

La salinización del suelo cultivable: causas, problemática actual asociada al cambio climático y áreas de oportunidad

Patricia Paulina Hernández Victoria¹, Héctor Flores Magdaleno^{1*}, Abel Quevedo Nolasco¹, Jorge Flores Velázquez¹, Gustavo Cruz Cárdenas² y Nora Meráz Maldonado¹

¹Colegio de Postgraduados (COLPOS), Departamento de Hidrociencias, Motecillos, Estado de México, México.

²COFAA, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Michoacán, Jiquilpan, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: mhector@colpos.mx

Palabras clave:

análisis de imagen, cambio climático, monitoreo, remediación de suelos salinos, salinidad.

Resumen

La salinización del suelo es una problemática que afecta principalmente a los agricultores y atenta contra la soberanía alimentaria. El objetivo de este trabajo es comentar los distintos conceptos del suelo, la salinización del suelo, las principales causas de salinización, la gravedad de la problemática, la distribución de suelos salinos a nivel mundial y a nivel nacional y los probables efectos del cambio climático sobre la salinización del suelo. Además, también se desarrolla la problemática actual del monitoreo de suelos salinos, así como sus probables soluciones mediante análisis de imágenes, tanto satelitales como con cámaras acopladas a drones. Por último, se integran las limitaciones de este nuevo enfoque para el diagnóstico de salinización y se describen las soluciones actuales para la remediación de suelos salinos.

¿Qué es el suelo?

El suelo es un recurso no renovable; una vez perdido, no se puede recuperar (Garrido, 2016). Existen diversos conceptos sobre el suelo, dependiendo de la ciencia que lo describa, desde el punto de vista físico, químico o biológico. Algunos de los conceptos más utilizados son los siguientes:

1. Cuerpo natural físico, dinámico, vivo y con múltiples funciones ubicado sobre la parte superficial de la corteza terrestre. Derivado de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos sobre la roca madre (material original). El suelo está formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, donde los componentes

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 83-101.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14707376>

Recibido: 12 septiembre 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 30 de noviembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



sólidos provienen de la desintegración o alteración física y química de las rocas y minerales. Se caracterizan por formar uno o más horizontes que se distinguen del material que los originó (Llerena, 2020; Aceves, 2011; Porta et al., 2019)

2. Sistema complejo en la intersección de la atmósfera, litosfera, hidrosfera y biosfera que es fundamental para la producción de alimentos y clave para la sostenibilidad a través de su apoyo a importantes servicios sociales y ecosistémicos (Lehmann et al., 2020).

3. Edafológicamente hablando es un medio que ofrece los nutrientes requeridos para las plantas y un sustrato que sirve de soporte para el crecimiento de las raíces. Es el hogar de una gran diversidad de microorganismos que impactan en el crecimiento de los cultivos a través de diferentes funciones, como la descomposición de la materia orgánica, lo que convierte los nutrientes en formas disponibles para las plantas (FAO, 2009; Rosales et al., 2006).

Una definición holística del suelo propuesto por los autores de este trabajo sería la siguiente: El suelo es un componente natural formado a partir de un material parental que va evolucionando a lo largo del tiempo, mediante una serie de interacciones físicas (como la lluvia, el viento y el calor), químicas (como la meteorización) y biológicas (como la descomposición de la materia orgánica). El suelo constituye la base de la cadena trófica ya que actúa como soporte y fuente de nutrientes para los productores primarios, muchos de los cuales representan importantes especies para la alimentación humana.

Tras explorar las principales definiciones del suelo, a continuación, abordamos una problemática que repercute en el funcionamiento óptimo del sistema y atenta contra los múltiples beneficios que la sociedad obtiene a través del suelo para asegurar la soberanía alimentaria: la salinización del suelo.

¿Qué es la salinización del suelo? y ¿Por qué es tan grave?

La salinización del suelo ocupa el segundo lugar como causa principal de la degradación de la tierra, solo detrás de la erosión. A lo largo de 10,000 años, la salinización del suelo cultivable ha colapsado diversas sociedades agrícolas, pues existen registros históricos de migraciones que muestran el fracaso de civilizaciones por el aumento de salinidad en campos agrícolas, impactando directamente en la productividad de sus cultivos; Mesopotamia es el caso más conocido (ahora Irak) (Leidi & Pardo, 2002., Zaman et al., 2018).

El exceso de sales presentes en el suelo representa una amenaza para la productividad agrícola, la salud ambiental y el bienestar financiero. El costo de degradación del suelo inducido por la sal en 2013 fue de \$441 dólares por hectárea. Las



pérdidas económicas anuales actuales podrían ser de \$27 mil millones de dólares (Zaman et al., 2018). La salinidad del suelo es quizá el problema más serio que enfrenta la agricultura en estos días, provoca una disminución entre el 10 y el 25% del rendimiento en la producción de diversos cultivos, puede impedir la cosecha por completo y conducir a la desertificación (Otero et al., 2008; Grieve et al., 2012; López et al., 2008). Además, 2.6 mil millones de personas dependen directamente de estas tierras (Koutroulis, 2019).

Numerosas investigaciones (de Souza et al., 2012; Zhang et al., 2019; Sheldon et al., 2017) muestran los efectos negativos de la salinidad en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la microflora, la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. En presencia de estos efectos nocivos, ha sido un desafío para el sistema agrícola satisfacer las demandas alimentarias mundiales tanto actuales como futuras, así como garantizar la seguridad alimentaria (Sahab et al., 2021). El alto valor del pH y la conductividad eléctrica junto con el bajo potencial de permeabilidad, característico de los suelos salinos, afectan directamente la actividad microbiana, lo que reduce la disponibilidad de nutrientes para las plantas y, en consecuencia, afecta el crecimiento de los cultivos (Xu et al., 2020).

Muy pocas publicaciones tratan aspectos socioeconómicos de la degradación de la tierra inducida por la sal. Por ello, se recomienda invertir en la remediación de las tierras afectadas e incluir los costos de remediación y acciones en una estrategia nacional más amplia para la seguridad alimentaria (Qadir et al., 2014).

