BIBLIOTECA DE SILICE

CAPÍTULO CT-NG

TRIGO EN ARGENTINA

Argentina y ambientes de secano comparables

Agua · déficit hídrico · ácido ortosilícico · rendimiento · calidad · sanidad

Documento técnico · Versión 2.0 · Multitransversalidad y protección multivía

Equipo Técnico I+D · NewGreen · Septiembre 2026

NO SE TRATA DE ESPERAR MÁS AGUA. SE TRATA DE CONSEGUIR QUE EL TRIGO CONVIERTA MEJOR EN GRANO EL AGUA QUE RECIBE Y QUE PIERDA MENOS POTENCIAL CUANDO EL AMBIENTE SE COMPLICA.

Resumen ejecutivo

El trigo argentino se produce mayoritariamente en secano y, por lo tanto, una parte sustantiva de su rendimiento depende de la precipitación y del agua almacenada en el perfil. En la Región Semiárida Pampeana, una base de 138 ensayos mostró un uso consuntivo medio cercano a 319 mm y una fuerte dependencia de la lluvia durante el ciclo; en años secos, el agua almacenada antes de la siembra puede transformarse en una fracción decisiva del consumo total (Bono et al., 2017). Los 28 años del módulo de riego de INTA Manfredi muestran la otra cara del mismo problema: cuando el agua dejó de ser la principal limitante, el trigo irrigado produjo en promedio 115% más que el secano.

El momento del déficit importa tanto como su magnitud. En ensayos de campo del Néguev israelí, el estrés desde macollaje hasta antesis redujo 28% el rendimiento, desde encañado/embuche hasta llenado 36% y durante llenado 16% (Shimshi & Kafkafi, 1982). En China, un déficit moderado redujo el rendimiento 9,59% en encañado, 13,9% en antesis y 18,9% en llenado; cuando se aplicó silicio foliar, la respuesta productiva fue de +5,71% en antesis y +8,9% en llenado (Ning et al., 2023). La traducción agronómica es simple: una misma cantidad de agua no tiene el mismo valor si falta en momentos diferentes.

La evidencia directa con ácido ortosilícico es especialmente relevante porque ya no depende de extrapolar resultados obtenidos sólo con silicatos. En UNESP, Botucatu, un ensayo de campo con 14 repeticiones y una formulación foliar estabilizada de ácido ortosilícico aumentó 26,9% el rendimiento de trigo, junto con mayor materia seca y más espigas por metro cuadrado (Soratto et al., 2012). En Faisalabad, Pakistán, un ensayo de campo bajo déficit hídrico comparó distintas fuentes foliares y encontró que el ácido ortosilícico fue la fuente más eficaz del estudio, con aproximadamente +12% en masa de grano frente al tratamiento estresado sin Si (Khalid et al., 2022). En Polonia, dos campañas de trigo primaveral mostraron que una formulación líquida de ácido ortosilícico llevó el rendimiento

desde 3,88 t/ha a 4,84 t/ha por vía foliar (+24,7%) y a 4,97 t/ha con aplicación combinada suelo + follaje (+28,1%) (Kowalska et al., 2021).

La evidencia de ambientes con restricción hídrica amplía esa conclusión. En Australia, reducir la lluvia al 50% disminuyó 18% la producción de grano; la suplementación con silicio restauró la producción del trigo estresado hasta niveles comparables con el tratamiento de precipitación ambiente y aumentó 32–74% la eficiencia instantánea de uso del agua (Johnson et al., 2022). En Irán, dos campañas de campo con 60% del requerimiento hídrico mostraron +16% y +24% de rendimiento con silicio (Saleh & Soliemanzadeh, 2026). En Sudáfrica, la respuesta cambió fuertemente según genotipo y formulación, mostrando que el silicio puede tener un efecto productivo muy grande en ciertos materiales, pero que no existe un porcentaje universal (Christian et al., 2023).

El valor del silicio en trigo, sin embargo, no termina en sequía ni en kilogramos. La evidencia muestra respuestas desde la raíz hasta la canopia: mayor desarrollo radical bajo déficit, mejor estado hídrico y fotosíntesis, menor población de pulgones, mayor resistencia mecánica del tallo y menor severidad de Fusarium head blight dentro de manejo integrado. También existe evidencia frente a congelamiento y sobre composición del grano dependiente de genotipo. En 2025/26, además, Argentina obtuvo rendimiento récord pero una calidad proteica baja en muchas zonas, recordando que el valor comercial del trigo no se explica únicamente por toneladas.

EL VALOR DEL ÁCIDO ORTOSILÍCICO NO DEBE MEDIRSE SOLAMENTE POR LO QUE PUEDE SUMAR. TAMBIÉN DEBE MEDIRSE POR CUÁNTO POTENCIAL PRODUCTIVO PUEDE AYUDAR A NO PERDER POR AGUA, ESTRUCTURA, CALIDAD O PRESIÓN BIÓTICA.

1. Trigo argentino: producir con el agua disponible

Argentina posee una extensa tradición de trigo bajo secano. En estos sistemas, la disponibilidad real de agua surge de la combinación entre precipitaciones durante el ciclo, agua almacenada antes de la siembra, profundidad efectiva de raíces, textura y estructura del suelo, cobertura, temperatura y demanda atmosférica. El productor no controla la lluvia; sí puede manejar una parte importante de la capacidad del cultivo para convertir el agua disponible en biomasa, espigas y grano.

Bono et al. (2017), a partir de 138 ensayos distribuidos en la Región Semiárida Pampeana durante más de una década, estimaron un uso consuntivo medio cercano a 319 mm. En promedio, alrededor de 90% del agua utilizada por el cultivo provino de precipitaciones ocurridas durante el ciclo, pero en años secos el agua almacenada en el suelo antes de la siembra pudo aportar hasta aproximadamente una cuarta parte del consumo. Esa reserva no es un dato secundario: puede definir cuánto estrés atraviesa el cultivo antes de que llegue la próxima lluvia.

Los 28 años del módulo de riego de INTA Manfredi permiten dimensionar el costo de la limitación. La precipitación media anual regional fue cercana a 757 mm y alrededor de 80% ocurre entre octubre y

marzo, fuera de gran parte del ciclo del trigo. En ese sistema, el riego suplementario elevó el rendimiento del trigo 115% respecto del secano. El dato no implica transformar el trigo argentino en un cultivo irrigado; cuantifica cuánto potencial puede quedar condicionado por el agua.

