

Fitohormonas y su impacto en la adaptación de las plantas al estrés salino: un artículo de revisión

Phytohormones and their impact on plant adaptation to salt stress: a review article

Kharen Liliana Marengo-Cardona¹, Sara Lucia Romano-Peréz², Jovanna Acero-Godoy³


Fecha de recepción: 20 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 3 de octubre, 2025


Marengo-Cardona, K. L.; Romano-Peréz, S.L.; Acero-Godoy, J. Fitohormonas y su impacto en la adaptación de las plantas al estrés salino: un artículo de revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 37-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7994>





1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 kmarengo@universidadmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0008-6952-3236>

2 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 sromano@universidadmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0007-5371-6335>

3 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 jacerog@universidadmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>

Palabras clave

Suelo; fitohormonas; salinidad; resistencia; estrés abiótico; plantas (cultivos).

Resumen

La salinidad del suelo representa una limitación crítica para la producción agrícola a nivel mundial, afectando el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas. Ante este tipo de estrés, las plantas ponen en marcha una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares que les permiten adaptarse. Entre los principales reguladores de estas respuestas se encuentran las fitohormonas, como el ácido abscísico (ABA), el etileno y las auxinas, las cuales desempeñan funciones esenciales en la tolerancia a condiciones salinas. El ABA contribuye al cierre estomático y regula la expresión de genes vinculados al estrés hídrico y salino. Por su parte, el etileno, aunque tradicionalmente asociado con procesos de senescencia, también participa en la regulación de la homeostasis iónica y en la activación de mecanismos antioxidantes en plantas tolerantes. Las auxinas, en tanto, promueven el desarrollo del sistema radicular y favorecen la relación con microorganismos benéficos, facilitando una mejor absorción de agua y nutrientes. Esta revisión analiza la interacción y señalización de estas fitohormonas en entornos de salinidad, subrayando la relevancia de comprender estos procesos para impulsar el desarrollo de estrategias biotecnológicas orientadas a mejorar la tolerancia de los cultivos en suelos salinos.

Keywords

Soil; phytohormones; salinity; resistance; abiotic stress; plants (crops).

Abstract

Soil salinity represents a critical constraint on agricultural production worldwide, affecting plant growth, development, and yield. Faced with this type of stress, plants trigger a series of physiological, biochemical, and molecular responses that allow them to adapt. Among the main regulators of these responses are phytohormones, such as abscisic acid (ABA), ethylene, and auxins, which play essential roles in tolerance to saline conditions. ABA contributes to stomatal closure and regulates the expression of genes linked to water and salt stress. Ethylene, meanwhile, although traditionally associated with senescence processes, also participates in the regulation of ionic homeostasis and the activation of antioxidant mechanisms in tolerant plants. Auxins, meanwhile, promote the development of the root system and foster relationships with beneficial microorganisms, facilitating improved water and nutrient absorption. This review analyzes the interaction and signaling of these phytohormones in saline environments, highlighting the importance of understanding these processes to promote the development of biotechnological strategies aimed at improving crop tolerance in saline soils.

Introducción

La salinidad del suelo es uno de los principales desafíos que enfrenta la agricultura moderna, ya que afecta negativamente el desarrollo, crecimiento y productividad de los cultivos. En Colombia, se ha estimado que aproximadamente el 10 % del territorio presenta niveles de salinidad moderados a altos. Aunque este problema ha estado presente desde hace tiempo, en los últimos años se ha intensificado como consecuencia del cambio climático, agravando aún más sus efectos sobre los sistemas agrícolas [1]. El aumento de las temperaturas, los cambios

en las lluvias y prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso excesivo de aguas salinas para riego, de fertilizantes y la erosión del suelo, han contribuido al deterioro progresivo de la calidad edáfica en múltiples regiones [2].

La acumulación de sales no solo altera las propiedades fisicoquímicas del suelo (afectando su estructura y reduciendo su porosidad y permeabilidad), sino que también compromete directamente procesos fisiológicos clave en las plantas, desde la germinación hasta la fotosíntesis. Estas condiciones generan estrés osmótico, ya que dificultan la absorción de agua por parte de las raíces, lo que provoca una sequía fisiológica que es posible observar en el marchitamiento, la caída de hojas y el deterioro general de los cultivos [3]. Además, el exceso de algunos iones como sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) causa estrés iónico, que interfiere en la absorción de nutrientes esenciales como potasio o calcio, y favoreciendo la deficiencia de nitrógeno, que reduce la producción de clorofila. La sensibilidad al estrés salino puede variar según la especie, siendo las fases de germinación y crecimiento temprano las más vulnerables a esta afectación [4].

En este contexto, las fitohormonas cumplen un rol esencial en la regulación del crecimiento y en la adaptación de las plantas al estrés salino. Estas moléculas hormonales no sólo modulan la respuesta frente al estrés, sino que también intervienen en procesos como la osmorregulación, la tolerancia a la deshidratación y la optimización de la absorción de nutrientes [5]. El ácido abscísico (ABA), por ejemplo, actúa como un regulador clave al inducir el cierre estomático, reduciendo la pérdida de agua por transpiración. Por otro lado, hormonas como las auxinas y el etileno desempeñan funciones críticas en la arquitectura radicular, promoviendo un desarrollo que favorece la exploración del suelo y la captación eficiente de recursos en ambientes salinos [6].

Comprender el papel que desempeñan las fitohormonas en la respuesta vegetal ante condiciones de alta salinidad, es clave para profundizar en los mecanismos moleculares que regulan la tolerancia al estrés. Este conocimiento resulta esencial para el desarrollo de estrategias agrícolas más sostenibles, especialmente en contextos donde la salinización del suelo compromete la productividad. A través de la manipulación de estas rutas hormonales, es posible desarrollar enfoques biotecnológicos que permitan una producción agrícola más eficiente en suelos afectados por la salinidad, contribuyendo a la seguridad alimentaria en escenarios cada vez más exigentes [7].

Estrés biótico y abiótico en plantas: mecanismos de respuesta y adaptación

El estrés generado por factores bióticos y abióticos influye significativamente en las plantas. Comprender cómo responden a estos estímulos es clave para asegurar su supervivencia en ambientes dinámicos y exigentes, especialmente en el contexto del calentamiento global. Este fenómeno ha intensificado y hecho más frecuentes eventos extremos como sequías prolongadas, altas temperaturas y lluvias intensas, lo que representa un reto para la agricultura y la conservación de los ecosistemas naturales [8].

El estrés biótico es causado por organismos vivos que afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estos agentes, comúnmente conocidos como plagas agrícolas, incluyen insectos, ácaros, moluscos, aves, roedores. Asimismo, patógenos como virus, bacterias, hongos y nematodos. Su impacto puede manifestarse a través del consumo directo de tejido vegetal, la transmisión de enfermedades o la interferencia en algunos procesos fisiológicos [9]. Frente a estas amenazas, las plantas responden mediante defensas genéticamente programadas, conocidas como respuesta inmunológica innata, que involucran

cientos de genes de resistencia. Por ejemplo, el gen *RPS2* en *Arabidopsis thaliana* se activa frente a la infección de *Pseudomonas syringae* con presencia del gen *avrRpt2*, bacteria que puede provocar pudrición floral e inhibir el crecimiento mediante toxinas [10].

