio piloto que fue realizado en la cuenca del Río Chinchiná donde se hizo un análisis cuantitativo de los servicios hidrológicos y de la demanda del servicio de acueducto en las áreas de prestación de los prestadores Aguas de Manizales S.A. E.S.P., Empresa de Obras Sanitarias de Caldas S.A. E.S.P. - EMPOCALDAS y AQUAMANÁ E.S.P., identificar áreas y acciones de intervención con el propósito de mantener, mejorar o recuperar los servicios hidrológicos de regulación y rendimiento hídrico.

Asimismo, el estudio realizó un análisis de costo beneficio considerando acciones en infraestructura gris y verde, con el fin de determinar criterios de priorización de las intervenciones asociadas al uso racional y eficiente del recurso y/o acciones de protección de cuencas y fuentes de abastecimiento. Esto, en la medida que el modelo utilizado permite analizar y comparar diferentes estrategias de manejo de los recursos hídricos, considerando sus componentes bióticos, técnicos, económicos y financieros.

Con los resultados obtenidos del primer caso de estudio en la cuenca Chinchiná, se concluye que hay una gran importancia en la realización de proyectos de infraestructura verde en cuencas, logrando mantener las condiciones de una cuenca sana o contribuyendo a la recuperación de las cuencas degradadas. De igual forma, otro aspecto fundamental que se identificó fue la articulación entre entidades para trabajar de manera conjunta en y para la cuenca, logrando unas condiciones adecuadas para mantener la oferta hídrica en los próximos 50 años. Lo anterior, fue un insumo clave para la expedición de la Resolución CRA 907 de 2019.

Otra de las conclusiones del caso de estudio en la cuenca del río Chinchiná, es que se identificó la necesidad de evaluar la metodología con personas prestadoras del servicio de acueducto que presenten problemas en la oferta del recurso hídrico. Para tal fin, se escogieron los municipios de Duitama y Paipa, en el Departamento de Boyacá, los cuales se encuentran localizados en la cuenca alta del río Chicamocha y sufren de escasez de agua para la prestación del servicio, razón por la cual se definió realizar un segundo estudio de caso con los prestadores Empresa de Servicios Públicos de Duitama - EMPODUITAMA S.A. E.S.P. y RED VITAL PAIPA S.A E.S.P. Asimismo, otro objetivo importante fue la aplicación de la metodología tarifaria establecida en la Resolución CRA

907 de 2019. En este estudio se evaluaron los indicadores definidos en la metodología para determinar el cambio en los caudales medio y caudal de estiaje, la brecha entre la oferta y la demanda de cada estrategia y comparada con la línea base proyectada al año 2050, y el costo-beneficio de cada estrategia. Adicionalmente, para cada municipio se aplicó la Resolución CRA 907 de 2019 y se determinó el impacto en la tarifa de incluir inversiones ambientales.

La acción regulatoria de la CRA debe garantizar los criterios definidos en el artículo 87 de la Ley 142 de 1994, entre los cuales se destaca el de eficiencia económica y suficiencia financiera, por lo cual, las decisiones del prestador en cuanto a la inclusión de inversiones y costos de operación y mantenimiento debe ser eficientes y enmarcarse en el cumplimiento de los estándares de prestación que para el caso en concreto se relacionan con la continuidad y confiabilidad del servicio.

Con base en lo antes mencionado, el presente documento describe el resultado del piloto realizado por el Centro SEI de América Latina en Bogotá en la Cuenca alta del río Chicamocha, mediante la aplicación del modelo WEAP *Water Evaluation and Planning*, el cual constituye una contribución a la base de conocimiento para el análisis tarifario de inversiones ambientales del servicio de acueducto y al desarrollo de capacidades en el uso de herramientas de análisis con miras a la adopción efectiva de un marco normativo tarifario de inversiones ambientales entre los prestadores del servicio.

En este informe se presenta inicialmente una propuesta de los elementos conceptuales para cuantificar y comparar los beneficios marginales de diferentes tipologías de inversiones en un sistema de acueducto, incluidas las inversiones en infraestructura verde. Posteriormente se detalla la metodología adoptada para cuantificar y comparar los beneficios. Las estrategias de gestión propuestas en este caso de estudio fueron definidas de forma participativa primero a través de un diálogo con la CRA y posteriormente complementadas en talleres con los actores en la cuenca alta del río Chicamocha como EMPODUTAMA S.A. E.S.P., RED VITAL PAIPA S.A. E.S.P., Corporación Autónoma Regional de Boyacá - CORPOBOYACÁ,

Las métricas para evaluar la efectividad de cada estrategia se definen desde el punto de vista de la prestación del servicio público domiciliario de acueducto para disminución de la vulnerabilidad de los sistemas de acueducto asociada al desabastecimiento. El costo estimado de cada estrategia y su efectividad son evaluados para asegurar finalmente que las inversiones que se defina financiar a través de las tarifas efectivamente aporten en el suministro del agua a los usuarios y no solamente a conservar los ecosistemas en la cuenca que es un objetivo general para la sociedad.

1. ELEMENTOS CONCEPTUALES

Estudios previos en Colombia han aportado información relevante sobre los efectos de las acciones de protección y restauración en áreas de cuencas hidrográficas desde el punto de vista de la oferta hídrica en las fuentes de abastecimiento de sistemas de acueducto (Sáenz et al 2013, Cárdenas et al, 2017) o de los impactos negativos de la transformación de ecosistemas de cuencas proveedoras (Bouyaert et al, 2006). Menor atención, sin embargo, se ha prestado al análisis comparativo de los beneficios desde el punto de vista del marco tarifario, para el cual, es indispensable incorporar consideraciones de demanda y eficiencia económica comparativa de las inversiones respecto a otras alternativas o acciones complementarias disponibles para los prestadores del servicio.

El propósito de este análisis es contribuir a la consideración total del costo de inversión, operación y mantenimiento en acciones de protección de cuencas y fuentes de agua dentro de las fórmulas tarifarias del servicio público de acueducto. Esto conlleva a preguntas, tales como:

- ¿Qué criterios metodológicos podrían utilizar los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto para determinar la pertinencia, tipo y montos de inversión en acciones de protección de cuencas y fuentes de abastecimiento?
- ¿Qué criterios metodológicos podrían utilizar los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto para articularse con los instrumentos de planificación ambiental y demás acciones de protección de cuencas y fuentes de agua de los demás usuarios del recurso y grupos de interés presentes a la cuenca abastecedora del servicio de acueducto?

En este estudio se proponen algunos elementos conceptuales para abordar estas preguntas generales. El objetivo es identificar un marco analítico que permita incorporar y comparar de manera objetiva los beneficios de las inversiones ambientales y algunas inversiones en infraestructura gris desde la perspectiva de los usuarios de un sistema de acueducto.

En la Figura 1 se ilustran los conceptos propuestos para cuantificar y comparar los beneficios de diferentes tipologías de inversiones que podría realizar un prestador del servicio público domiciliario de acueducto para asegurar satisfacer la demanda actual y futura del servicio. Entre otras se consideran inversiones ambientales (II), medidas de uso eficiente y ahorro del agua (III), e inversiones en nueva infraestructura como construcción de bocatomas nuevas para expandir el caudal captado (IV), que se comparan respecto a la condición de referencia (I) correspondiente al escenario de no realizar ninguna inversión dentro del horizonte de planificación del servicio. El diagrama ilustra las diferencias de los efectos de los tipos de inversiones entre: las intervenciones entre acciones de gestión de la demanda¹ (III), y acciones para incrementar la capacidad de suministro del sistema, que incluyen las inversiones ambientales, y las inversiones en nueva infraestructura de captación (II y IV). A su vez, es importante resaltar que el escenario de referencia (I) no corresponde necesariamente a la condición actual de oferta hídrica de las fuentes, pues en el horizonte de planificación puede ocurrir la degradación de las fuentes hídricas por efecto de los

¹ Medidas de gestión de la demanda: Acciones relacionadas con mejorar el consumo del agua. Entre las medidas se consideran: Disminución de pérdidas en la aducción, disminución del consumo por habitante, micromedición y macromedición. Todas las medidas buscan que el indicador se acerque a estándares nacionales i.e. consumo por usuario, pérdidas en la aducción.

conflictos de uso actual en las cuencas, que conducen a procesos activos de erosión o compactación de suelos, etc.

Las inversiones ambientales (II) por su parte, generan beneficios en la capacidad hidrológica del sistema (por ejemplo, incrementando la cantidad de agua que las fuentes hídricas pueden proveer de manera continua o reduciendo la sensibilidad a eventos extremos como inundaciones o sequías). Estos cambios se dan de manera progresiva en horizontes de largo plazo, que pueden ser incluso de varias décadas. Las acciones asociadas a la transición de usos productivos o a la restauración de coberturas vegetales pueden requerir varias décadas para alcanzar una escala suficiente de implementación, sumada al tiempo necesario para alcanzar el establecimiento de la vegetación y la recuperación de la capacidad de regulación hidrológica de los suelos.

En contraste, las inversiones en infraestructura (IV) – que incluyen medidas como la captación de nuevas fuentes, o la implementación de infraestructuras que permitan compensar la variabilidad hidrológica de las fuentes mediante embalses, permiten obtener beneficios en plazos relativamente más cortos, en respuesta a los requerimientos progresivos de la demanda. No obstante, en este caso, es relevante indicar que las inversiones de infraestructura se encuentran sujetas a la potencial pérdida de oferta hídrica asociada a la degradación de las fuentes de agua, y en algunos casos, el beneficio marginal puede ser equivalente a la degradación de la oferta hídrica en el largo plazo. Adicionalmente es importante reconocer que las licencias y permisos ambientales asociados a la construcción de embalses son demandantes en términos temporales y económicos, debido a los potenciales impactos sociales, económicos y ecosistémicos que pueden generar.

Las acciones de gestión de la demanda (III), por el contrario, se refieren a medidas de eficiencia de los distintos componentes del sistema de acueducto y/o el uso del agua por parte de los suscriptores, por ejemplo, a través de programas de reducción de pérdidas técnicos y/o comerciales o de la adopción de paquetes tecnológicos o incentivos tarifarios para promover la disminución de los consumos per-cápita o módulos de consumo en el área de servicio.

Desde el punto de la calidad, confiabilidad y continuidad de prestación del servicio, en el presente estudio adoptamos como indicador para caracterizar y comparar los diferentes tipos de acciones, la brecha proyectada B_p entre la capacidad de provisión de agua del acueducto en condición de caudal promedio y condición crítica (Q95), y la demanda del sistema de acueducto en el periodo proyectado. La brecha proyectada – y su tendencia - permite establecer el nivel de seguridad con que el sistema puede suplir la demanda proyectada en un horizonte de planificación de inversiones (T_p), y a su vez, indicar la vulnerabilidad del sistema de acueducto por desabastecimiento en plazos posteriores al horizonte de planificación.

El cambio en el indicador de brecha, ΔB_p , al horizonte de planificación es independiente del tipo de medida (gestión de demanda u oferta) y permite comparar los beneficios de las inversiones en términos de unidades equivalentes de capacidad o confiabilidad del sistema, y a su vez, permite asimilar los cambios en la oferta hídrica al horizonte de planificación (por ejemplo, por efecto de la degradación de las fuentes asociadas a conflictos de uso).

El indicador ΔB_p , al proporcionar unidades equivalentes de beneficio, permite implementar un Análisis de Costo Efectividad (ACE) para identificar la eficiencia relativa de los diferentes tipos de medidas, que son comparables desde el punto de vista de la confiabilidad y calidad en la prestación del servicio.

La oferta de agua adicional que se identifique comparando el indicador con la oferta total de agua en la cuenca, beneficia a los usuarios aguas abajo de los puntos de captación del sistema. De esta forma se identifica los beneficios de otros usuarios en la misma cuenca debido a las inversiones ambientales.

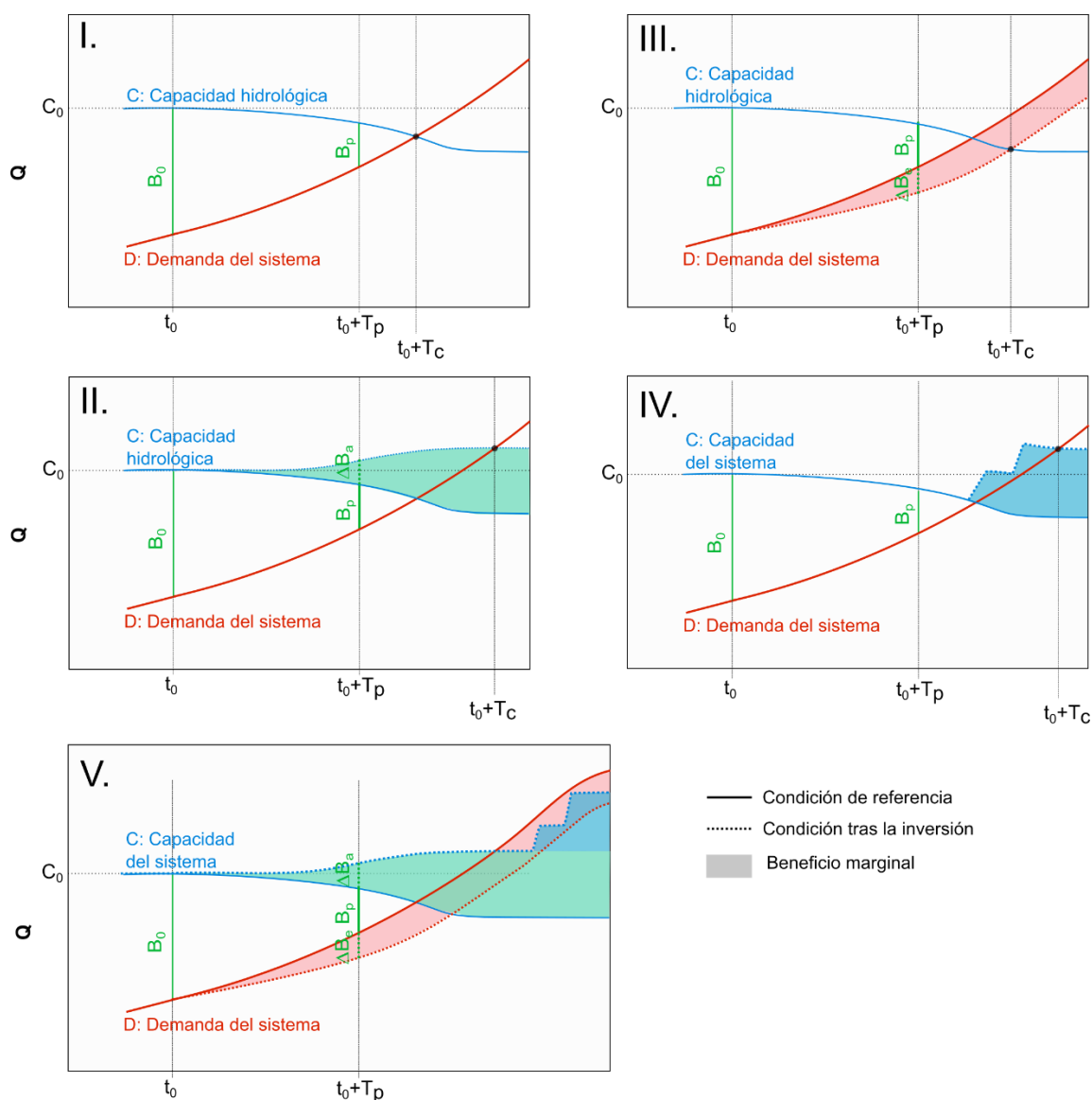


Figura 1 Comparación de los beneficios de diferentes tipos de inversiones en un sistema de abastecimiento de agua. (I). Condición de referencia (no hacer nada), (II) Inversiones de eficiencia (i.e. reducción de pérdidas, reducción de los módulos de consumo), (III) Inversiones ambientales (protección o restauración de fuentes, reconversión productiva), (IV) Inversiones en infraestructura para incrementar la oferta (fuentes complementarias, embalses, etc.) (V). Combinación de acciones

2. OBJETIVOS

Definir y aplicar criterios metodológicos para evaluar alternativas de inversión en proyectos ambientales para mejorar la regulación hídrica en las fuentes de abastecimiento, estrategias de uso eficiente y ahorro del agua, y/o inversiones en infraestructura gris como reservorios, que permitan el mejoramiento en la continuidad y cobertura del servicio público de acueducto.

