BIBLIOTECA DE SILICIO · CHILE 3.0

CAPÍTULO TÉCNICO

TOMATE EN INVERNADERO

Agua, salinidad, calor, calcio, tejidos, defensa y calidad de fruto

PROBLEMA PRODUCTIVO → FUNCIÓN → SILICIO → EVIDENCIA → CONSECUENCIA

Versión Final · Noviembre 2026



EN INVERNADERO, CONTROLAR EL AMBIENTE NO ELIMINA EL RIESGO. CAMBIA CUÁL ES EL RIESGO DOMINANTE EN CADA TEMPORADA.

TOMATE EN INVERNADERO: UNA CADENA QUE TERMINA EN FRUTO COMERCIALIZABLE

El invernadero desplaza parte de la incertidumbre climática, pero no elimina la restricción fisiológica. Agua, conductividad eléctrica, temperatura, nutrición mineral, integridad de tejidos y presión sanitaria pueden cambiar de importancia dentro del mismo ciclo. La planta sigue teniendo que sostener fotosíntesis, raíz, cuaja, llenado y condición del fruto hasta cosecha.

La evidencia disponible en tomate muestra que el silicio (Si) puede intervenir en varios de esos puntos. El objetivo de este capítulo no es enumerar respuestas aisladas, sino conectar cada problema productivo con la función comprometida, la evidencia experimental y la consecuencia que finalmente importa: rendimiento comercializable, continuidad productiva, descarte, firmeza o calidad.

RAÍZ Y AGUA → FOTOSÍNTESIS → CUAJA Y LLENADO → TEJIDOS → DEFENSA → CALIDAD → FRUTO COMERCIALIZABLE

1. TOMATE ACUMULA POCO SILICIO. ESO NO SIGNIFICA QUE NO RESPONDA

Tomate se clasifica como una especie de baja acumulación de Si en la parte aérea. El trabajo de Sun et al. demostró por qué: la raíz posee un transportador de entrada funcional, SlLsi1, pero carece de un sistema de eflujo Lsi2 funcional que permita una carga eficiente hacia el xilema. Por eso, una concentración foliar históricamente baja describe una característica de transporte; no demuestra ausencia de respuesta biológica [1].

Ese punto es importante para interpretar análisis foliares. Una planta puede tener baja acumulación total y, aun así, responder a Si disponible en momentos o tejidos donde una función está bajo presión. La suficiencia funcional no debe confundirse con la concentración típica de una especie acumuladora.

CONCENTRACIÓN FOLIAR HISTÓRICA ≠ SUFICIENCIA FUNCIONAL BAJO ESTRÉS

2. AGUA Y SALINIDAD: DOS RESTRICCIONES QUE SE SUMAN

En tomate protegido, la restricción hídrica rara vez actúa sola. Una CE elevada reduce el potencial osmótico de la solución, dificulta la absorción de agua y añade desequilibrio iónico. La combinación termina afectando apertura estomática, asimilación de CO_2, crecimiento y llenado de fruto.

En un experimento de dos temporadas con tomate de invernadero fertirrigado por goteo, Dou et al. evaluaron simultáneamente déficit de riego, salinidad y Si. El estrés combinado redujo fotosíntesis, rendimiento de fruto y rendimiento de nutrientes. La aplicación de Si elevó en promedio 12,3% el rendimiento, 11,9% la productividad del agua y entre 10,0% y 27,4% los rendimientos de nutrientes; el estudio estimó además una mejora de 21% en beneficio económico bajo las condiciones ensayadas [2].

AGUA / CE → ESTOMAS Y FOTOSÍNTESIS → LLENADO → RENDIMIENTO

En un segundo análisis del mismo sistema, la respuesta no quedó limitada a toneladas por hectárea. Bajo sequía y salinidad combinadas, la aplicación de Si produjo aumentos de rendimiento entre 6,5% y 17,7% según tratamiento y temporada, junto con cambios favorables en sólidos solubles, azúcares, vitamina C y licopeno [3]. Esto conecta una misma intervención con dos componentes distintos del resultado: cantidad de fruta y calidad de esa fruta.