Este tipo de estrés también puede afectar la fotosíntesis, como ocurre con los daños foliares por insectos o infecciones virales. Las respuestas de las plantas pueden ser elásticas (reversibles), refiriéndose a la producción de metabolitos secundarios (como flavonoides, alcaloides), aumento de fitohormonas como ABA o etileno y la activación de genes de resistencia [11]; como también plásticas (irreversibles) que incluyen cambios morfológicos como lo son, el engrosamiento de la cutícula, la formación de tricomas (pelos epidérmicos que actúan como barreras físicas), o la lignificación de paredes celulares para dificultar la penetración de patógenos [12][13]. A nivel bioquímico, pueden producirse acumulaciones permanentes de compuestos fenólicos, depósitos de callosa o alteraciones en la arquitectura foliar, reduciendo el área de exposición al ataque. Estos cambios representan una inversión energética considerable, pero son fundamentales para la supervivencia en entornos hostiles [14].

Por otro lado, el estrés abiótico se refiere a condiciones ambientales desfavorables que reducen el rendimiento vegetal cuando factores como temperatura, nutrientes, viento, radiación o salinidad exceden los rangos óptimos. El estrés salino, por ejemplo, implica acumulación excesiva de sales en el agua o suelo, dificultando la absorción de nutrientes y afectando el crecimiento, desarrollo y productividad [8].

El estrés abiótico en las plantas se clasifica principalmente en osmótico e iónico (Figura 1). El estrés osmótico (Figura 1a) surge por una menor disponibilidad de agua, como en suelos secos, lo que deshidrata las células y limita la fotosíntesis. Ante esto, las plantas cierran sus estomas para reducir la pérdida de agua, aunque también restringen la entrada de CO_2 , lo que puede provocar marchitez [6] [15].

En cambio, el estrés iónico (Figura 1b) se debe a la acumulación de iones tóxicos como sodio (Na^+) y cloro (Cl^-), derivada de factores como el riego con agua salina, el uso excesivo de agroquímicos o condiciones como sequía y altas temperaturas. Estos iones generan toxicidad celular, dañando proteínas y membranas [6].

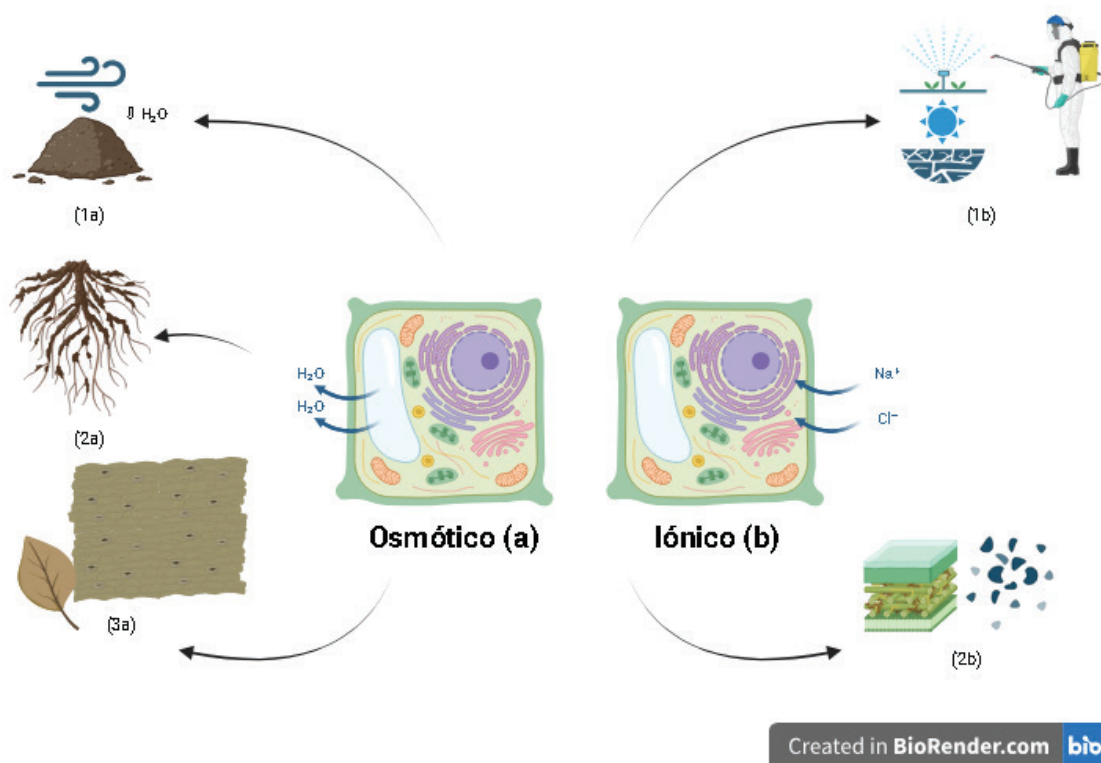


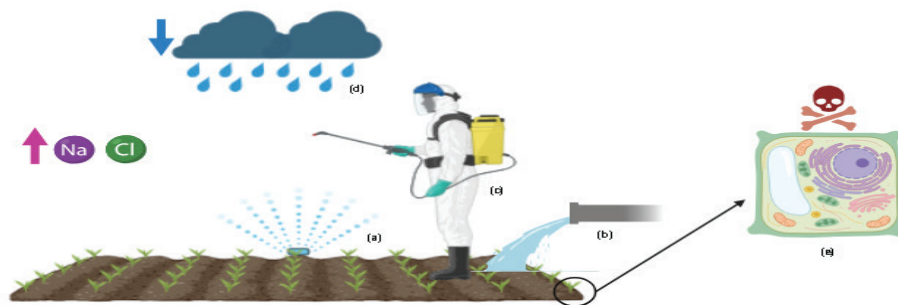
Figura 1. Subtipos estrés abiótico. Estrés osmótico (a): Disminución de agua (1a), deshidratación celular y baja absorción en raíces (2a), cierre estomático (3a). Estrés iónico (b): Factores (1b), toxicidad iónica y daño celular (2b). Adaptado de: [6].

Al igual que ante el estrés biótico, las plantas activan respuestas inmediatas como el cierre estomático (mediado por ácido abscísico) que puede ocurrir en menos de una hora [16], y respuestas a largo plazo como modificaciones morfológicas en raíces y hojas que permiten a la planta mejorar su tolerancia sostenida al estrés ambiental [17].

¿Cómo se llega al estrés salino?