Evaluar la costo-efectividad de las inversiones ambientales propuestas para generar un indicador que permita la comparación entre alternativas, de tal forma que puedan ser pagadas a través de tarifas de acueductos por parte de los usuarios del servicio.

Evaluar el posible aumento en las tarifas de los acueductos que hacen parte del caso de estudio debido a las inversiones ambientales, siguiendo la Resolución CRA 907 de 2019

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se utilizó la metodología XLRM (Purkey, 2018). Este método de análisis separa las incertidumbres exógenas X, las estrategias de gestión L, las relaciones o modelos R y las medidas de desempeño M. Las incertidumbres exógenas (X) están relacionadas con los factores inciertos pero que afectan el sistema hídrico *i.e.* cambio climático, crecimiento de la población, o degradación de los servicios de regulación hidrológica en las cuencas donde existen áreas con conflictos de uso. Las estrategias de gestión constituyen las alternativas que los tomadores de decisiones consideran afectarán el estado del sistema. Las relaciones o modelos R establecen los estados futuros como consecuencia de estrategias seleccionadas e incertidumbres asociadas. Las medidas de desempeño M son indicadores que permiten verificar el cumplimiento del sistema ante algunos factores que se determinan como claves (Lempert, et al., 2003). En la Figura 2 se presenta un esquema de la metodología utilizada que permite visualizar el proceso llevado a cabo en estos estudios de caso siguiendo la metodología XLRM.

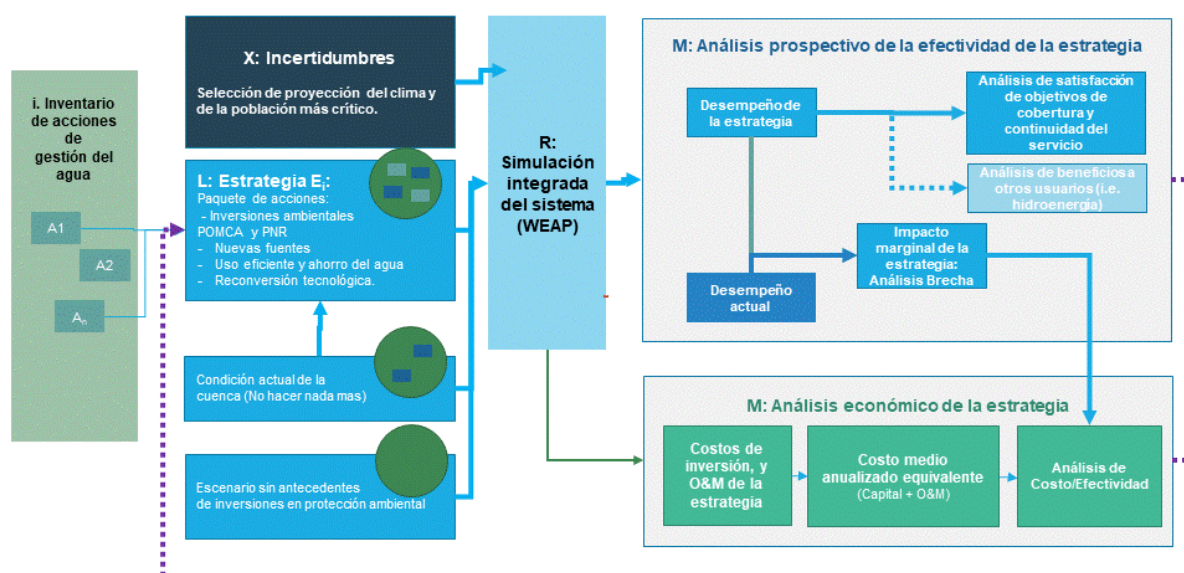


Figura 2. Metodología del caso de estudio.

3.1. INCERTIDUMBRES EXÓGENAS (X)

Las incertidumbres que se analizan en este estudio son cambio climático y crecimiento de la población. Los escenarios más críticos fueron incorporados en el análisis.

3.1.1. Cambio Climático.

La disponibilidad del recurso hídrico depende de las características propias biofísicas entre las que se encuentra el clima. La precipitación y la temperatura presentan patrones de variación con diversas escalas temporales *i.e.*, diario, mensual, anual, decadal y por diversos fenómenos como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El cambio climático puede alterar tanto las condiciones medias de algunas variables relacionadas con el clima como la temperatura y la precipitación, así como los eventos extremos, exacerbando las condiciones que generan eventos amenazantes. Este tipo de variaciones puede producir condiciones más críticas de vulnerabilidad frente al desabastecimiento para las comunidades. Los prestadores del servicio público de acueducto deben considerar la

incertidumbre asociada con futuras condiciones del clima cambiante para mejorar la toma de sus decisiones y asegurar que pueden contar con el recurso.

3.1.2. Crecimiento de la población.

El crecimiento de la población genera impactos en las cuencas abastecedoras, debido a la necesidad de agua para suministrar a los habitantes tanto actuales como futuros. El crecimiento de la población puede calcularse a partir de los datos de los censos poblacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), proyectando la tendencia histórica o a través de métodos desarrollados para este fin como se compila en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico i.e. Aritmético, Geométrico, Wappaus, Gráfico, Exponencial, Detallado por zonas o por densidades (MAVDT, 2003).

Los valores de la población proyectada pueden variar ampliamente y no generan un pronóstico ni una predicción exacta pues el crecimiento de la población depende de la actividad social y económica que es dinámica. Debe considerarse la incertidumbre asociada a estas proyecciones, usando al menos el escenario más crítico que permita estimar la demanda de agua más alta en la cuenca.

3.2. MODELOS O RELACIONES (R)

Determinar la disponibilidad del agua es una tarea compleja, debido a los diversos factores que determinan la dinámica de la oferta natural y los múltiples usuarios que demandan el recurso. Los modelos pueden ayudar a describir cada componente en este sistema, así como sus relaciones intrínsecas.

WEAP21 (www.weap21.org) es una plataforma computacional para la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca (Yates, Sieber, et al., 2005a). Los factores relacionados con el sistema bio-físico, son los que determinan la oferta de agua y su movimiento a través de una cuenca, es decir, el clima, la topografía, cobertura vegetal, la hidrología de aguas superficiales y subterráneas y los suelos. Los factores relacionados con el sistema socioeconómico están asociados principalmente a la demanda de agua y determinan cómo se almacena, asigna y entrega el agua disponible, dentro y/o entre cuencas hidrográficas.

Una de las principales ventajas de WEAP en comparación con modelos puramente “hidrológicos” es la posibilidad de incluir la diversidad de componentes de un sistema de recursos hídricos, tales como estructuras de regulación, desviación y asignación, y a diferentes tipos de usuarios y demandas, por ejemplo domésticos, industriales, agrícolas, hidroenergía, caudales ambientales (Yates, Purkey, et al., 2005). Esto permite modelar y analizar cómo configuraciones específicas de infraestructura, reglas de operación y prioridades de asignación de agua a los diferentes usuarios – sumados a los factores biofísicos como la interacción del clima, el suelo y la vegetación, transforman el régimen hidrológico y los componentes de interés para la adecuada gestión del recurso hídrico. Adicionalmente, permite incluir información detallada de la demanda del agua, tales como variaciones temporales y estrategias de uso eficiente y ahorro de agua. Todo esto, permite una caracterización integrada de la oferta hídrica, las demandas, la calidad del agua y la vulnerabilidad, de un sistema de recursos hídricos (Figura 3).

En WEAP la cuenca es representada como un conjunto de unidades de análisis hidrológico o *catchments*. Los balances hídricos se ejecutan a nivel de cada unidad y posteriormente se integran a través de la red de drenaje. Por lo tanto, es posible establecer los efectos acumulativos de intervenciones ubicadas aguas arriba en cualquier punto de la cuenca.

El modelo WEAP puede tener resolución temporal diaria, semanal, quincenal o mensual, de acuerdo con la información disponible, y espacialmente usa unidades hidrológicas hasta una escala de

microcuenca, de tal forma que la información que el modelo suministra permite soportar decisiones hasta este nivel de desagregación temporal y espacial.

De acuerdo con esta información, WEAP permite el análisis integrado de aspectos tales como:

- Cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo;
- Escenarios alternativos del clima;
- Crecimiento y localización de actividades económicas hidro-dependientes: agua para consumo, irrigación, navegación, hidro-energía, riego;
- Reglas de funcionamiento de embalses y requisitos de caudales ambientales;
- Asignación y/ o ampliación de concesiones de agua en ríos principales o en cierres de microcuencas.
- Evaluación de estrategias de uso eficiente y ahorro del agua.
- Estimación de otros índices complementarios.

En este proyecto se utiliza la herramienta WEAP para realizar una evaluación integral de las diversas soluciones que permiten a un prestador de servicio público de acueducto contar con el recurso para asegurar la calidad y eficiencia del servicio.

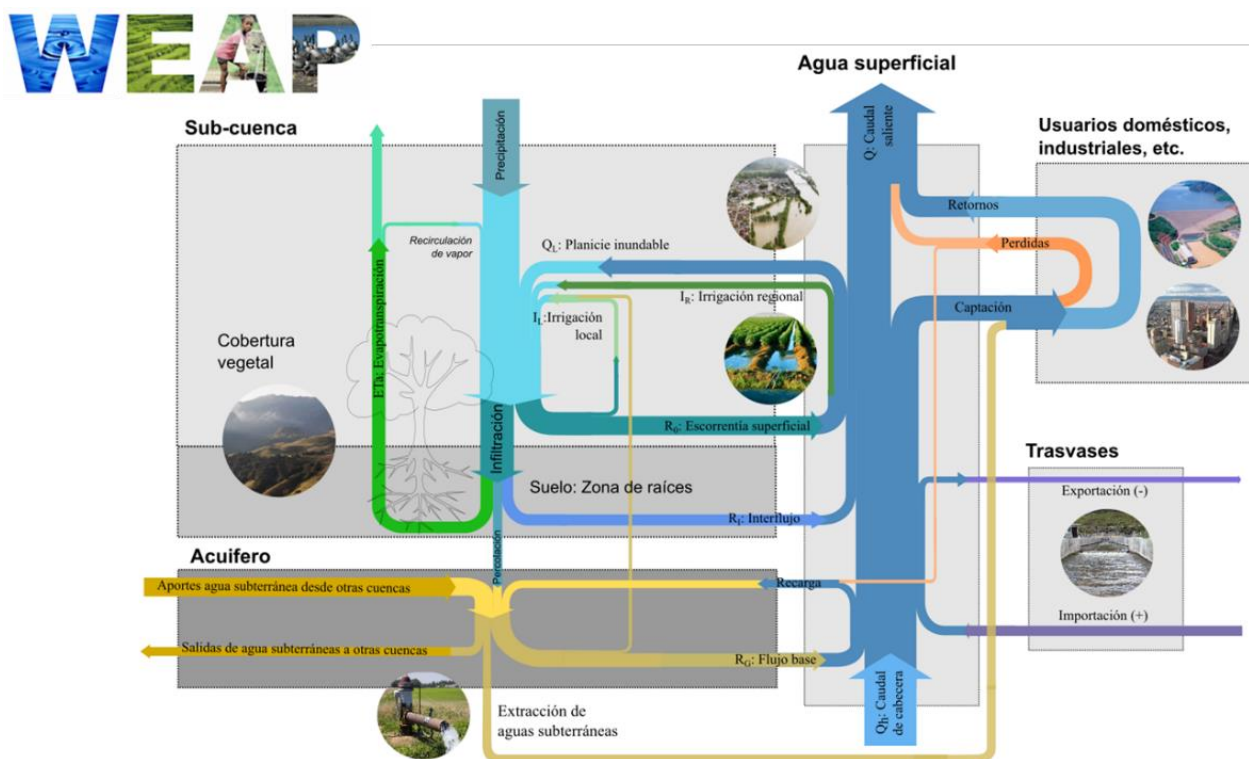


Figura 3 Ejemplo de los componentes del balance hídrico típicamente representados en WEAP. La herramienta permite simular dinámicamente los diferentes componentes bio-físicos y socioeconómicos que determinan el balance en sistemas altamente gestionados

3.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)

Las estrategias de gestión constituyen todas aquellas alternativas que permitan manejar tanto la oferta como la demanda de agua en una cuenca. Para este estudio, las estrategias de gestión son definidas desde la visión de la empresa prestadora de servicio, quien busca contar con disponibilidad del recurso hídrico de buena calidad de tal forma que el servicio pueda prestarse continuamente.

La definición de las estrategias se realiza de forma conjunta con los usuarios en cada una de las cuencas que hacen parte de los estudios piloto. A través de talleres participativos se identificaron las estrategias que en la actualidad se están adelantando por los actores clave en la cuenca como, por ejemplo, Empresa Prestadoras de Servicios (ESP), Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), y/o Fondos de agua, relacionadas con inversiones ambientales. También se identifican las principales barreras respecto a la inclusión de las inversiones ambientales en el sistema tarifario y se identifican estrategias que responden a las inquietudes de los participantes.

En este sentido, en este ejercicio se incluyen estrategias para mejorar la *oferta hídrica y su regulación*, como la conservación y restauración de ecosistemas, estrategias en *infraestructura gris* como construcción de embalses que buscan garantizar la oferta en diversos periodos del año, y estrategias de *gestión de la demanda*, donde a través de disminución de pérdidas de agua en la captación y aducción, así como el uso eficiente y ahorro de agua, pueden lograrse disminuciones importantes en la demanda y mejorar la continuidad del servicio.

Las estrategias incluidas en los casos de estudio responden a las inquietudes presentadas por parte de los prestadores de servicios públicos y algunas entidades, respecto a la normatividad relacionada con la inclusión de inversiones ambientales adicionales en el sistema tarifario. En talleres con ESP e instituciones, los actores presentaron inquietudes respecto a los presupuestos escasos con los que cuentan las ESP y sus prioridades de inversión e.g., operación y mantenimiento de la infraestructura existente, nueva infraestructura gris, implementación de sistemas de medición, disminución de pérdidas, uso eficiente y ahorro del agua. Así mismo, la dificultad de incrementar las tarifas de acueducto debido a la aceptación por parte de los usuarios. La comparación entre estas alternativas de gestión utilizando los indicadores de regulación en la oferta, la brecha en la disponibilidad y la costo-eficiencia, permiten comparar entre alternativas de inversión y priorizar de acuerdo con el impacto requerido para lograr y mantener la continuidad del servicio.

Estas estrategias de gestión se comparan con la línea base o condición actual y con la proyección a 30 años incluyendo el crecimiento de la población y su desarrollo económico en las cuencas sin realizar inversiones ambientales en conservación, restauración o cambios en los sistemas productivos actuales.

3.4. MEDIDAS DE DESEMPEÑO M

Los indicadores de desempeño permiten analizar y comparar el desempeño entre las diferentes acciones con el estado actual de la cuenca y en el evento que no se hubiera desarrollado ninguna acción de conservación de ecosistemas. Para este proyecto se definen tres indicadores para ser calculados en condiciones de caudal medio y para un caudal igualado o excedido el 95% del tiempo (condición seca, Q95): 1. La oferta, 2. Brecha en la cobertura y 3. Eficiencia en las inversiones para garantizar la confiabilidad en el suministro:

1. **Oferta:** La oferta se refiere a la suma del caudal disponible en las fuentes abastecedoras proyectado en un horizonte de 30 años. Este indicador permite establecer el cambio respecto a la oferta de agua en condición media y seca, mostrando los efectos de las inversiones en la regulación hídrica.
2. **Brecha de la cobertura:** La brecha de la cobertura muestra la diferencia entre oferta y la demanda (disponibilidad) para cada estrategia, comparada con el escenario sin realizar acciones. El indicador permite establecer el beneficio de la estrategia en términos de la disponibilidad de agua.

3. **Eficiencia de las inversiones para garantizar la confiabilidad en el suministro:** La eficiencia se refiere a la relación entre el costo de cada estrategia sobre su beneficio en términos de la brecha (diferencia oferta-demanda). Este indicador permite a las ESP comparar entre estrategias y priorizar acciones de acuerdo con su impacto respecto a garantizar la cobertura y la confiabilidad del servicio público.

En la

Tabla 1 se define cada indicador y su método de cálculo.

