

PROJETO ARCA

Biossincronicidade de Resistência Viral

Clima · Vetores · UV · Vírus · Biota do Solo · Zinco · Selênio

Como Medir e Gerenciar o Risco Viral Sistêmico em Variedades Crioulas

PERGUNTA FUNDADORA DESTE MÓDULO:

'Como melhorar a resistência a vírus pensando na biossincronicidade do sistema – biota, zinco, selênio e outros nutrientes traço indispensáveis para a memória epigenética? O aumento de temperatura revela aumento de insetos e evolução viral por UV – como medir esses riscos?'

RESPOSTA: O sistema é biossincronizado – perturbações climáticas perturbam simultaneamente os vetores, os vírus, a maquinaria epigenética de defesa e os minerais que a alimentam. O MinION permite medir todos esses níveis de risco em tempo real – algo inédito na fitovirologia.

Welson Perli Pereira

Projeto ARCA | Bahia, Brasil | Junho de 2026

1. A CASCATA BLOSSINCRONIZADA DE RISCO VIRAL

1.1 O Que é Blossincronicidade no Contexto Viral

Blossincronicidade de resistência viral é o princípio de que a vulnerabilidade de uma planta a vírus não é determinada por um único fator — mas pela sincronização simultânea de múltiplos sistemas interdependentes que respondem ao mesmo driver climático. Quando a temperatura aumenta, ela não perturba apenas um elo da cadeia — ela perturba todos os elos ao mesmo tempo, em direções que se amplificam mutuamente.

A CASCATA BLOSSINCRONIZADA — VISÃO COMPLETA

DRIVER: Aumento de temperatura + Intensificação de UV

→ NÍVEL 1: VETORES

Expansão geográfica de afídeos, trips, mosca-branca
Ciclos reprodutivos mais rápidos (2-3x mais gerações/ano)
Maior mobilidade → mais vírus transportados por área

→ NÍVEL 2: VÍRUS

UV aumentada muta RNA viral em tempo real
Novas estirpes escapam de resistências existentes
Vírus adaptados ao calor = mais competitivos

→ NÍVEL 3: SOLO E BIOTA

Calor + seca reduz diversidade microbiana
Solubilizadores de Zn e Se diminuem
AMF enfraquecidas = menos Mg, P, Zn entregues

→ NÍVEL 4: NUTRIÇÃO MINERAL DA PLANTA

Zn reduzido → proteínas AGO disfuncionais
Se reduzido → resposta HR descontrolada
S reduzido → SAM insuficiente → epigenoma comprometido

→ NÍVEL 5: MAQUINARIA ANTIVIRAL DA PLANTA

RNAi enfraquecido (AGO sem Zn)
HR imprecisa (sem Se)
Genes de resistência hipermetilados (sem Fe)
Memória epigenética antiviral não transmitida às sementes

RESULTADO: Mais vírus + Mais mutações + Planta mais vulnerável
= Colapso sistêmico silencioso – invisível para a agronomia convencional

1.2 Os Vírus Mais Relevantes para o ARCA no Nordeste

Vírus	Família	Vetor Principal	Culturas Afetadas	Risco com Clima Quente
TSWV (Vírus do Vira-cabeça)	Tospoviridae	Trips (Frankliniella)	Tomate, pimentão, feijão	🔴 CRÍTICO — trips multiplica 3x em calor
Begomovírus (TYLCV e outros)	Geminiviridae	Mosca-branca (Bemisia tabaci)	Tomate, feijão, mandioca	🔴 CRÍTICO — mosca-branca dominante no semiárido
PVY (Vírus Y da Batata)	Potyviridae	Afídeos (Myzus, Macrosiphum)	Tomate, batata, pimentão	🟡 ALTO — afídeos expandindo range
CMV (Vírus do Mosaico do Pepino)	Bromoviridae	Afídeos (> 60 espécies)	Cucurbitáceas, tomate, feijão	🟡 ALTO — range de hospedeiros amplo
BYDV (Vírus do Nanismo Amarelo)	Luteoviridae	Afídeos de gramíneas	Milho, sorgo, trigo	🟡 MODERADO — cresce com clima seco
CaCV (Vírus do Carvão da Capsicum)	Tospoviridae	Trips	Pimentão, tomate	🟡 ALTO — nova estirpe detectada NE Brasil 2024