EL PRODUCTOR DE SECANO NO CONTROLA CUÁNTO VA A LLOVER. LA OPORTUNIDAD ES CONSEGUIR QUE CADA MILÍMETRO DISPONIBLE TENGA EL MAYOR VALOR PRODUCTIVO POSIBLE.

2. El momento de la sequía define cuánto rendimiento está en riesgo

La restricción hídrica no vale lo mismo en todas las etapas. El trigo puede compensar parcialmente una limitación temprana, pero esa capacidad disminuye cuando el estrés coincide con etapas reproductivas y de llenado. La razón productiva es concreta: en ese período se define cuántas espigas y flores efectivas terminan formando granos y cuánto peso alcanza cada grano.

Shimshi y Kafkafi (1982) impusieron déficits severos en trigo cultivado en el Néguev de Israel. El estrés desde macollaje hasta antesis redujo 28% el rendimiento. El estrés desde encañado/embuche hasta llenado provocó la mayor caída, 36%. Cuando la restricción se concentró en llenado, el rendimiento cayó 16%. El experimento fue irrigado y el déficit fue impuesto experimentalmente; su valor para Argentina está en la sensibilidad por etapa, no en presentarlo como un ensayo de secano.

La relevancia climática de Gilat se refuerza con otra serie de diez años en trigo bajo ambiente árido mediterráneo. Amir et al. (1991) trabajaron con una precipitación anual media de 231 ± 70 mm, concentrada durante la estación de crecimiento, y una evaporación de tanque Clase A superior a 500 mm. Es un ambiente muy distinto a la Pampa húmeda, pero extremadamente útil para comprender eficiencia de uso del agua en sistemas donde la oferta hídrica es estructuralmente limitada.

Ning et al. (2023) confirmaron el mismo principio con un diseño moderno. El déficit moderado redujo el rendimiento 9,59% en encañado, 13,9% en antesis y 18,9% durante llenado. Cuando el mismo estrés estuvo acompañado por silicio foliar, el rendimiento aumentó 5,71% en antesis y 8,9% durante llenado respecto del trigo estresado sin silicio. La respuesta durante encañado fue menor y no significativa.

NO BASTA PREGUNTAR CUÁNTA AGUA FALTÓ. HAY QUE PREGUNTAR CUÁNDO FALTÓ Y CUÁNTO RENDIMIENTO ESTABA CONSTRUYENDO EL CULTIVO EN ESE MOMENTO.

3. Qué ocurre dentro de la planta cuando falta agua

La fisiología necesaria para interpretar estos resultados puede resumirse en una cadena. Cuando disminuye el agua disponible, baja el potencial hídrico del tejido, cambia la conductancia estomática y se reduce la entrada de CO2. Si la restricción persiste, cae la fotosíntesis, aumenta el daño oxidativo

y se acelera la pérdida de membranas y clorofila funcional. El cultivo puede sobrevivir y, al mismo tiempo, perder rendimiento.

Ning et al. (2023) observaron bajo déficit reducciones de materia seca, contenido relativo de agua, fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración, junto con una alteración del sistema antioxidante y aumento de indicadores de estrés oxidativo. La suplementación con silicio mejoró especialmente el contenido relativo de agua, clorofila y fotosíntesis durante las etapas reproductivas y disminuyó peroxidación de membranas.

Johnson et al. (2022) aportan una pieza distinta. Bajo lluvia reducida a la mitad, la suplementación con silicio aumentó hasta 73% la biomasa aérea y 32–74% la eficiencia instantánea de uso del agua, dependiendo de la dosis. Esto no significa que la planta 'fabrique agua'. Significa que, bajo la misma lluvia, pudo sostener mejor su funcionamiento y convertir una mayor fracción del ambiente disponible en biomasa y grano.

4. Raíces: acceder al agua que ya existe en el perfil

En secano, la disponibilidad hídrica no depende sólo de la lluvia que cae durante el ciclo. También depende de la capacidad del sistema radical para explorar el perfil y sostener la absorción cuando las capas superficiales comienzan a secarse. Por eso, una estrategia de tolerancia al déficit no puede analizarse únicamente desde la hoja: la primera limitación se expresa en la interfaz raíz-suelo.

Ashfaq, Brodie, Fuentes, Pang y Gupta (2024) estudiaron dos cultivares contrastantes de trigo, RAC875 —más tolerante a sequía— y Kukri —más susceptible—, bajo condiciones controladas de déficit hídrico. El tratamiento con Si incrementó de forma significativa la arquitectura radical. Bajo sequía, Kukri aumentó 44% la longitud de raíz primaria y 28,1% la longitud de raíces laterales; RAC875 aumentó 35,2% la longitud de raíz primaria. También se registraron mejoras en longitud radical total y número de ápices.

La importancia del trabajo está en que la respuesta radical se conectó con la parte aérea. Con Si, ambos cultivares sostuvieron mejor la fotosíntesis, la conductancia estomática y la transpiración bajo déficit. La temperatura de canopia disminuyó 4,24% en Kukri y 6,15% en RAC875, mientras mejoraron los índices térmicos asociados a estado hídrico. La interpretación de los autores es que una raíz funcionalmente más desarrollada puede sostener mejor la adquisición de humedad y nutrientes y, con ello, una canopia fisiológicamente más activa durante la restricción.

El experimento se realizó en invernadero y durante etapas tempranas, por lo que no corresponde convertir esos porcentajes de crecimiento radical en una promesa directa de rendimiento a campo. Su valor es mecanístico: demuestra que el efecto del Si puede comenzar bajo tierra y explicar parte de las respuestas de fotosíntesis, estado hídrico y producción observadas posteriormente en ensayos de campo.

EN TRIGO DE SECANO, NO TODO EL VALOR ESTÁ EN HACER RENDIR MEJOR EL AGUA QUE LLEGA A LA HOJA. TAMBIÉN ESTÁ EN SOSTENER UN SISTEMA RADICAL CAPAZ DE ACCEDER A UNA MAYOR FRACCIÓN DEL AGUA QUE YA EXISTE EN EL PERFIL.

5. ¿Dónde entra el silicio?