¿Por qué se saliniza el suelo?

La salinización del suelo se divide en primaria y secundaria (Allbed & Kumar, 2013). La primera ocurre de manera natural, ya que es causada por la incorporación salina mediante el intemperismo de rocas y minerales primarios, formados in situ (nativas), o bien, son transportados por agua, viento, tipo de topografía y procesos continuos de inundación- evaporación (Zhou et al., 2013; Rhoades, 1990). Otro tipo de condiciones del perfil del suelo que delimitan que exista una salinización primaria son: la textura, la profundidad, el pH, la estructura, la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de retención de humedad, el intercambio catiónico, la conductividad eléctrica y la fertilidad. En las zonas áridas el viento puede llegar a arrastrar una gran cantidad de partículas en suspensión (sulfatos y carbonatos), además en estas regiones las sales también pueden ascender por capilaridad (Mata, 2014).

La salinización secundaria es originada por actividades antropogénicas, especialmente por prácticas agrícolas inadecuadas como el manejo incorrecto del agua, el uso de agua de baja calidad para el riego, la aplicación excesiva de fertilizantes químicos,



el empleo de agua de riego salina, los cambios de uso del suelo, el sobrepastoreo en las zonas pecuarias, además las condiciones de salinización pueden empeorar con condiciones de drenaje deficiente (Peña et al., 2020; Rozema, 1996). La actividad humana actúa de manera similar a las enzimas, acelerando o catalizando los procesos naturales. Este efecto es pernicioso, ya que si un proceso de manera natural tarda hasta siglos para ocurrir, nuestra intervención puede reducir drásticamente el tiempo hasta años e incluso meses, dependiendo de la intensidad con la que se lleve a cabo.

La salinidad sigue un ciclo natural (Figura 1), por lo tanto, no podemos mitigar el problema de raíz, puesto que los iones presentes en el extracto de saturación (causantes de la salinidad) han estado y existirán hasta el fin de la tierra, es decir, es un proceso continuo, sin embargo, podemos aprender a identificarlo y gestionarlo. Las principales sales que afectan el suelo por orden de importancia son el cloruro de sodio, sulfato de calcio, bicarbonato de calcio, cloruro de magnesio y bicarbonato de magnesio, (Basurto et al., 2008). Cuando un suelo contiene cualquier sal descrita anteriormente en altas concentraciones se habla de suelos salinos, sin embargo, cuando la cantidad de la sal que predomina es sodio se clasifica como un suelo sódico.

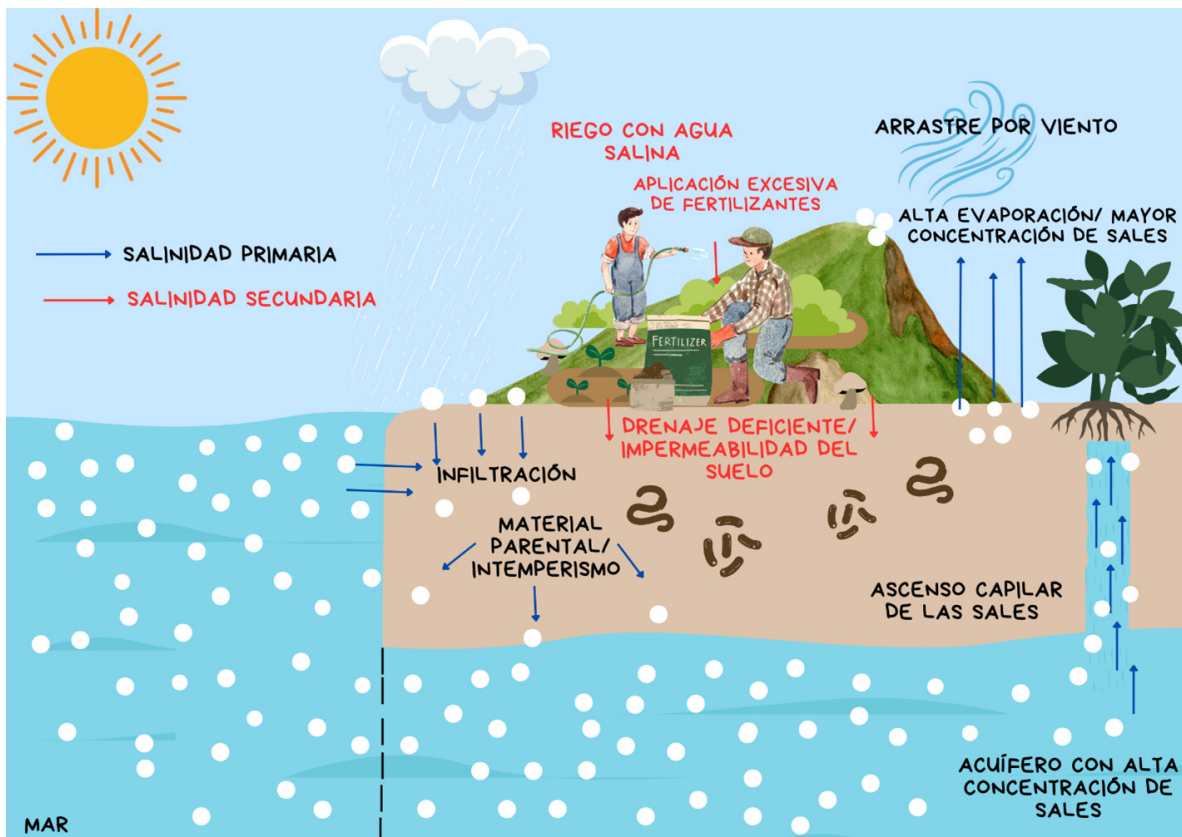


Figura 1. Ciclo de la salinización del suelo por factores primarios y secundarios (Figura realizada por los autores).



¿Cuál es la distribución de suelos afectados por salinidad a nivel mundial?