Los análisis se realizan en el horizonte de planificación, correspondiente a 30 años. Se toma este periodo debido a dos razones fundamentales:

1. De acuerdo con estudios previos, en 30 años puede recuperarse un bosque de niebla en mosaicos en Latinoamérica, consistentes en una mezcla de áreas limpias, bosques secundarios y parches limitados residuales de bosques primarios (**Rey_Benayas, et al., 2005**).
2. Cuando se calcula el valor anualizado de las inversiones, en 30 años se observa que el pago anual no cambia drásticamente al proyectarse con un mayor horizonte de tiempo.

Tabla 1. Medidas de desempeño (M) para evaluar el comportamiento de cada estrategia, al horizonte de planificación

Indicador	Definición	Ecuación del indicador
Oferta media Q_m	Sumatoria del caudal medio diario en las fuentes abastecedoras q_i para cada municipio.	$Q_m = \sum_i^n q_i$
Brecha cobertura ΔB_m	Diferencia entre la capacidad hidrológica media de la acción definido como caudal medio Q_{mi} y la demanda debida a la acción D_i , y la capacidad hidrológica media del escenario sin hacer inversiones (caudal medio) Q_{m0} y la demanda sin inversiones D_0	$\Delta B_m = (Q_{mi} - D_i) - (Q_{m0} - D_0)$
Eficiencia de las inversiones para garantizar la cobertura del sistema $ECob$	Relación entre el costo de la implementación de cada estrategia $C\$$ y la brecha de la cobertura ΔB_m	$ECob = \frac{C\$}{\Delta B_m}$

Indicador	Definición	Ecuación del indicador
Oferta 95% Q_{95}	Sumatoria del caudal igualado o excedido diario multianual en las fuentes abastecedoras q_{i95} para cada municipio.	$Q_{95} = \sum_i^n q_{i95}$
Brecha confiabilidad ΔB_{95}	Diferencia entre el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo de la acción Q_{95i} (caudal de estiaje) y la demanda de la acción D_i menos la diferencia entre el caudal igualado o	$\Delta B_{95} = (Q_{95i} - D_i) - (Q_{95-0} - D_0)$

	excedido el 95% del tiempo del escenario sin hacer inversiones Q_{95-0} y la Demanda sin inversiones D_0	
Eficiencia de las inversiones para garantizar confiabilidad del sistema $EConf$	Relación entre el costo de la implementación de cada estrategia $C\$$ y la brecha de la confiabilidad ΔB_{95}	$EConf = \frac{C\$}{\Delta B_{95}}$

4. CASO DE ESTUDIO 1: CUENCA DEL RIO CHINCHINA (Resumen ejecutivo)

El primer informe realizado en el marco de la colaboración entre la Comisión de Regulación de agua Potable y Saneamiento Básico CRA y el Instituto de Ambiente de Estocolmo SEI, incluyó la aplicación de la metodología propuesta para determinar la importancia, pertinencia y montos de inversiones en acciones de protección de cuencas y fuentes de abastecimiento. En este informe adicionalmente se comparó, a través de los indicadores propuestos en la metodología, las inversiones ambientales en cuencas y fuentes abastecedoras con otras inversiones enfocadas en el uso eficiente del agua, reducción de pérdidas o construcción de nueva infraestructura. En este documento se presenta un resumen ejecutivo de los resultados obtenidos en dicho estudio piloto y las conclusiones que introdujeron la necesidad de incluir el segundo estudio de caso en una cuenca con mayores intervenciones

La cuenca del río Chinchiná se encuentra localizada en el departamento de Caldas en Colombia (Ver Figura 4). De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2018), en la cuenca del río Chinchiná el Índice de Uso de Agua² para año medio es moderado y para año seco muy alto. El índice de vulnerabilidad hídrica³ para año medio es medio y para año seco es alto.

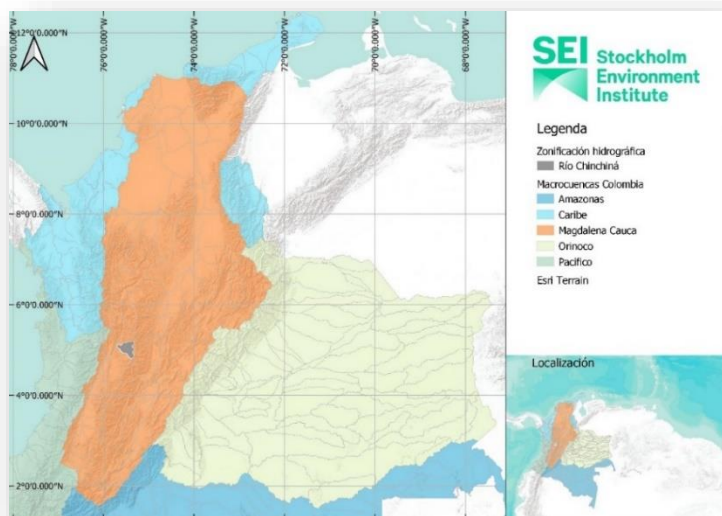


Figura 4 Ubicación de la cuenca del río Chinchiná. Caso de Estudio 1

2 El Índice del Uso del Agua (IUA), corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y por unidad espacial de subzona hidrográfica y cuencas abastecedoras de acueductos en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales (<http://www.ideam.gov.co/web/agua/iua>).

3 El Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH), permite identificar el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas —como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño)— podría generar riesgos de desabastecimiento (<http://www.ideam.gov.co/web/agua/ivh>).

En esta cuenca, se han realizado inversiones ambientales desde hace más de 50 años, de acuerdo con la información suministrada por diversos actores, entre los que se encuentra el Fondo del Agua VivoCuenca, que articula y coordina las acciones relacionadas con protección ambiental en la cuenca del río Chinchiná (<https://vivocuenca.org/>).

4.1. INCERTIDUMBRES R: CAMBIO CLIMÁTICO Y CRECIMIENTO POBLACIONAL.

Siguiendo la metodología XLRM, se definieron incertidumbres exógenas como son el cambio climático y el crecimiento de la población, que generan cambios en las proyecciones de la oferta hídrica y la demanda del agua. Como resultado de los efectos del cambio climático, se obtuvo que existe una probabilidad de aumento de los caudales hasta un 22% en los periodos secos y en el caudal medio de 20%, siguiendo métodos de reducción de escala de Modelos Climáticos Globales GMC, con método estadístico no paramétrico (Yates et al., 2003). Los resultados de la Tercera Comunicación Nacional para el año 2011-2040 muestran la misma tendencia y se observa un aumento en la precipitación media entre 11 a 40%, mostrando condiciones futuras menos críticas respecto a la oferta del agua que analizando el clima histórico. Para simular el clima histórico las series temporales medidas a través de los último 30 años se usan sin alteraciones como proyecciones del clima futuro.

El crecimiento de la población genera aumento en la demanda del agua y de acuerdo con la oferta, posibles conflictos en el uso del recurso hídrico. Para este estudio se proyectó la tendencia histórica de crecimiento de la población utilizando diferentes metodologías como las incluidas en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (MAVDT, 2003). Para los municipios en la cuenca se calcularon TAC. Para esta incertidumbre se plantearon dos suposiciones, la primera considera la tasa de crecimiento anual histórica y la segunda la tasa de crecimiento proyectada por el DANE (DANE, 2005) usando una proyección geométrica.

Cabecera Municipal	TAC Alto (Histórico)	TAC bajo (proyecciones futuras)
Manizales	0.83%	0.32%
Villamaría	2.12%	1.75%

4.2. MODELOS O RELACIONES R: MODELO WEAP DE LA CUENCA CHINCHINÁ

El modelo utilizado en este análisis fue implementado previamente en el proyecto PARA–Agua entre los años 2014 y 2015 utilizando un modelo de gestión en WEAP⁴ para la cuenca del río Chinchiná, el cual fue desarrollado por SEI. El modelo contiene módulos de hidrología, glaciares, demanda para consumo humano y doméstico, y demanda de agua para la generación hidroeléctrica. El modelo comprende un periodo histórico 1981-2010 a paso de tiempo mensual. El modelo fue actualizado respecto a las demandas de acuerdo con información proporcionada por DANE, Aguas de Manizales S.A. E.S.P., Empresa de Obras Sanitarias de Caldas S.A. E.S.P. - EMPOCALDAS y AQUAMANÁ E.S.P y el POMCA.

- Cantidad de población en las cabeceras municipales (DANE)
- Uso promedio per cápita (Aguas de Manizales, Empocaldas, Aquamaná y POMCA)

⁴ <https://www.weap21.org/>

- Puntos de captación y microcuencas abastecedoras (POMCA)
- Concesiones de agua para acueductos (CORPOCALDAS, Aguas de Manizales, EMPOCALDAS, Aquamaná)
- Pérdidas en la aducción (Aguas de Manizales, EMPOCALDAS, Aquamaná y POMCA)

Respecto a la demanda para generación hidroeléctrica:

- Concesiones de agua y puntos de captación (POMCA y CORPOCALDAS)
- Características de las centrales hidroeléctricas (CHEC y POMCA)

Para este estudio en específico se utilizó el modelo desarrollado por el proyecto PARA-Agua, sin embargo, se realizaron los siguientes ajustes:

- Conversión del modelo mensual a escala de tiempo diaria.
- Revisión de los parámetros hidrológicos para cada tipo de cobertura y uso de suelo.
- Recalibración del modelo hidrológico.
- Revisión y actualización de datos de demanda de agua.

4.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)

Las estrategias de gestión muestran posibles escenarios de acuerdo con las decisiones tomadas en la cuenca. El primer escenario es la línea base, donde el estado actual y proyectado de la cuenca se analiza, sin realizar más intervenciones ambientales en la cuenca, incluyendo su degradación debido a las actividades económicas. El siguiente escenario considera hipotéticamente que pasaría en la cuenca si no se hubiera intervenido realizando medidas de protección de ecosistemas (Sin Inversiones Previas) y proyectando la degradación de la cuenca. Posteriormente se analizan posibles estrategias de manejo de acuerdo con escenarios planteados en las reuniones realizadas con los prestadores de servicio y otras entidades, tales como conservación y restauración de ecosistemas, reconversión en prácticas agrícolas, nuevas fuentes de abastecimiento, reducción de pérdidas en la aducción del sistema y mejoramiento en el uso del agua. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las estrategias de gestión o acciones de intervención. Información detallada de las acciones evaluadas se presenta en el informe previo de esta colaboración

Tabla 2. Acciones de intervención evaluadas

	N°	Estrategias de Gestión o Acciones
Escenario base	1	Línea Base o Condición Actual
	2	Sin Inversiones Previas
Inversiones ambientales	3	Inversiones de VivoCuenca
	4	Inversión de Plan de Restauración Nacional
	5	Reconversión de Prácticas Agrícolas
Gestión de la demanda	6	Reducción de Pérdidas en Aducción
	7	Uso eficiente del Agua, reducción de la dotación
	8	Incorporación de Nueva Infraestructura

4.4. MEDICIÓN DE INDICADORES POR ACCIÓN

4.4.1. Regulación hídrica: Oferta media y en condiciones de estiaje (Q95)

Los indicadores fueron estimados desde el modelo WEAP de la cuenca Chinchiná para un horizonte prospectivo de 30 años. En este documento se presentan únicamente los resultados de clima histórico proyectado a futuro por ser el más crítico de los simulados (Figura 5). Los escenarios de cambio climático en esta cuenca estiman un aumento en la precipitación, escenario que sería menos crítico que el histórico.

En la Figura 5 puede observarse los caudales obtenidos de las simulaciones para cada uno de los escenarios incluidos en este análisis. Se puede ver que las acciones relacionadas con la protección o restauración de ecosistemas tienen menos picos *i.e.* caudal mínimo y máximo con menor intensidad, que las acciones como “Sin inversiones previas”. Las inversiones ambientales permiten mejorar la regulación hídrica del sistema, almacenando agua en el suelo y vegetación. Como consecuencia la oferta hídrica en la cuenca aumenta cuando se realizan inversiones en infraestructura verde.

Las acciones que están relacionadas con inversiones ambientales como VivoCuenca y el Plan de Restauración Nacional (PRN) contribuyen a mejorar las condiciones ambientales de la cuenca, lo cual incide en las condiciones hidrológicas. En la Figura 6 se puede observar que, por ejemplo, para la condición “Sin Inversiones Previas” existe un incremento del caudal en la estación más lluviosa en comparación con la “Línea Base”, y una reducción en la estación menos lluviosa. Caso contrario ocurre en el escenario donde se considera las acciones como VivoCuenca y PRN, donde existe una reducción de caudales en estación más lluviosa e incremento en la menos lluviosa.

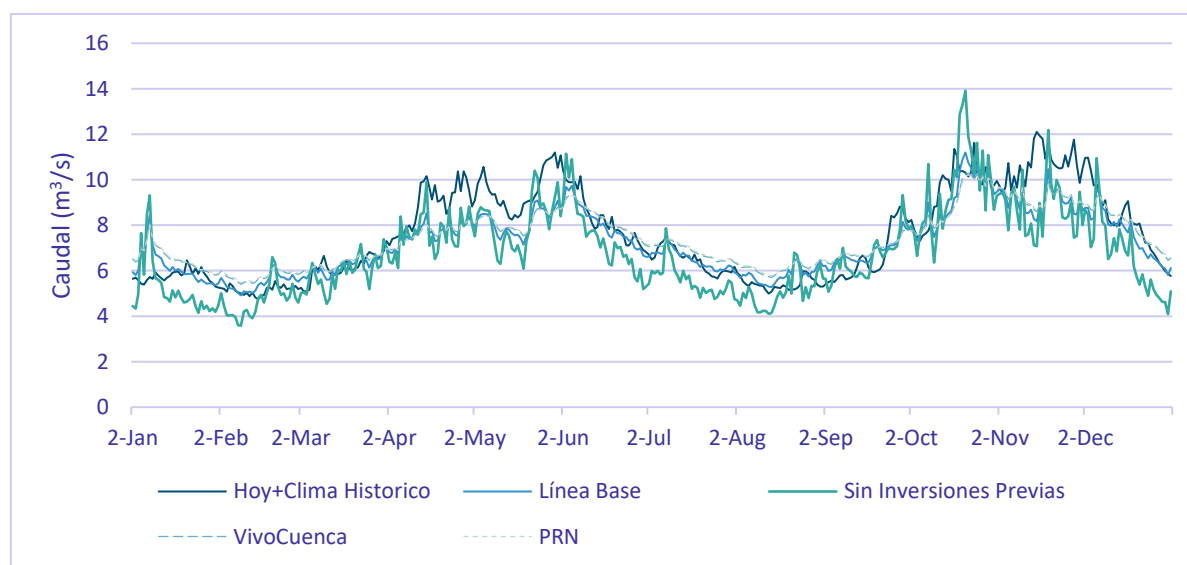


Figura 5. Caudal medio diario de las cuencas abastecedoras bajo diferentes estrategias

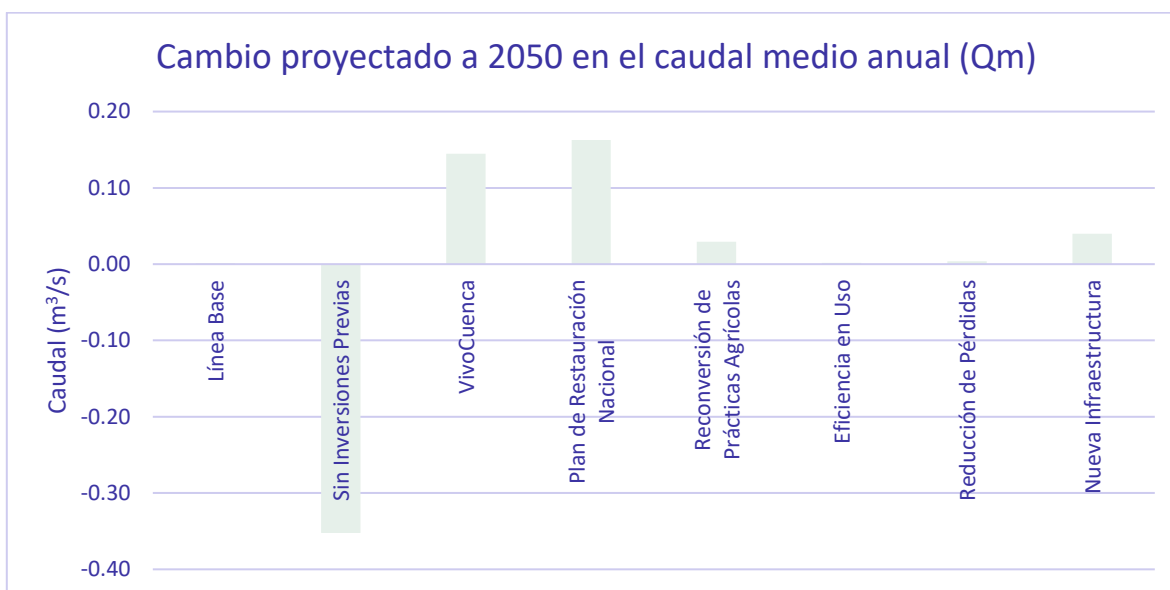


Figura 6. Cambio proyectado a 2050 en el caudal medio anual

Otro indicador importante para analizar es el Q95 debido a que muestra el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo, es decir, el caudal esperado en condiciones críticas de estiaje. En la Figura 7 se muestra para cada acción el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo en condiciones de clima histórico. Los resultados indican que con las inversiones ambientales se podría incrementar hasta en 0.45 m³/s respecto a la Línea Base. Sin inversiones ambientales previas el Q95 se podría haber reducido hasta en 1.97 m³/s en comparación a la condición actual.