3. DÉFICIT HÍDRICO: EFICIENCIA DE USO DEL AGUA SIN CONFUNDIRLA CON “AHORRO DE RIEGO”

La respuesta al Si bajo déficit hídrico debe leerse con precisión. Mejorar la eficiencia de uso del agua no significa que cualquier productor pueda reducir automáticamente el riego. Significa que, bajo determinadas condiciones experimentales, la planta produjo más biomasa o fruto por unidad de agua utilizada.

En tomate hidropónico de invernadero sometido a 100%, 85% y 70% del requerimiento hídrico, Ebrahimi et al. observaron efectos significativos del Si nanoparticulado sobre peso de fruto y eficiencia de uso del agua. La combinación 70% de riego + 50 ppm de Si aplicado a raíz alcanzó 10,97 kg/m³ de WUE frente a 6,88 kg/m³ en el tratamiento de menor desempeño, y bajo esa combinación el peso fresco del fruto aumentó 11,5% respecto del control correspondiente [4].

EL OBJETIVO NO ES "REGAR MENOS". ES CONSERVAR FUNCIÓN CUANDO EL AGUA SE CONVIERTE EN LIMITANTE.

4. CALOR: UNA RESTRICCIÓN PROPIA DEL AMBIENTE PROTEGIDO

El invernadero puede acumular temperatura precisamente cuando la planta está en etapas reproductivas sensibles. El efecto productivo no depende de una sola vía: el calor altera membranas, balance hídrico, fotosíntesis, especies reactivas de oxígeno y proteínas sensibles al estrés.

En tomate sometido a estrés térmico, Khan et al. demostraron que el Si aumentó biomasa, pigmentos fotosintéticos y contenido relativo de agua, disminuyó superóxido y malondialdehído, estimuló enzimas antioxidantes y elevó la expresión de proteínas de choque térmico y factores de transcripción Hsf [5]. La relevancia productiva es clara: el Si no "enfría" el invernadero; aumenta la capacidad de la planta para conservar función frente al calor.

CALOR → DAÑO OXIDATIVO + PÉRDIDA DE FUNCIÓN → SILICIO → MAYOR CAPACIDAD DE RESPUESTA

5. CALCIO Y BLOSSOM-END ROT: UNA RELACIÓN QUE EXIGE PRECISIÓN

Blossom-end rot (BER) se asocia a una insuficiencia localizada de Ca en el extremo distal del fruto, pero su aparición depende del movimiento de agua, crecimiento del fruto, salinidad, temperatura y competencia entre órganos. Por eso no debe reducirse a "falta de calcio en la solución".

Bajo salinidad hidropónica, Costan et al. observaron menor rendimiento, menor peso de fruto y alta incidencia de BER. La incorporación de Si a la solución nutritiva contrarrestó parte de esas pérdidas, produjo mayor rendimiento y menor incidencia de BER que el tratamiento salino sin Si [6].

En otro experimento con deficiencia moderada de Ca, la pulverización con Si hizo que las plantas se parecieran más al control con Ca suficiente, mientras que tratamientos con Ca-EDTA generaron toxicidad [7]. Estudios posteriores mostraron además que el Si puede conservar fotosíntesis y disminuir daño oxidativo bajo bajo Ca [8].

SILICIO NO REEMPLAZA AL Ca. PUEDE AYUDAR A CONSERVAR FUNCIÓN CUANDO EL SISTEMA QUE ENTREGA Ca AL FRUTO ESTÁ BAJO PRESIÓN.

6. FIRMEZA: CUANDO LA PARED CELULAR PASA A SER UNA VARIABLE PRODUCTIVA

La firmeza no es un atributo aislado de poscosecha. Se construye durante el desarrollo del fruto y depende de pared celular, pectinas, actividad enzimática y regulación hormonal. Si esa arquitectura se debilita demasiado rápido, aumenta la sensibilidad a manipulación y se acorta la ventana comercial.