La FAO (2021) publicó el primer mapa mundial de suelos salinos (GSASmap) (Figura 2), con la colaboración de 118 países, que representan el 85% de la superficie terrestre global. Este mapa incluye 257,419 puntos con datos medidos *in situ* y contó con la participación de 350 expertos nacionales. Este enfoque colaborativo permite la posibilidad de actualizaciones periódicas en el futuro. De acuerdo con el estudio, 424 millones de hectáreas de suelo superficial (0-30cm de profundidad) y 833 millones de hectáreas de subsuelo (30-100 cm de profundidad) están afectados por sal. Existen diferentes estimaciones que muestran una pérdida mundial de 1.5 millones de hectáreas de tierras cultivables por año (Foley et al., 2005).

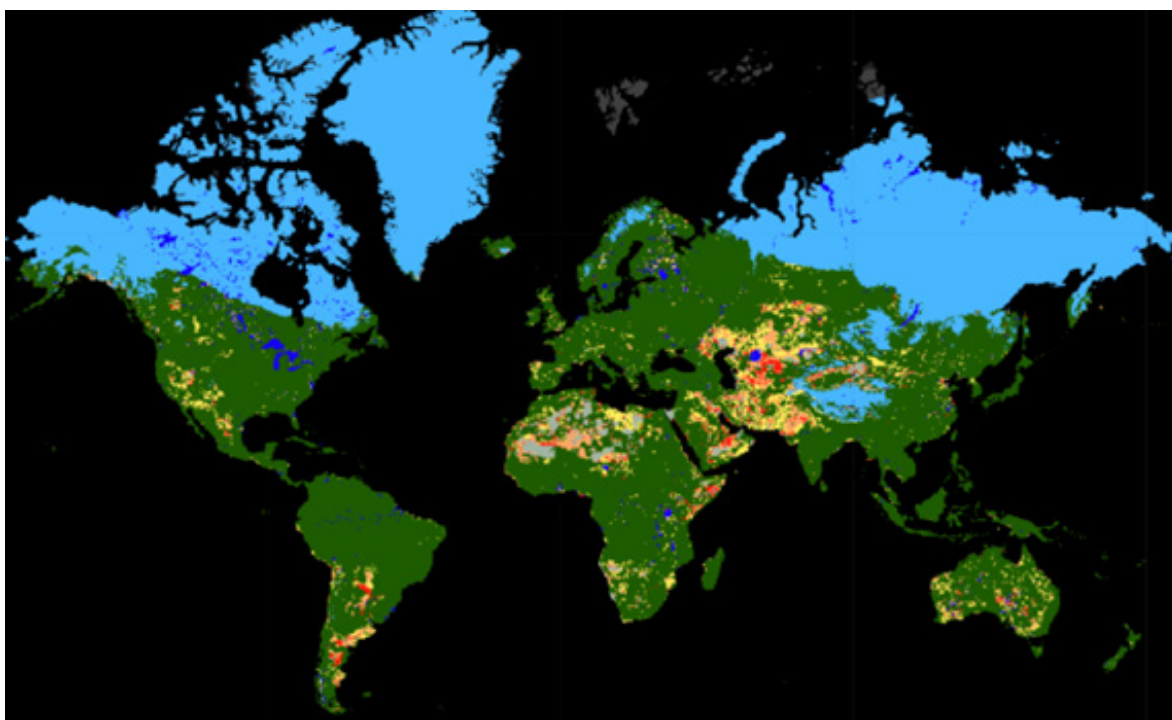


Figura 2. Distribución espacial del exceso de sales y el tipo de limitaciones presentes en el suelo alrededor del mundo. Mapa elaborado en la Plataforma Hand-in-Hand Geospatial (FAO,2021).

Otras estimaciones indican que existen alrededor de 800 millones de hectáreas afectadas por sal, de las cuales 77 millones se encuentran en áreas irrigadas, Zaman et al. (2018) documentó que estas áreas son más susceptibles a la degradación de la tierra. Cada año los suelos se vuelven más improductivos debido a la paulatina acumulación de sales (Nikalje et al., 2018). Australia posee 357.3 millones de hectáreas afectadas por salinidad del suelo; mientras que México y Centro América presentan 2 millones de hectáreas (Amaya, 2019).

¿Cuál es la distribución de suelos afectados por la salinidad en México?



La superficie afectada en México es de 600 mil hectáreas, la mitad de esta superficie presenta rendimientos muy bajos o ya se encuentran abandonadas (Mata, 2014). Aproximadamente la mitad del territorio nacional posee regiones áridas o semiáridas, desde el norte y hasta el centro del país, donde el problema de salinización sigue avanzando principalmente en los distritos de riego (González, 2012).

La Figura 3 muestra la distribución espacial a nivel nacional de los suelos salinos, así como los suelos que presentan una conductividad eléctrica mayor o igual a 4 dS/m, parámetro indicativo de algún tipo de salinidad. Los datos tanto a nivel mundial como nacional están muy desactualizados, en México los datos más recientes datan del año 2014 para conductividad eléctrica y 2004 para salinidad.

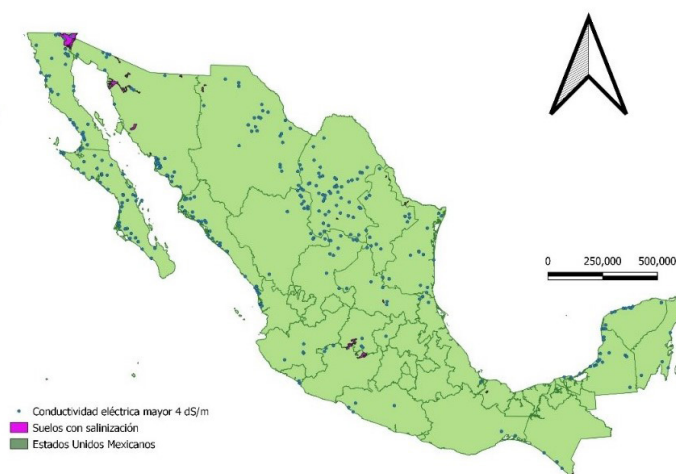


Figura 3. Distribución espacial de suelos salinos en los Estados Unidos Mexicanos
Elaboración propia. Fuente: INEGI, 2014 y SEMARNAT, 2004.