El estrés salino en plantas se manifiesta cuando el suelo presenta concentraciones elevadas de sales solubles, particularmente cloruro de sodio (NaCl), sulfato de calcio (CaSO₄), así como otros sulfatos y cloruros de cationes como Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺, derivados de metales alcalinos y alcalinotérreos con potencial citotóxico [1]. La salinización puede originarse por prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso de agua de riego con alto contenido de sales, la aplicación excesiva de fertilizantes, la infiltración de agua marina en regiones costeras o por condiciones de baja precipitación que impiden el arrastre de las sales fuera del suelo [3].

Cuando las plantas absorben agua de estos suelos, las sales entran junto con el agua y se acumulan en sus tejidos (Figura 2). Esto provoca un desequilibrio osmótico, donde el agua sale de las células para tratar de equilibrar la concentración de sales, causando deshidratación celular. Con el tiempo, esta condición altera funciones vitales como la fotosíntesis, el metabolismo y el crecimiento. En situaciones más extremas, el daño celular puede ser irreversible, afectando la producción y la supervivencia de la planta en ambientes salinos [18].



Created in  BioRender.com

Figura 2. Esquema de salinización del suelo. (a) Riego con agua salina, (b) infiltración marina en suelos costeros, (c) aplicación fertilizantes salinos, (d) acumulación de sales en suelos áridos, y (e) desecación y muerte celular. Adaptado de: [3].

Metodología

Para la elaboración del presente artículo de revisión se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos como SciELO, IntechOpen, Frontiers, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) y la Revista Mexicana de Ciencias Forestales, así como en artículos de divulgación y trabajos de grado. Para la selección inicial de fuentes, se emplearon términos y frases clave como «hormonas vegetales», «fitohormonas», «principales fitohormonas», «ácido abscísico (ABA)», «etileno», «auxinas», «tipos de estrés», «estrés salino», «plantas», «suelo», «señalización» y «mecanismos de acción». La búsqueda se realizó en un período comprendido entre el año 2004 al año 2025, considerando artículos en español e inglés.

Los criterios de inclusión fueron: artículos originales, revisiones y trabajos de grado que abordaron los temas mencionados, publicados en revistas científicas y/o instituciones educativas, y que presentarán información relevante sobre hormonas vegetales, estrés salino y sus mecanismos de acción. Se excluyeron fuentes que no fueran pertinentes y que no estuvieran disponibles en texto completo.

Posteriormente, se registraron datos como el nombre del artículo, resumen, fecha de publicación, idioma, enlace y DOI en una base de datos propia, creada en la herramienta “Hoja de cálculo de Google”, con el fin de facilitar la organización y análisis de la información recopilada.

Resultados

Impacto de la salinidad en el suelo y su papel en el estrés salino

La relación entre la salinidad del suelo y el estrés en las plantas ha cobrado gran relevancia en la agricultura, ya que influye directamente en el rendimiento de los cultivos y en el equilibrio de los ecosistemas. El aumento de la salinización se debe a prácticas de riego inadecuadas, la expansión urbana y los efectos del cambio climático. Por ello, es fundamental entender cómo las altas concentraciones de sales afectan el desarrollo vegetal para así diseñar estrategias de manejo que fortalezcan la tolerancia de los cultivos y protejan el medio ambiente [19].

Además, el impacto de la salinidad varía según la especie vegetal (Cuadro 1), por lo que se han propuesto clasificaciones de tolerancia basadas en la reducción del rendimiento en suelos salinos en comparación con suelos no salinos.

Cuadro 1. Clasificación de la salinidad del suelo y sus efectos sobre los cultivos.

Clase de salinidad del suelo	Conductividad del extracto de saturación (dS/m)	Efecto sobre las plantas de cultivo	Ejemplos de cultivos tolerantes
No salino	0 - 2	Efectos insignificantes sobre la mayoría de cultivos.	Desarrollo óptimo de la mayoría de los cultivos agrícolas.
Ligeramente salino	2 - 4	Posible reducción de rendimiento en cultivos sensibles.	Frijol, maíz, guisante, soya y trébol.
Moderadamente salino	4 - 8	Reducción significativa en el rendimiento de muchos cultivos.	Canola, avena, trigo, centeno, cebada y alfalfa.
Fuertemente salino	8 - 16	Sólo los cultivos tolerantes presentan rendimientos aceptables.	Algunas especies de <i>Agropyron</i> .
Muy fuertemente salino	> 16	Solo algunos cultivos altamente tolerantes sobreviven.	Algunas gramíneas forrajeras.

Adaptado de: [20]

Tipos de suelos salinos

Los suelos salinos son aquellos que presentan altas concentraciones de sales solubles, como cloruros (por ejemplo: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂) y cloruro de magnesio (MgCl₂)); sulfatos (como sulfato de sodio, Na₂SO₄; sulfato de calcio, CaSO₄; sulfato de magnesio, MgSO₄); carbonatos (como carbonato de sodio, Na₂CO₃; carbonato de calcio, CaCO₃; carbonato de magnesio, MgCO₃); además de bicarbonatos (HCO₃⁻), nitratos (NO₃⁻) y, en menor proporción, sales de potasio y amonio [21].

Estas sales pueden acumularse en la superficie o en capas más profundas del suelo debido a procesos naturales o actividades humanas, como el riego inadecuado que incluye prácticas como el uso de agua con alto contenido de sales, la falta de drenaje eficiente, la ausencia de lavados periódicos del suelo y el diseño deficiente de sistemas de riego [3]. La presencia excesiva de sales dificulta que las plantas absorban agua y nutrientes, afectando su crecimiento y procesos esenciales como la fotosíntesis y el desarrollo de las raíces. Este tipo de suelo es más frecuente en regiones áridas y semiáridas (Cuadro 2), donde la poca lluvia y la alta evaporación favorecen la acumulación de sales [22].

Para diagnosticar y manejar estos suelos, se utilizan indicadores como la conductividad eléctrica (CE), que mide la concentración de sales solubles; la relación de absorción de sodio (RAS), que evalúa el riesgo de sodicidad y su impacto en la estructura del suelo; y el pH, que, cuando es elevado, puede reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales. Estos parámetros son fundamentales para implementar estrategias de manejo adecuadas y mitigar los efectos

adversos de la salinidad en la agricultura [22]. Estos suelos representan un desafío significativo para la agricultura, ya que la salinidad puede reducir la absorción radicular y aumentar el estrés osmótico, afectando la salud de las plantas [23].

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de suelo.

Característica	Suelo Salino	Suelo Sódico	Suelo Salino-Sódico
Definición	Suelo con alta concentración de sales solubles.	Suelo con alta concentración de sodio intercambiable.	Suelo con alta concentración de sales solubles y sodio intercambiable.
Ejemplos de Sales	NaCl, Na ₂ SO ₄ , Calcio y magnesio	Principalmente Na ⁺	Mezcla de sales como NaCl y Na ₂ SO ₄
Conductividad Eléctrica (CE)	> 4 dS/m	Variable	> 4 dS/m
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	< 13	> 13	> 13
pH	< 8.5	> 8.5	Variable, pero puede ser > 8.5
Suelos típicos de presencia	Común en desiertos, valles secos, y llanuras aluviales donde la evaporación excede la precipitación, provocan la acumulación de sales.	Común en llanuras y regiones áridas donde la lixiviación de sodio es limitada y la acumulación de sodio es alta.	Común en llanuras y regiones áridas donde hay una acumulación tanto de sales solubles como de sodio debido a la escasa lixiviación.