Wang et al. estudiaron directamente metabolismo de pared celular en tomate y encontraron que 1,2 mmol/L de Si mejoró la firmeza, redujo la actividad de enzimas de degradación de pared y disminuyó producción de etileno, extendiendo el potencial de vida útil [9]. En el ensayo hidropónico de Costan et al., la aplicación pre y poscosecha de Si también mantuvo mejor la firmeza tras almacenamiento [6].

PARED CELULAR → FIRMEZA → CONDICIÓN → MENOR PÉRDIDA DE VALOR DESPUÉS DE PRODUCIR EL FRUTO

7. CALIDAD DE FRUTO: LA RESPUESTA NO SE REDUCE A °BRIX

La calidad en tomate integra peso individual, firmeza de piel, color, sólidos solubles, azúcares, vitamina C, carotenoides, aminoácidos y perfil aromático. La evidencia con Si muestra que varios de estos atributos pueden cambiar, pero no siempre en la misma dirección ni con la misma dosis.

En tomate cultivado en sustrato, Wang et al. observaron que 1,2 mmol/L de Si foliar aumentó peso individual y firmeza de piel, elevó azúcares, sólidos solubles, proteína soluble y vitamina C, y aumentó licopeno y luteína en fruto rojo [10]. Otro trabajo reciente mostró cambios en ácidos orgánicos, azúcares, polifenoles y compuestos volátiles, reforzando la idea de que la respuesta de calidad es metabólica y dependiente de concentración [11].

EL SILICIO NO "FABRICA CALIDAD" DE UNA SOLA FORMA. MODULA PROCESOS QUE PUEDEN EXPRESARSE EN ATRIBUTOS COMERCIALES DISTINTOS.

8. ÁCIDO MONOSILÍCICO Y AOS: EVIDENCIA DIRECTA EN TOMATE

Para un capítulo técnico importa distinguir mecanismo del elemento y evidencia de forma química. En tomate existen estudios donde se trabajó directamente con ácido mono/ortosilícico estabilizado.

Kleiber et al. evaluaron ácido ortosilícico estabilizado con colina en tomate cultivado en lana de roca bajo estrés por Mn. El tratamiento modificó la actividad fotosintética y mejoró significativamente el rendimiento comercial bajo el nivel menor de estrés por Mn, demostrando que una forma biodisponible de Si puede expresarse en una variable productiva [12].

En otro ensayo de invernadero que comparó distintas fuentes foliares, la aplicación de 0,4 g/L de Si proveniente de ácido monosilícico produjo los mayores aumentos de ácido ascórbico, acidez titulable y firmeza del fruto entre las fuentes y concentraciones evaluadas [13].

FORMA BIODISPONIBLE → RESPUESTA FISIOLÓGICA → FRUTO

9. DEFENSA INDUCIDA: EL SILICIO NO ES UN FUNGICIDA

La lectura sanitaria del Si debe evitar dos errores: presentarlo como sustituto universal de fungicidas o reducir su efecto a una barrera física. En tomate existe evidencia de priming y activación de defensas.

Frente a Alternaria solani, Gulzar et al. observaron retraso de síntomas y menor severidad en plantas suplementadas con Si. La respuesta incluyó mayor expresión de genes asociados a jasmonato, salicilato y etileno, además de mayor actividad de SOD, CAT, APX, GR y peroxidasa [14].

Para Ralstonia solanacearum, estudios recientes muestran reducción de marchitez bacteriana bajo invernadero y campo, aumento de biomasa y rendimiento y activación de enzimas defensivas [15]. Otra investigación 2026 encontró menor índice de severidad junto con modulación de estrés oxidativo y genes de defensa [16].