Figura 7. Q95 en cuencas abastecedoras para diferentes escenarios de acción

Puede observarse en la Figura 8 que, si no se hubieran realizado las acciones de conservación de vegetación “Sin Inversiones Previas” en la cuenca, el caudal en épocas de estiaje disponible se disminuiría en 1.13 m³/s. Gracias a estas inversiones anteriores, se cuenta con el caudal actual disponible para suministrar el servicio de acueducto a los municipios ubicados en esta cuenca. Si se realizan mayores inversiones en restauración y/o conservación de ecosistemas se aumentará la oferta hídrica en estiaje hasta 0.45 m³/s. Las inversiones en infraestructura gris no presentarán un aumento en el caudal de estiaje disponible

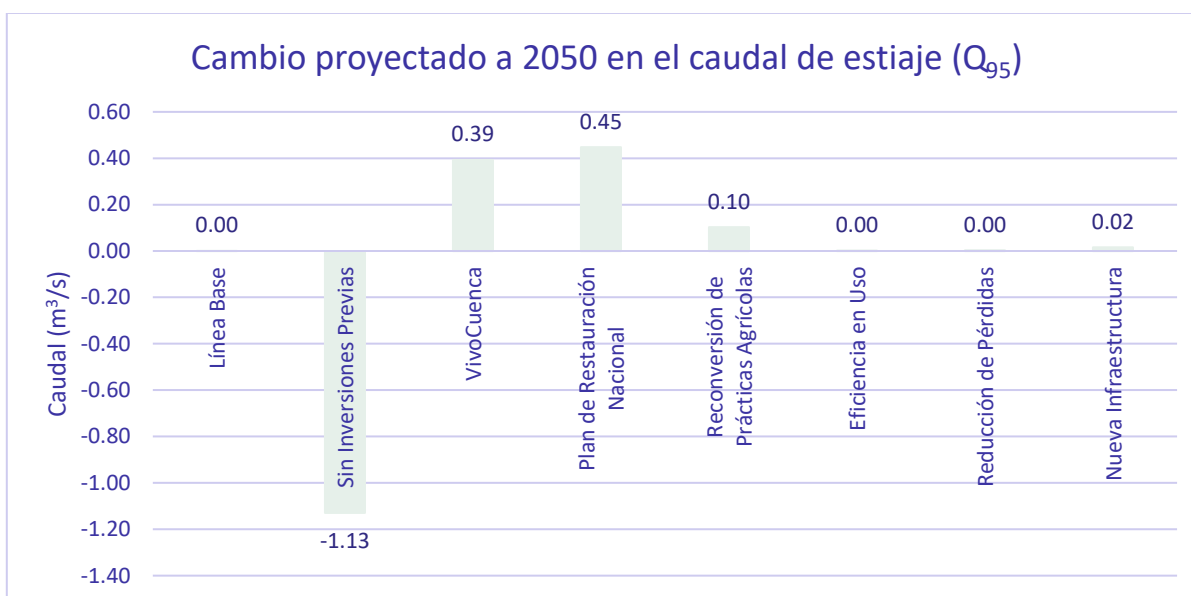


Figura 8. Cambio proyectado a 2050 en el caudal de estiaje.

4.4.2. Análisis del efecto de las estrategias en la cobertura y confiabilidad en la prestación del servicio

Este indicador considera la diferencia entre la capacidad del sistema y la demanda de agua. La oferta está dada en el caso de cobertura por el caudal medio Q_m de las fuentes abastecedoras y para determinar la confiabilidad por el caudal igualado o excedido el 95% del tiempo Q₉₅, correspondiente a condiciones secas. La demanda proyectada hasta el año 2050 para las acciones que no intervienen la gestión de la demanda de agua es 1.41 m³/s, en el caso de Uso Eficiente es 1.27 m³/s y para Reducción de Pérdidas 1.04 m³/s.

El delta de la brecha - ΔB_p, calculado como la diferencia entre la brecha para cada estrategia menos la brecha de referencia (escenario de condición actual proyectado a 2050) se presenta en la Tabla 3

Respecto a la confiabilidad del sistema Q₉₅ (B₉₅), para la mayoría de las acciones existe un incremento en la brecha excepto en la estrategia *Sin Inversiones Previas*. Dicho incremento es favorable ya que se incrementa la diferencia entre oferta y demanda, el cual fluctúa entre 0.02 y 0.45 m³/s donde los valores más altos corresponden a las acciones que contemplan inversiones ambientales (VivoCuenca y Plan de Restauración Nacional) y reducción de pérdidas en la aducción. En caso de la delta de la brecha estimada para determinar la cobertura del sistema Q_m (B_m), los resultados indican también un incremento a excepción de la estrategia “Sin Inversiones Previas”, y la acción que tiene el valor más alto es la correspondiente a la estrategia de “Reducción de Pérdidas”.

Tabla 3. Análisis del indicador de Brecha para diferentes escenarios de acción, respecto a la condición actual proyectada a 2050

Acción			B ₉₅	B _m	ΔB ₉₅	ΔB _m
A	Escenario Base	1. Referencia (Condición actual)	1.69	6.06		
		2. Sin Inv ambientales previas	0.56	5.71	-1.13	-0.35
	Inversiones Ambientales	3. VivoCuenca	2.08	6.21	0.39	0.14
		4. Plan de Restauración Nacional	2.14	6.22	0.45	0.16
		5. Reconversión Prácticas Agrícolas	1.79	6.09	0.10	0.03
B	Gestión de la demanda	6. Eficiencia en Uso	1.83	6.20	0.14	0.14
		7. Reducción de Pérdidas aducción	2.07	6.44	0.38	0.37
		8. Incorporación de nuevas fuentes	1.71	6.10	0.02	0.04

En la Tabla 3 las estrategias agrupadas con la letra A: 3, 4,5 se refieren a acciones de conservación y preservación en el área donde se localizan las captaciones. Las estrategias agrupadas con la letra B: 6, 7, 8 están relacionadas con uso racional y eficiente del agua o gestión de la demanda o redundancia, es decir invertir en otra captación a una fuente adicional de agua.

De acuerdo con los resultados de la brecha obtenida en la condición de referencia (1.69) comparada con la brecha sin inversiones ambientales previas (0.56), es posible concluir que las inversiones ambientales realizadas en años anteriores por las entidades prestadoras del servicio de acueducto han permitido garantizar la disponibilidad de agua y disminuir la vulnerabilidad de sistema. El delta de la brecha para la condición de estiaje ΔB₉₅ y el delta de la brecha para caudal son los que presentan mayor diferencia, lo que implica que generan mayor beneficio.

La realización de estas inversiones ambientales ha apoyado en cumplir con los estándares de prestación del servicio *i.e.*; cobertura, confiabilidad y eficiencia, y disminuir la vulnerabilidad del sistema.

25

4.4.3. Análisis de costo-efectividad

Los resultados del Análisis Costo-Efectividad ACE se muestra en la Figura 9, los cuales para el Delta B95 indican que las acciones de Eficiencia en uso⁵ y Reducción Pérdidas en aducción tienen los valores menores comparado con otras acciones, es decir producen beneficios comparables a un menor costo. La acción con el valor más alto es Reconversión de Prácticas Agrícolas (1462.04 M\$/hm³).

En general para el caso de Delta B95, las acciones de gestión de demanda (Eficiencia en Uso y Reducción de Pérdidas) resultan ser más favorables desde el punto de vista Costo-Efectividad. Las inversiones ambientales como VivoCuenca y Plan de Restauración Nacional tienen un indicador de Costo-Efectividad casi similar a Nueva Infraestructura.

La diferencia ΔC-E entre la costo- eficiencia de las inversiones para mejorar el servicio como es el uso eficiente del agua o la reducción de pérdidas, con los costos asociados a las obras de infraestructura verde como son las acciones de restauración propuestas por Vivocuenca o el Plan

⁵ La Eficiencia en uso se refiere a la disminución de consumo por parte de suscriptores residenciales.

Nacional de Restauración, deberían ser cubiertas de forma concurrente con los otros usuarios del agua quienes se beneficiarían por las inversiones realizadas. Para el caso de Chinchiná la CHEC ha hecho parte de estas inversiones y recibe los beneficios contando con agua suficiente para sus actividades.

En el caso contrario, cuando las inversiones ambientales tienen mayor costo – efectividad, se justifica su pago a través del esquema tarifario, pues los suscriptores se van a beneficiar directamente de las inversiones.

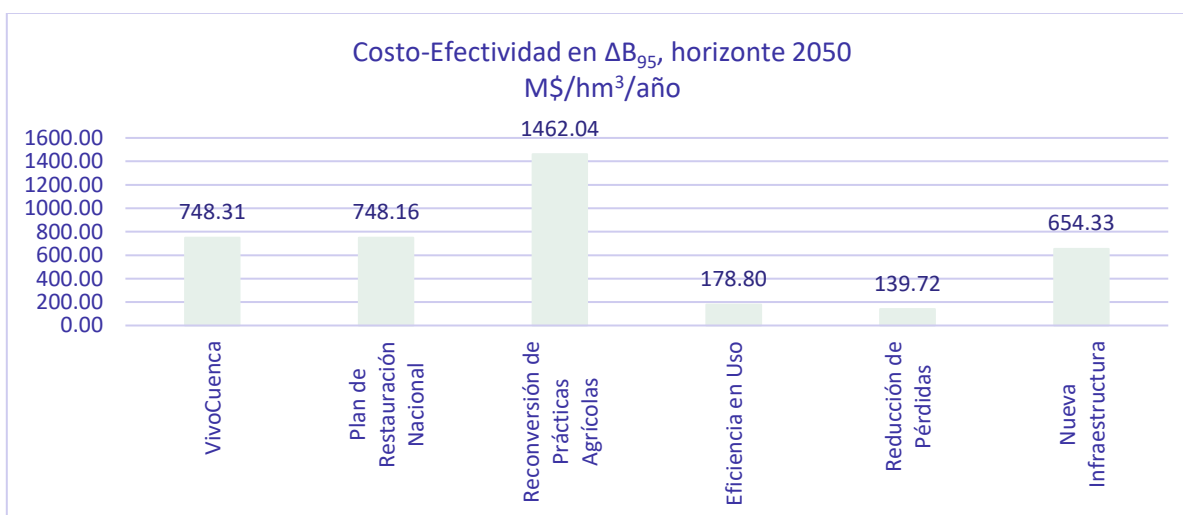


Figura 9. Costo-Efectividad de acciones en (M\$/hm³) para Delta B95

5. LECCIONES APRENDIDAS CASO DE ESTUDIO CUENCA CHINCHINÁ

A partir de este proyecto piloto se obtuvieron varias conclusiones que se mencionan a continuación:

- Realizar inversiones ambientales en las cuencas hídricas permite mantener las condiciones hidrológicas y los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, logrando sostener la oferta. Lo anterior propende por la seguridad hídrica de la cuenca y su demanda poblacional y económica.
- La gobernanza del agua es fundamental para preservar y recuperar las cuencas. Todos los actores que se favorecen de la oferta hídrica para satisfacer la demanda tienen responsabilidades en la cuenca y deben actuar para que la misma sufra la menor degradación posible.
- Las inversiones ambientales siempre deben estar articuladas con los documentos de gestión y planeación de las cuencas hídricas elaborados por las Autoridades Ambientales o por instituciones de mayor nivel jerárquico como el IDEAM o el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. También es importante que las inversiones ambientales que vayan a realizar los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto sean informadas a las Autoridades Ambientales y registradas en el REEA y/o el RUNAP para evitar duplicidad de inversiones en la misma área de una cuenca.

- La metodología propuesta para la definición de inversiones ambientales y comparación entre alternativas permite determinar cuál es la mejor opción de acuerdo con los indicadores definidos y las simulaciones realizadas utilizando herramientas SIG y de modelación hidrológica. Estos indicadores son el cambio en la oferta del agua, la brecha (oferta - demanda) y el análisis costo/beneficio del proyecto. Estas inversiones ambientales generan otros beneficios relacionados con la calidad de agua, el aumento en la oferta para los usuarios concurrentes de la fuente o en la red hídrica, y los relacionados con los beneficios sociales que podrían generarse por el pago por servicios ambientales.

Las conclusiones mencionadas fueron temas claves en la elaboración de la Resolución CRA 907 de 2019, donde se definieron las fórmulas tarifarias para incorporar inversiones ambientales adicionales a los marcos tarifarios de grandes prestadores (Resolución CRA 688 de 2014) y de pequeños prestadores (Resolución CRA 825 de 2017), así como los criterios técnicos y regulatorios que deben tener presentes los prestadores para la realización de dichas inversiones.

6. CASO DE ESTUDIO 2: CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua ENA 2018 (IDEAM, 2018), en la cuenca del río Chicamocha el Índice de Uso de Agua para año medio es alto y para año seco Crítico. El índice de vulnerabilidad hídrica para año medio es alto y para año seco es muy alto. La ubicación de la cuenca del río Chicamocha se observa en la Figura 10

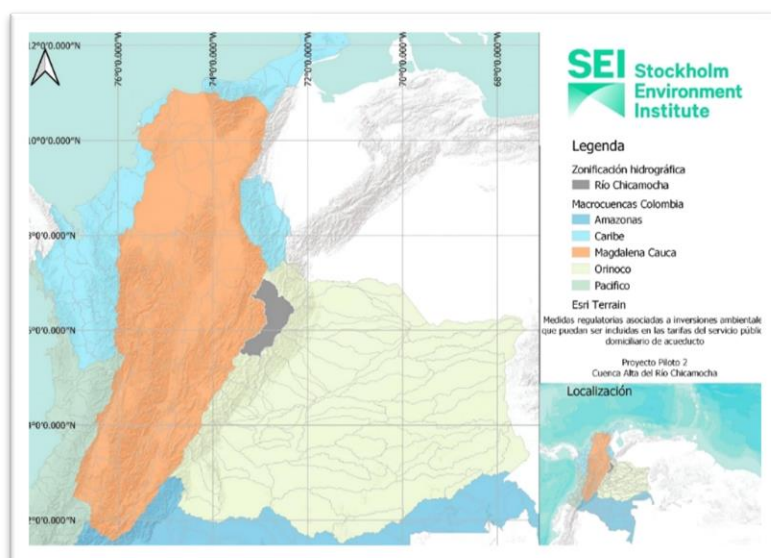


Figura 10 Ubicación Cuenca Hidrográfica del río Chicamocha

6.1. X INCERTIDUMBRES EXÓGENAS.

Las incertidumbres que se analizan en este proyecto son cambio climático y crecimiento de la población. Para este proyecto piloto solo se incluyen los escenarios más críticos.

6.1.1. Crecimiento de la población

La demanda de agua fue modelada en WEAP a paso de tiempo diario para la cabecera municipal de Duitama y Paipa. En Duitama, el suministro de agua está a cargo de *EMPODUITAMA SA E.S.P.* y en *Paipa por Red Vital Paipa SA E.S.P.* Los datos de entrada para modelar la demanda se muestran en la Tabla 4. En la Tabla 5 se muestran los datos usados para la simulación del suministro de agua.

