

JOSÉ FABIÁN SÁNCHEZ LÓPEZ¹

DOI 10.47633/oriolus1.1-6

LUIS E. FLORES PANTOJA^{1,2}

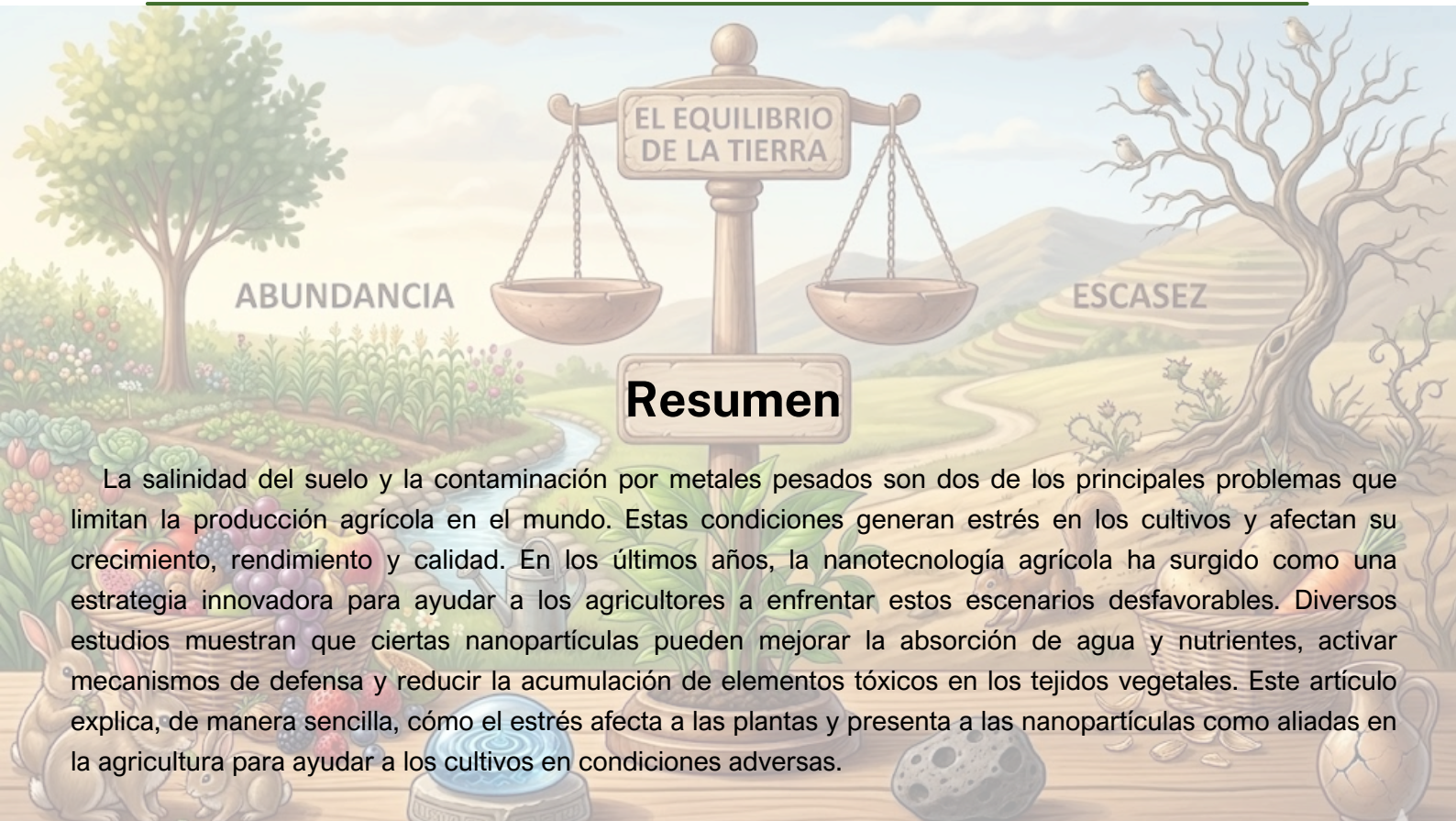
ISAAC ZEPEDA JAZO^{1*}

¹Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo. México.