¿Qué impacto tiene el cambio climático sobre la salinización de los suelos?

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 2013 define al cambio climático como los cambios en las condiciones medias (promedio) del sistema atmósfera-hidrosfera-tierra en un lapso de tiempo no menor a 30 años; este cambio de clima puede estar directa o indirectamente atribuido a la actividad antropogénica.

El cambio climático y la salinización del suelo generan un ciclo que se refuerza a sí mismo, con impactos perjudiciales en los ecosistemas y en la estabilidad climática global (Shokri et al., 2024). El cambio climático podría generar efectos negativos en la agricultura (Ojeda et al., 2010). De acuerdo con Mazuela (2013) se prevé que las zonas de clima templado y suelos fértiles experimenten afectaciones en décadas venideras debido a la escasez de lluvias con una tendencia hacia la salinización. Por otro lado, Sahab et al. (2021) señalan que las zonas con baja precipitación y alta evaporación, como las zonas áridas y semiáridas, son más vulnerables a la acumulación



de sales. Existen diversas problemáticas que se verán agravadas debido al cambio climático, entre las que destacan el calor, la salinidad, la sequía, las inundaciones y el anegamiento (Ortiz, 2008). Se pronostica, además, una disminución en la productividad de cultivos importantes, lo que tendría diversas consecuencias para la seguridad alimentaria (Vargas, 2007).

Según Perri et al. (2022), el impacto del clima varía según la región, es decir, en zonas áridas con baja precipitación, la salinización tiende a aumentar debido a la reducción de humedad en el suelo, lo que, a su vez, dificulta la eliminación de sal. En cambio, las áreas con un patrón estacional de lluvias, como los climas mediterráneos, experimentarán una menor acumulación de sal debido a una eliminación más eficiente de la sal durante la estación húmeda.

Se han pronosticado diversos modelos sobre los posibles impactos del cambio climático en la salinización del suelo, por ejemplo, Illangasekare et al. (2006) mencionan que esta problemática puede acelerarse por diferentes razones, por ejemplo, que el aumento de las temperaturas traerá consigo un aumento en la evaporación del suelo y por ende los requisitos de agua de los cultivos se incrementaran, esto resultará en la salinización del suelo en áreas que ya son propensas a la salinidad. Las regiones costeras estarán sujetas a un riesgo creciente de salinización por aumento de los niveles del agua de mar, añadiendo más agua salada a los acuíferos costeros y aumentando la salinidad de aguas subterráneas. La probabilidad de tormentas extremas y tsunamis puede causar inundaciones de agua de mar, resultando en la infiltración de agua salada en los suelos y la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.

Un estudio realizado por Hassani et al. (2021) reveló futuros puntos críticos que serán afectados por el cambio climático en términos de salinización del suelo; las áreas más vulnerables serán América del Sur, el sur y el oeste de Australia, México, el suroeste de los Estados Unidos y Sudáfrica. Por el contrario, se proyecta una disminución de la salinidad del suelo en regiones como el noroeste de los Estados Unidos, la península de Somalia en África, Europa del Este, Turkmenistán y Kazajistán. Otros estudios indican que el aumento de la salinidad del suelo podría conducir a una reducción global en el nivel de carbono orgánico del suelo (Haj-Amor et al 2021).

En México existen pocos estudios que aborden la salinización del suelo y el cambio climático. Uno de los trabajos es el desarrollado por Pulido (2016) en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora; Pulido concluye que los efectos del calentamiento global (aumento de temperatura, reducción de las precipitaciones, disminución del agua disponible para riego y el aumento de la concentración de sales en el agua de riego) contribuyeron al incremento en las superficies afectadas por sales, además



los problemas de salinidad del suelo en el Distrito de Riego incrementaron 24.1 y 15.8% en los estratos del suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, en un periodo comprendido entre 1970-2001 y existió una reducción del 15.2% en la producción agrícola.

Corwin (2020) menciona que han pasado por alto las consecuencias del cambio climático y será necesario monitorear y mapear los cambios en el grado de salinidad del suelo. Existen pocas referencias puntuales tanto a nivel mundial como nacional de la verdadera extensión de salinidad en tierras, pues la mayoría son predicciones debido al alto costo que representa obtener fuentes medibles en laboratorio en grandes extensiones. Es necesario eficientizar los diagnósticos de salinización y tener una buena gestión de las tierras cultivables.

¿Por qué es problemático el monitoreo de salinidad?

La distribución de las sales en el suelo tanto espacial como temporal es muy heterogénea, pues tiene gran fluctuación debido a que la salinización es un proceso complejo y variable a diferentes escalas (Ruiz et al., 2007). Al ser un proceso tan dinámico ¿cuál es el mejor método para abordarlo?, ¿será que, a escala de parcela, municipal, regional, nacional o mundial? Pues bien, esto no está determinado, siempre dependerá de los objetivos, del enfoque y del presupuesto destinado a la investigación.

Hopmans et al. (2021) mencionan que las publicaciones más recientes sobre la salinización en el suelo son aplicadas y apenas agregan nueva investigación básica, pues la mayoría de los conceptos presentados datan de antes del año 2000. El aumento de los artículos que contienen “soil salinity” en su título, de 1995 al 2019, crecieron un 318%, para el 2024 el número de resultados es de 2, 280,000 publicaciones. Los autores informan que, aunque no es una búsqueda exhaustiva sí es indicativa.

Los costos de diagnóstico de salinización por métodos tradicionales (laboratorio) son elevados. Por ejemplo, para medir la salinización en una muestra simple de suelo, el precio ronda alrededor de los \$666.00 pesos mexicanos (LANISAF, 2024). Sin embargo, una muestra no es suficiente para evaluar la salinidad en una hectárea, al menos 5 muestras son requeridas si las condiciones de terreno son homogéneas, si no es así, debe elevarse el número de toma de muestras; en este supuesto, el costo sería de \$3330 pesos mexicanos por hectárea. Ahora bien, ¿qué sucede si se desea evaluar la salinidad en las 600 mil hectáreas mexicanas degradadas por algún tipo de salinidad? Los costos serían exorbitantes, alcanzando un total de \$ 1,998,000,000 pesos mexicanos para evaluar la salinización en todo el país.