Tabla 4. Datos de entrada para estimar la demanda agua

Variable	Duitama	Paipa
Población (2015)	102,519	18,950
Población flotante (2015)	27,496	13,000
Tasa de crecimiento (%)	0.45	1.64
Dotación per cápita (l/(hab*día))	120	120
Pérdidas en distribución (%)	37.5	40

Tabla 5. Datos de entrada para simular el suministro de agua

Sitio de demanda	Fuente	Concesión (l/s)	Perdidas (%)
Duitama	Quebrada Surba	335.48	6.3
	Quebrada Boyacogua	24.82	7.8
	Aguas subterráneas	81.5	9.2
	Río Chicamocha	71	8
Paipa	Quebrada Toibita	43	11
	Río Chicamocha	23.9	11

6.2. MODELOS O RELACIONES R: MODELO WEAP DE LA CUENCA CHICAMOCHA

El balance hídrico de las cuencas de suministro de agua fue modelada con “Soil Moisture Model-SMM” de WEAP (Yates, Sieber, et al., 2005b). El SMM es un modelo semidistribuido y está conceptualizado en dos baldes, uno que representa la capa de suelo y el otro la zona profunda. Los componentes considerados en el balance son típicos de la hidrología como la precipitación, evapotranspiración, la percolación, flujo superficial, interflujo, y flujo base. Para el área en estudio el horizonte de tiempo considerado es 1980-2015 y una resolución temporal diaria.

Los datos climáticos usados son precipitación, temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar; la evapotranspiración de referencia es utilizada con el método de Penman-Monteith, utilizando las cuatro últimas variables mencionadas previamente (Maidment, 1993). Los datos fueron recopilados de la base de datos del IDEAM. La precipitación se interpoló usando el método “Minimum Curvature” en el software Surfer®. Como resultado de la interpolación se generó un producto grillado en formato NetCDF a paso de tiempo diario y para el horizonte histórico 1980-2015. Similar procedimiento se hizo para la temperatura media, pero la interpolación consideró la altitud informada por un Modelo Digital de Elevación (DEM), esto a fin de capturar el gradiente térmico

predominante en la región. Para el resto de las variables (humedad relativa, velocidad de viento y brillo solar) se adoptó la estación más próxima a las cuencas de suministro, debido a la limitada disponibilidad de datos tanto espacial como temporal.

Para la calibración del SMM se usaron los registros de caudales medidos de fuente IDEAM. Los parámetros del SMM fueron calibrados manualmente con valores iniciales definidos de acuerdo con las características de tipo de cobertura vegetal. Los valores calibrados para la cuenca Alto Chicamocha se muestran en la Tabla 6. Los parámetros S_w y F fueron ajustados con la pendiente media de cada microcuenca (Tabla 7), esto para mejorar la regionalización de dichos parámetros que además de la cobertura vegetal está influenciada por la topografía.

Tabla 6. Parámetros del SMM calibrados para las cuencas de suministro estudiados

Parámetro	Unidad	Valor
Capacidad de almacenamiento del suelo (S_w)	mm	Bosque: 195 Bosques artificiales: 195 Cultivos: 169 Herbácea Arbustiva: 130 Pastos: 104 Tejido urbano: 39 Tierra desnuda: 65
Capacidad almacenamiento zona profunda (D_w)	mm	350
Factor a la resistencia a la escorrentía (RRF)	-	Bosque: 10 Bosques artificiales: 9 Cultivos: 6 Herbácea Arbustiva: 8 Pastos: 5 Tejido urbano: 5 Tierra desnuda: 1
Conductividad en la zona de raíces (K_s)	mm/día	Bosque: 4.5 Bosques artificiales: 4.5 Cultivos: 3 Herbácea Arbustiva: 4 Pastos: 2 Tejido urbano: 1 Tierra desnuda: 1.5
Conductividad profunda (K_d)	mm/día	1
Dirección preferencial del flujo (F)	-	Bosque: 0.5 Bosques artificiales: 0.5 Cultivos: 0.65 Herbácea Arbustiva: 0.55 Pastos: 0.6 Tejido urbano: 0.8 Tierra desnuda: 0.79

Tabla 7. Factor de ajuste para la regionalización de Sw y F a escala de microcuenca

Clase de pendiente	Factor ajuste Sw	Factor ajuste F
Plana ($\leq 5\%$)	1.5	0.6
Inclinada (5-10%)	1.1	0.9
Muy inclinada (10-15%)	1	1
Fuertemente inclinada (15-30%)	0.65	1.25
Escarpada ($>30\%$)	0.5	1.3

Los resultados de la calibración se muestran en la Figura 11. El SMM representa adecuadamente los caudales diarios mínimos, medios y máximos. El sesgo porcentual indica que el SMM subestima los caudales en 3%, siendo una magnitud relativa aceptable. Mientras que otras medidas de bondad de ajuste como el índice de eficiencia de Nash&Sutcliffe y R^2 no son del todo satisfactorios (0.33 y 0.5 respectivamente). En el caso de Nash&Sutcliffe es un indicador muy sensible a caudales extremos, los cuales no han sido capturados por el SMM. Dado que este estudio se enfoca en los caudales mínimos y medios, se adoptan los resultados obtenidos.

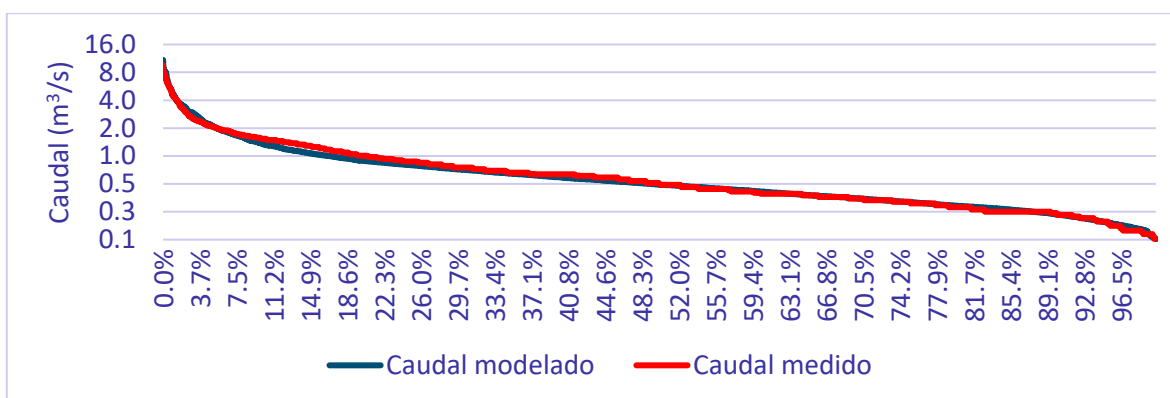


Figura 11. Curva de duración de caudales diarios modelados y medidos en la estación hidrométrica Las Vegas para el periodo 2004-2014.

6.3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN (L)

Las estrategias de gestión definidas en esta evaluación responden a las opciones de decisiones disponibles de acuerdo con las características actuales de las cuencas abastecedoras, la demanda del agua y el estado del sistema.

Respecto a las inversiones ambientales, en el POMCA se ha establecido un área importante para la restauración de las cuencas abastecedoras, buscando reemplazar las coberturas actuales de pastos y cultivos permanentes y transitorios, por bosques.

La estrategia 1 que es la “Línea base o condición actual” fue evaluada con la población proyectada al 2020 y con la climatología del periodo 1980-2015. El resto de las estrategias fueron evaluadas con la población proyectada hasta el año 2050 y con la climatología del periodo 1980-2015. (Tabla 8)

Tabla 8. Acciones de intervención evaluadas

	N°	Estrategias de Gestión o Acciones
Escenario base	1	Línea Base o Condición Actual (2020)
	2	Línea Base proyectada (2050)
Inversiones ambientales	3	Inversiones POMCA
Gestión de la demanda	4	Reducción de Pérdidas en Aducción
	5	Uso eficiente del Agua, reducción de la dotación
	6	Incorporación de Nueva Infraestructura

6.3.1. Línea Base o Condición Actual (2020)

Son las actuales condiciones manejo de los sistemas de suministro de agua y actual cobertura vegetal de las microcuencas. En la Figura 12 puede observarse un mapa con las coberturas actuales incluidas en WEAP.

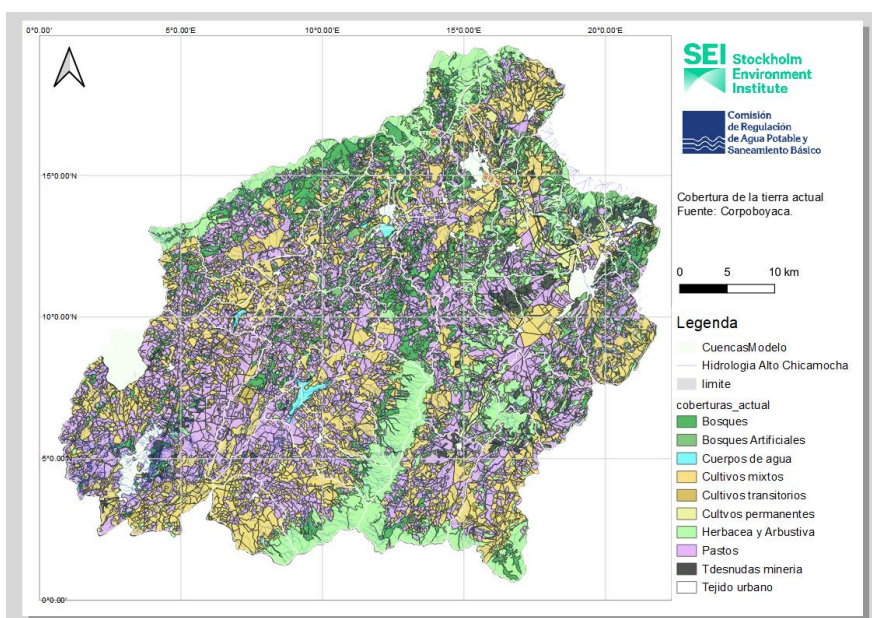


Figura 12. Cobertura actual cuenca alta río Chicamocha

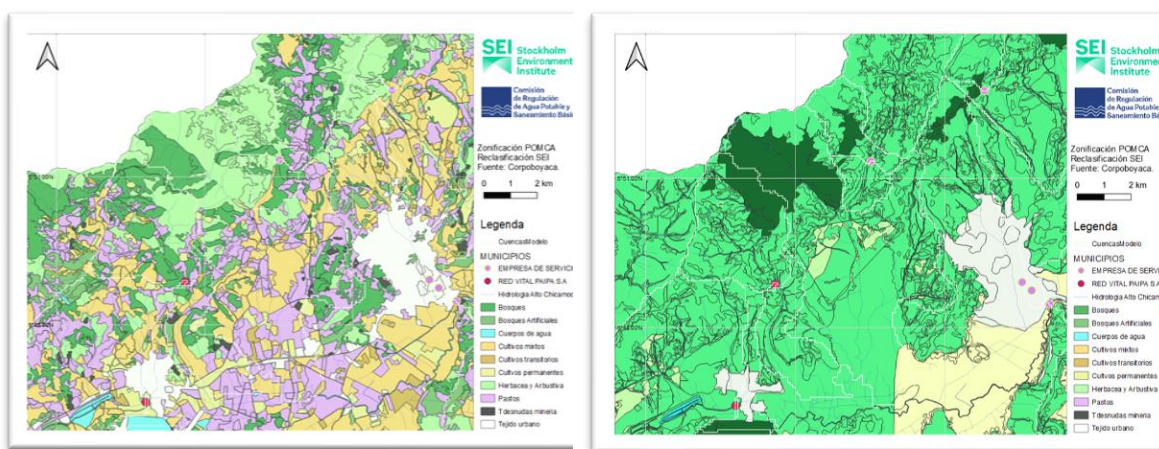
6.3.2. Línea Base Proyectada (2050)

En este caso no existen estrategias para mejorar el actual sistema de suministro, y tampoco para la conservación y preservación de las condiciones ambientales de las microcuencas. En la proyección de la línea base hasta el 2050 se consideraron los siguientes supuestos: (i) reducción de la cobertura de bosques en un 30%, (ii) reducción de la capacidad de almacenamiento del suelo (Sw) en un 20%, (iii) reducción de la conductividad en la zona de raíces (Ks) en un 20%.

6.3.3. Inversiones POMCA.

En esta estrategia se adopta la zonificación del POMCA. Específicamente consiste en incrementar la cobertura de bosques en las microcuencas de suministro de agua. De acuerdo con el POMCA en

la microcuenca Surba los bosques se incrementaría en 3785 ha, en Boyacogua 360 ha, y en Toibita 1098 ha. En la Figura 13 puede observarse el cambio en la cobertura actual de acuerdo con la zonificación del POMCA. Nótese que en amarillo se presentan los cultivos permanentes, transitorios y mixtos (a), que se espera sean restaurados a bosques, que se presentan con colores verdes (b). Lo anterior quiere decir que se espera restaurar casi la totalidad de las cuencas abastecedoras. En este sentido no se incluyen inversiones ambientales tales como reconversión de prácticas agrícolas o mayores área de restauración a través de otros programas estratégicos.



a) Cobertura actual

b) Zonificación POMCA

Figura 13. Microcuencas abastecedoras y cambio en la cobertura proyectado en el POMCA

32

6.3.4. Reducción de pérdidas en la aducción

Se refiere la reducción de pérdidas en la distribución, donde el supuesto es alcanzar un 30%. En Duitama se tendría que reducir en un 7.5% y en Paipa un 10%.

6.3.5. Uso eficiente de agua

La estrategia consiste en reducir la dotación de 120 a 90 l/(hab*d). Esto implica un uso eficiente del agua. La reducción en el consumo de agua puede lograrse a través de estrategias de educación ambiental, incentivos tarifarios y tributarios, micromedición, entre otras estrategias.

6.3.6. Incremento en la concesión por inversión ambiental

Esta estrategia consiste en incrementar la concesión de caudales por mejoras en las condiciones ambientales de las microcuencas. Esta es una acción combinada entre POMCA e incremento de concesión. De acuerdo con los resultados en Surba se podría incrementar en 35 l/s, en Boyacogua 2.5 l/s, y en Toibita 12 l/s. Esta estrategia constituye dos etapas, primero realizar inversiones ambientales en las cuencas abastecedoras, y posteriormente construir nuevamente bocatomas y sistemas de aducción que permitan transportar el agua al sistema de abastecimiento.

6.4. INVERSIONES POR CADA ESTRATEGIA

Para determinar el costo de las inversiones ambientales se utilizó información de la Corporación Autónoma de Boyacá, CORPOBOYACA, de acuerdo con la resolución No 0622 del 26 de abril de 2021, por medio de la cual se actualiza el valor promedio de los costos de establecimiento,

aislamiento y mantenimiento de un árbol plantado, para la ejecución de proyectos de reforestación que se adelanten como medida de compensación en la jurisdicción de CORPOBOYACA.

Los costos de las obras de infraestructura gris se obtienen a partir de presupuestos de obras para redes a pagar por precios unitarios (SECOP).

La estrategia 5 se adiciona en el análisis de costo -beneficio, con el ánimo de restar las inversiones que se espera se realicen en el POMCA en las cuencas abastecedoras para la restauración de los ecosistemas de acuerdo con la zonificación, de tal forma que las inversiones concurrentes no se dupliquen en este indicador. El presupuesto total definido en el POMCA para reforestación es restado de forma proporcional de acuerdo con el área en cada microcuenca que debe restauración, respecto al área total para restauración establecida en el POMCA. En la Tabla 9 se presentan los costos unitarios definidos en la cuenca del río Chicamocha, para establecer la costo-eficiencia de las alternativas

Tabla 9. Costos unitarios establecidos para cada inversión, de acuerdo con la información regional disponible.