1.3 Como a UV Muta os Vírus — O Mecanismo

A radiação UV-B (280–315 nm) — que aumenta com o avanço da destruição da camada de ozônio e com altitude — causa mutações diretas no RNA viral por dois mecanismos:

Mecanismo	Efeito no Vírus	Consequência para Resistência
Formação de dímeros de pirimidina no RNA viral	Cria variantes de sequência no genoma do vírus — especialmente na proteína da capa e no gene de movimento	Variantes escapam de resistências baseadas em reconhecimento de sequência (genes R e NBS-LRR)
Oxidação de bases do RNA viral	Aumenta a taxa de mutação geral — especialmente em vírus de RNA de fita simples	Maior diversidade de estirpes circulando simultaneamente na mesma área
Pressão seletiva sobre a estrutura do vírus	Vírus com capa proteica mais estável ao UV são	Novas estirpes mais resistentes à inativação por UV — mais persistentes

	selecionados	em vetores
Indução de recombinação viral	UV facilita recombinação entre estirpes diferentes no mesmo hospedeiro	Novos vírus recombinantes com características imprevisíveis — potencial de quebrar resistências múltiplas

2. ZINCO, SELÊNIO E A MAQUINARIA ANTIVIRAL DA PLANTA

2.1 Zinco — O Mineral que Arma o RNAi Antiviral

O RNAi (RNA interference) é o sistema imune antiviral primário das plantas. Quando um vírus entra na célula, seu RNA de dupla fita é reconhecido pela enzima DICER-LIKE (DCL), que o corta em pequenos RNAs de interferência (siRNA de 21–24 nt). Esses siRNA são carregados nas proteínas AGO (Argonaute) que formam o complexo RISC — o qual então degrada qualquer RNA viral que corresponda à sequência dos siRNA.

ZINCO E O COMPLEXO RISC ANTIVIRAL

VÍRUS entra na célula



RNA viral de dupla fita reconhecido por DCL2/DCL4



Corte em siRNA de 21–22 nt (antivirais)



siRNA carregado nas proteínas AGO1/AGO2 ← ZINC FINGER OBRIGATÓRIO
(PAZ domain – liga Zn^{2+})



Formação do complexo RISC



RISC degrada RNA viral complementar → VÍRUS ELIMINADO ✓

SEM ZINCO SUFICIENTE:

AGO1/AGO2 perdem estrutura PAZ domain

siRNA não são carregados corretamente

RISC não se forma ou funciona parcialmente

→ VÍRUS REPLICA LIVREMENTE ✗

IMPLICAÇÃO PARA O ARCA:

Solo deficiente em Zn = sistema RNAi comprometido

= planta produzindo defesas mas incapaz de usá-las

Além do RISC, o zinco é necessário para a proteína HEN1 — que metila os siRNA antivirais para protegê-los de degradação. Sem zinco, os siRNA produzidos são degradados antes de chegar às proteínas AGO. A planta tem o sistema de alarme mas as baterias estão descarregadas.

2.2 Selênio — O Mineral que Calibra a Morte Celular Antiviral

A resposta de hipersensibilidade (HR) é o mecanismo mais poderoso de resistência viral em plantas: ao detectar um vírus, a planta executa morte celular programada (apoptose) nas células infectadas — criando uma zona necrótica que impede a dispersão do vírus para o restante da planta. É literalmente suicídio de algumas células para salvar o organismo.

O selênio é cofator das selenoproteínas tioredoxina redutase e glutathione peroxidase, que controlam o estado redox intracelular — o equilíbrio entre oxidação e redução dentro da célula. A HR requer um burst oxidativo preciso: suficiente para matar a célula infectada, mas controlado para não destruir células vizinhas saudáveis.