PATÓGENO → RECONOCIMIENTO Y DEFENSA → SILICIO → MENOR VULNERABILIDAD DEL SISTEMA

La consecuencia agronómica no es "eliminar tratamientos sanitarios". Es disponer de una capa adicional de protección fisiológica que puede modificar la severidad o la velocidad con que se instala el daño. La racionalización de programas sólo puede decidirse sobre evidencia local y resultado medido.

10. DE LA FISIOLOGÍA AL RESULTADO COMERCIAL

Problema productivo	Función comprometida	Respuesta asociada al silicio	Evidencia
Déficit hídrico	Estomas, fotosíntesis, WUE	Mayor eficiencia fisiológica y uso del agua	Directa en tomate de invernadero
Salinidad / CE	Agua, iones, fotosíntesis	Mayor rendimiento y productividad bajo estrés	Directa, dos temporadas
Calor	Membranas, ROS, proteínas	Antioxidantes + HSP/Hsf + mayor RWC	Directa en tomate

Ca / BER	Entrega de Ca, integridad distal	Menor sensibilidad a bajo Ca / menor BER en salinidad	Directa en tomate
Firmeza	Pared celular, etileno	Menor degradación y mayor firmeza	Directa en fruto
Calidad	Azúcares, pigmentos, metabolitos	Cambios en sólidos, vitamina C, carotenoides	Directa en fruto
Alternaria	Defensa inducida	PR/JA/SA/ET + enzimas antioxidantes	Directa en tomate
Ralstonia	Defensa + estrés oxidativo	Menor marchitez y mayor rendimiento	Directa, incluye campo
AOS / ácido monosilícico	Disponibilidad de Si	Fotosíntesis, rendimiento comercial, firmeza	Directa en tomate

11. EL ORDEN IMPORTA: NO TODAS LAS RESPUESTAS TIENEN EL MISMO PESO

Para un asesor, la pregunta no es cuántas respuestas del silicio existen en la literatura, sino cuál de ellas coincide con la restricción real del invernadero. La lógica del Tonel de Liebig ayuda a ordenar esta lectura: el resultado del sistema queda condicionado por su factor más limitante, y esa “tabla más corta” puede cambiar dentro de una misma temporada. Un ciclo con agua de alta CE no debe analizarse igual que uno limitado por calor, BER, firmeza o presión sanitaria.

MULTI significa que una misma herramienta participa en distintas funciones que pueden convertirse, en momentos diferentes, en la restricción dominante del sistema. No significa esperar que todas mejoren simultáneamente ni sumar cada mecanismo como si fuera un beneficio económico independiente. La tabla más corta puede cambiar; el resultado que buscamos proteger sigue siendo el mismo.

DISTINTOS DESAFÍOS. UNA MISMA HERRAMIENTA. UNA SOLA CONTABILIDAD DEL RESULTADO.

12. VENTANAS FISIOLÓGICAS DE INTERÉS

Este capítulo no reemplaza un protocolo. La evidencia sí permite reconocer momentos en que disponer de Si tiene mayor lógica fisiológica:

- Construcción de raíz y canopia: preparar absorción, balance hídrico y capacidad fotosintética antes de la máxima demanda.
- Prefloración, floración y cuaja: sostener función en una etapa sensible a calor, estrés osmótico y desequilibrios.
- Crecimiento y llenado de fruto: etapa crítica para agua, entrega de Ca, pared celular, peso y condición.
- Producción continua: conservar follaje funcional y responder a CE, calor y presión sanitaria durante ciclos largos.
- Antes de períodos previsibles de estrés: la lógica de priming requiere capacidad defensiva antes de que el daño sea irreversible.

EL VALOR DEL PRIMING ESTÁ EN PREPARAR LA RESPUESTA ANTES DE QUE EL DAÑO SEA IRREVERSIBLE.