ESTRATEGIA 1		
INVERSIONES AMBIENTALES		
Inversiones Toibita	Unid	Valor Unitario
Restauración ecológica	Ha	6,543,525
Implementación esquema de incentivos	Ha	1,746,622
Protocolo de monitoreo servicios ambientales	Ha	3,700,000
OPERACIÓN		
Operación sistema de incentivos	Ha/año	109,164
Seguimiento y monitoreo	Ha/año	184,948
ESTRATEGIA 2 Reducción de pérdidas		
Macromedidor	Unid	350,000,000
Cambio tubería aducción 6"	Km	273,000,000
Protocolo de monitoreo	Unid	250,000,000
OPERACIÓN		
Operación protocolo de monitoreo	Unid	100,000,000
Programa de educación ambiental	Unid	250,000,000
ESTRATEGIA 3 USO EFICIENTE DE AGUA		
Instalación Micromedidores	Unid	180,000
Intervención sectorización acueducto	Unid	2,500,000
Protocolo de monitoreo consumo de agua	Unid	150,000,000
OPERACIÓN		
Operación monitoreo	Unid	300,000,000
Campañas de educación ambiental	Unid	250,000,000
ESTRATEGIA 4 AMPLIACIÓN BOCATOMA Y CONDUCCIÓN		

Ampliación bocatoma	Unid	500,000,000
Cambio de tubería 8"	ml	400,000
Ampliación PTAP	Unid	1,500,000,000
Instalación macromedidores	Unid	350,000,000
OPERACIÓN		
Operación sistema	Unid	50,000,000
Seguimiento y monitoreo	Unid	184,948
ESTRATEGIA 5. INVERSIONES AMBIENTALES, INCLUYENDO INVERSIÓN DE POMCA Y OTROS USUARIOS		
Restauración ecológica	Ha	6,543,525
Inversión POMCA	%	- 4,087,500,000
Implementación esquema de incentivos	Ha	1,746,622
Protocolo de monitoreo servicios ambientales	Ha	3,700,000
OPERACIÓN		
Operación sistema de incentivos	Ha/año	109,164
Seguimiento y monitoreo	Ha/año	184,948

6.5. MEDICIÓN DE INDICADORES POR ACCIÓN

Los indicadores definidos en esta investigación permiten evaluar el efecto de las inversiones ambientales sobre la oferta hídrica, el beneficio de esa oferta respecto a la demanda del prestador del servicio y la mejora en la confiabilidad del servicio debido al aumento en la oferta principalmente en época de estiaje (Q95).

6.5.1. Análisis del cambio en la oferta del agua

Para este caso de estudio se analizaron las quebradas que suministran el agua a los acueductos de Paipa y Duitama, con el ánimo de identificar el efecto que tiene sobre el caudal disponible y su regulación, la realización de las diferentes estrategias. En la Figura 14 puede observarse los caudales medios diarios en la cuenca de la quebrada Toibita para la condición donde la cuenca se ve degradada por continuar las prácticas actuales agrícolas y pecuarias, proyectada al año 2050 y para la estrategia 3, donde se realiza el cambio de las coberturas actuales con cultivos y pastos a bosques, de acuerdo con la zonificación proyectada del POMCA.

Puede observarse que la regulación en la cuenca se mejoraría, al disminuir los eventos extremos de caudales máximos y aumentar el caudal almacenado en la cuenca, lo que produce un incremento de los caudales mínimos en época de estiaje. El mismo efecto puede observarse en la Figura 15 para las quebradas Surba y Boyacogua, para los dos escenarios analizados: proyección al año 2050 continuando con el manejo actual y en el año 2050 aplicando el cambio de cobertura y restauración de ecosistemas del POMCA.

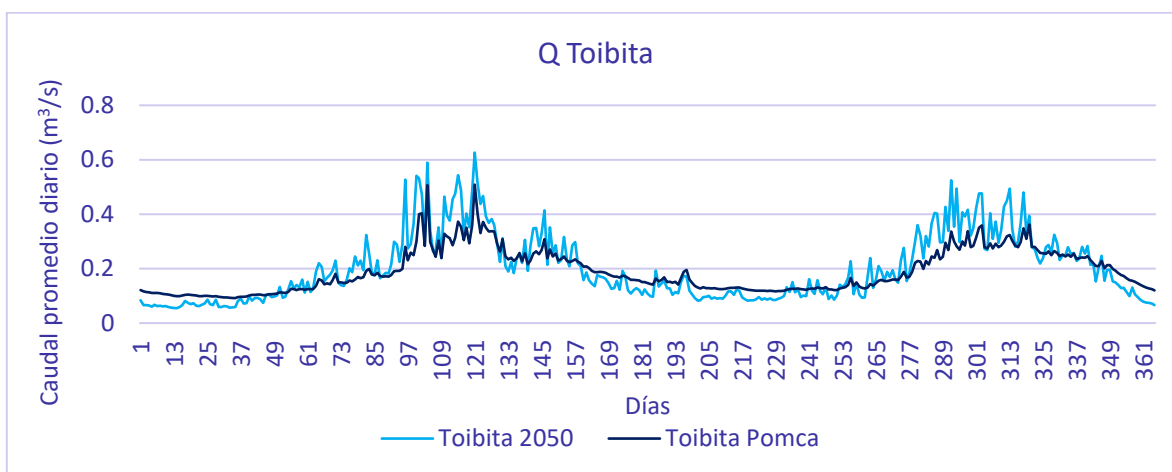
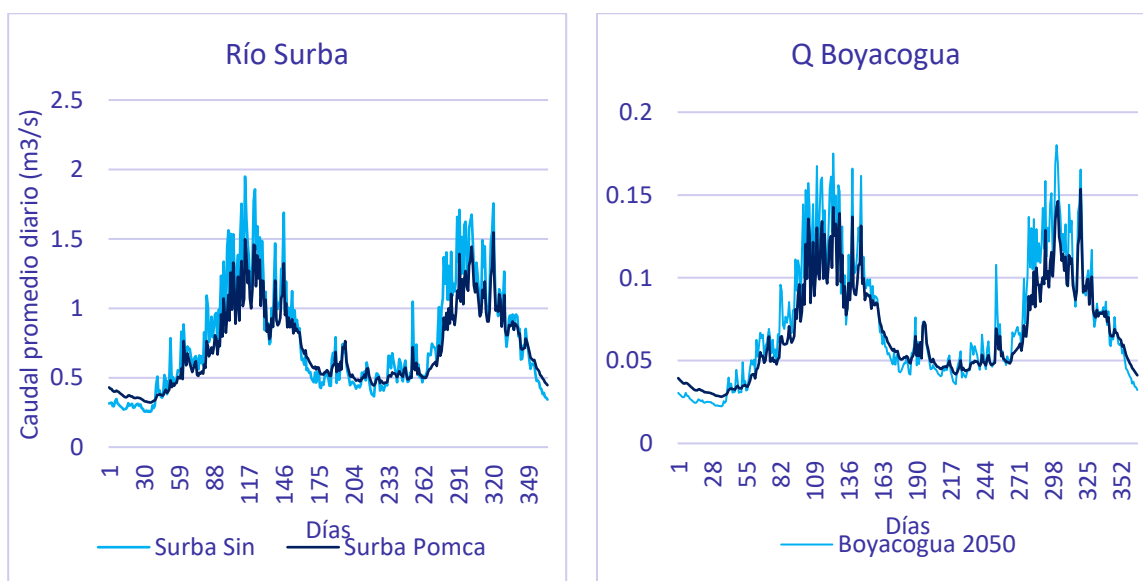


Figura 14. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en la Quebrada Toibita, Municipio Paipa.



a. Quebrada Surba

b. Quebrada Boyacogua

Figura 15. Caudal medio diario bajo diferentes estrategias en las quebradas a. Surba y b. Boyacogua, Municipio Duitama.

Para la evaluación de los caudales mínimos se ha considerado el percentil 95 (Q95) del caudal diario simulado para el periodo 2020-2050. En Surba para la *Línea base actual* el Q95 es 202.2 l/s, y de acuerdo con la *Línea base proyectada al año 2050* este podría reducirse en 33.8 l/s. Con la estrategia de incremento de cobertura de bosques definida en el *POMCA (3)* el Q95 se incrementaría en 35.9

l/s. En Boyacogua el Q95 para la *Línea base actual* es 19.4 l/s, para *Línea base proyectada al año 2050* se reduciría en 2.9 l/s, y con la estrategia *POMCA (3)* se incrementaría en 35.9 l/s. En Toibita para la *Línea base actual* el Q95 es 51.9 l/s, con *Línea base proyectada al año 2050* este se podría reducir en 17.5 l/s, y con *POMCA (3)* se incrementaría en 12 l/s. De acuerdo con los resultados es evidente que las inversiones ambientales podrían generar una mejor regulación del ciclo hidrológico, específicamente en el incremento de los caudales mínimos que son muy importantes para el suministro y confiabilidad de los sistemas de agua. Los incrementos en los caudales mínimos generan una oportunidad de incrementar la concesión de agua, la cual fue evaluada en la estrategia 6.

El cambio en el caudal de estiaje (caudal igualado o excedido el 95 % del tiempo) en las tres cuencas (Toibita, Boyacogua y Surba) se presenta en la Figura 16, para todas las estrategias comparadas con el caudal actual. El caudal disponible en estas cuencas aumentaría en más de 50 l/s para esta condición crítica. Respecto a la regulación de los caudales puede observarse claramente el efecto positivo de las inversiones ambientales, permitiendo mejorar la confiabilidad del servicio de acueducto, al contar con más recurso en los momentos críticos de caudal.

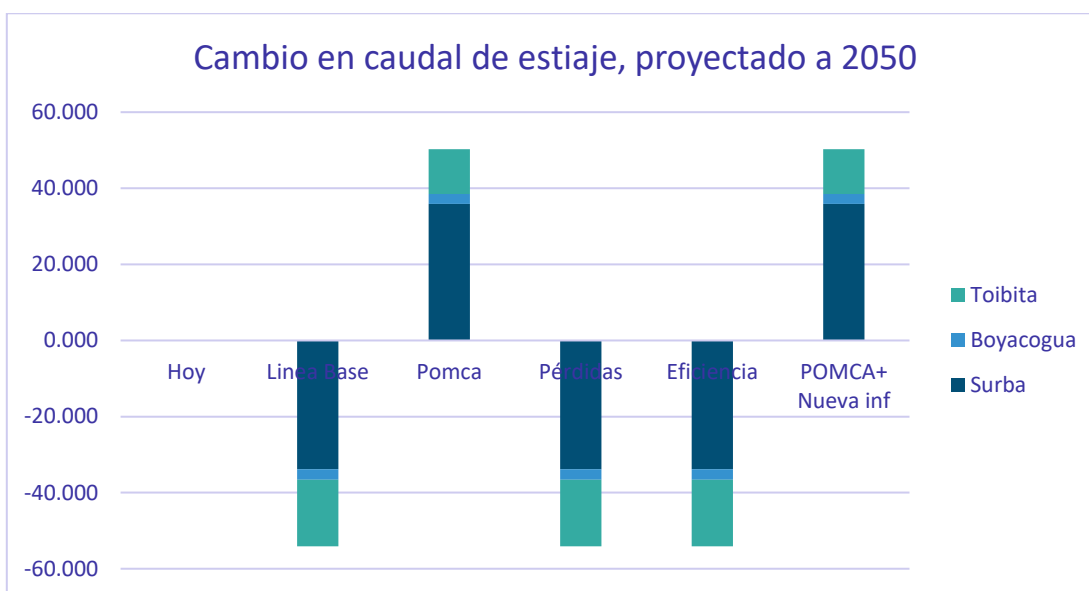


Figura 16. Cambio en el caudal de estiaje (Q95) de las diferentes estrategias respecto al caudal en la condición actual

6.5.2. Análisis del efecto de las estrategias en la cobertura y confiabilidad en la prestación del servicio de acueducto (Análisis brecha)

Los resultados de la brecha entre la oferta y demanda de agua se muestran en la Tabla 10. La brecha se presenta en términos de valores promedio (Caudal medio-demanda) y Q95 (Q95 -Demanda). La brecha para caudal de estiaje Q95 se constituye en un indicador muy importante, ya que se refiere al valor en condiciones de sequía. De acuerdo con los resultados, en Duitama la brecha promedio presenta valores muy bajos, en la mayoría de las estrategias es menor a 1 l/s excepto en la evaluación para la línea base proyectada al año 2050(2) donde se tiene 1.72 l/s. Estos números cambian drásticamente para la condición de brecha para el caudal de estiaje: en la línea base proyectada en el año 2050 (2) podría ser 50.9 l/s y solo para la estrategia donde se disminuye el

consumo de 120 l/día a 90 l/día la brecha sería 0. En Paipa, la brecha promedio para la línea base es igual a 12.5 l/s mientras que en la condición máxima es 20 l/s. En el resto de las estrategias de acuerdo con la brecha máxima estos varían entre 35.6 y 55.2 l/s, donde para la línea base proyectada al 2050 se tiene el valor más alto y para la estrategia de disminución del consumo promedio de 120 l/día a 90 l/día el más bajo.

El mayor beneficio entre las alternativas comparadas se produce cuando se logra disminuir el consumo de los usuarios de 120 l/día a 90 l/día. La siguiente estrategia donde se obtiene el mayor beneficio, es decir que se disminuye más la brecha entre la oferta y la demanda es la estrategia de restauración de ecosistemas, siguiendo la zonificación del POMCA.

Tabla 10. Brecha (l/s) entre oferta y demanda de agua en los sistemas de suministro de agua en Duitama y Paipa, y Delta de la brecha entre la línea base al año 2050 y cada una de las estrategias

Duitama						Paipa			
	Estrategias	B _m	B ₉₅	ΔB _m	ΔB ₉₅	B _m	B ₉₅	ΔB _m	ΔB ₉₅
Actual	Hoy (2020)	-0.01	-8.53			-12.46	-19.96		
	Línea Base (2050)	-1.72	-50.90	0.00	0.00	-43.24	-55.19	0.00	0.00
Inversiones Ambientales	POMCA	-0.04	-16.88	1.68	34.02	-42.70	-46.03	0.54	9.16
	POMCA+Nueva infraestructura	-0.04	-16.88	1.68	34.02	-36.36	-46.03	6.88	9.16
Gestión de la demanda	Pérdidas	-0.37	-31.65	1.35	19.25	-37.38	-51.32	5.86	3.87
	Eficiencia	0.00	0.00	1.72	50.90	-23.64	-35.58	19.60	19.60

6.5.3. Análisis de costo-efectividad

El indicador de costo-efectividad muestra cuales estrategias permiten lograr el mayor beneficio respecto a disminuir la brecha entre la oferta y la demanda, comparada con la línea base proyectada al año 2050, con el menor costo posible. En la Figura 17 se presenta el análisis para los municipios Duitama y Paipa, en el caso extremo de caudal de estiaje (Q95). En el gráfico, la mejor opción es aquella que tiene menor costo y mayor beneficio, es decir la barra más baja.

En los dos casos, la alternativa más costo-eficiente es la disminución del consumo de cada usuario de 120 l/hab*día a 90 l/hab*día. Esta alternativa implica además de un mejoramiento en la infraestructura para la micromedición, campañas de educación ambiental y estímulos tarifarios y tributarios que permitan la reducción efectiva en el consumo de agua.

La siguiente alternativa más costo efectiva para Paipa es la restauración de ecosistemas basada en la reforestación en las cuencas abastecedoras del sistema de acueducto. Esta alternativa incluye las inversiones concurrentes que se realizan en las microcuencas como parte de la ejecución del POMCA.

En Duitama, antes de las inversiones ambientales es más costo-eficiente para el prestador del servicio, la disminución de pérdidas en la bocatoma y la aducción del sistema.

En los dos casos la alternativa menos costo eficiente es la inversión en bocatoma y sistemas de aducción que permitan un mayor transporte de agua desde estas fuentes hídricas. Sin embargo, los sistemas de acueducto tienen mayores demandas que oferta, así que estas inversiones ambientales permiten disminuir el déficit de agua en época de sequía en 11.7 l/s desde Toibita, 2.6 l/s desde Boyacogua y 35.9 l/s desde Surba.

Una combinación de alternativas, donde se disminuyan los consumos por individuo, las pérdidas y donde las inversiones ambientales permitan ampliar la oferta hídrica en época de estiaje parece ser una solución más completa y acertada para la gestión del recurso hídrico.