El trigo pertenece a Poaceae y tiene una capacidad alta de incorporar silicio. La forma absorbida desde la solución es H4SiO4, ácido ortosilícico. Una vez ingresado, el silicio puede depositarse en tejidos y también participar en respuestas fisiológicas y bioquímicas que no se explican únicamente por una barrera física.

La literatura en trigo describe respuestas sobre estado hídrico, intercambio gaseoso, actividad antioxidante, integridad de membranas, lignificación, arquitectura y resistencia mecánica del tallo, interacción con nutrientes y defensas frente a patógenos e insectos. La magnitud cambia con genotipo, fuente, dosis, ambiente y momento de aplicación.

Esta variabilidad no invalida el efecto del elemento. La hace agronómicamente más interesante: muestra que la respuesta final surge de la interacción entre la herramienta y el problema que el cultivo enfrenta. En un año puede expresarse principalmente como rendimiento bajo sequía; en otro como estabilidad estructural; en otro como menor presión biótica o mejor calidad.

6. Argentina: evidencia directa de disponibilidad y absorción

Frayssinet, Osterrieth, Borrelli, Fernández Honaine, Ciarlo y Heiland (2019) evaluaron a campo dos fuentes de fertilizante silicatado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. El estudio analizó silicio disponible en suelo, contenido de silicio en el trigo y variables edáficas.

Durante el ensayo, el contenido de silicio del trigo aproximadamente se duplicó. También se observaron relaciones entre silicio disponible y fósforo y efectos modestos sobre propiedades físicas del suelo. El valor del trabajo para esta Colección no está en atribuirle un gran salto de rendimiento que el estudio no demostró; está en mostrar experimentalmente que, en suelo agrícola argentino, la fertilización puede modificar el silicio disponible y el silicio incorporado por el trigo.

Esto es importante frente a un argumento frecuente: 'nuestros suelos ya tienen mucho silicio'. El silicio total del suelo y el ácido ortosilícico disponible para la planta no son la misma variable. Un suelo puede contener grandes cantidades de silicio estructural y, al mismo tiempo, mantener una concentración mucho menor de la forma que efectivamente entra a la planta.

MUCHO SILICIO TOTAL EN EL SUELO NO SIGNIFICA MUCHO ÁCIDO ORTOSILÍCICO DISPONIBLE PARA EL CULTIVO.

7. Ácido ortosilícico: evidencia directa de campo en trigo

La evidencia con ácido ortosilícico merece un bloque propio porque responde a una pregunta tecnológica distinta de la evidencia general con silicio: si la planta absorbe Si principalmente como

H_4SiO_4, ¿puede una estrategia que entrega directamente esa forma producir respuestas agronómicas medibles en trigo? Los ensayos de Brasil, Pakistán y Polonia permiten responder afirmativamente, aunque cada uno evalúa ambientes y objetivos diferentes.

7.1. Brasil: 14 repeticiones y +26,9% de rendimiento

Soratto, Crusciol, Castro, Costa y Ferrari Neto (2012), de la Universidade Estadual Paulista (UNESP), realizaron un ensayo de campo durante el invierno de 2008 en Botucatu, São Paulo. El diseño utilizó 14 repeticiones y comparó un control sin Si con una formulación foliar estabilizada de ácido ortosilícico. El programa aplicó 2,0 L/ha del producto comercial, que contenía 0,8% de Si soluble, dividido entre macollaje, diferenciación floral y encañado/embuche.

En trigo, la aplicación aumentó la concentración de K y Si en tejido, la materia seca de la parte aérea y el número de espigas por metro cuadrado. El resultado final fue un aumento de 26,9% en rendimiento de grano frente al control. El ensayo fue irrigado y las plagas y enfermedades fueron controladas, por lo que no debe presentarse como una prueba de mitigación de sequía. Su fuerza es demostrar, bajo condiciones de campo y con alta repetición experimental, que una estrategia foliar de ácido ortosilícico puede mover variables centrales de rendimiento.

7.2. Pakistán: ácido ortosilícico foliar bajo déficit hídrico

Khalid, Nawaz, Iqbal y Ashraf (2022) trabajaron a campo en el Ayub Agriculture Research Institute de Faisalabad con el cultivar Faisalabad-08. Compararon ácido ortosilícico, silicato de potasio y silicato de sodio por vía foliar bajo riego normal y déficit hídrico. El tratamiento seco recibió únicamente la precipitación de la campaña, mientras que el manejo normal incluyó riegos adicionales.

La concentración de 0,1 mM de ácido ortosilícico fue la fuente más eficaz del estudio para aliviar el déficit. Bajo restricción hídrica aumentó aproximadamente 12% el área foliar, 23% la biomasa y 12% la masa de grano frente al tratamiento estresado sin Si, junto con mejoras de fotosíntesis y variables de intercambio gaseoso. Es importante mantener la precisión: el trabajo informa un aumento de masa de grano, no una estimación comercial universal de +12% t/ha.

7.3. Polonia: dos campañas con una formulación líquida de ácido ortosilícico

Kowalska, Tyburski, Jakubowska y Krzymińska (2021) evaluaron trigo primaveral durante 2017 y 2018 en un sistema de producción orgánica. El ensayo comparó una fuente en polvo y una formulación líquida de ácido ortosilícico, aplicadas al suelo, al follaje o mediante una estrategia combinada.

El control produjo 3,88 t/ha. Con la formulación líquida, la aplicación al suelo alcanzó 4,49 t/ha; la vía foliar 4,84 t/ha (+24,7%); y la combinación suelo + follaje 4,97 t/ha (+28,1%). Las diferencias de la aplicación foliar y combinada fueron estadísticamente significativas frente al control. El estudio también registró más espigas y mejor crecimiento con la forma líquida.

La fuente en polvo aplicada de forma combinada también produjo una respuesta alta, lo que refuerza el valor general del Si y evita una lectura artificial de competencia entre fuentes. Para nuestro objetivo, lo importante es que la formulación líquida de ácido ortosilícico produjo respuestas de campo claras durante dos campañas, con dosis muy bajas de producto respecto de materiales minerales tradicionales.