²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Roque

NANOPARTÍCULAS: PEQUEÑAS ALIADAS FRENTE AL ESTRÉS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS





La salinidad del suelo y la contaminación por metales pesados son dos de los principales problemas que limitan la producción agrícola en el mundo. Estas condiciones generan estrés en los cultivos y afectan su crecimiento, rendimiento y calidad. En los últimos años, la nanotecnología agrícola ha surgido como una estrategia innovadora para ayudar a los agricultores a enfrentar estos escenarios desfavorables. Diversos estudios muestran que ciertas nanopartículas pueden mejorar la absorción de agua y nutrientes, activar mecanismos de defensa y reducir la acumulación de elementos tóxicos en los tejidos vegetales. Este artículo explica, de manera sencilla, cómo el estrés afecta a las plantas y presenta a las nanopartículas como aliadas en la agricultura para ayudar a los cultivos en condiciones adversas.

La importancia de los cultivos y los suelos agrícolas

Como seres vivos heterótrofos (es decir, organismos que necesitamos alimentarnos de otros seres vivos para obtener energía) las personas dependemos directamente de los cultivos para vivir. De los vegetales obtenemos frutas, verduras y cereales indispensables para la nutrición, salud y bienestar. En la actualidad, en algunas zonas del mundo se producen grandes cantidades de alimentos, mientras que en otras la producción es insuficiente. La intensificación agrícola, manejo inadecuado o degradación del suelo, ha traído efectos nocivos para el campo, repercutiendo en la baja productividad

en algunas regiones y probocando condiciones hostiles para las plantas [1]. El suelo no es solo “tierra” donde crecen las plantas; es un sistema vivo de soporte en el que interactúan minerales, agua, aire y una enorme comunidad de microorganismos que ayudan a que los vegetales dispongan de lo que necesitan. Cuando este equilibrio se pierde (por exceso de sales, contaminación o malas prácticas) los cultivos enfrentan más dificultades para crecer y producir. Uno de los objetivos de la agricultura sostenible es precisamente mantener ese equilibrio para favorecer el rendimiento de las plantas [2].

Palabras clave: Estrés vegetal, metales pesados, nanomateriales, salinidad, suelos agrícolas.

El estrés en las plantas: salinidad y metales pesados

Aunque no lo parezca, las plantas también se estresan. A diferencia de las personas, no pueden alejarse de aquello que les hace daño ni buscar ayuda como lo hacemos nosotros. Las plantas silvestres han desarrollado una notable capacidad de adaptación que les permite sobrevivir en ambientes poco favorables; sin embargo, en el caso de las cultivadas, debido al proceso de domesticación, se han vuelto más dependientes del manejo humano. Por esta razón, el cuidado de los cultivos sigue siendo fundamental para garantizar el abasto mundial de alimentos [1].

Los cultivos pueden enfrentar distintos tipos de estrés. Las plantas pueden sufrir estrés biótico, causado por organismos vivos como hongos, bacterias, virus o insectos que afectan su crecimiento. También pueden sufrir estrés abiótico, provocado por condiciones ambientales adversas como temperaturas extremas, sequía o exceso de agua, sal en los suelos o la presencia de metales pesados [3].

La salinidad del suelo y la contaminación por metales pesados son problemas cada vez más frecuentes en la agricultura moderna debido a actividades humanas como el riego intensivo, la expansión industrial y el uso de fertilizantes y pesticidas, los cuales favorecen la acumulación de estos contaminantes en los suelos agrícolas. La salinidad del suelo es consecuencia de la acumulación excesiva de sales solubles, como calcio, magnesio y sodio, en la zona de la raíz de las plantas.

La salinidad, resultado del mal manejo del riego, el uso excesivo de fertilizantes o la desertificación, afecta a más de 830 millones de hectáreas en el mundo. La salinidad, resultado del mal manejo del riego, el uso excesivo de fertilizantes o la desertificación, afecta a más de 830 millones de hectáreas en el mundo, una superficie comparable al territorio de los Estados Unidos [5]. El exceso de sales dificulta la absorción de agua y puede provocar crecimiento lento o incluso la muerte de las plantas.

Entre los metales pesados que generan mayor preocupación en la agricultura destacan el plomo, el cadmio y el arsénico, ampliamente documentados por su elevada toxicidad y su presencia en los sistemas agrícolas [4]. El plomo, por ejemplo, es uno de los contaminantes más comunes y peligrosos en suelos agrícolas. Procede de actividades industriales, gasolinas y algunos insumos del campo, acumulándose en los tejidos vegetales y llegando a los alimentos, lo que representa un riesgo para la salud humana [6].

Estas condiciones pueden afectar a cultivos de gran importancia para la alimentación, como el arroz, el maíz o el frijol, reduciendo su crecimiento y productividad debido a alteraciones en procesos básicos para su crecimiento como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes [7]. Además, la presencia de metales pesados en los suelos puede alterar el equilibrio de los ecosistemas y favorecer su entrada en la cadena alimenticia a través de las plantas y animales, lo que representa un problema importante para la salud pública [8].