Adaptado de: [22]

Clasificación de plantas según su adaptación a ambientes salinos: estrategias y mecanismos de tolerancia

Comprender y clasificar cómo las plantas se adaptan a entornos salinos permite reconocer las estrategias y mecanismos que emplean para resistir la salinidad, ofreciendo información valiosa para mejorar el manejo de los cultivos y restaurar ecosistemas afectados. Las plantas halófitas se caracterizan por su capacidad para crecer y desarrollarse en suelos con altas concentraciones de sal sin verse perjudicadas. Estas especies suelen habitar en regiones cálidas y secas y pueden clasificarse en distintos subgrupos (Cuadro 3). En contraste, las plantas glicófitas (que incluyen la mayoría de los cultivos agrícolas) no toleran altos niveles de sal y prefieren suelos con baja salinidad. También existen las pseudohalófitas, que parecen estar adaptadas a ambientes salinos, pero en realidad solo soportan la salinidad de manera parcial y no poseen una resistencia completa [24].

Cuadro 3. Subclasificación de plantas halófitas.

Clasificación	Definición	Características	Ejemplos
Crinohalófitas	Plantas que crecen en ambientes altamente salinos, como estuarios y salares, desempeñan un papel crucial en la estabilización de suelos y la protección de las costas.	Cuentan con glándulas excretoras en los tricomas o la epidermis de las hojas para eliminar el exceso de sal. Tienen raíces profundas que les permiten acceder a agua dulce, clave para mantener el equilibrio hídrico en su entorno salino. Además, sus hojas suculentas almacenan agua, reduciendo la transpiración y minimizando la pérdida de agua, lo que les ayuda a sobrevivir.	<i>Atriplex spongiosa</i> , <i>Limonium</i> , <i>Tamarix</i>
Euhalófitos	Plantas que crecen en ambientes salinos y tienen adaptaciones para tolerar la sal, pero no la requieren para su desarrollo.	Han desarrollado mecanismos para tolerar altas concentraciones de sal, como acumular sales en vacuolas celulares y utilizar sistemas de transporte de iones, como canales, bombas y transportadores en las membranas celulares de raíces, tallos y hojas. También producen compuestos osmoprotectores y desarrollan estructuras especiales como tricomas y una cutícula gruesa para reducir la pérdida de agua y protegerse contra la sal.	<i>Arthrocnemum</i> , <i>Salicornia</i> , <i>Sarcocornia</i>
Glicohalófitos	Están adaptadas a ambientes con salinidad moderada y emplean mecanismos fisiológicos para tolerar el exceso de sal sin depender de condiciones extremadamente salinas. Requieren agua dulce para crecer y desarrollarse óptimamente, por lo que desarrollan raíces profundas para acceder a ella y mantener su equilibrio hídrico.	Tienen adaptaciones para tolerar ciertos niveles de sal, como excreción de sales a través de glándulas salinas en tricomas o epidermis, acumulación de sales en vacuolas de células de tejidos como la epidermis y el mesófilo, y producción de compuestos osmoprotectores como prolina, betaína, sacarosa, rafinosa, manitol y sorbitol.	<i>Chenopodium quinoa</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Suaeda maritima</i>
Locahalófitas	Plantas adaptadas a ambientes con salinidad moderada, que requieren cierto nivel de sales para su crecimiento, aunque no dependen de concentraciones salinas extremas.	Regulan la concentración de sal mediante estructuras especializadas que facilitan el movimiento de las sales, como glándulas excretoras o sistemas de transporte de iones, para mantener un equilibrio osmótico adecuado. En su mayoría, prefieren suelos con niveles bajos de salinidad y tienen mecanismos limitados para manejar la sal en concentraciones más altas.	<i>Atriplex halimus</i> , <i>Salsola oppositifolia</i> , <i>Halimione portulacoides</i>

Adaptado de: [24].

Principales fitohormonas frente al estrés salino

Las plantas reaccionan al estrés salino a través de una serie de adaptaciones fisiológicas, bioquímicas y moleculares, reguladas por una red compleja de interacciones hormonales [25]. Las fitohormonas, también llamadas hormonas vegetales, son compuestos orgánicos esenciales que controlan varios procesos vitales en las plantas. Estas moléculas desempeñan un papel crucial en la coordinación y regulación de funciones a nivel celular, de tejidos y órganos, ayudando al crecimiento, la adaptación y la respuesta a los cambios en el entorno [26].

A diferencia de las hormonas animales, que se producen en glándulas especializadas y actúan sobre células concretas, las fitohormonas se generan en distintas partes de la planta, como los ápices meristemáticos, que impulsan el crecimiento continuo, y los primordios, que intervienen en la formación de nuevas estructuras. Estas zonas son clave para el desarrollo y la capacidad de adaptación de la planta [26][27].

Los tres principales tipos de fitohormonas (ácido abscísico, etileno y auxinas) presentan diferencias en su estructura (Figura 3), lo que se traduce en funciones específicas dentro de los procesos fisiológicos de la planta.

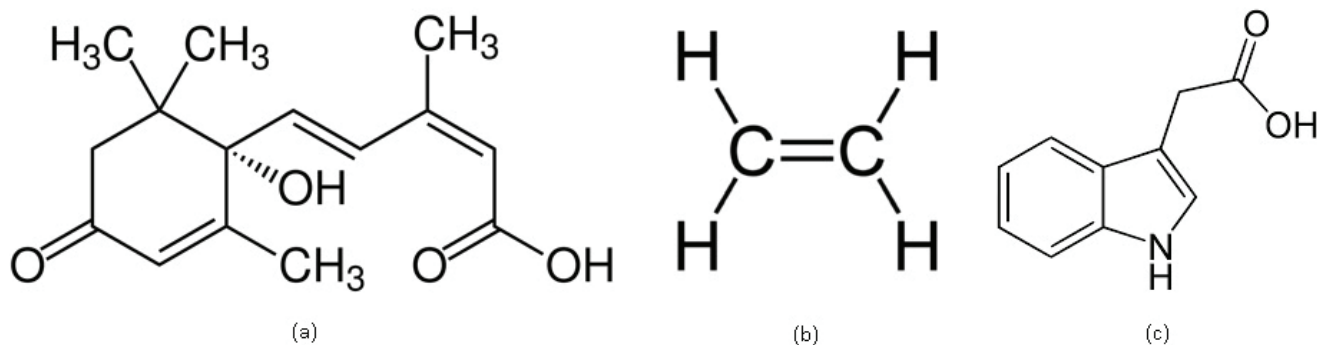


Figura 3. Estructura química fitohormonas. Ácido abscísico (a). Etileno (b). Auxinas (c). Adaptado de: [27]

Ácido Abscísico (ABA)

El ácido abscísico (ABA) es una fitohormona clave que participa en la regulación del cierre de los estomas, la germinación de las semillas y la respuesta a distintos tipos de estrés. Bajo condiciones osmóticas adversas, como la alta salinidad o la sequía, el ABA desencadena respuestas rápidas, como el cierre de los estomas, ayudando a conservar el agua en la planta. Además, esta hormona influye en procesos de adaptación a largo plazo al regular la expresión de genes relacionados con la tolerancia al estrés [28].