Ensayo	Condición	Ácido ortosilícico	Respuesta principal	Lectura
UNESP · Brasil	Campo irrigado · 14 repeticiones	Foliar estabilizado · 2,0 L/ha producto	Rendimiento +26,9%; más materia seca y espigas/m²	Evidencia directa de rendimiento en trigo de campo.
AARI · Pakistán	Campo · déficit hídrico	0,1 mM foliar	Masa de grano ~+12%; biomasa +23%	Evidencia directa bajo restricción hídrica; masa de grano, no promesa de t/ha.
Polonia · 2017-2018	Campo · producción orgánica	Líquido · foliar	3,88 → 4,84 t/ha (+24,7%)	Dos campañas; respuesta estadísticamente significativa.
Polonia · 2017-2018	Campo · producción orgánica	Líquido · suelo + foliar	3,88 → 4,97 t/ha (+28,1%)	Mayor respuesta de la formulación líquida en el programa combinado.

La convergencia de estos trabajos es más importante que una cifra aislada. Tres países, diferentes sistemas productivos y distintos niveles de estrés muestran que el ácido ortosilícico puede modificar componentes de rendimiento y resultado final en trigo. La magnitud no debe venderse como fija; la dirección productiva sí merece formar parte de la discusión técnica.

LAS FUENTES TRADICIONALES DEMOSTRARON QUE EL SILICIO FUNCIONA. LA EVIDENCIA DIRECTA CON ÁCIDO ORTOSILÍCICO DEMUESTRA QUE TAMBIÉN ES POSIBLE OBTENER RESPUESTAS PRODUCTIVAS IMPORTANTES CON UNA ENTREGA FOLIAR DE BAJA CARGA MATERIAL.

8. Australia: lluvia reducida y recuperación del rendimiento

Johnson, Chen, Rowe y Tissue (2022) realizaron uno de los ensayos de campo más útiles para interpretar trigo de secano. Utilizaron refugios de exclusión de lluvia y compararon precipitación ambiente con una condición de sequía equivalente al 50% de la lluvia ambiental.

Promediando los tratamientos de silicio, la sequía redujo 21% la biomasa aérea y 18% la producción de grano. La suplementación con silicio aumentó la biomasa hasta 73% bajo sequía y restauró la producción de grano de las plantas estresadas a niveles comparables con las plantas bajo precipitación ambiente.

La eficiencia instantánea de uso del agua a nivel foliar aumentó entre 32% y 74%, según la dosis. Para nuestro enfoque, éste es el resultado central: al tratamiento seco no se le agregó más lluvia. Se modificó la capacidad del cultivo para sostener funcionamiento y rendimiento bajo la misma restricción.

Los propios autores advierten que los rendimientos extrapolados desde las parcelas experimentales fueron superiores al rendimiento mediano del trigo australiano de secano. Esa limitación debe

respetarse. Aun así, la comparación interna del ensayo es fuerte porque el efecto se midió en campo y con manipulación directa de lluvia.

9. China: el silicio importa especialmente cuando importa el agua

Ning et al. (2023), de la Chinese Academy of Agricultural Sciences, evaluaron silicio foliar frente a déficit impuesto en encañado, antesis y llenado. La respuesta productiva no fue igual en las tres etapas.

Bajo déficit en antesis, el silicio aumentó 5,71% el rendimiento frente al tratamiento estresado sin silicio. Durante llenado, la respuesta fue +8,9%. Durante encañado, el aumento fue menor y no significativo. Esto es especialmente útil para el manejo: la respuesta de una herramienta fisiológica depende de cuánto rendimiento está en riesgo cuando ocurre el estrés.

Las mejoras productivas estuvieron acompañadas por mayor contenido relativo de agua, clorofila, fotosíntesis y actividad antioxidante, y por menor acumulación de especies reactivas de oxígeno. El resultado conecta mecanismo y cosecha.

10. Irán: dos campañas bajo fuerte restricción hídrica

Saleh y Soliemanzadeh (2026) realizaron dos campañas de campo en la estación experimental de Hajiabad, cerca de Bandar Abbas, Irán. El sitio presenta una precipitación anual media cercana a 179 mm y temperatura anual media de 25,2 °C. El experimento comparó 100% y 60% del requerimiento de riego y varias estrategias de silicio.

Bajo 60% del requerimiento hídrico, la estrategia de mejor respuesta aumentó el rendimiento de grano 16% en la primera campaña y 24% en la segunda frente al control bajo la misma limitación. También aumentaron componentes de rendimiento y absorción de nutrientes y se modificaron respuestas osmóticas y antioxidantes.

La pertinencia para Argentina no está en decir que el clima iraní sea igual al pampeano. Está en mostrar, durante dos temporadas y en un ambiente estructuralmente seco, que el silicio puede conservar una fracción productivamente relevante del rendimiento cuando el agua es limitada.

EL SILICIO NO ELIMINÓ LA RESTRICCIÓN HÍDRICA. REDUJO CUÁNTO RENDIMIENTO LE COSTÓ ESA RESTRICCIÓN AL CULTIVO.

11. Sudáfrica: genotipo y formulación cambian la magnitud

Christian, Shimelis, Laing y Tsilo (2023) evaluaron 20 genotipos de trigo en invernadero y campo, con y sin sequía, comparando una formulación granular, una formulación líquida de silicato de potasio y un control.

La interacción genotipo × ambiente × agua × formulación fue significativa para biomasa, espigas productivas, peso de semilla y rendimiento. En campo y bajo sequía, el genotipo MC18 produjo 2,18

t/ha sin silicio, 2,56 t/ha con la formulación líquida y 4,17 t/ha con la granular. Para ese genotipo específico, la formulación granular significó +91,3% frente al control.

No corresponde transformar ese +91,3% en una expectativa general. Su importancia científica es mostrar que el techo de respuesta puede ser muy alto y que fuente y genética condicionan fuertemente el resultado. Esto explica por qué un promedio único puede ocultar oportunidades y también por qué la validación por ambiente y variedad es importante.

12. Calidad comercial: proteger toneladas no siempre protege el valor

La campaña argentina 2025/26 es un ejemplo útil. El país alcanzó una producción récord de 27,9 millones de toneladas y un rendimiento medio nacional de 41,3 qq/ha. Sin embargo, el relevamiento de Córdoba mostró una proteína media de 9,1%; 83,8% de las muestras quedaron por debajo de 11% y 39,9% por debajo de 9%. Una campaña puede ser excelente en toneladas y, al mismo tiempo, perder valor comercial por calidad.