Estado do Selênio	Burst Oxidativo da HR	Resultado	Impacto Viral
Selênio adequado	Preciso e controlado — ROS suficiente para matar célula infectada	Zona necrótica pequena e eficaz — vírus contido	Resistência viral completa ✓
Deficiência leve de Se	Burst insuficiente — oxidação não atinge limiar letal	Célula infectada não morre — vírus não é contido	Vírus se espalha sistemicamente ⚠
Deficiência severa de Se	Sem controle redox — burst oxidativo desregulado e excessivo	Necrose sistêmica não controlada — beneficia vírus necrotróficos	Colapso imune — planta destrói a si mesma ✗
Excesso de Se (toxicidade)	Supressão do burst oxidativo por antioxição excessiva	HR não ativada mesmo com vírus presente	Resistência bloqueada por excesso do mineral ⚠

2.3 Outros Minerais Traço e a Resistência Viral

Mineral Traço	Função Antiviral	Via Molecular	Deficiência Causa
Boro (B)	Integridade da parede celular — barreira física à entrada do vírus	Complexos borato-polissacarídeo na parede celular	Parede mais permeável — vírus entra mais facilmente
Cobre (Cu)	Cofator de enzimas antioxidantes (Cu/Zn-SOD) + atividade antiviral direta	Cu/Zn superóxido dismutase; lacases de lignificação	Defesa oxidativa comprometida; lignificação reduzida
Molibdênio (Mo)	Cofator de nitrogenase e nitrato redutase — controla disponibilidade de N	Mo → molibdopterina → enzimas de N	Desequilíbrio N/C favorece replicação viral
Silício (Si)	Reforço físico da parede celular + indução de resistência	Deposição de sílica em células epidérmicas; ativação de PR genes	Células mais vulneráveis à picada do vetor

	sistêmica		
Cobalto (Co)	Precursor de vitamina B12 — regula hormônios relacionados à defesa	Co → cobalamina → metabolismo etileno/JA	Sinalização de defesa comprometida
Iodo (I)	Antioxidante celular + ativação de genes de defesa via H ₂ O ₂	Iodeto → yodoperoxidases → controle ROS	Acúmulo excessivo de ROS — dano oxidativo à planta

2.4 A Memória Epigenética Antiviral nas Sementes

Plantas que sobreviveram a infecções virais em gerações anteriores podem transmitir às sementes três tipos de memória antiviral — todos detectáveis pelo MinION:

Tipo de Memória	O Que é Transmitido	Mecanismo	Efeito na Próxima Geração
sRNA antivirais maternos	siRNA de 21–24 nt contra estirpes virais específicas que infectaram a mãe	Depositados no endosperma via AGO — carregados no embrião	Plântula nasce com 'vacina molecular' contra vírus específico
Hipometilação de genes AGO	Genes AGO1/AGO2/AGO4 hipometilados — sistema RNAi pré-ativado	Marcas de metilação herdadas via gametas e endosperma	RNAi em estado de alerta desde a germinação
Hipometilação de genes PR/SAR	Genes PR-1, NPR1, WRKY antivirais parcialmente ativados	Herança epigenética via sRNA e marcas de histonas	Resistência sistêmica adquirida pré-ativada
Padrão de siRNA de transposons	TEs mobilizados pela infecção viral geram siRNA secundários	RdDM reforçado em regiões afetadas pelo vírus	Maior estabilidade genômica e epigenômica na progênie

3. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RISCO VIRAL INTEGRADO — MinION

3.1 Os Cinco Níveis de Medição

O sistema de medição que o ARCA pode implementar com o MinION é único no mundo: mede o risco viral em todos os cinco níveis da cascata biossincronizada simultaneamente — algo que a fitovirologia convencional nunca fez por não ter uma plataforma portátil capaz de sequenciar DNA, RNA, vírus e metagenoma no mesmo equipamento.