Su estructura química está basada en un sesquiterpenoide (terpenos de 15 carbonos), con un anillo central y varios grupos funcionales, incluidos hidroxilos y un grupo carboxilo, lo que le otorga su naturaleza lipofílica (Figura 3a). Esta característica permite al ABA moverse a través de las membranas celulares. Su fórmula molecular es $C_{15}H_{20}O_4$ [29].

El ácido abscísico (ABA) desempeña un papel fundamental en la adaptación de las plantas al estrés salino, especialmente cuando se combina con otros tipos de estrés abiótico, como el calor. En situaciones donde se presentan ambos factores, el ABA actúa como una señal clave en la respuesta de la planta. Estudios realizados en *Arabidopsis thaliana* mostraron que esta combinación de estrés aumenta la vulnerabilidad de las plantas, elevando la proporción de Na^+/K^+ en las hojas y activando genes relacionados con el ABA. Además, plantas modificadas

genéticamente para ser deficientes en ABA mostraron una mayor sensibilidad a este tipo de estrés, lo que subraya la importancia de esta hormona en la regulación de las respuestas adaptativas [30].

Por otra parte, el ABA también controla la expresión de genes como NCED (9-cis-epoxi-caroteno dioxigenasa), involucrados en su producción, y se ha demostrado que su acumulación está estrechamente vinculada a la respuesta ante sequías, deshidratación y estrés por sales. A nivel celular, esta fitohormona regula la apertura de los estomas, ayudando a minimizar la pérdida de agua y mejorando la resistencia a condiciones difíciles. También participa en la respuesta a contaminantes, como los metales pesados, incrementando su concentración en presencia de estos elementos y favoreciendo la tolerancia de las plantas a distintos factores de estrés, como el frío, la sequía y la salinidad [31].

Etileno

El etileno es un hidrocarburo sencillo formado por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno, unidos por un doble enlace C=C (Figura 3b). A pesar de su estructura molecular sencilla, esta molécula gaseosa actúa como una fitohormona esencial en numerosos procesos fisiológicos de las plantas, incluyendo la maduración de frutos, la senescencia foliar y la respuesta frente a diversos tipos de estrés. Su tamaño reducido no limita su funcionalidad: el etileno cumple un papel determinante en la adaptación y el desarrollo vegetal bajo condiciones adversas. En el contexto del estrés salino, esta hormona participa activamente en la regulación del equilibrio iónico, especialmente de sodio (Na⁺) y potasio (K⁺), además de modular el metabolismo de especies reactivas de oxígeno (ROS) y potenciar la respuesta antioxidante. Asimismo, favorece la asimilación de nutrientes como nitratos y sulfatos, fortaleciendo la resistencia de las plantas en ambientes con alta salinidad. Su fórmula molecular es C₂H₄ [32].

Diversas investigaciones respaldan el papel clave del etileno en la respuesta de las plantas al estrés salino. Un estudio llevado a cabo en 2017 evaluó el comportamiento de cuatro especies de interés agrícola común: pimienta, lechuga, espinaca y remolacha [33]. Tras ser expuestas a un “shock salino” mediante la aplicación de 100 mM de NaCl, se observó que las especies más sensibles al estrés (pimienta y lechuga) presentaron mayores pérdidas de peso fresco y contenido hídrico en comparación con las especies más tolerantes (espinaca y remolacha). Durante la exposición al estrés, todas las especies mostraron un incremento en la tasa respiratoria, así como en la producción de etileno, poliaminas y 1-amino-ciclopropano-1-carboxilato (ACC), este último precursor directo del etileno. Las especies sensibles presentaron niveles más altos y sostenidos de estos compuestos, mientras que las tolerantes lograron volver a valores normales en 24 horas. El aumento de etileno parece estar relacionado con la sensibilidad al estrés, actuando como una señal reguladora en la respuesta de las plantas. Además, se encontró que la producción de poliaminas y etileno ocurre de manera simultánea, sin interferir entre sí, lo que indica que ambas rutas funcionan juntas como parte de la estrategia de adaptación al estrés salino [33].

Auxinas

Las auxinas —entre las que destacan el ácido indol-3-acético (AIA) (Figura 3c), el ácido naftalenoacético (ANA) y el ácido indolbutírico (AIB)— son fitohormonas fundamentales en el crecimiento y desarrollo vegetal. Estas comparten un núcleo indólico como estructura básica, con variaciones en los sustituyentes que les confieren diferencias en actividad y uso agronómico. El AIA, derivado del indol y con fórmula C₁₀H₉NO₂, es esencial para la elongación celular, la formación de raíces y el mantenimiento de la dominancia apical. Por su parte, el ANA —un análogo sintético— se emplea para estimular el enraizamiento y reducir la caída prematura de frutos, mientras que el AIB, de origen natural o sintético, resulta muy eficaz para inducir raíces

adventicias en especies de difícil propagación. Estas hormonas actúan de forma conjunta, regulando procesos esenciales como el transporte de nutrientes y la adaptación a situaciones adversas, y contribuyendo a controlar la acumulación de sodio (Na^+) en suelos salinos, lo que refuerza la tolerancia de las plantas a este estrés [34].

Las auxinas, tanto producidas naturalmente como aplicadas externamente, son clave para ayudar a las plantas a enfrentar el estrés salino. Bacterias como *Methylobacterium oryzae* CBMB20 pueden tolerar altos niveles de sal (200 mM de NaCl) y producir ácido indolacético (AIA), favoreciendo el crecimiento de raíces y mejorando la absorción de agua y nutrientes en ambientes salinos. Además, la aplicación de auxinas, como en *Eucalyptus globulus*, donde el tratamiento con 57 μM de AIA aumentó el enraizamiento 4,7 veces, demuestra cómo estas hormonas apoyan la adaptación y el desarrollo de las plantas bajo condiciones salinas [35].

Proteínas relacionadas con la señalización de fitohormonas y sus mecanismos de acción

Las fitohormonas controlan el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de intrincadas redes de señalización, donde diversas proteínas son esenciales para detectar, transmitir y ejecutar las respuestas hormonales (Cuadro 4). Estas proteínas participan en procesos clave como la germinación, la elongación celular, la floración y la adaptación al estrés, ayudando a las plantas a ajustarse a su entorno y responder a estímulos. Comprender el papel de estas proteínas es crucial para fortalecer la resistencia de las plantas y mejorar su rendimiento en condiciones desfavorables.