La Norma XX argentina establece bonificaciones y rebajas por grado y proteína. Por encima de 11% de proteína se bonifica 2% por cada punto porcentual o fracción proporcional; bajo 10% comienzan rebajas y bajo 9% la penalización aumenta. Grado 1 recibe bonificación y Grado 3 rebaja respecto del Grado 2.

La evidencia reciente de Sudáfrica muestra que el silicio puede influir también en composición del grano, aunque la respuesta es genotipo-dependiente. Christian et al. (2026) observaron bajo sequía que la formulación granular mejoró el contenido proteico del grano en 14 de 20 genotipos, además de cambios en carbono y nitrógeno.

Esto no autoriza a vender ácido ortosilícico como garantía de proteína. Sí obliga a mirar el resultado del programa con una métrica más completa: rendimiento, peso hectolítrico, proteína y grado. En trigo, una tonelada protegida que conserva mejor su calidad puede valer más que una tonelada adicional de menor calidad.

13. Vuelco: una fuga de rendimiento que comienza en el tallo

El vuelco reduce la eficiencia de cosecha, puede favorecer brotado y deterioro de calidad y, cuando ocurre después de antesis, puede generar pérdidas relevantes. Berry y Spink (2012) documentaron pérdidas de rendimiento asociadas al vuelco y mostraron que la magnitud depende de la etapa y severidad.

Yang et al. (2024) realizaron un ensayo de dos años con nano-silicio incorporado a fertilización compuesta. La resistencia a quiebre del segundo entrenudo basal aumentó significativamente. En el tratamiento más efectivo, a madurez, la resistencia a quiebre fue 67,38% mayor que el control en 2021 y 32,56% mayor en 2022. El índice de resistencia al vuelco fue 62,10% y 47,04% mayor que el control en esos mismos años.

La respuesta estuvo acompañada por mayor acumulación de lignina y mayor actividad de enzimas asociadas a su síntesis. El estudio no permite convertir automáticamente +67% de resistencia mecánica en un porcentaje fijo de rendimiento protegido; sí demuestra una vía estructural concreta por la que el silicio puede reducir vulnerabilidad.

EN TRIGO, FORTALECER EL TALLO NO ES UN OBJETIVO ESTÉTICO. ES PROTEGER LA CAPACIDAD DEL CULTIVO PARA LLEGAR ERGUIDO Y COSECHABLE HASTA EL FINAL.

14. Pulgones: evidencia de campo de menor presión y mayor rendimiento

De Oliveira, Sampaio, Carvalho, Albuquerque y Korndörfer (2023) realizaron tres experimentos de campo en Brasil con cultivares de trigo susceptibles y resistentes al pulgón Sitobion avenae. Las enmiendas de silicio redujeron las poblaciones del pulgón y aumentaron el rendimiento del trigo.

La relación fue particularmente interesante: a medida que aumentó la dosis de silicio, el rendimiento mostró una respuesta lineal positiva y el número de pulgones una relación cuadrática descendente. El efecto se observó tanto en materiales susceptibles como resistentes.

Este tipo de evidencia cambia la forma de valorar el silicio. El beneficio no aparece únicamente como 'más crecimiento'; puede aparecer como tejido que se conserva y presión de plaga que se expresa menos. Eso no reemplaza el monitoreo ni un insecticida cuando el umbral económico lo exige, pero sí puede modificar la probabilidad y urgencia de una intervención.

15. Fusarium: el mayor valor aparece en manejo integrado

Pazdiora et al. (2023) realizaron un experimento de campo de tres años con dos cultivares de trigo, evaluando silicio aplicado al suelo con y sin fungicida frente a Fusarium head blight. El silicio por sí solo redujo la severidad de la enfermedad y el porcentaje de granos dañados, independientemente del cultivar.

El mejor control se obtuvo en el cultivar moderadamente resistente cuando el silicio se combinó con fungicida durante floración. En ensayos complementarios de invernadero, las plantas con silicio presentaron mayor período de incubación, menor severidad y una activación más temprana de defensas asociadas a compuestos fenólicos y enzimas antioxidantes.

La lectura para un programa comercial es clara: el silicio no debe presentarse como sustituto automático del fungicida. Su fortaleza está en complementar resistencia genética y manejo sanitario, reducir vulnerabilidad y potencialmente disminuir la intensidad con que el patógeno logra expresarse.

UNA ENFERMEDAD NO NECESITA DESAPARECER PARA QUE EL SILICIO TENGA VALOR. SI EL DAÑO SE EXPRESA MENOS, YA SE ESTÁ PROTEGIENDO RENDIMIENTO, CALIDAD Y MARGEN.

16. Heladas: una capa adicional de riesgo climático

En el trigo argentino, la restricción hídrica puede coincidir con bajas temperaturas y heladas. La campaña 2022/23 mostró con claridad esa combinación: sequía y heladas redujeron fuertemente la producción nacional. Desde el punto de vista fisiológico, el frío extremo agrega una vía distinta de daño: altera membranas, aumenta el estrés oxidativo y puede comprometer tejidos reproductivos y capacidad de recuperación.

Liang, Zhu, Li, Chu, Ding, Zhang y Sun (2008) evaluaron dos cultivares de trigo invernal contrastantes frente a un episodio de congelamiento de -5 °C. En el cultivar susceptible, el estrés redujo significativamente la biomasa aérea, mientras la suplementación con Si mejoró la resistencia al congelamiento. El trabajo relacionó la respuesta con mayor estabilidad de membranas, menor daño oxidativo y una respuesta antioxidante más favorable.

La evidencia no permite afirmar que el Si proteja al trigo argentino de cualquier helada ni sustituya decisiones varietales, fecha de siembra o manejo del riesgo. Sí aporta una segunda lectura climática: una herramienta fisiológica capaz de amortiguar daño por estrés no tiene valor únicamente cuando falta agua. Puede tenerlo también cuando el cultivo enfrenta temperaturas críticas.

LA PROTECCIÓN MULTIVÍA NO SIGNIFICA QUE TODOS LOS RIESGOS OCURRAN A LA VEZ. SIGNIFICA QUE UNA MISMA HERRAMIENTA PUEDE TENER MÁS DE UNA OPORTUNIDAD DE PROTEGER EL POTENCIAL DEL CULTIVO.