SISTEMA ARCA DE MEDIÇÃO DE RISCO VIRAL — 5 NÍVEIS

NÍVEL 1 — PRESSÃO VIRAL NO AMBIENTE

Amostra: armadilhas adesivas amarelas (vetores capturados)

Kit: Direct RNA Sequencing SQK-RNA004

Análise: Kraken2 + banco de vírus de plantas (NCBI RefSeq)

Output: quais vírus estão circulando + em quais estirpes

Frequência: semanal durante períodos de risco

NÍVEL 2 — EVOLUÇÃO VIRAL (PRESSÃO UV)

Amostra: pool de vírus de vetores capturados ao longo do tempo

Análise: alinhamento temporal de sequências virais

Output: taxa de mutação + novas variantes + fuga de resistência

Frequência: comparação mensal – detecção de evolução

NÍVEL 3 — ESTADO ANTIVIRAL DA PLANTA

Amostra: folhas jovens (sRNA + DNA)

Análise: ShortStack (sRNA antivirais) + DeepPlant (metilação AGO)

Output: intensidade do RNAi + estado AGO1/AGO2 + siRNA ativos

Frequência: antes do plantio + a cada 30 dias do ciclo

NÍVEL 4 — NUTRIÇÃO MINERAL EPIGENÉTICA DO SOLO

Amostra: solo da rizosfera

Análise: metagenômica funcional – genes de Zn, Se, Si, Cu, B

Output: abundância de solubilizadores + previsão de disponibilidade

Frequência: antes do plantio + após intervenções de manejo

NÍVEL 5 — MEMÓRIA ANTIVIRAL DAS SEMENTES

Amostra: sementes do lote a ser plantado

Análise: sRNA + epigenoma (AGO, PR, NPR1) – MinION

Output: se a semente carrega memória antiviral da mãe

Frequência: antes de cada plantio – integrado ao Módulo 6

3.2 Índice de Risco Viral ARCA (IRVA)





Com os dados dos 5 níveis, o ARCA pode calcular um índice integrado de risco viral — o IRVA — que combina pressão externa (vírus + vetores) com vulnerabilidade interna (planta + solo + sementes):

Componente do IRVA	O Que Mede	Peso	Como Medir
Pressão de vetores (PV)	Densidade e diversidade de insetos vetores na área	20%	Armadilhas adesivas + contagem + MinION para identificação
Diversidade viral circulante (DV)	Número de espécies e estirpes virais nos vetores	20%	MinION direto nos vetores capturados
Taxa de mutação viral (TMV)	Velocidade de evolução das sequências virais detectadas	15%	Comparação temporal de sequências MinION
Estado do RNAi (ERNAi)	Funcionalidade das proteínas AGO e abundância de siRNA antivirais	20%	sRNA sequencing + metilação AGO com MinION
Status mineral epigenético (SME)	Disponibilidade de Zn, Se, Si, Cu no solo e na planta	15%	Metagenômica funcional + análise foliar
Memória antiviral da semente (MAS)	Presença de sRNA antivirais e hipometilação de genes AGO/PR nas sementes	10%	MinION na semente — integrado ao Módulo 6

INTERPRETAÇÃO DO IRVA

$$\text{IRVA} = (\text{PV} \times 0.20) + (\text{DV} \times 0.20) + (\text{TMV} \times 0.15) + (\text{ERNAi} \times 0.20) + (\text{SME} \times 0.15) + (\text{MAS} \times 0.10)$$

Cada componente pontuado de 0 (risco mínimo) a 10 (risco máximo)

IRVA 0.0–3.0:  BAIXO – Monitorar. Manejo preventivo básico.
IRVA 3.1–5.5:  MODERADO – Intervenção preventiva. Fortalecer RNAi.
IRVA 5.6–7.5:  ALTO – Intervenção urgente. Corrigir minerais.
IRVA 7.6–10.0:  CRÍTICO – Risco de surto. Protocolo de emergência.

3.3 Protocolo de Coleta e Análise

Armadilhas para Vetores e Vírus

1. Instalar armadilhas adesivas amarelas (40×25cm) a 30cm acima do dossel — 1 por 500m²
2. Trocar semanalmente durante períodos de risco (temperatura > 28°C + umidade > 60%)

3. Coletar insetos aderidos em tubo com tampão de preservação RNA Later
4. Extrair RNA total com TRIzol (1h)
5. Sequenciar com MinION Direct RNA Kit SQK-RNA004 (24–48h)
6. Analisar com Kraken2 + banco viral NCBI — identificar espécies e estirpes em 2h