En conjunto, las proteínas implicadas en la señalización hormonal actúan como componentes clave para la percepción y transducción del estrés abiótico en las plantas. Su estudio permite comprender cómo las fitohormonas coordinan respuestas complejas que van desde la activación génica hasta cambios metabólicos y estructurales. Esta información resulta fundamental no sólo para fines académicos, sino también para aplicaciones prácticas en el ámbito agrícola, como la selección de cultivos más resilientes y el diseño de estrategias biotecnológicas enfocadas en mejorar la tolerancia a condiciones ambientales adversas [47].

Cuadro 4. Proteínas y su función en los procesos hormonales

Fitohormona	Proteína	Función
Ácido Abscísico (ABA)	Receptores del ABA (PYR/PYL/RCAR)	Estos receptores son proteínas que se unen al ABA. Cuando esto sucede, se inhibe la actividad de las proteínas fosfatasa tipo 2C (PP2C), permitiendo que la señalización continúe [36].
	Fosfatasa tipo 2C (PP2C)	En ausencia de ABA, estas fosfatasa inhiben las proteínas quinasas activadas por ABA (SnRK2). Cuando el ABA se une a su receptor, se inhibe a las PP2C, permitiendo que las SnRK2 se activen [36].
	Proteínas LEA (Late Embryogenesis Abundant)	Aunque no participan directamente en la señalización del ABA, su expresión es inducida por ABA. Estas proteínas ayudan a proteger las células en condiciones de desecación [37].
	Osmotina	Su expresión es estimulada por el ABA, lo que la vincula con la respuesta de la planta a la sequía y la salinidad [38].
Etileno	Proteína insensible al etileno 3 (EIN3) / proteínas similares a EIN3 (EILs)	Es un regulador esencial en la vía de señalización del etileno, ya que activa cascadas transcripcionales al unirse a elementos de respuesta al etileno (PEREs) y secuencias conservadas de unión a EIL (ECBSs) en los promotores de genes diana. Además, juega un papel fundamental en la respuesta a estreses bióticos y abióticos, como la tolerancia a la salinidad, al regular procesos hormonales, la defensa contra patógenos y la adaptación a condiciones adversas [39].
	Factor de Respuesta al Etileno (ERF)	Son un grupo de proteínas de la familia de los factores de transcripción, que regulan genes de desarrollo y defensa en plantas especialmente en respuestas frente a patógenos y herbívoros. En la respuesta defensiva, controlan la síntesis de metabolitos secundarios (p. ej., fitoalexinas) y de proteínas antimicrobianas (quitinasas, glucanasas). Un ejemplo es el gen PR1 (Pathogenesis-Related Protein 1), implicado en la defensa contra patógenos [40].
	Respuesta Triple Constitutiva 1 (CTR1)	Esta proteína es una quinasa citoplasmática que inhibe la señalización del etileno. En ausencia de etileno, mantiene inactiva a EIN2, bloqueando la activación de genes etilénicos. Al unirse el etileno a sus receptores, se inhibe CTR1, permitiendo que EIN2 active EIN3 y se inicien procesos como maduración de frutos, senescencia y respuesta al estrés. En resumen, CTR1 reprime la ruta del etileno para modular la respuesta de la planta según las señales del entorno [41].
	Aminociclopropano-1-carboxilato sintasa (ACS1)	En condiciones de estrés salino, se incrementa la expresión de ACS, lo que eleva la producción de etileno. Este aumento activa la señalización de la fitohormona, estimulando la expresión de genes responsables de la respuesta al estrés, como aquellos que regulan el equilibrio osmótico y la acumulación de antioxidantes. Entre estos se destacan genes que codifican proteínas osmoprotectoras (por ejemplo, P5CS) y antioxidantes (como APX y SOD), que ayudan a mitigar el daño provocado por el estrés salino [42].

Fitohormona	Proteína	Función
Auxinas	Respuesta al Inhibidor del Transporte 1 (TIR1)	<p>Proteína perteneciente a la familia TIR1/AFB, es un receptor esencial de auxinas que modula tanto el crecimiento como la respuesta al estrés en las plantas. Al unirse a auxinas, activa una señalización que desencadena la degradación de proteínas inhibitoras, lo que facilita la expresión de genes involucrados en el desarrollo radicular y la elongación celular.</p> <p>Además, en condiciones de estrés, como el estrés salino, estudios han mostrado que tanto las plantas mutantes como las que sobreexpresan TIR1/AFB mejoran en germinación y desarrollo de raíces, lo que sugiere su papel en la adaptación a ambientes adversos, posiblemente mediante la regulación de enzimas antioxidantes y la modulación de hormonas como el ácido abscísico (ABA), lo que subraya su importancia en la adaptación y resistencia vegetal [43].</p>
	Proteínas PIN-formadas	<p>Las proteínas pertenecientes a la familia PIN-FORMED (PIN), también llamadas transportadores de eflujo de auxina, desempeñan un rol esencial en el transporte polar de esta fitohormona. Estas proteínas, situadas en la membrana celular que permiten su salida del citosol al espacio extracelular.</p> <p>Este proceso unidireccional es crucial para la distribución de auxinas en diferentes órganos vegetales y es fundamental para el desarrollo de raíces, flores, la elongación celular y el establecimiento de patrones morfológicos, respondiendo a señales ambientales e internas [44].</p>
	Factores de respuesta a las auxinas (ARF)	<p>Los factores de transcripción ARF son fundamentales para regular la expresión de genes controlados por auxinas en plantas. Estas proteínas reconocen y se enlazan a secuencias específicas conocidas como AuxRE, ubicadas en las regiones promotoras de genes modulando su actividad ya sea de forma activadora o represora.</p> <p>Su estructura modular incluye un dominio B3 en el extremo N-terminal (DBD) para reconocer AuxRE y regiones intermedias que actúan según su contenido de aminoácidos, como por ejemplo; serina (S) que tiene una función represora y la glutamina (Q) que suele promover la transcripción.</p> <p>Además, intervienen en procesos como la elongación celular y la formación de órganos, y algunos ARF facilitan la dimerización y la interacción con otras proteínas, fortaleciendo su capacidad reguladora [45].</p>
	ARN pequeño inducido por auxina (SAUR)	<p>Las proteínas SAUR desempeñan un papel esencial en la elongación celular inducida por auxinas en las plantas. Actúan mediante la interacción con las H⁺-ATPasa de la membrana plasmática, impidiendo su desfosforilación, lo cual incrementa su actividad. Esto provoca una acidificación del espacio apoplástico, favoreciendo el aflojamiento de la pared celular y facilitando el alargamiento celular.</p> <p>Además, los genes SAUR también participan en respuestas a estímulos lumínicos, regulando la orientación de brotes y ramas según la dirección de la luz. Se ha comprobado que su sobreexpresión promueve el crecimiento celular en distintos órganos vegetales, como tallos, hojas y flores, subrayando su relevancia en el desarrollo morfológico de la planta [46].</p>

Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

El estrés salino es una de las mayores limitaciones para la actividad agrícola, afectando vastas áreas de cultivo y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria global. Según la concentración de sales, las plantas experimentan efectos que varían desde la reducción del crecimiento hasta la inhibición total de la vegetación en condiciones extremas.