17. Protección multivía: una misma herramienta, varias fugas posibles

Cuando se integran agua, raíces, fisiología, estructura, sanidad, temperatura y calidad aparece una lectura diferente del valor agronómico. El rendimiento final del trigo es la consecuencia acumulada de múltiples riesgos. Una raíz que explora menos perfil, una hoja que pierde fotosíntesis, un tallo que se vuelca, una espiga afectada por Fusarium, un pulgón que drena asimilados, una helada que daña tejido funcional o un grano que pierde calidad son vías distintas de fuga del mismo resultado económico.

Vía de pérdida	Consecuencia productiva	Evidencia de silicio en trigo
Déficit hídrico	Menos espigas/granos, menor peso y fotosíntesis.	Australia, China, Irán y Sudáfrica: mayor rendimiento y mejor funcionamiento bajo restricción.
Raíces y acceso al perfil	Menor exploración del suelo y menor capacidad de sostener absorción cuando se seca la superficie.	Ashfaq et al. (2024): mayor longitud radical y mejor fisiología de canopia bajo sequía.
Disponibilidad del elemento	Silicio total del suelo no equivale a fracción absorbible.	Buenos Aires: fertilización modificó silicio disponible e incorporado por el trigo.
Estructura	Vuelco, cosecha difícil y pérdida de calidad.	Dos años: mayor resistencia a quiebre, lignina e índice de resistencia al vuelco.
Pulgones	Pérdida de área y asimilados.	Tres ensayos de campo: menor población de Sitobion avenae y mayor rendimiento.
Fusarium	Menor rendimiento, granos dañados y riesgo de micotoxinas.	Tres años: menor severidad y granos dañados; mejor respuesta con manejo integrado.

Vía de pérdida	Consecuencia productiva	Evidencia de silicio en trigo
Heladas / congelamiento	Daño de membranas, estrés oxidativo y pérdida de tejido funcional.	Liang et al. (2008): mayor resistencia al congelamiento a -5 °C en trigo susceptible con Si.
Calidad	Descuentos por proteína o grado.	Respuesta proteica dependiente de genotipo/formulación bajo sequía.
Ácido ortosilícico	Eficiencia de entrega del silicio.	UNESP: +26,9% de rendimiento con programa foliar de bajo volumen en trigo de campo.

No todos estos problemas ocurren en la misma campaña ni con la misma intensidad. Precisamente por eso la herramienta es multifactorial: tiene más de una oportunidad de aportar valor y más de una vía por la cual puede proteger el potencial productivo.

18. Del efecto agronómico al margen protegido

El análisis económico del ácido ortosilícico no debería reducirse a 'cuántos kilogramos adicionales entrega'. Un kilogramo que se agrega y un kilogramo que no se pierde tienen el mismo valor al momento de venderlo. En una campaña normal el beneficio puede aparecer como aumento de rendimiento; en una campaña de sequía puede aparecer principalmente como una caída menor que la de los lotes más afectados.

La misma lógica se aplica a una contingencia sanitaria. Si una menor vulnerabilidad mantiene una plaga o enfermedad por debajo del umbral económico durante más tiempo, el valor potencial incluye el rendimiento que no se perdió y el costo de una intervención de rescate que pudo postergarse o no ser necesaria. Esto debe decidirse con monitoreo; no es una promesa de reemplazo automático de fitosanitarios.

También existe una dimensión anticíclica. En la campaña argentina 2022/23, la sequía y las heladas redujeron drásticamente la producción. En diciembre de 2022, la Bolsa de Comercio de Rosario reportó precios locales de trigo cercanos a US$350/t, máximos en diez años. Cuando un evento afecta una región completa, la menor oferta puede sostener precios y volver más valiosos los kilogramos que un productor logró preservar.

El efecto precio no está garantizado: depende de stocks, mercado internacional, sustitutos, políticas y posición comercial. Su importancia conceptual es que la protección productiva puede valer más precisamente en los años en que el riesgo climático afecta a muchos productores al mismo tiempo.

EL ÁCIDO ORTOSILÍCICO NO TIENE UNA SOLA OPORTUNIDAD DE PAGARSE: PUEDE SUMAR PRODUCCIÓN, CONSERVAR CALIDAD, REDUCIR VULNERABILIDAD Y AYUDAR A EVITAR PÉRDIDAS QUE APARECEN POR DISTINTAS VÍAS.

19. Fuentes tradicionales y ácido ortosilícico: evolución de eficiencia

La bibliografía revisada utiliza fuentes muy diferentes: silicatos al suelo, formulaciones granulares, silicato de potasio foliar, nano-silicio y tecnologías de ácido ortosilícico. No corresponde comparar

directamente las dosis o porcentajes de respuesta entre ensayos hechos en ambientes y genotipos distintos.

La lectura correcta es secuencial. Las fuentes tradicionales demostraron que el silicio tiene valor agronómico real en trigo: pueden aumentar rendimiento, mejorar funcionamiento bajo sequía, reforzar tallos y modificar interacción con plagas y enfermedades. Esa evidencia es el fundamento.

La tecnología de ácido ortosilícico agrega eficiencia de entrega. La planta absorbe H_4SiO_4; por eso la pregunta tecnológica no es simplemente cuánto silicio total contiene un producto, sino qué fracción llega de forma disponible y en qué cantidad de material debe aplicarse para generar una respuesta.

La evidencia directa permite ir más allá de un solo ensayo. Soratto et al. (2012) reportaron +26,9% de rendimiento con una formulación foliar estabilizada de ácido ortosilícico en trigo de campo. Khalid et al. (2022) encontraron que el ácido ortosilícico fue la fuente foliar más eficaz bajo déficit hídrico, con aproximadamente +12% en masa de grano. Kowalska et al. (2021) documentaron durante dos campañas 3,88 → 4,84 t/ha (+24,7%) con aplicación foliar y 3,88 → 4,97 t/ha (+28,1%) con aplicación combinada. No demuestra que todas las tecnologías de ácido ortosilícico produzcan esos porcentajes en cualquier ambiente; sí demuestra que la forma directamente disponible tiene evidencia propia y no necesita sostenerse únicamente en resultados de silicatos.

NO SE TRATA DE APLICAR MÁS SILICIO. SE TRATA DE UTILIZARLO DE MANERA MÁS EFICIENTE.