Análise de sRNA Antivirais na Planta

7. Coletar folhas jovens (3ª folha do ápice) — 200mg — congelar imediatamente
8. Extrair small RNA com TRIzol + precipitação PEG (3h)
9. Sequenciar com MinION Direct RNA Kit (24h)
10. Analisar com ShortStack — identificar siRNA de 21–22nt antivirais
11. Verificar estado de metilação dos genes AGO1/AGO2 com Ligation Kit

Análise Mineral Epigenética do Solo

12. Coletar solo da rizosfera (0–5cm) — 250mg
13. Extrair DNA com PowerSoil Pro (2h)
14. Sequenciar metagenoma com Rapid Kit MinION (24–48h)
15. Buscar genes funcionais: znuABC (transporte Zn), selA/selB (metabolismo Se), czc (resistência/transporte Zn/Co/Cd), pcoA (cobre), bor (boro)
16. Correlacionar abundância desses genes com análise química do solo

4. ESTRATÉGIA RFS PARA RESISTÊNCIA VIRAL EPIGENÉTICA

4.1 O Protocolo de Pressão Viral Controlada

Aplicando os princípios do IIE (Módulo 9A — artigo científico) ao contexto viral: expor variedades crioulas a pressão viral controlada ao longo de gerações — com suporte mineral completo (Zn, Se, Si, Cu, B) — produz resistência epigenética herdável que supera qualquer resistência convencional baseada em gene R único.

PROTOCOLO RFS ANTIVIRAL — F1 A F4

PREREQUISITO: Garantir status mineral adequado

Solo: Zn > 1.5 mg/kg, Se > 0.1 mg/kg, Si disponível

Microbioma: *Bacillus megaterium* + *Pseudomonas* + AMF presentes

Verificar: MinION metagenômica antes de iniciar

F1 (Baseline — caracterização)

Inocular 50% das plantas com vírus local (TSWV ou Begomovírus)

Manter status mineral completo durante todo o ciclo

Sequenciar sRNA antivirais das plantas sobreviventes

Selecionar 15% com menor severidade de sintomas → sementes F2

MinION sementes: verificar depósito de sRNA antivirais maternos

F2 (1º ciclo de seleção antiviral)

Repetir inoculação + mineral completo

Comparar sRNA antivirais F2 vs F1 — devem aumentar

Verificar hipometilação crescente de AGO1/AGO2

Selecionar → sementes F3

F3 (2º ciclo — memória estabelecida)

Plântulas de F3 devem mostrar resistência ANTES da inoculação (prova de memória epigenética antiviral transgeracional)

MinION: confirmar sRNA antivirais presentes nas plântulas sem exposição ao vírus — herdados da mãe

F4 (Resistência consolidada)

> 70% das plantas sem sintomas mesmo com inoculação severa

AGO1/AGO2 hipometilados — RNAi permanentemente ativado

sRNA antivirais depositados nas sementes de forma estável

→ PUBLICAÇÃO + BANCO DE SEMENTES ANTIVIRAIS ARCA

4.2 Suporte Mineral para Maximizar Resistência Viral

Mineral	Dose Recomendada	Forma de Aplicação	Momento Crítico	Efeito Antiviral
Zinco (Zn)	2–3 kg/ha sulfato de Zn + foliar 0.3%	Solo + Foliar quinzenal	Todo o ciclo — especialmente vegetativo	AGO funcional → RNAi ativo → vírus degradado
Selênio (Se)	10–20 g/ha selenato de Na (foliar)	Foliar — baixa dose precisa	Antes de período de risco (previsão meteorológica)	HR calibrada → morte celular precisa → vírus contido
Silício (Si)	200–300 kg/ha silicato de cálcio	Solo incorporado	Antes do plantio — efeito duradouro	Parede celular reforçada → vetor não penetra + ISR ativada
Boro (B)	1–2 kg/ha bórax	Solo + foliar 0.1%	Florescimento + formação de semente	Parede celular íntegra → barreira física viral
Cobre (Cu)	1 kg/ha sulfato de Cu (baixa dose)	Solo + foliar preventivo	Início do ciclo + após chuvas	Cu/Zn-SOD ativa + lignificação reforçada
Molibdênio (Mo)	50–100 g/ha molibdato de Na	Tratamento de semente + foliar	Antes do plantio	Sinalização JA/SA equilibrada → defesa antiviral correta