La respuesta de las plantas es un proceso activo en el que una compleja red de fitohormonas—especialmente el ácido abscísico (ABA), el etileno y las auxinas—regula el cierre de estomas, la reorganización radicular y la homeostasis osmótica. Estudios recientes indican que, si bien el ABA es clave en la tolerancia a la salinidad, su acción es modulada significativamente por etileno y auxinas. Por ejemplo, la generación de etileno tras un “shock salino” aumenta la tasa respiratoria y la producción de poliaminas, normalizándose rápidamente en especies tolerantes, a diferencia de los cultivos sensibles que sufren una marcada pérdida de biomasa.

Además, las auxinas, junto a la actividad de bacterias promotoras del crecimiento, favorecen el desarrollo radicular, optimizando la captación de agua y nutrientes. Sin embargo, la eficacia de estos mecanismos varía según la especie, el tiempo de exposición y las condiciones ambientales, lo que subraya la necesidad de profundizar en la modulación hormonal para adaptar mejor los cultivos a suelos salinos.

En este contexto, el estudio de las fitohormonas constituye una herramienta prometedora para comprender las respuestas fisiológicas de las plantas expuestas a los ambientes salinos. Este enfoque puede facilitar el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes frente a esta problemática. En particular, los agricultores deben considerar estrategias integradas de manejo ambiental que incluyan: la evaluación previa del estado de los suelos antes del establecimiento de cultivos, el uso de técnicas de biorremediación para mitigar la toxicidad y la implementación de cultivos resistentes o bioindicadores que permitan monitorear tempranamente el estrés vegetal. Asimismo, es fundamental promover la capacitación en el manejo seguro y racional de agroquímicos, fomentando alternativas ecológicas y promoviendo la transición hacia sistemas agrícolas más responsables con el entorno.

Referencias

- [1] W. A. Cardona, J. S. Gutiérrez D., O. I. Monsalve C., y C. R. Bonilla C., «Efecto de la salinidad sobre el crecimiento vegetativo de plantas de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) micorrizadas y sin micorrizar», *Rev. Colomb. Cienc. Hortícolas*, vol. 11, n.º 2, pp. 253-266, jul. 2017, doi: 10.17584/rcch.2017v11i2.6109.
- [2] C. Vasyi, «Erosión Del Suelo: Tipos, Cómo Evitarla Y Controlarla», *Erosión Del Suelo: Tipos, Cómo Evitarla Y Controlarla*. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/erosion-del-suelo/>
- [3] C. Vasyi, «Salinidad Del Suelo: Cómo Prevenirla Y Reducirla», *Salinidad Del Suelo: Cómo Prevenirla Y Reducirla*. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/salinidad-del-suelo/>
- [4] K. Pandit, Chandni, S. Kaur, M. Kumar, R. Bhardwaj, y S. Kaur, «Chapter Six - Salinity stress: Impact on plant growth», vol. 9, pp. 145-160, 15 de agosto de 2024.
- [5] L. Rodríguez Pérez, «Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas», vol. 24, n.º 1, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v24n1/v24n1a04.pdf>
- [6] A. Martínez Callejón, «Implicaciones de las hormonas vegetales en respuesta al estrés abiótico», Universidad de Jaén, Facultad de Ciencias Experimentales, 2018. [En línea]. Disponible en: https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/8659/1/TFG_Martinez_Callejon_Ana.pdf
- [7] L. Suárez Chávez, A. Álvarez Fonseca, y R. Ramírez Fernández, «Apuntes sobre algunos reguladores del crecimiento vegetal que participan en la respuesta de las plantas frente al estrés abiótico», vol. 33, n.º 3, p. 10, 2012.
- [8] A. Gull, A. Ahmad Lone, y N. Ul Islam Wani, «Biotic and Abiotic Stresses in Plants», en *Abiotic and Biotic Stress in Plants*, IntechOpen, 2019. Accedido: 22 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/66714#>

- [9] «Cómo combatir el estrés biótico en los cultivos». [En línea]. Disponible en: <https://manvert.com/medios/estres-biotico-plantas>
- [10] Z. Chen *et al.*, «Pseudomonas syringae type III effector AvrRpt2 alters Arabidopsis thaliana auxin physiology», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 104, n.º 50, pp. 20131-20136, dic. 2007, doi: 10.1073/pnas.0704901104.
- [11] «Defensas vegetales contra la herbivoría», Wikipedia. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Defensas_vegetales_contra_la_herbivor%C3%ADa
- [12] T. Colombi, B. K. Pandey, A. Chawade, M. J. Bennett, S. J. Mooney, y T. Keller, «Root plasticity versus elasticity – when are responses acclimative?», *Trends Plant Sci.*, vol. 29, n.º 8, pp. 856-864, ago. 2024, doi: 10.1016/j.tplants.2024.01.003.
- [13] A. P. Vovides y S. Galicia, «Plantas a la defensiva: espinas, agujones e idioblastos», *17*, pp. 31-37, 6 de febrero de 2025.
- [14] F. Sautua y M. Carmona, «Sistema de Inmunidad basal: Barreras Constitutivas o Preexistentes», Sistema de Inmunidad basal: Barreras Constitutivas o Preexistentes. [En línea]. Disponible en: https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=6092&utm_source=
- [15] L. Márquez Juárez, «Efecto del estrés osmótico inducido in vitro en las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 de caña de azúcar.», Universidad Veracruzana, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/server/api/core/bitstreams/1fcd1866-aaab-4bec-b82c-6a6612877ff2/content>
- [16] B. Hu, J. Cao, K. Ge, y L. Li, «The site of water stress governs the pattern of ABA synthesis and transport in peanut», *Sci. Rep.*, vol. 6, n.º 1, p. 32143, oct. 2016, doi: 10.1038/srep32143.
- [17] E. W. Chehab, E. Eich, y J. Braam, «Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation», *J. Exp. Bot.*, vol. 60, n.º 1, pp. 43-56, nov. 2008, doi: 10.1093/jxb/ern315.
- [18] V. Goykovic Cortés y G. Saavedra Del Real, «Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo», *Idesia Arica*, vol. 25, n.º 3, dic. 2007, doi: 10.4067/S0718-34292007000300006.
- [19] P. Kogut, «Degradación Del Suelo: Técnicas Para Evitar Sus Efectos», Degradación Del Suelo: Técnicas Para Evitar Sus Efectos. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>
- [20] J. Lúquez, G. Eyherabide, y L. R. Petigrosso, «Tolerancia a la salinidad del suelo en especies de interés agronómico.», *Nexos*, n.º 34, dic. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://revista.mdp.edu.ar/nexos/article/view/11>
- [21] K. L. Gartley, «Recommended Methods for Measuring Soluble Salts in Soils», may 2011, [En línea]. Disponible en: <https://www.udel.edu/content/dam/udelImages/canr/pdfs/extension/factsheets/soiltest-recs/CHAP10.pdf>
- [22] O. Rodríguez y R. Dufour, «Suelos Salinos y Sódicos: Identificación, Mitigación y Consideraciones de Manejo», Suelos Salinos y Sódicos: Identificación, Mitigación y Consideraciones de Manejo. [En línea]. Disponible en: <https://attra.ncat.org/publication/suelos-salinos-y-sodicos-identificacion-mitigacion-y-consideraciones-de-manejo/>
- [23] S. Montoya Sanchez-Camacho, «Prevención y recuperación de suelos salinos», Prevención y recuperación de suelos salinos. [En línea]. Disponible en: <https://tecnicrop.com/blog/prevencion-y-recuperacion-de-suelos-salinos>
- [24] A. F. González Villaveces, «Especies halófitas de importancia agrícola como alternativa de biorremediación de suelos con problemas de salinización en Colombia.», Revisión Bibliográfica, Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/9a94ed5d-0bb7-48a7-8397-e7876906b8c0/content>
- [25] I. Khan *et al.*, «Perspectives of phytohormones application to enhance salinity tolerance in plants», en *New Insights Into Phytohormones*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1003714.
- [26] J. Azcón Bieto y M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2.ª ed. McGraw-Hill Interamericana, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- [27] J. S. Alcántara Cortes, J. Acero Godoy, J. D. Alcántara Cortés, y R. M. Sánchez Mora, «Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal», *Nova*, vol. 17, n.º 32, pp. 109-129, abr. 2019, doi: 10.22490/24629448.3639.
- [28] V. Verma, P. Ravindran, y P. P. Kumar, «Plant hormone-mediated regulation of stress responses», *BMC Plant Biol.*, vol. 16, n.º 1, p. 86, abr. 2016, doi: 10.1186/s12870-016-0771-y.
- [29] M. Jordán y J. Casaretto, «Hormonas y Reguladores del Crecimiento: Etileno, Ácido Abscísico, Brasinoesteroides, Poliaminas, Ácido Salicílico y Ácido Jasmónico», [En línea]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Etileno,aba,jasmonico,brasino,.pdf>