13. LECTURA TERRITORIAL PARA CHILE

La misma estructura de invernadero puede enfrentar restricciones distintas según ubicación, agua y época de producción. En zonas del Norte Chico puede dominar la interacción entre salinidad, calidad del agua y demanda evaporativa. En la zona central interior, el calor y la acumulación térmica del invernadero pueden desplazar la restricción hacia fotosíntesis, cuaja y estrés oxidativo. En sectores costeros o ciclos de mayor humedad, la presión sanitaria puede ganar peso.

La decisión técnica no debería partir de “qué beneficio del silicio quiero obtener”, sino de “qué función está limitando hoy este sistema”. Esa lectura territorial permite priorizar el uso de una herramienta transversal sin convertirla en una promesa uniforme para todos los invernaderos.

14. PREGUNTAS PARA EL ASESOR TÉCNICO

- ¿Dónde se está perdiendo producción comercializable: agua/CE, calor, BER, firmeza, sanidad o calidad?
- ¿La restricción aparece en toda la temporada o en una ventana específica?

- ¿La información disponible sobre CE, drenaje, temperatura y descarte permite identificar dónde se está perdiendo función y valor?
- ¿El resultado se está leyendo como rendimiento total o como fruta realmente comercializable?
- ¿La principal pérdida de valor del fruto está en BER, firmeza, calibre, sólidos solubles, vida útil u otra condición comercial?
- ¿La presión sanitaria dominante coincide con patógenos o mecanismos donde existe evidencia directa de respuesta al silicio?
- ¿El programa permite integrar una fuente de silicio sin crear una operación innecesaria?

15. ¿HEMOS EVALUADO SERIAMENTE EL USO DE SILICIO EN ESTE INVERNADERO?

No usar silicio puede ser una decisión técnica perfectamente válida cuando las restricciones del invernadero no justifican su incorporación. Lo importante es que la decisión se tome desde la fisiología y el sistema productivo real, no desde la idea histórica de que el tomate acumula poco silicio. Si agua/CE, calor, bajo Ca/BER, firmeza, calidad o defensa están comprometiendo fruta comercializable, existe una base técnica suficiente para considerar una herramienta transversal dentro del programa.

¿TENGO JUSTIFICACIONES TÉCNICAS PARA NO USARLO ESTE AÑO?

16. CONCLUSIÓN

Tomate en invernadero es un sistema intensivo donde la restricción dominante puede desplazarse varias veces dentro del mismo ciclo. La evidencia disponible conecta al silicio con estado hídrico, salinidad, termotolerancia, fotosíntesis, bajo Ca/BER, pared celular, firmeza, calidad del fruto y defensa inducida. Además, existen trabajos directos en tomate con ácido mono/ortosilícico estabilizado que vinculan una forma biodisponible de silicio con actividad fotosintética, rendimiento comercial y atributos de firmeza.

La fortaleza del argumento no está en afirmar que todas esas respuestas ocurrirán juntas. Está en reconocer, siguiendo la lógica del Tonel de Liebig, que la tabla más corta cambia: una temporada puede quedar limitada por agua o CE; otra por calor; otra por BER, firmeza, sanidad o calidad. Una herramienta fisiológicamente transversal conserva relevancia porque participa en diferentes puntos de esa cadena sin depender de acertar una única amenaza.

En un cultivo protegido, el ambiente puede controlarse, pero la planta sigue teniendo que convertir agua, carbono, calcio, tejidos funcionales y defensa en fruta comercializable durante ciclos largos. Por eso la lectura final no debería reducirse a rendimiento bruto. Importa cuánta fruta llega con peso, integridad, firmeza, calidad y condición suficiente para conservar valor.

MULTI no multiplica el mismo beneficio: multiplica las vías por las que una misma inversión puede proteger el resultado cuando cambia la restricción dominante.

NO SABEMOS DÓNDE VA A ESTAR EL PROBLEMA ESTA TEMPORADA. EL SILICIO PREPARA LA PLANTA PARA LO QUE VENGA.