20. Qué significa para el trigo argentino

La evidencia argentina demuestra que el agua limita fuertemente el rendimiento y que la eficiencia de uso del agua es una variable productiva real. También demuestra localmente que la disponibilidad y absorción de silicio pueden modificarse en trigo. La evidencia mecanística agrega una pieza clave: bajo sequía, el Si puede favorecer arquitectura radical y conectar una mejor exploración del suelo con una canopia fisiológicamente más activa. La evidencia internacional de campo aporta la consecuencia productiva: bajo lluvia reducida, riego deficitario y sequía, el silicio puede conservar una parte importante del rendimiento.

La evidencia directa con ácido ortosilícico agrega una referencia tecnológica particularmente valiosa. Brasil aporta +26,9% de rendimiento en un ensayo de campo con 14 repeticiones; Pakistán muestra respuesta directa bajo déficit hídrico; y Polonia agrega dos campañas con +24,7% por vía foliar y +28,1% con aplicación combinada. La evidencia de Australia, China, Irán y Sudáfrica muestra, con otras fuentes de Si, que el valor productivo puede expresarse con fuerza cuando el agua limita o cuando el genotipo y la formulación permiten una respuesta mayor.

La evidencia estructural, sanitaria, térmica y de calidad amplía la interpretación. En trigo, la protección productiva no termina en agua. Vuelco, pulgones, Fusarium, heladas y proteína son otras rutas por las

que un lote puede perder margen. Una tecnología transversal merece evaluarse por el conjunto de esas vías, no únicamente por un aumento promedio de rendimiento.

Para una validación comercial argentina, el indicador principal debe seguir siendo rendimiento corregido. Pero conviene acompañarlo de proteína, peso hectolítrico, espigas por metro cuadrado, peso de mil granos, incidencia/severidad de problemas sanitarios relevantes, vuelco y una caracterización simple del agua disponible durante el ciclo. Así se puede entender no sólo si hubo respuesta, sino de dónde vino.

21. Preguntas al asesor técnico

- ¿Cuánta agua útil hay en el perfil al momento de la siembra?
- ¿En qué etapa suele concentrarse la mayor pérdida de rendimiento por falta de agua: encañado, antesis o llenado?
- ¿Qué variedad se utiliza y cómo responde históricamente frente a sequía y vuelco?
- ¿Cuál es el objetivo comercial del lote: toneladas, proteína, peso hectolítrico, estabilidad interanual o una combinación?
- ¿Qué historial existe de pulgones, Fusarium u otras enfermedades que generen aplicaciones de rescate?
- ¿Cuánto cuesta realmente una aplicación de rescate, incluyendo producto, pasada y logística?
- ¿El programa actual contiene aminoácidos, algas u otros bioestimulantes generales cuyo objetivo sea tolerancia al estrés y puedan estar duplicando funciones?
- ¿La fuente de silicio entrega directamente ácido ortosilícico o depende de procesos previos de solubilización?
- ¿El momento de aplicación coincide con etapas en las que interesa proteger macollos/espigas, antesis y llenado?
- ¿Qué profundidad efectiva de suelo y qué restricciones físicas pueden limitar la exploración radical del lote?
- ¿Qué historial de heladas tiene el ambiente y en qué etapas fenológicas suelen ocurrir?
- ¿El ensayo medirá rendimiento, proteína, peso hectolítrico, componentes de rendimiento, vuelco y presión sanitaria además de variables fisiológicas?

22. Conclusión

En trigo argentino de secano, el agua no es una variable más: es uno de los principales determinantes de cuánto potencial productivo termina convertido en grano. La evidencia argentina de largo plazo cuantifica esa limitación; los experimentos de Israel y China muestran cuánto cambia el costo productivo según el momento del déficit.

El silicio tiene evidencia consistente frente a ese problema y la cadena fisiológica comienza antes de la hoja. Ashfaq et al. (2024) mostraron mayor desarrollo radical y mejor fisiología de canopia bajo

sequía. A campo, Australia mostró recuperación del rendimiento bajo lluvia reducida a la mitad y mejoras de 32–74% en eficiencia instantánea de uso del agua. Irán mostró +16% y +24% durante dos campañas bajo restricción hídrica. Sudáfrica mostró que genotipo y formulación pueden ampliar enormemente la respuesta. China demostró que el beneficio productivo es mayor cuando el estrés coincide con antesis y llenado.

La evidencia directa con ácido ortosilícico completa la historia tecnológica con más de una referencia. En Brasil, una formulación foliar estabilizada aumentó 26,9% el rendimiento de trigo; en Pakistán fue la fuente foliar más eficaz bajo déficit y aumentó alrededor de 12% la masa de grano; y en Polonia dos campañas alcanzaron +24,7% por vía foliar y +28,1% con aplicación combinada. Estos resultados no son una garantía para Argentina, pero sí una base experimental directa para discutir una estrategia de alta eficiencia de entrega.

Y el valor no termina en sequía. La evidencia muestra mayor resistencia estructural frente al vuelco, menor población de pulgones, menor severidad de Fusarium dentro de un manejo integrado, mayor resistencia al congelamiento en condiciones experimentales y cambios favorables de calidad en determinados genotipos. Son rutas diferentes que terminan en el mismo lugar: proteger rendimiento, calidad y margen.

Por eso la propuesta no debe formularse como una promesa fija de 'X% más rendimiento'. Debe formularse como una estrategia de protección multivía: mejorar la probabilidad de que una mayor proporción del potencial del lote llegue efectivamente a cosecha y conserve valor comercial.

FORTALECER LA FISIOLOGÍA NO ES EL OBJETIVO FINAL. EL OBJETIVO ES QUE EL TRIGO PIERDA MENOS POTENCIAL Y CONVIERTA MEJOR EL AMBIENTE QUE REALMENTE TIENE EN GRANO COMERCIAL.

Bibliografía

Bono, A. A.; Quiroga, A.; Álvarez, R.; et al. (2017). Uso de agua por cultivos en la Región Semiárida Pampeana. Ciencia del Suelo, 35(2), 273-283. Base experimental: 138 ensayos, 2000-2013.

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (2026). Informe Institucional de Calidad de Trigo 2025/2026. Producción 27,9 Mt y rendimiento promedio nacional 41,3 qq/ha. https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-gobierno-nacional-presento-el-informe-institucional-de-calidad-de-trigo-20252026

Bolsa y Cámara de Cereales de Córdoba (2026). Relevamiento de Calidad de Trigo - Campaña 2025/2026. Proteína promedio 9,1%; 83,8% de muestras por debajo de 11%; 39,9% por debajo de 9%.