- [30] N. Suzuki *et al.*, «ABA Is Required for Plant Acclimation to a Combination of Salt and Heat Stress», *PLOS ONE*, vol. 11, n.º 1, p. e0147625, ene. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0147625.
- [31] K. Vishwakarma *et al.*, «Abscisic Acid Signaling and Abiotic Stress Tolerance in Plants: A Review on Current Knowledge and Future Prospects», *Front. Plant Sci.*, vol. 08, feb. 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00161.
- [32] R. Riyazuddin *et al.*, «Ethylene: A Master Regulator of Salinity Stress Tolerance in Plants», *Biomolecules*, vol. 10, n.º 6, p. 959, jun. 2020, doi: 10.3390/biom10060959.
- [33] P. J. Zapata, M. Serrano, M. F. García-Legaz, M. T. Pretel, y M. A. Botella, «Short Term Effect of Salt Shock on Ethylene and Polyamines Depends on Plant Salt Sensitivity», *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 855, may 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00855.
- [34] T. Ribba, F. Garrido-Vargas, y J. A. O'Brien, «Auxin-mediated responses under salt stress: from developmental regulation to biotechnological applications», *J. Exp. Bot.*, vol. 71, n.º 13, pp. 3843-3853, may 2020, doi: 10.1093/jxb/eraa241.
- [35] M. A. Mónaco, «Caracterización de la tolerancia a estrés salino del sistema *Tabebuia aurea* *Methylobacterium*», Tesis de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Luján, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/rediunlu/1063/18%20-%20MONACO%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [36] D. Franco Aragón, «Caracterización de compuestos químicos agonistas de los receptores de ABA, en las plantas modelo *Arabidopsis thaliana* y *Setaria viridis*», Trabajo Fin de Máster en Biotecnología Molecular y Celular de Plantas, Universitat Politècnica de València, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/5d8a8f1b-d263-4c23-97eb-2c68d529f553/content>
- [37] A. Imen, «Abiotic stress in plants: Late Embryogenesis Abundant proteins», Título de Doctorado, Universidad de Barcelona, 2012. [En línea]. Disponible en: https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/36318/4/IMEN_AMARA_PhD_THESIS.pdf
- [38] L. Ruz Estévez, E. Badosa Romáño, y E. Montesinos Seguí, «Las proteínas de estrés en las plantas», n.º 159, pp. 49-51, 2004.
- [39] H. Yi-Qin *et al.*, «Genome-wide analysis of ethylene-insensitive3 (EIN3/EIL) in *Triticum aestivum*», *Crop Sci.*, vol. 60, n.º 4, pp. 2019-2037, jul. 2020, doi: 10.1002/csc2.20115.
- [40] J. Debbarma, Y. N. Sarki, B. Saikia, H. P. D. Boruah, D. L. Singha, y C. Chikkaputtaiah, «Ethylene Response Factor (ERF) Family Proteins in Abiotic Stresses and CRISPR-Cas9 Genome Editing of ERFs for Multiple Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants: A Review», *Mol. Biotechnol.*, vol. 61, n.º 2, pp. 153-172, feb. 2019, doi: 10.1007/s12033-018-0144-x.
- [41] H. L. Park *et al.*, «Ethylene-triggered subcellular trafficking of CTR1 enhances the response to ethylene gas», *Nat. Commun.*, vol. 14, n.º 1, p. 365, ene. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-35975-6.
- [42] J. Cerezo Martínez, «Fisiología Vegetal Tema XII Etileno», Universidad Politécnica de Cartagena. [En línea]. Disponible en: <https://georgiusm.com/wp-content/uploads/2017/11/tema-12-etileno.pdf>
- [43] W. Du *et al.*, «TIR1/AFB proteins: Active players in abiotic and biotic stress signaling», *Front. Plant Sci.*, vol. 13, p. 1083409, nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1083409.
- [44] K. L. Ung *et al.*, «Structures and mechanism of the plant PIN-FORMED auxin transporter», *Nature*, vol. 609, n.º 7927, pp. 605-610, sep. 2022, doi: 10.1038/s41586-022-04883-y.
- [45] S.-B. Li, Z.-Z. Xie, C.-G. Hu, y J.-Z. Zhang, «A Review of Auxin Response Factors (ARFs) in Plants», *Front. Plant Sci.*, vol. 7, feb. 2016, doi: 10.3389/fpls.2016.00047.
- [46] N. Stortenbeker y M. Bemer, «The SAUR gene family: the plant's toolbox for adaptation of growth and development», *J. Exp. Bot.*, vol. 70, n.º 1, pp. 17-27, ene. 2019, doi: 10.1093/jxb/ery332.
- [47] R. Waadt, C. A. Seller, P.-K. Hsu, Y. Takahashi, S. Munemasa, y J. I. Schroeder, «Plant hormone regulation of abiotic stress responses», *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, vol. 23, n.º 10, pp. 680-694, oct. 2022, doi: 10.1038/s41580-022-00479-6.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *Copilot*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.