BIBLIOGRAFÍA CIENTÍFICA

[1] Sun, H. et al. (2020). Tomato roots have a functional silicon influx transporter but not a functional silicon efflux transporter. Plant, Cell & Environment 43:732–744. DOI: 10.1111/pce.13679.

[2] Dou, Z. et al. (2023). Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. Agricultural Water Management 289:108526. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108526.

[3] Dou, Z. et al. (2023). Exogenous silicon application improves fruit yield and quality of drip-irrigated greenhouse tomato under combined drought and salt stress. Scientia Horticulturae 321:112352.

[4] Ebrahimi, H. et al. (2024). Evaluation the impact of silicon nanoparticle on growth and water use efficiency of greenhouse tomato in drought stress condition. Applied Water Science 14:196. DOI: 10.1007/s13201-024-02256-6.

[5] Khan, A. et al. (2020). Silicon-induced thermotolerance in Solanum lycopersicum L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. BMC Plant Biology 20:248. DOI: 10.1186/s12870-020-02456-7.

[6] Costan, A., Stamatakis, A., Chrysargyris, A., Petropoulos, S.A. & Tzortzakis, N. (2020). Interactive effects of salinity and silicon application on tomato growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. Journal of the Science of Food and Agriculture 100:732–743. DOI: 10.1002/jsfa.10076.

[7] de Souza Alonso, T.A. et al. (2020). Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants, but Ca-EDTA is toxic. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 183:659–664. DOI: 10.1002/jpln.202000055.

[8] Li, Z., Liu, Z., Yue, Z., Wang, J., Jin, L., Xu, Z., Jin, N., Zhang, B., Lyu, J. & Yu, J. (2022). Application of Exogenous Silicon for Alleviating Photosynthetic Inhibition in Tomato Seedlings under Low-Calcium Stress. International Journal of Molecular Sciences 23:13526. DOI: 10.3390/ijms232113526.

[9] Wang, J. et al. (2024). Effect of exogenous silicon treatments on cell wall metabolism and textural properties of tomato fruits. Scientia Horticulturae 336:113407. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113407.

[10] Wang, L. et al. (2024). Improvements in the Appearance and Nutritional Quality of Tomato Fruits Resulting from Foliar Spraying with Silicon. Foods 13:223. DOI: 10.3390/foods13020223.

[11] Yang, Y., Zhu, W., Jin, N., Liu, W., Lie, Y., Wang, L., Jin, L., Wang, S., Yu, J. & Lyu, J. (2024). Exogenous silicon applied at appropriate concentrations is effective at improving tomato nutritional and flavor qualities. Food Chemistry: X 22:101306. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101306.

[12] Kleiber, T., Calomme, M. & Borowiak, K. (2015). The effect of choline-stabilized orthosilicic acid on microelements and silicon concentration, photosynthesis activity and yield of tomato grown under Mn stress. Plant Physiology and Biochemistry 96:180–188. DOI: 10.1016/j.plaphy.2015.07.033.

[13] Biofortification of tomato with stabilized alkaline silicate and silicic acid, nanosilica, and potassium silicate via leaf increased ascorbic acid content and fruit firmness (2022). Journal of Plant Nutrition 45:896–903. DOI: 10.1080/01904167.2021.1994599.

[14] Gulzar, N., Ali, S., Shah, M.A. & Kamili, A.N. (2021). Silicon supplementation improves early blight resistance in Lycopersicon esculentum Mill. by modulating the expression of defense-related genes and antioxidant enzymes. 3 Biotech 11:232. DOI: 10.1007/s13205-021-02789-6.

[15] Antibacterial activity of different silicon sources against Ralstonia solanacearum of tomato (2026). Physiological and Molecular Plant Pathology, article 103599. DOI: 10.1016/j.pmpp.2026.103599.

[16] Silicon dioxide nanoparticles and potassium silicate mitigate tomato bacterial wilt and modulate oxidative stress and host defense responses (2026). Physiological and Molecular Plant Pathology 146:103494.