Estrategias para enfrentar el estrés en los cultivos

Métodos convencionales como fertilizantes, enmiendas y riego especializado han sido útiles para mejorar las condiciones de cultivo en situaciones de estrés, pero su eficacia es limitada y, aplicados de forma incorrecta, pueden incluso agravar el deterioro del suelo.

En las últimas décadas se han desarrollado nuevas estrategias para ayudar a las plantas a enfrentar condiciones adversas. Entre ellas se encuentran el mejoramiento genético de cultivos, que busca variedades más tolerantes al estrés ambiental, el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos que favorecen el crecimiento vegetal, así como diversas prácticas de agricultura sostenible orientadas a reparar la salud del suelo y reducir el impacto ambiental de la producción agrícola [9]. En este contexto, la nanotecnología agrícola ha despertado un creciente interés, ya que permite desarrollar herramientas capaces de actuar de manera más precisa en los sistemas biológicos de las plantas mediante el uso de nanopartículas. Estas son partículas extremadamente pequeñas, mucho más delgadas que un cabello humano, capaces de interactuar con el suelo, el agua y las raíces

[10], lo que facilita procesos como la absorción de agua y nutrientes y la activación de mecanismos de defensa en los cultivos [11]. Estas partículas se obtienen en laboratorio por síntesis química (a partir de la mezcla de sustancias químicas), verde (a través de plantas o microbios) o física (extracción a partir de un solo compuesto), y se aplican en hojas, semillas o directamente en el suelo. Gracias a su tamaño y propiedades, estos materiales cuando son aplicados en el campo o incluso previamente en las semillas, pueden fortalecer las defensas naturales de las plantas (Fig. 1), optimizar la absorción de agua y nutrientes, y reducir el impacto de factores adversos como la salinidad y los metales pesados.

Es importante destacar que estas tecnologías aún se encuentran en fase de investigación y que sus posibles efectos ambientales y sociales deben evaluarse cuidadosamente antes de su aplicación a gran escala. Sus beneficios dependen de un uso adecuado, pues la dosis, el tipo de nanopartícula y el cultivo determinan los resultados [12].



Figura 1. Esquema comparativo conceptual de plantas cultivadas en suelos con salinidad y presencia de plomo. A la izquierda se muestra una planta sin nanopartículas, con disminución en crecimiento y calidad del fruto; a la derecha, una planta bajo las mismas condiciones con aplicación de nanopartículas, se ilustra una posible mitigación del estrés. Imagen generada con Inteligencia Artificial. ChatGPT, OpenAI, 2026 para fines ilustrativos y de divulgación científica, no basada en datos experimentales reales.

Nanopartículas: pequeñas aliadas para una agricultura sostenible



Distintos tipos de nanopartículas ayudan a las plantas a enfrentar el estrés y se reportan casos concretos y ejemplos de cultivos donde se han observado beneficios (Tabla 1).

Tabla 1. Ejemplos de estudios del uso de nanomateriales para enfrentar condiciones de estrés en cultivos de interés agrícola.

Nanopartícula	Cultivo	Problema que enfrenta	¿Qué se observó?	Ref.
Selenio	Trigo	Suelos salinos	Plantas con hojas más verdes, mayor crecimiento y mejor rendimiento de grano	[13]
Óxido de zinc	Chicharo	Salinidad	Raíces más largas y robustas, mejor “equilibrio interno” y semillas más pesadas	[14]
Quitosano	Frijol	Alta salinidad	Aumentó la altura, la producción de semillas y la eficiencia de la fotosíntesis	[15]
Óxido de hierro	Girasol	Plomo	Menor absorción de plomo; mejor retención de agua y crecimiento más estable	[16]
Hierro + silicio	Arroz	Plomo	Menor absorción de plomo y activación de defensas internas	[17]
Silicio	Arroz	Salinidad	Menor daño en hojas y raíces más desarrolladas	[18]
Silicio	Arroz - Granado	Plomo	Limitó la acumulación de plomo en el grano	[19], [20]

Conclusión

En conjunto, estas investigaciones demuestran que las nanopartículas, aunque son extremadamente pequeñas, pueden tener un gran impacto en la agricultura. Gracias a su aplicación, las plantas pueden desarrollarse mejor en suelos con salinidad y contaminación por metales pesados. La comunidad científica coincide en que el futuro de la alimentación no depende únicamente de producir más, sino de utilizar la ciencia de manera responsable para cuidar los suelos, proteger los cultivos y garantizar la seguridad alimentaria.