¿Cómo podemos efficientizar el diagnóstico de salinización en tierras cultivables?

El análisis de imágenes, especialmente para el mapeo espacial, se ha convertido en una tecnología poderosa de gran crecimiento y desarrollo en el ámbito de la teledetección; esta técnica se utiliza para obtener un gran número de bandas de distintas longitudes de onda medidas en un solo píxel (Rekha et al., 2012); además, posee múltiples ventajas para monitorear los procesos de salinización del suelo con gran eficiencia a menor costo y una buena resolución tanto temporal (cada 7 o 15 días) como espacial (desde 15 a 30 metros dependiendo del tipo de sensor utilizado) (Muller & Van Niekerk, 2016; Wang et al., 2020).

Ghabour y Daels (1993) mencionan que la obtención de datos de salinidad del suelo es más eficiente y económica cuando se utilizan los datos de reflectancia obtenidos por percepción remota. Los suelos salinos presentan características morfológicas y espectrales distintivas en la superficie del suelo a los suelos no salinos, con una reflectancia general más elevada en las regiones visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético (Ben-Dor et al., 2009). Con base en estas características espectrales asociadas a la salinidad del suelo, se han desarrollado distintos índices de salinidad para su estimación, un ejemplo es el índice de salinidad de diferencia normalizada (Mandal, 2022).

Una opción más reciente es la utilización de imágenes capturadas con drones acoplados a cámaras con diversos sensores que permiten generar diferentes diagnósticos, entre los que se encuentran las gestiones hídricas, la fertilización y la detección de enfermedades, gracias a estos datos se pueden generar mapas agronómicos (González et al., 2013). Sin embargo, en la actualidad las imágenes obtenidas con drones han sido poco utilizadas para detectar problemas de salinización del suelo. La Figura 4 muestra las diferencias de resolución de una imagen satelital (Landsat 8) y de una imagen obtenida con una cámara multiespectral (Parrot sequoia) acoplada a un dron en 100 hectáreas agrícolas en el estado de Michoacán.

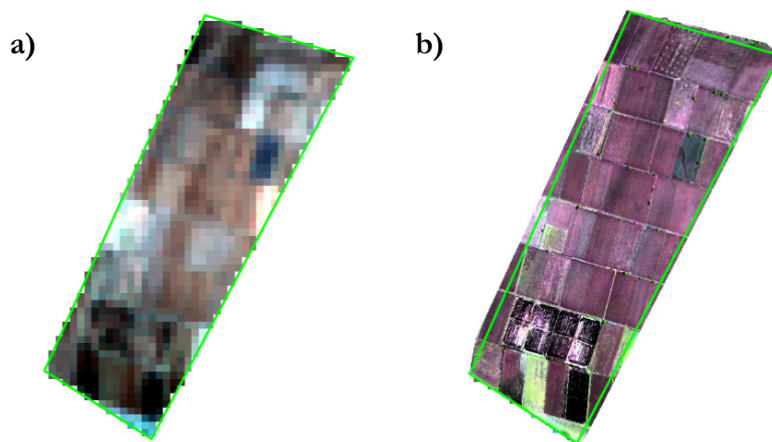


Figura 4. a) Imagen obtenida con un satélite LANDSAT 8 (tamaño de pixel:30 m.), b) Imagen obtenida con una cámara multispectral Parrot Sequoia (tamaño de pixel: 15cm).

Zhang et al. (2022) fusionaron datos de medición en campo, imágenes obtenidas con drones y con el satélite Sentinel-2A para desarrollar modelos de aprendizaje automático de estimación de la salinidad del suelo a diferentes escalas en el Yellow River Delta de China. Entre los diferentes índices espectrales, se examinaron algunas bandas individuales, índices de vegetación e índices de salinidad, el modelo basado en redes neuronales fue el que mostró el mejor desempeño en términos de predicción.

Es recomendable analizar la dinámica de la salinidad del suelo junto con el uso del suelo para comprender de manera más profunda las tendencias de estabilidad y variabilidad de los diferentes grados de salinidad en suelos (Zhang et al., 2022), debido al constante cambio de los usos y cobertura de suelo a través del tiempo.

¿Cuáles son las limitaciones existentes con el uso de sensores remotos?

Allbed y Kumar (2013) mencionan dos limitaciones clave en el análisis de salinidad del suelo mediante sensores remotos. La primera es que estos sensores solo evalúan la superficie del suelo a través de la reflectancia espectral, lo que impide analizar la salinidad en el perfil, además de que la salinidad presenta una gran heterogeneidad tanto espacial como temporal. La segunda limitación es que la detección directa de salinidad se dificulta en regiones áridas y semiáridas con vegetación densa, ya que la vegetación puede generar una mezcla espectral que complica el análisis, por el contrario, en suelos desnudos resulta más fácil, puesto que las costras salinas y la vegetación dispersa, son visibles en la superficie, lo que permite obtener información de los tipos y la cantidad de sal, en función de las firmas espectrales de la superficie del suelo.

Por otro lado, el porcentaje de nubosidad en las imágenes satelitales es una limitante importante de mencionar, pues si la imagen contiene un alto porcentaje



dentro del área de interés es casi imposible llevar a cabo las metodologías pertinentes para el estudio en caso.

¿Cuáles son las soluciones a los problemas de salinización?

Los suelos salinos se han registrado en una amplia gama de ambientes bajo muchas condiciones hidrológicas y fisiográficas diferentes. Una distribución tan amplia nos dice que ninguna opción o técnica única de adaptación o mitigación será aplicable a todas las áreas (Zaman et al., 2018). Por lo tanto, para controlar la salinización del suelo se han desarrollado diversas opciones de manejo, pero ninguna garantiza la sostenibilidad a largo plazo. Las prácticas varían ampliamente y dependen del tipo de suelo, ubicación del paisaje, geohidrología, clima y otros factores locales (Hopmans et al., 2021).