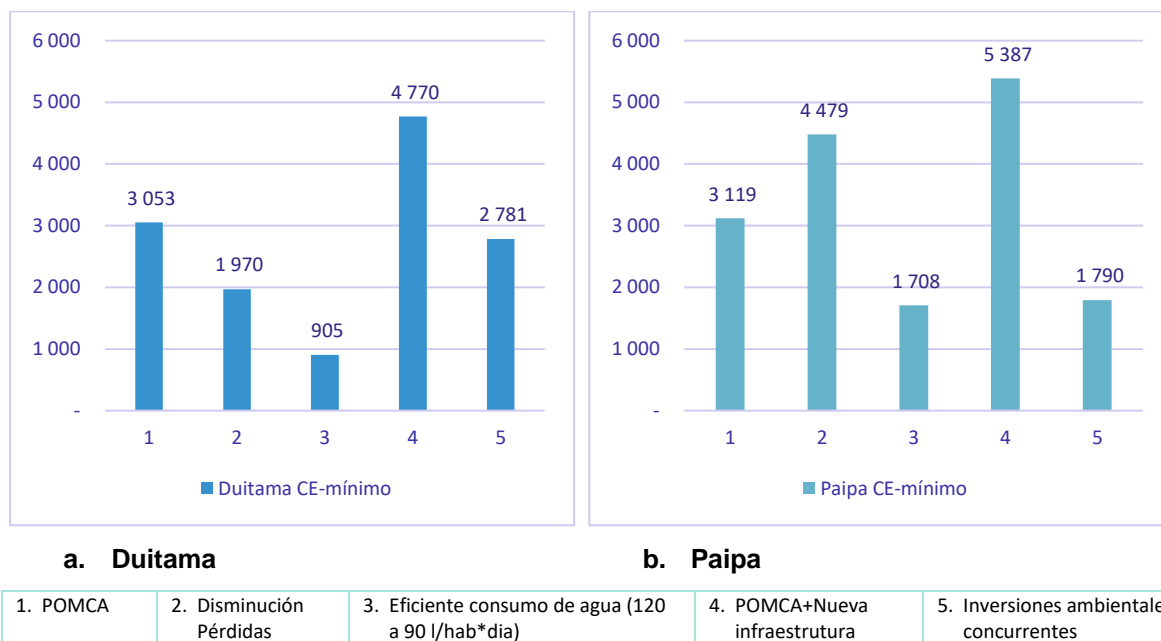


Figura 17. Costo efectividad C/ΔB₉₅ para los prestadores de servicio de a. Duitama y b. Paipa

6.6. IMPACTO EN EL ESQUEMA TARIFARIO

Para los municipios analizados en este caso de estudio, Duitama y Paipa, se realizó el cálculo de los diferentes componentes del Costo de Protección de Cuencas y Fuentes de Abastecimiento siguiendo la metodología establecida en la Resolución CRA 907 de 2019. Para tal finalidad, se calculó el Costo Medio de Administración por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMAP_{i,ac}$), el Costo Medio de Operación por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMOP_{i,ac}$), y el Costo Medio de Inversión por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMIP_{i,ac}$). Cada costo fue realizado mostrando el paso a paso para el cálculo de cada costo para cada uno de los municipios, presentando como se afecta la tarifa con diferentes proyectos a realizar. Como parte del ejercicio, se estableció el impacto en la tarifa de realizar las inversiones ambientales, tal como se presentó en la tercera estrategia de este análisis. Este cálculo fue realizado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA.

6.6.1. Municipio de Duitama

Ejemplo de cálculo de inclusión de los costos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en la tarifa del servicio público domiciliario de acueducto.

Es importante para efectos de la aplicación de la Resolución CRA 907 de 2019, se debe conocer el marco y segmento que aplica el prestador, de esto dependen las fórmulas y las tasas de descuento y capital de trabajo que empleará para el cálculo.

Las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua que la persona prestadora realizó en el periodo entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021 fueron las siguientes:

1. **Esquemas de pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica.**
2. **Restauración**

Determinación del Costo Medio de Operación por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMOP_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

1. **Esquemas de pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica.**

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 1.310.250.000 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021, tal como se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11. Gastos en los incurrió la empresa prestadora en el año anterior

Rubro	\$ de diciembre del 2014	Tipo de gasto
Identificación de inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua		
Estudios técnicos para identificar las posibles inversiones ambientales adicionales en la cuenca de estudio junto con el análisis del retorno de la inversión, y los actores interesados en la ejecución de las inversiones, así como la articulación con la Autoridad Ambiental.	\$ 800.000.000	Estudios
Diseño del esquema de Pago por Servicios Ambientales		
Estudio técnico que presente la identificación de acciones dentro del PSA que se va a realizar, el valor del incentivo, el cronograma de trabajo y el establecimiento de metas con sus respectivos indicadores.	\$ 500.000.000	Estudios
Socialización del proceso con los beneficiarios y las autoridades locales		
Empresa de comunicaciones	\$ 5.000.000	Contratos por servicios
Transporte	\$ 5.000.000	Contratos por servicios
Refrigerios	\$ 250.000	Contratos por servicios

Paso 2. Determinar el $CMOP_{i,ac}$

De acuerdo con el artículo 55.D de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Operación por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMOP_{i,ac}$), para el ejemplo, se calcula con la siguiente fórmula:

Estudio Piloto Cuenca Río Alto Chicamocha- Informe final 2021

$$CMOP_{i,ac} = \frac{COP_{i-1,ac} * (1 + r_{ct})}{CCP_{i,ac}}$$

$CMOP_{i,ac}$: Costo medio de operación por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 .

$COP_{i-1,ac}$ Costos operativos por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año tarifario $i=5$, relacionados con pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica, para el servicio público domiciliario de acueducto.

r_{ct} : Tasa de capital de trabajo, que según el artículo 21 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 2,43%.

$CCP_{i,ac}$: Consumo corregido por pérdidas para el año i , para el servicio público domiciliario de acueducto ($m^3/año$), el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 7.841.127 ($m^3/año$).

i : Año tarifario $i=6$.

$$CMOP_{i,ac} = \frac{(\$1.310.250.000) * (1 + 2,43\%)}{7.841.127}$$

$$CMOP_{i,ac} = \$ 171,16/m^3$$

Determinación del Costo Medio de Inversión por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMIP_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

1. Restauración

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 2.617.410.000 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021 con el proyecto de restauración donde se realizó una plantación forestal de 400 hectáreas, las cuales fueron identificadas y priorizadas atendiendo los criterios definidos en la Resolución CRA 907 de 2019.

Rubro	\$ de diciembre de 2014	Tipo de gastos
-------	-------------------------	----------------

Proyecto de restauración	\$ 2.617.410.000	Plantaciones forestales
--------------------------	------------------	-------------------------

PASO 2. Calcular las depreciaciones anuales y las depreciaciones totales

De conformidad con el artículo 55.G de la Resolución CRA 688 de 2014, la vida útil para activos relacionados con plantaciones forestales es de 30 años, aplicando el método de depreciación lineal, se estima el valor de las depreciaciones anuales.

El valor de la depreciación de cada uno de los activos que hacen parte de la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$) se calcula con la siguiente fórmula:

$$dpc_{i,ac} = \sum_{v=1}^n \frac{VAP_{v,ac}}{VUP_{v,ac}}$$

Donde:

$VAP_{v,ac}$: Valor del activo v al momento de su inclusión en el $CIP_{i,ac}$ para el servicio público domiciliario de acueducto (en pesos de diciembre del año base). El valor del activo para el año tarifario 6 se determinó en el paso 1.

$VUP_{v,ac}$: Vida útil regulada en años del activo v para el servicio público domiciliario de acueducto, de conformidad con el artículo 55.G de la Resolución CRA 688 de 2014.

v : Cada uno de los activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.

n : Número total de activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.

i : Año tarifario $i=6$.

Como para el año tarifario $i=6$ sólo se incurrió en costos de inversión de un activo, al reemplazar los valores en la anterior fórmula se obtiene la depreciación anual para el activo:

$$dpc_{i,ac} = \frac{\$2.617.410.000}{30}$$

$$dpc_{i,ac} = \$ 87.247.000$$

PASO 3. Estimar las depreciaciones acumuladas

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, la depreciación acumulada se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$DAP_{i,v,ac} = DAP_{i-1,v,ac} + dpc_{i,v,ac}$$

Donde:

$DAP_{i,v,ac}$: Depreciación acumulada del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto. La depreciación acumulada para el año de inicio de operación del activo es cero.

$dpc_{i,v,ac}$: Depreciación del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto, la cual se estimó en el paso 2.

i : Año tarifario $i=6$.

42

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$DAP_{i,v,ac} = \$0 + \$87.247.000$$

$$DAP_{i,v,ac} = \$87.247.000$$

PASO 4. Calcular el valor de la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$)

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$BCRP_{i,ac} = \sum_{v=1}^n (VAP_{i-1,v,ac} - DAP_{i,v,ac})$$

Donde:

$VAP_{i-1,v,ac}$:	Valor del activo v para el año $i-1$ (pesos de diciembre del año base) del servicio público domiciliario de acueducto, se determinó en el paso 1.
$DAP_{i,v,ac}$:	Depreciación acumulada del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto. El valor se calculó en el paso 3.
v :	Cada uno de los activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.
n :	Número total de activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.
r :	Tasa de descuento, que según el artículo 20 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 12,76%.
i :	Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$BCRP_{i,ac} = \$2.617.410.000 - \$87.247.000$$

$$BCRP_{i,ac} = \$2.530.163.000$$

PASO 5. Calcular el Costo de Inversiones Ambientales Adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i ($CIP_{i,ac}$)

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo de Inversiones Ambientales Adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i ($CIP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CIP_{i,ac} = (dpc_{i,ac}) + (r * BCRP_{i,ac})$$

Donde:

$CIP_{i,ac}$:	<i>Costo anual de inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i (pesos de diciembre del año base) del servicio público domiciliario de acueducto.</i>
$dpc_{i,ac}$:	<i>Depreciación anual de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i (pesos de diciembre del año base), estimado en el paso 2.</i>
$BCRP_{i,ac}$:	<i>Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i (pesos de diciembre del año base), para el servicio público domiciliario de acueducto, el cual se determinó en el paso 4.</i>
r :	<i>Tasa de descuento, que según el artículo 20 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 12,76%.</i>
i :	<i>Año tarifario $i=6$.</i>

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CIP_{i,ac} = \$ 87.247.000 + (12,76\% * \$2.530.163.000)$$

$$CIP_{i,ac} = \$ 410.095.798,8$$

Paso 6. Determinar el $CMIP_{i,ac}$

De conformidad con el artículo 55.E de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Inversión por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMIP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMIP_{i,ac} = \frac{CIP_{i,ac}}{CCP_{i,ac}}$$

Donde:

$CMIP_{i,ac}$:	<i>Costo medio de inversión por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i, expresado en pesos de diciembre del año base/m^3, para el servicio público domiciliario de acueducto.</i>
$CIP_{i,ac}$:	<i>Costo anual de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i, para el servicio público domiciliario de acueducto (pesos de diciembre del año base). El valor se estimó en el paso 5.</i>
$CCP_{i,ac}$:	<i>Consumo corregido por pérdidas para el año i, para el servicio público domiciliario de acueducto ($m^3/año$), el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 7.841.127 ($m^3/año$).</i>
i :	<i>Año tarifario $i=6$.</i>

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMIP_{i,ac} = \frac{410.095.798,8}{7.841.127}$$

$$CMIP_{i,ac} = \$ 52,30/m^3$$

45

Determinación del Costo Medio Variable por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMP_{i,ac}$).

De acuerdo con el artículo 55.C de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio Variable por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMP_{i,ac} = CMOP_{i,ac} + CMIP_{i,ac}$$

$CMP_{i,ac}$:	<i>Costo medio variable por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i, expresado en pesos de diciembre del año base/m^3, para el servicio público domiciliario de acueducto.</i>
$CMOP_{i,ac}$:	<i>Costo medio de operación por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i, expresado en pesos de diciembre del año base/m^3, para el servicio público domiciliario de acueducto.</i>

$CMP_{i,ac}$: Costo medio de inversión por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 , para el servicio público domiciliario de acueducto.

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMP_{i,ac} = 171,16 + 52,30$$

$$CMP_{i,ac} = \$ 223,46/m^3$$

Determinación del Costo Medio de Administración por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMA_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 72.462.254 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021, en ajustes del software de facturación, peticiones, quejas y recursos, capacitación y socialización

Paso 2. Determinar el $CMA_{i,ac}$

De acuerdo con el artículo 55.B de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Administración por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMA_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMA_{i,ac} = \frac{CAP_{i-1,ac}}{N_{i,ac} * 12}$$

Donde:

$CMA_{i,ac}$: Costo medio de administración por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i del servicio público domiciliario de acueducto, expresado en pesos de diciembre del año base (\$/suscriptor/mes).

$CAP_{i-1,ac}$: Costos de administración por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el servicio público domiciliario de acueducto causados en el año tarifario 5. Valor estimado en \$20.000.000.

El valor del se estimó dando un valor de \$15.000.000 al rubro capacitaciones y \$5.000.000 al rubro de ajustes de software y facturación.

$N_{i,ac}$ Número de suscriptores promedio proyectados en el año tarifario i , el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 53.341 suscriptores.

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMA_{i,ac} = \frac{\$ 20.000.000}{53.341 * 12}$$

$$CMA_{i,ac} = \$ 31,24/\text{suscriptor}/\text{mes}$$

Nota Importante: Una vez estimados los costos económicos de referencia de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado expresados en pesos de diciembre del año 2014, las personas prestadoras deberán actualizarlos a la fecha de inicio de aplicación de las tarifas.

Impacto en la tarifa del servicio público domiciliario de acueducto

1. Cálculo del valor final de aumento de la tarifa aplicado a un suscriptor promedio estrato 4.

Para este cálculo se asume:

- Un consumo promedio por suscriptor de 13,5 (m³ /suscriptor/mes)

CARGO FIJO		CARGO POR CONSUMO	
CMA	CMA _P	Costo actual metro cúbico por suscriptor	CMA _{P,i,ac}
\$4.835,9	\$31,24	\$2.239,5	\$223,46
TOTAL CARGO FIJO		TOTAL CARGO POR CONSUMO	
\$4.867,14		\$2.462,96	

6.6.2. Municipio de Paipa

Ejemplo de cálculo de inclusión de los costos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en la tarifa del servicio público domiciliario de acueducto

Es importante para efectos de la aplicación de la Resolución CRA 907 de 2019 se debe conocer el marco y segmento que aplica el prestador, de esto dependen las fórmulas y las tasas de descuento y capital de trabajo que empleará para el cálculo.

Las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua que la persona prestadora realizó en el periodo entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021 fueron las siguientes:

1. Esquemas de pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica.
2. Restauración

Determinación del Costo Medio de Operación por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMOP_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

1. Esquemas de pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica.

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 711.250.000 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021, tal como se detalla en el siguiente cuadro

Rubro	\$ de diciembre del 2014	Tipo de gasto
Identificación de inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua		
Estudios técnicos para identificar las posibles inversiones ambientales adicionales en la cuenca de estudio junto con el análisis del retorno de la inversión, y los actores interesados en la ejecución de las inversiones, así como la articulación con la Autoridad Ambiental.	\$ 700.000.000	Estudios
Diseño del esquema de Pago por Servicios Ambientales		
Estudio técnico que presente la identificación de acciones dentro del PSA que se va a realizar, el valor del incentivo, el cronograma de trabajo y el establecimiento de metas con sus respectivos indicadores.	\$ 300.000.000	Estudios
Socialización del proceso con los beneficiarios y las autoridades locales		
Empresa de comunicaciones	\$ 10.000.000	contratos por servicios
Transporte	\$ 1.000.000	contratos por servicios
Refrigerios	\$ 250.000	contratos por servicios

Paso 2. Determinar el $CMOP_{i,ac}$

De acuerdo con el artículo 55.D de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Operación por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMOP_{i,ac}$), para el ejemplo, se calcula con la siguiente fórmula:

$$CMOP_{i,ac} = \frac{COP_{i-1,ac} * (1 + r_{ct})}{CCP_{i,ac}}$$

$CMOP_{i,ac}$: Costo medio de operación por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 .

$COP_{i-1,ac}$: Costos operativos por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año tarifario $i=5$, relacionados con pago por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica, para el servicio público domiciliario de acueducto.

r_{ct} : Tasa de capital de trabajo, que según el artículo 21 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 2,43%.

$CCP_{i,ac}$: Consumo corregido por pérdidas para el año i , para el servicio público domiciliario de acueducto ($m^3/año$), el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 2.969.018,69 ($m^3/año$).

i : Año tarifario $i=6$.

$$CMOP_{i,ac} = \frac{(\$ 711.250.000) * (1 + 2,43\%)}{2.969.018,69}$$

$$CMOP_{i,ac} = \$ 245,37/m^3$$

Determinación del Costo Medio de Inversión por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMIP_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

1. Restauración

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 1.308.705.000 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021 con el proyecto de restauración donde

se realizó una plantación forestal de 200 hectáreas, las cuales fueron identificadas y priorizadas atendiendo los criterios definidos en la Resolución CRA 907 de 2019.