REFERENCIAS



- [1] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 (SOFI). Rome: FAO; 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- [2] Thapa S, Shah GA, Xue Q. Soil Health and Crop Management in Conservation Agriculture. *Agronomy*. 2024;14(10):2291. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy14102291>
- [3] Scutarășu EC, Trincă LC. Heavy Metals in Foods and Beverages: Global Situation, Health Risks and Reduction Methods. *Foods*, 2023, 12: 3340. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/foods12183340>.
- [4] Tiwari S, Lata C, Prasad M. Arsenic toxicity in plants: mechanisms and mitigation strategies. *Chemosphere*. 2023;313:138123. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138123>
- [5] FAO. Global Symposium on Salt-Affected Soils: Outcome document. Rome: FAO; 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cb9929en>
- [6] Briseño-Bugarín J, Araujo-Padilla X, Escot-Espinoza VM, Cardoso-Ortiz J, Flores de la Torre JA, López-Luna A. Lead (Pb) pollution in soil: a systematic review and meta-analysis of contamination grade and health risk in Mexico. *Environments*, 2024, 11(3):43. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/environments11030043>
- [7] Ahmed M, Tóth Z, Decsi K. The Impact of Salinity on Crop Yields and the Confrontational Behavior of Transcriptional Regulators, Nanoparticles, and Antioxidant Defensive Mechanisms under Stressful Conditions: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25: 2654. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms25052654>.
- [8] Soliman M, Al-Akeel R, Al-Ghamdi M, Almadiy A, Rawi S, Zhang W, Al Dhafer H, Mohamed A, Al Naggar Y, Salem AM. Trophic transfer of heavy metals across a food chain in a wastewater-irrigated agroecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196: 1082. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13179-9>.
- [9] Xu L, Cui Z, Wang Y, Wang N, Ma J. Pollution Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soil Under Different Land Use Types: A Case Study of Dehui City, Northeastern China. *Agronomy*, 2025, 15: 2899. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy15122899>.
- [10] Kumari A, Gupta AK, Sharma S, Jadon VS, Sharma V, Chun SC, Sivanesan I. Nanoparticles as a Tool for Alleviating Plant Stress: Mechanisms, Implications, and Challenges. *Plants*, 2024, 13: 1528. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13111528>
- [11] Zhang X, Gao H, Liang Y, Cao Y. Full-length transcriptome analysis of asparagus roots reveals the molecular mechanism of salt tolerance induced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 185: 104402. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104402>.
- [12] Zhao L, Zhang H, White JC. Environmental implications and risk assessment of engineered nanomaterials in agroecosystems. *Environmental International*. 2023;171:107789. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107789>
- [13] Zafar S, Hasnain Z, Danish S, Battaglia ML, Fahad S, Ansari MJ, Alharbi SA. Modulations of wheat growth by selenium nanoparticles under salinity stress. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1):1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04720-6>
- [14] Mustafa G, Chaudhari SK, Manzoor M, Batool S, Hatami M, Hasan M. Zinc oxide nanoparticles mediated salinity stress mitigation in *Pisum sativum*: a physio-biochemical perspective. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1):1. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05554-y>
- [15] Alenazi MM, El-Ebady AM, El-Shehaby OA, Seleiman MF, Aldhuwaib KJ, Abdel-Aziz HMM. Chitosan and chitosan nanoparticles differentially alleviate salinity stress in *Phaseolus vulgaris* L. *Plants*, 2024, 13(3):398. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13030398>
- [16] Mounier L, Pédrot M, Bouhnik-Le-Coz M, Cabello-Hurtado F. Impact of iron oxide nanoparticles on a lead-polluted water-soil-plant system under alternating periods of water stress. *Environmental Science: Advances*, 2023, 2(5):767-779. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/d2va00283c>
- [17] Ghouri F, Sarwar S, Sun L, Riaz M, Haider FU, Ashraf H, Lai M, Imran M, Liu J, Ali S, Liu X, Shahid MQ. Silicon and iron nanoparticles protect rice against lead (Pb) stress by improving oxidative tolerance and minimizing Pb uptake. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55810-2>
- [18] Xiong J, Yang X, Sun M, Zhang J, Ding L, Sun Z, Feng N, Zheng D, Zhao L, Shen X. Mitigation effect of exogenous nano-silicon on salt stress damage of rice seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(1):85. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms26010085>
- [19] Liu J, Cai H, Mei C, Wang M. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2015, 9(5):905-911. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11783-015-0786-x>
- [20] Mohammadi Z, Zahedi SM, Panahirad S, Gohari G. Alleviation of the effect of salinity on pomegranate seedlings by priming foliar spray of chitosan-silicon nanoparticles (CTS-SiO₂ NPs). *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1):1. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07016-5>