4.3 Manejo da Biota para Suporte Antiviral

O microbioma do solo não apenas fornece minerais — ele induz sistemicamente resistência antiviral nas plantas através de dois mecanismos diretos:

Organismo	Mecanismo Antiviral	Como Implementar	Detectável MinION
Bacillus subtilis / amyloliquefaciens	Produz lipopeptídeos (iturina, fengicina) que ativam SAR sistêmica — incluindo resistência a vírus	Inoculante de semente + aplicação foliar	Sim — genes ituD, fenD
Pseudomonas fluorescens	Induz resistência sistêmica (ISR) via ácido salicílico + entrega Fe para AGO funcional	Inoculante de solo + semente	Sim — genes phlD, salicylate genes
AMF (Glomus/Rhizophagus)	Fornecer Zn + Mg + P + ativa via JA que protege contra vírus necrotróficos	Inoculação de solo pré-plantio	Sim — região ITS fúngica
Trichoderma	Induz expressão de genes	Inoculação de solo ou	Sim — genes

asperellum	PR e de silenciamento antiviral via JA/ET	tratamento de semente	chi18-5, swo1
Streptomyces spp.	Produz antibióticos e compostos que suprimem replicação viral em células	Incorporação via composto + inoculação	Sim — genes PKS, NRPS

5. ATUALIZAÇÃO DO PASSAPORTE EPIGENÉTICO — DIMENSÃO ANTIVIRAL

5.1 Novos Componentes do Scorecard — Módulo 9

O Passaporte Epigenético da Semente (Módulo 6) é atualizado com 3 novos genes diagnósticos antivirais — elevando o scorecard de 14 para 20 pontos:

Gene Novo	O Que Indica	Hipometilado =	Pontos
AGO1 / AGO2	Estado do sistema RNAi antiviral	RNAi pré-ativado — planta pronta para degradar RNA viral	+2
DCL2 / DCL4	Enzimas que cortam RNA viral em siRNA	Sistema de alarme antiviral em alerta	+2
RDR6	RNA-dependent RNA polymerase — amplifica a resposta RNAi	Amplificação antiviral funcionando	+2

SCORECARD EPIGENÉTICO ATUALIZADO — v2.0 (20 PONTOS)





GENES ORIGINAIS (Módulo 6) — 14 pontos:

DREB1/DREB2 (+2) | LEA (+2) | HSP70/90 (+2) | PR-1/NPR1 (+2)
FLS2/BAK1 (+2) | ABI3/DOG1 (+2) | Transposons (+2)

GENES ANTIVIRAIS NOVOS (Módulo 9) — 6 pontos:

AGO1/AGO2 (+2) | DCL2/DCL4 (+2) | RDR6 (+2)

INTERPRETAÇÃO TOTAL (0–20 pontos):

17–20 pts: TREINADA ANTIVIRAL  — imunidade completa
12–16 pts: TREINADA PARCIAL  — defesa viral incompleta
7–11 pts: VIRGEM  — sem memória antiviral
0–6 pts: TRAUMATIZADA  — investigar causa

5.2 Publicações Potenciais

Título	Periódico	IF
Biosynchronicity of Viral Resistance: Climate-Driven Cascade from Vectors to Epigenome in Tropical Crioulo Varieties	PLOS Pathogens	6.7
Zinc and Selenium as Epigenomic	Plant Cell & Environment	6.1

Regulators of Antiviral RNAi: Implications for Climate-Resilient Smallholder Agriculture		
MinION-Based Integrated Viral Risk Index (IRVA) for Real-Time Monitoring of Phytoviral Threats in Participatory Breeding Systems	Frontiers in Plant Science	5.6
Transgenerational Epigenetic Memory of Viral Resistance: siRNA Inheritance and AGO Hypomethylation in Brazilian Heirloom Seeds	Molecular Plant	12.1
UV-Driven Viral Evolution and Epigenomic Vulnerability in the Semi-Arid Northeast Brazil: A Framework for Climate-Adaptive Seed Selection	Global Change Biology	11.1