Es crucial implementar técnicas agronómicas adecuadas para mejorar las características del suelo salino de manera eficaz (Huang et al., 2016). Una de las prácticas más frecuentes para eliminar o reducir la concentración de sales en el suelo es el lavado, cuyo método consiste en originar un flujo de agua descendente a través del perfil para arrastrar las sales, se realizan tanto de manera vertical como horizontal (Mata et al., 2014). Aunque es un buen método para cambiar (no mitigar) el posicionamiento de las sales, no es una práctica universal, pues se debe conocer la composición y concentración de sales en suelo, y también se deben realizar las determinaciones de la composición del agua con la que se harán los lavados, evitando así que empeore la salud del ecosistema.

De las técnicas de gestión disponibles, algunas se centran en mejorar las propiedades de las plantas (preparación de semillas, forestación, selección de cultivos, mejoras genéticas, agrosilvicultura), algunas están bien enfocadas en mejorar las propiedades del suelo (enmiendas químicas, biocarbón, vermicompost, compost, inoculantes microbianos, electro remediación) y algunas técnicas mejoran tanto las propiedades del suelo como las de las plantas de manera sinérgica (Sahab et al., 2021).

Xu et al. (2023) señalan que los métodos actuales para la recuperación de suelos salinos incluyen métodos físicos, biológicos y químicos, que están descritos desde hace tiempo y han sido ampliamente documentados, entre ellos por Aceves (2011) (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos de recuperación de suelos salinos

Físicos	Tratamiento mecánico al suelo: subsuelo, arado profundo, aplicación de arena e inversión del perfil → Para romper capas endurecidas (pisos de arado, capas de carbonatos y sulfatos precipitados) que impiden el paso del agua a través del perfil del suelo.
----------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Biológicos	Uso de materia orgánica (estiércol y composta) → durante el proceso de descomposición los microorganismos presentes en el suelo liberan CO_2 , cuando se combina con agua forman ácido carbónico, que puede solubilizar sales de calcio precipitadas en el suelo. Uso de plantas tolerantes a sales → Impiden que el agua se evapore directamente de la superficie del suelo y las raíces dejan pequeños conductos por los cuales el agua circula mejor en el suelo.
Eléctricos	Se hace pasar la corriente eléctrica directa en un volumen de suelo determinado → Con electroósmosis se extraen mediante la corriente eléctrica las sales que se encuentran en la solución del suelo; sin embargo, los costos actuales son prohibitivos para utilizarlos en la recuperación de suelos agrícolas.
Químicos	Agregan sustancias al suelo con la finalidad de solubilizar el calcio existente o agregarlo directamente en forma soluble en caso de que no exista, propiciando intercambio catiónico y sustitución de sodio por calcio en el complejo de intercambio con el fin de lograr la floculación de los coloides en el suelo → Cloruro de calcio, yeso, azufre, ácido sulfúrico, sulfato ferroso, sulfato de aluminio, polisulfuro de calcio, calcita y dolomita.
Hidrotécnicos	Controlan la cantidad y calidad química del agua disponible para mantener las sales solubles y las intercambiables de manera que no interfiera, ni de forma directa ni indirecta con el crecimiento de los cultivos.

Fuente: Tomado de Aceves (2011)

Una vez que los problemas de salinidad se diagnostican adecuadamente, se puede formar un programa integrado de recuperación de suelos que incluya una combinación de métodos para rectificar los problemas. Sin embargo, algunas tecnologías modernas, como las mejoras genéticas y eléctricas son difíciles de desarrollar debido a sus altos costos y baja eficiencia (Amombo et al., 2022). Además, otra limitación es que los métodos previamente mencionados, cuando se aplican en grandes áreas, resultan muy costosos, tanto por las cantidades de material que se utilizan como por la aplicación de los mismos, debido a que en casos específicos se requiere de equipo especializado (Hopmans et al., 2021; Zaman et al., 2018). Por el contrario, los métodos químicos se consideran los más rentables y ampliamente utilizados para mejorar los suelos salinos (Xu et al., 2023).

El desafío futuro consiste en desarrollar estrategias que aumenten la producción de alimentos y al mismo tiempo preserven la funcionalidad ecológica del suelo, minimicen los riesgos para la salud humana y promuevan el uso sostenible de nuestros recursos de tierra y agua para uso agrícola. En este contexto, un estudio realizado por Xu et al. (2023) documentó el uso de una enmienda compuesta por fósforo y yeso, ácido húmico, bentonita y carboximetilcelulosa sódica que contribuyó sustancialmente a la mejora de los atributos físicos, químicos, biológicos y nutrimentales de suelos salinos. Por otro lado, Xing et al. (2024) demostraron que el uso de bio-carbón desempeña un papel clave en la modificación de la composición elemental del suelo, ya que su estructura porosa puede mejorar la disposición de los agregados, optimizando las características de porosidad y permeabilidad en suelos salinos.



Conclusiones

Dado que el suelo es un recurso de vital importancia para el ser humano, es necesario desarrollar nuevas técnicas de investigación y eficientizar el diagnóstico de salinización, principalmente en tierras agrícolas. El cambio climático juega un rol importante en el impacto de salinización del suelo, agudizando los impactos negativos. Al ser el clima el principal factor que afecta la tolerancia de los cultivos a las sales, aunado al cambio climático, supone que, en décadas venideras, las zonas de clima templado se verán afectados por la escasez de lluvias y una tendencia a la salinización, mientras que en áreas secas también se conducirá hacia la salinización y desertificación de las tierras. En México el 60% del territorio posee un clima árido, por lo que tiene una mayor tendencia a la salinización del suelo. Se requiere realizar una actualización de datos a nivel mundial y nacional para tomar medidas de gestión y no atentar contra la soberanía alimentaria, pues es de esperarse que exista un gran incremento en la salinización de las tierras agropecuarias y con ello disminuya la productividad agrícola. Las imágenes satelitales y obtenidas mediante drones auguran un importante desarrollo tecnológico para el diagnóstico de salinización, más rentable y eficaz, para poder comenzar a realizar las gestiones de remediación de los suelos más afectados, pero con un diagnóstico puntual, de esta manera optar por el mejor método de remediación de suelos salinos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Agradecimientos

Patricia Paulina Hernández Victoria con CVU agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada para su formación del programa de Doctorado en Hidrociencias.