Argentina. Resolución SAGPyA 1075/1994 y modificatorias. Norma XX: Trigo Pan. Bonificaciones y rebajas por grado y contenido proteico. https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1075-1994-28301/actualizacion

INTA / Argentina.gob.ar (2024). Con riego, mejoran los rendimientos de los cultivos hasta un 115 %. Resultados de 28 años del módulo de riego de INTA Manfredi, Córdoba. Publicado 12 de agosto de 2024.

De Emilio, M. (2024). Trigo 24/25: Rendimientos potenciales y demanda. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro de Investigación en Economía y Prospectiva, 2 de octubre de 2024.

Frayssinet, C.; Osterrieth, L. M.; Borrelli, L. N.; Fernández Honaine, M.; Ciarlo, E. A.; Heiland, P. (2019). Effect of silicate fertilizers on wheat and soil properties in Southeastern Buenos Aires province, Argentina. Soil & Tillage Research, 195, 104412. DOI: 10.1016/j.still.2019.104412.

Soratto, R. P.; Crusciol, C. A. C.; Castro, G. S. A.; Costa, C. H. M. da; Ferrari Neto, J. (2012). Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36(5), 1538-1544. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500018.

Toledo, M. Z.; Castro, G. S. A.; Crusciol, C. A. C.; Soratto, R. P.; Cavariani, C.; Ishizuka, M. S.; Picoli, L. B. (2012). Silicon leaf application and physiological quality of white oat and wheat seeds. Semina: Ciências Agrárias, 33(5), 1693-1701. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n5p1693.

Johnson, S. N.; Chen, Z.-H.; Rowe, R. C.; Tissue, D. T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. Frontiers in Plant Science, 13, 1030620. DOI: 10.3389/fpls.2022.1030620.

Ning, D.; Zhang, Y.; Li, X.; Qin, A.; Huang, C.; Fu, Y.; Gao, Y.; Duan, A. (2023). The Effects of Foliar Supplementation of Silicon on Physiological and Biochemical Responses of Winter Wheat to Drought Stress during Different Growth Stages. Plants, 12(12), 2386. DOI: 10.3390/plants12122386.

Saleh, J.; Soliemanzadeh, A. (2026). Silicon-mediated drought stress tolerance in wheat: Impacts on yield, nutrient uptake, osmotic regulation, and antioxidant responses. Field Crops Research, 337, 110284. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.110284.

Christian, M. M.; Shimelis, H.; Laing, M. D.; Tsilo, T. J. (2023). The effect of silicon fertilizers on agronomic performance of bread wheat under drought stress and non-stress conditions. Journal of Agronomy and Crop Science, 209(6), 827-840. DOI: 10.1111/jac.12668.

Christian, M. M.; Shimelis, H.; Laing, M. D.; Tsilo, T. J.; Burgdorf, R. (2026). Compositions of wheat grain carbon, nitrogen, sulfur and protein under two silicon fertilisers and drought. Journal of Food Composition and Analysis, 156, 109347. DOI: 10.1016/j.jfca.2026.109347.

Amir, J.; Krikun, J.; Orion, D.; Putter, J.; Klitman, S. (1991). Wheat production in an arid environment. 1. Water-use efficiency, as affected by management practices. Field Crops Research, 27(4), 351-364. DOI: 10.1016/0378-4290(91)90041-S.

Shimshi, D.; Kafkafi, U. (1982). Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. Field Crops Research, 5, 55-67. DOI: 10.1016/0378-4290(82)90006-5.

Yang, M.; Chen, S.; Chao, K.; Ji, C.; Shi, Y. (2024). Effects of nano silicon fertilizer on the lodging resistance characteristics of wheat basal second stem node. BMC Plant Biology, 24, 54. DOI: 10.1186/s12870-024-04735-z.

Berry, P. M.; Spink, J. (2012). Predicting yield losses caused by lodging in wheat. Field Crops Research, 137, 19-26. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.07.019.

de Oliveira, R. S.; Sampaio, M. V.; Carvalho, F. J.; Albuquerque, C. J. B.; Korndörfer, G. H. (2023). Silicon amendments reduce aphid numbers and improve yield of aphid-resistant and susceptible wheat cultivars in a dose-dependent manner. Crop Protection, 172, 106296. DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106296.

Pazdiora, P. C.; Crizel, R. L.; da Rosa Dorneles, K.; da Silva, S. M.; Morello, T. N.; Chaves, F. C.; Dallagnol, L. J. (2023). Silicon amendment improves wheat defence against Fusarium graminearum and complements the control by fungicide of Fusarium head blight. Plant Pathology, 72(1), 53-66. DOI: 10.1111/ppa.13648.

Bolsa de Comercio de Rosario (2022). Trigo 2022/23: por el azote climático, se prevén las exportaciones más bajas en 8 años. Informativo Semanal, 23 de diciembre de 2022.

Bolsa de Comercio de Rosario (2023). El derrumbe de la demanda de exportación compensó la caída en la producción de trigo. Informativo Semanal, 1 de septiembre de 2023.

Khalid, A.; Nawaz, M.; Iqbal, N.; Ashraf, M. Y. (2022). Silicon foliar application improves water stress tolerance in wheat (Triticum aestivum L.) by modulating growth, yield and photosynthetic attributes. Pakistan Journal of Botany, 54(5), 1643-1652. DOI: 10.30848/PJB2022-5(27).

Kowalska, J.; Tyburski, J.; Jakubowska, M.; Krzymińska, J. (2021). Effect of Different Forms of Silicon on Growth of Spring Wheat Cultivated in Organic Farming System. Silicon, 13, 211-217. DOI: 10.1007/s12633-020-00414-4.

Ashfaq, W.; Brodie, G.; Fuentes, S.; Pang, A.; Gupta, D. (2024). Silicon improves root system and canopy physiology in wheat under drought stress. Plant and Soil, 502, 279-296. DOI: 10.1007/s11104-023-06202-4. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06202-4

Liang, Y.; Zhu, J.; Li, Z.; Chu, G.; Ding, Y.; Zhang, J.; Sun, W. (2008). Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. Environmental and Experimental Botany, 64(3), 286-294. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2008.06.005. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.06.005