Rubro	\$ de diciembre de 2014	Tipo de gastos
Proyecto de restauración	\$ 1.308.705.000	Plantaciones forestales

PASO 2. Calcular las depreciaciones anuales y las depreciaciones totales

De conformidad con el artículo 55.G de la Resolución CRA 688 de 2014, la vida útil para activos relacionados con plantaciones forestales es de 30 años, aplicando el método de depreciación lineal, se estima el valor de las depreciaciones anuales.

El valor de la depreciación de cada uno de los activos que hacen parte de la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$) se calcula con la siguiente fórmula:

$$dpc_{i,ac} = \sum_{v=1}^n \frac{VAP_{v,ac}}{VUP_{v,ac}}$$

Donde:

$VAP_{v,ac}$: Valor del activo v al momento de su inclusión en el $CIP_{i,ac}$ para el servicio público domiciliario de acueducto (en pesos de diciembre del año base). El valor del activo para el año tarifario 6 se determinó en el paso 1.

$VUP_{v,ac}$: Vida útil regulada en años del activo v para el servicio público domiciliario de acueducto, de conformidad con el artículo 55.G de la Resolución CRA 688 de 2014.

v : Cada uno de los activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.

n : Número total de activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.

i : Año tarifario $i=6$.

Como para el año tarifario $i=6$ sólo se incurrió en costos de inversión de un activo, al reemplazar los valores en la anterior fórmula se obtiene la depreciación anual para el activo:

$$dpc_{i,ac} = \frac{\$1.308.705.000}{30}$$

$$dpc_{i,ac} = \$43.623.500$$

PASO 3. Estimar las depreciaciones acumuladas

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, la depreciación acumulada se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$DAP_{i,v,ac} = DAP_{i-1,v,ac} + dpc_{i,v,ac}$$

Donde:

$DAP_{i,v,ac}$: Depreciación acumulada del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto. La depreciación acumulada para el año de inicio de operación del activo es cero.

$dpc_{i,v,ac}$: Depreciación del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto, la cual se estimó en el paso 2.

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$DAP_{i,v,ac} = \$0 + \$43.623.500$$

$$DAP_{i,v,ac} = \$43.623.500$$

PASO 4. Calcular el valor de la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$)

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, la Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i ($BCRP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$BCRP_{i,ac} = \sum_{v=1}^n (VAP_{i-1,v,ac} - DAP_{i,v,ac})$$

Donde:

$VAP_{i-1,v,ac}$: Valor del activo v para el año $i-1$ (pesos de diciembre del año base) del servicio público domiciliario de acueducto, se determinó en el paso 1.

$DAP_{i,v,ac}$:	<i>Depreciación acumulada del activo v para el año i (pesos de diciembre del año base) para el servicio público domiciliario de acueducto. El valor se calculó en el paso 3.</i>
v :	<i>Cada uno de los activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.</i>
n :	<i>Número total de activos de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua.</i>
r :	<i>Tasa de descuento, que según el artículo 20 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 12,76%.</i>
i :	<i>Año tarifario $i=6$.</i>

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$BCRP_{i,ac} = \$1.308.705.000 - \$43.623.500$$

$$BCRP_{i,ac} = \$1.265.081.500$$

52

PASO 5. Calcular el Costo de Inversiones Ambientales Adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i ($CIP_{i,ac}$)

De conformidad con el artículo 55.F de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo de Inversiones Ambientales Adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i ($CIP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CIP_{i,ac} = (dpc_{i,ac}) + (r * BCRP_{i,ac})$$

Donde:

$CIP_{i,ac}$:	<i>Costo anual de inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua en el año i (pesos de diciembre del año base) del servicio público domiciliario de acueducto.</i>
----------------	---

$dpc_{i,ac}$:	<i>Depreciación anual de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i (pesos de diciembre del año base), estimado en el paso 2.</i>
$BCRP_{i,ac}$:	<i>Base de capital regulada de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i (pesos de diciembre del año base), para el servicio público domiciliario de acueducto, el cual se determinó en el paso 4.</i>
r :	<i>Tasa de descuento, que según el artículo 20 de la Resolución CRA 688 de 2014, para el caso de prestadores del segundo segmento es de 12,76%.</i>
i :	<i>Año tarifario $i=6$.</i>

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CIP_{i,ac} = \$ 43.623.500 + (12,76\% * \$1.265.081.500)$$

$$CIP_{i,ac} = \$ 205.047.899,4$$

53

Paso 6. Determinar el $CMIP_{i,ac}$

De conformidad con el artículo 55.E de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Inversión por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMIP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMIP_{i,ac} = \frac{CIP_{i,ac}}{CCP_{i,ac}}$$

Donde:

$CMIP_{i,ac}$:	<i>Costo medio de inversión por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i, expresado en pesos de diciembre del año base/m^3, para el servicio público domiciliario de acueducto.</i>
-----------------	--

$CIP_{i,ac}$: Costo anual de las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , para el servicio público domiciliario de acueducto (pesos de diciembre del año base). El valor se estimó en el paso 5.

$CCP_{i,ac}$: Consumo corregido por pérdidas para el año i , para el servicio público domiciliario de acueducto ($m^3/año$), el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 2.969.018,69 ($m^3/año$).

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMIP_{i,ac} = \frac{205.047.899,4}{2.969.018,69}$$

$$CMIP_{i,ac} = \$ 69,06/m^3$$

Determinación del Costo Medio Variable por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMP_{i,ac}$).

De acuerdo con el artículo 55.C de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio Variable por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMP_{i,ac} = CMOP_{i,ac} + CMIP_{i,ac}$$

$CMP_{i,ac}$: Costo medio variable por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 , para el servicio público domiciliario de acueducto.

$CMOP_{i,ac}$: Costo medio de operación por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 , para el servicio público domiciliario de acueducto.

$CMIP_{i,ac}$: Costo medio de inversión por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i , expresado en pesos de diciembre del año base/ m^3 , para el servicio público domiciliario de acueducto.

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMP_{i,ac} = 245,37 + 69,06$$

$$CMP_{i,ac} = \$ 314,43/m^3$$

Determinación del Costo Medio de Administración por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMAP_{i,ac}$).

Paso 1. Determinar los costos incurridos en el año tarifario anterior

La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto incurrió \$ 72.462.254 en el periodo comprendido entre el 1 de enero y 30 de junio de 2021, en ajustes del software de facturación, peticiones, quejas y recursos, capacitación y socialización

Paso 2. Determinar el $CMAP_{i,ac}$

De acuerdo con el artículo 55.B de la Resolución CRA 688 de 2014, el Costo Medio de Administración por Inversiones Ambientales Adicionales para la Protección de Cuencas y Fuentes de Agua para el año i ($CMAP_{i,ac}$) se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$CMAP_{i,ac} = \frac{CAP_{i-1,ac}}{N_{i,ac} * 12}$$

Donde:

$CMAP_{i,ac}$: Costo medio de administración por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el año i del servicio público domiciliario de acueducto, expresado en pesos de diciembre del año base (\$/suscriptor/mes).

$CAP_{i-1,ac}$: Costos de administración por inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua para el servicio público domiciliario de acueducto causados en el año tarifario 5. Valor estimado en \$5.000.000.

El valor del se estimó dando un valor de \$3.000.000 al rubro capacitaciones y \$2.000.000 al rubro de ajustes de software y facturación.

$N_{i,ac}$ Número de suscriptores promedio proyectados en el año tarifario i , el cual según el estudio de costos corresponde para el año tarifario $i=6$ a 6.725 suscriptores.

i : Año tarifario $i=6$.

Al reemplazar los valores en la anterior formula se obtiene:

$$CMAP_{i,ac} = \frac{\$ 5.000.000}{6.725 * 12}$$

$$CMAP_{i,ac} = \$ 61,95/\text{suscriptor}/\text{mes}$$

Nota Importante: Una vez estimados los costos económicos de referencia de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado expresados en pesos de diciembre del año 2014, las personas prestadoras deberán actualizarlos a la fecha de inicio de aplicación de las tarifas.

Impacto en la tarifa del servicio público domiciliario de acueducto

1. Cálculo del valor final de aumento de la tarifa aplicado a un suscriptor promedio estrato 4.

Para este cálculo se asume:

- Un consumo promedio por suscriptor de 13,5 (m³ /suscriptor/mes)

CARGO FIJO		CARGO POR CONSUMO	
CMA	CMAP	Costo actual metro cúbico por suscriptor	$CMPI_{i,ac}$
\$5.245	\$61,95	\$1.165,25	\$314,43
TOTAL CARGO FIJO		TOTAL CARGO POR CONSUMO	
\$5.506,95		\$1.479,68	

7. RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DE INVERSIONES AMBIENTALES ADICIONALES

De acuerdo con los casos de estudio presentados en este análisis, adelantado en la cuenca del río Chinchiná y en la cuenca alta del río Chicamocha, donde se evaluaron los beneficios marginales y la costo-efectividad de implementar algunas inversiones para garantizar la prestación del servicio público de acueducto, se resaltan algunas recomendaciones para la ejecución de proyectos de inversiones ambientales adicionales:

1. Se recomienda seguir la metodología XLRM pues permite identificar las incertidumbres, estrategias, modelos y métricas requeridas para evaluar la efectividad de inversiones ambientales y grises respecto a garantizar el agua para la prestación del servicio de acueducto.
2. Los indicadores que se plantean en esta investigación, basados en el cambio en caudal, la diferencia entre la brecha (oferta-demanda) del desarrollo de la cuenca sin inversiones ambientales y con inversiones, muestran una aproximación que permite responder a la pregunta de cuáles estrategias son costo efectivas para garantizar la prestación del servicio público, siguiendo los indicadores definidos por la CRA como estándares de servicio y eficiencia.
3. El tipo de estrategias por analizar en la cuenca deben articularse con entidades relacionadas con el manejo del agua y el manejo ambiental en la cuenca. En este caso, gracias a esta retroalimentación se incluyeron estrategias como uso eficiente y ahorro de agua, que significa la opción más costo-efectiva.
4. Los costos incluidos en este análisis están basados en la información proporcionada por los prestadores de servicio y la Corporación Autónoma Regional. Estos valores variarán de acuerdo con el área donde se analizan las inversiones. Se recomienda actualizar estos costos para todos los análisis por realizar en otras cuencas y no generalizarlos.
5. Usar como periodo de retorno para las inversiones ambientales aquel que se considere se requiere para restaurar el ecosistema existente. En el caso de bosques como los presentes en la cuenca estudiada este periodo se definió en 30 años.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron alternativas de inversiones ambientales y grises en la cuenca alta del río Chicamocha como caso piloto, para analizar la eficiencia de las inversiones ambientales respecto a la regulación hídrica en la cuenca y la disponibilidad de agua para suplir la demanda.

Para ello se usó la metodología XLRM que propone la definición de indicadores para evaluar el comportamiento de acciones específicas definidas de forma participativa, en contextos de incertidumbre asociada al crecimiento poblacional y cambio climático, usando el modelo WEAP como plataforma de simulación.

Los elementos conceptuales definidos en este caso piloto para determinar los beneficios marginales de cada escenario analizado y su costo-efectividad, constituyen una herramienta que permite a los prestadores de servicio definir las inversiones más efectivas para garantizar la provisión del servicio y su eficiencia.

En el municipio de Duitama ubicado en la cuenca alta del río Chicamocha con caudal medio y en época de estiaje (Q95) se presenta déficit en el suministro de agua, donde la oferta es inferior a la demanda (-0,008 y -8.53 l/s respectivamente). Para el escenario de línea base proyectado al año 2050 esta diferencia es mucho más crítica con caudales medio y seco de -1.72 y -50.90 l/s. Este déficit se ve disminuido cuando se evalúan las inversiones ambientales, donde la brecha es de -0.04 y -16.880 l/s en el horizonte de análisis en el año 2050. Resultados similares se obtiene para la evaluación de la brecha entre la oferta y la demanda en el municipio de Paipa, donde el cambio de la brecha entre las inversiones ambientales y la línea base con proyección al 2050 es para caudal medio 0.54 y para Q95 9.16 l/s. Si bien las inversiones ambientales no responderán completamente la necesidad de agua para los municipios, ayudan a disminuir la brecha existente entre la oferta y la demanda.

Los indicadores de costo-efectividad muestran que las inversiones relacionadas con la disminución del consumo per cápita son las alternativas con más impacto y menos costosas. La segunda opción serían las inversiones ambientales para Paipa y la tercera opción para Duitama. Sin embargo, estos indicadores deben analizarse conjuntamente. Las inversiones ambientales pueden suplir parcialmente la demanda en el año 2050, lo que aliviaría la construcción de nueva infraestructura para suplir las necesidades de estas poblaciones.

Las inversiones en uso eficiente y ahorro del agua pueden complementarse con las inversiones ambientales de tal forma que se gestione la demanda mientras que se mejora la oferta a través del fortalecimiento de su regulación hídrica.

De acuerdo con la estimación del impacto en las tarifas debido a las inversiones ambientales para el municipio de Duitama, el cargo fijo aumentaría debido a las inversiones ambientales de \$4835 a \$4867 pesos. El valor del cargo consumo básico a 2017 es de \$2239 y el valor estimado por este concepto es de \$2463. Para el municipio de Paipa el cambio en el cargo fijo estimado sería de \$5245 a \$5507 pesos y para el cargo por consumo el cambio sería de \$1165 a \$1480 por metro cúbico por suscriptor. Estos aumentos en las tarifas parecen pequeños comparados con los beneficios que se producirían por el aumento en el caudal disponible por las inversiones ambientales, principalmente en época de estiaje.

Los beneficios agregados debidos a mayor oferta hídrica en la cuenca, mantener la calidad de agua y mayores ingresos a familias vulnerables por pago por servicios ambientales, muestran que las inversiones ambientales favorecen el desarrollo sostenible y equitativo en la cuenca.

En la cuenca del río Chicamocha, el aumento en los caudales disponibles principalmente en época de sequía disminuiría la brecha entre la oferta y la demanda, lo que demuestra la pertinencia y necesidad de las inversiones ambientales. Si bien no se podría suplir complementa la demanda en

el año 2050, las inversiones en obras de infraestructura como embalses o bocatomas en otros cuerpos de agua podrían ser inferiores que las requeridas actualmente.

9. REFERENCIAS

Buytaert W, Céleri R, De Bièvre B, Cisneros F, Wyseure G, Deckers J, Hofstede R, Human impact on the hydrology of the Andean páramos, *Earth-Science Reviews*, 79; 1–2, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.

Cárdenas, MF, Tobón, C, Buytaert, W. Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*. 2017; 31: 4440– 4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>

CORPOCALDAS, 2016. *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Chinchiná*, Manizales: s.n.

CRA, 2014. *Resolución CRA 688 de 2014. Por el cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5000 suscriptores en el área urbana*, Bogotá: s.n.

DANE, 2005. *Censo nacional*, Bogotá: s.n.

Daza-Torres, M. C., Hernandez_Florez, F. & Triana, F. A., 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz, Colombia. *Revista Fac.Nac. Agron. Medellín*, 67(1), pp. 7189-7200.

IDEAM, 2016. *NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO PARA COLOMBIA 2011 - 2100 . HERRAMIENTAS CIENTIFICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES. Estudio Técnico Completo*. Bogotá: s.n.

IDEAM, 2018. *Evaluación Nacional del Agua ENA*, Bogotá: s.n.

Ken M, F. y otros, 2018. Physical and Chemical Connectivity of Streams and Riparian Wetlands to Downstream Waters: A Synthesis. *JAWRA*, March, 54(2), pp. 323-345.

Lempert, R. J., Popper, S. . W. & Bankes, S. C., 2003. *Shaping the Next One Hundred Years: New methods for quantitative, long-term policy analysis*, RAND. Santa Monica, CA.: s.n.

MAVDT, 2003. *RAS, Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico*, s.l.: s.n.

Rey_Benayas, J. M., Mansourian, S., Vallauri, D. & Dudley, N., 2005. Restoring Forest After Land Abandonment. En: s.l.:s.n., pp. 356-360.

Yates, D., Sieber, J., Pukey, D. & Huber-Lee, A., 2005. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), pp. 487-500.

Sáenz, L., & Mulligan, M. (2013). The role of Cloud Affected Forests (CAFs) on water inputs to dams. *Ecosystem Services*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.005>