Referencias

- Aceves, E. (2011). *El ensalitramiento de los suelos bajo riego (Segunda edición)*. Colegio de Postgraduados.
- Allbed, A. & Kumar L. (2013). Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in remote sensing*, 2(4), 373-385. doi:10.4236/ars.2013.24040
- Amaya, C. (2019). *Comparación de técnicas de estimación del grado de salinidad en suelos con contenido de humedad mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales* [tesis de



- licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/6618>.
- Amombo, E., Ashilenje, D., Hirich, A., Kouisni, L., Oukarroum, A., Ghoulam, C., ... & Nilahyane, A. (2022). Exploring the correlation between salt tolerance and yield: Research advances and perspectives for salt-tolerant forage sorghum selection and genetic improvement. *Planta*, 255(3), 71. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03847-w>
- Ben-Dor, E., Metternicht, G., Goldshleger, N., Mor, E., Mirlas, V. & Basson, U. (2008). Review of Remote Sensing-Based Methods to Assess Soil Salinity. *Remote Sensing of Soil Salinization*, 1, 39–60. doi:10.1201/9781420065039.ch3
- Corwin, D. L. (2020). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
- de Souza Silva, C. M. M., & Fay, E. F. (2012). Effect of salinity on soil microorganisms. En M. C. Hernandez-Soriano, *Soil health and land use management* (pp. 177-198). DOI: 10.5772/28613
- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science (New York, N.Y.)*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Garrido, R. R. (2016). *Biogeoquímica del fósforo en el suelo: Optimización de criterios para un uso agronómico eficiente y ambientalmente aceptable de un recurso no renovable* [tesis de doctorado, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=181297>
- Ghabour, T & L. Daels. (1993). The use of GIS for soil degradation study in the Western Nile Delta of Egypt. *Journal soil science*. 33(4), 355-370. <https://doi.org/10.1063/1.44483>
- González, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Primera edición*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales.
- González, M., & Rodríguez, M. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 285-308. <file:///D:/Usuarios/consejoeditorial/Downloads/Dialnet-AplicacionesDe-LaTeledeteccionEnDegradacionDeSuelos-4157742.pdf>
- Grieve, C. M., Grattan, S. R., & Maas, E. V (2012). Plant salt tolerance. En W. W. Wallender & K. K. Tanji (eds.), *Agricultural salinity assessment and management* (pp. 405-459). Reston.



- Haj-Amor, Z., Araya, T., Kim, D.-G., Bouri, S., Lee, J., Ghiloufi, W., Yang, Y., Kang, H., Kumar Jhariya, M., Banerjee, A., Lal, R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Science of the Total Environment*, 843, 156946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156946>
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications*, 12(1), 6663. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3>
- Hopmans, J. W., Qureshi, A.S., Kisekka, I., Munns, R., Grattan, S.R., Rengasamy, P., Ben-Gal, A., Assouline, S., Javaux, M., Minhas, P.S., Raats, P.A.C., Skaggs, T.H., Wang, G., De Jong van Lier, Q., Jiao, H., Lavado, R.S., Lazarovitch, N., Li, B., Taleisnik, E. (2021). Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in agronomy*, 169, 1-191. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001>
- Huang, L. H., Liang, Z. W., Suarez, D. L., Wang, Z. C., Wang, M. M., Yang, H. Y., & Liu, M. (2016). Impact of cultivation year, nitrogen fertilization rate and irrigation water quality on soil salinity and soil nitrogen in saline-sodic paddy fields in Northeast China. *The Journal of Agricultural Science*, 154(4), 632-646.
- Illangasekare, T., Tyler, S.W., Clement, T.P., Villholth, K. G., Perera, A. P. G. R. L., Obeysekera, J., ... & Jensen, K. (2006). Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka. *Water Resource Research*, 42(5), W05201. <https://doi.org/10.1029/2006WR004876>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Conjunto de datos de perfiles de suelos. Escala 1: 250 000. Serie II Continuo Nacional*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. (Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge University Press.
- Koutroulis, A. G. (2019). Dryland changes under different levels of global warming. *Science of the Total Environment*, 655(1), 482-511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
- Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (s. f.). *Catálogo de servicios*. Consultado el 12 de diciembre de 2024. https://lanisaf.chapingo.mx/catalogo_jun2024/
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. doi:10.1038/s43017-020-0080-8



- Leidi, E. O & Pardo, J.M. (2002). Tolerancia de los cultivos al estrés salino: qué hay de nuevo. *Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 2, 1-12. https://www.researchgate.net/publication/38305106_Tolerancia_de_los_cultivos_al_estres_salino_que_hay_de_nuevo
- López, M., Arbona, V., Pérez, R., & Gómez, A. (2008). Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus. *Environmental and Experimental Botany*, 62(2), 176–184 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.08.002>
- Llerena, F. (2020). *Los problemas de salinidad de los suelos agrícolas bajo riego*. Colegio de Postgraduados.
- Mandal, A.K. (2022). The need for the spectral characterization of dominant salts and recommended methods of soil sampling and analysis for the proper spectral evaluation of salt affected soils using hyper-spectral remote sensing. *Remote Sensing Letters*, 13(6), 588–598. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2059414>
- Mata, I., Rodríguez, M., López, J., & Vela, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1(5), 26-35. http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf#:~:text=Din%C3%A1mica%20de%20la%20salinidad%20en%20los%20suelos.%20La%20salinidad%20y
- Mazuela, P. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 31(2), 3-4. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Muller, S.J & A. Van Niekerk. (2016). An evaluation of supervised classifiers for indirectly detecting salt-affected areas at irrigation scheme level. *International journal of applied earth observations and geoinformation*, 49, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.005>
- Nikalje, G. C., Srivastava, A. K., Pandey, G. K., & Suprasanna, P. (2018). Halophytes in biosaline agriculture: Mechanism, utilization, and value addition. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1081-1095. <https://doi.org/10.1002/ldr.2819>
- Ojeda B., Iniguez, W., & González, J. (2010). Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. En Martínez, P., y Patiño, C. (eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (pp. 115-142). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición* (R. Vargas Rojas, trad.) (Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón). Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>



- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2021a). *Global map of salt-affected soils gsmmap v1.0*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7247en>
- Ortiz, R. (2008). Crop genetic engineering under global climate change. *Annals of Arid Zone*, 47, 343–354. https://www.researchgate.net/publication/267995855_Crop_Genetic_Engineering_Under_Global_Climate_Change
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Morales, R., Sánchez, I., Labaut, M., & Rivero, L. (2008). *Caracterización y evaluación de la salinidad*. Edit. Richards L.A., México.
- Peña, A., Delgado-Moreno, L. & Rodríguez-Liévana, J. (2020). A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: Effect of some soil and solution properties. *Science of the Total Environment*, 718, 134468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134468>
- Perri, S., Molini, A., Hedin, L. O., & Porporato, A. (2022). Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization. *Nature Geoscience*, 15(5), 375–381. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00931-4>
- Porta, J., Poch, R., & López, M. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa Libros.
- Pulido Madrigal, L. (2016). Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 207-218. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000200207&lng=es&tlng=es.
- Qadir, M., Quillerou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., Drechsel, P. & Noble, A.D. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38(4), 282–295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- Rekha, P., Gangadharan, R., Pillai, S., Ramanathan, G., & Panigrahi, A. (2012). Hyperspectral image processing to detect the soil salinity in coastal watershed. *2012 Fourth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)* (pp. 1-5). doi: 10.1109/ICoAC.2012.6416859.
- Rhoades, J. D. (1990). Overview: diagnosis of salinity problems and selection of control practices. En K. K. Tanji (ed.), *Agricultural salinity assessment and management*. American Society of Civil Engineers, New York. (pp. 18-4171).
- Rosales, F., Pocasangre, L., Trejos, J., Serrano, E., Acuña, O. Segura, ... & Staver, C. (15 a 20 de octubre de 2006). Guía para el diagnóstico de la calidad y la salud de suelos bananeros (Resumen en extenso). *XVII Reunión Internacional de Asociaciones para la Cooperación de investigación sobre banano en el Caribe y América Latina. Brasil*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/profile/Javier-Trejos/>



- publication/228901881_GUIA_PARA_EL_DIAGNOSTICO_DE_LA_CALIDAD_Y_LA_SALUD_DE_SUELOS_BANANEROS_DIAGNOSTIC_GUIDE_FOR_BANANA_SOILS_QUALITY_AND_HEALTH/links/0fcfd5138f93276454000000/GUIA-PARA-EL-DIAGNOSTICO-DE-LA-CALIDAD-Y-LA-SALUD-DE-SUELOS-BANANEROS-DIAGNOSTIC-GUIDE-FOR-BANANA-SOILS-QUALITY-AND-HEALTH.pdf
- Rozema, J. (1996). Biology of halophytes. En C. Redouane, V. Clive & H. Atef (eds). *Halophytes and biosaline agriculture* (pp.17-30). Marcel dekker inc.
- Ruiz Cerda, E., Aldaco Nuncio, R. A., Montemayor Trejo, J. A., Fortis Hernández, M., Olague Ramírez, J., & Villagómez Gamboa, J. C. (2007). Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Técnica Pecuaria en México*, 45(1), 19-24.
- Sahab, S., Suhani, I., Srivastava, V., Chauhan, P. S., Singh, R. P., & Prasad, V. (2021). Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: Current status and management strategies. *Science of the Total Environment*, 764, 144164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144164>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección de Geomática (2004). *Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/degra250kgw.html>
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchoff, G., Kopittke, P. M., & Menzies, N. W. (2017). The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418, 477-491.
- Shokri, N., Hassani, A., & Sahimi, M. (2024). Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review. *Reviews of Geophysics*, 62(4), e2023RG000804. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Vargas, A. (2007). Cambio climático, agua y agricultura. *COMUNICA*, 1(2),13-23. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/7641>
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X., & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: a comparison between Landsat-8 oli and sentinel-2 msi. *Science of the total environment*, 707, 136092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136092>
- Xing, J., Li, X., Li, Z., Wang, X., Hou, N., & Li, D. (2024). Remediation of soda-saline-alkali soil through soil amendments: Microbially mediated carbon and nitrogen cycles and remediation mechanisms. *Science of The Total Environment*, 924, 171641. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Xu, Z., Shao, T., Lv, Z., Yue, Y., Liu, A., Long, X., ... & Rengel, Z. (2020). The mechanisms of improving coastal saline soils by planting rice. *Science of the Total Environment*, 703, 135529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171641>



- Xu, X., Guo, L., Wang, S., Wang, X., Ren, M., Zhao, P., ... & Lin, A. (2023). Effective strategies for reclamation of saline-alkali soil and response mechanisms of the soil-plant system. *Science of The Total Environment*, 905, 167179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167179>
- Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L., Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. En M. Zaman, S. A. Shahid, & L. Heng (eds.), *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques* (pp. 43-53). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Zhang, W. W., Chong, W. A. N. G., Rui, X. U. E., & Wang, L. J. (2019). Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(6), 1360-1368.
- Zhang, Z., Niu, B., Li, X., Kang, X., & Hu, Z. (2022). Estimation and Dynamic Analysis of Soil Salinity Based on UAV and Sentinel-2A Multispectral Imagery in the Coastal Area, China. *Land*, 11(12), 2307. <https://doi.org/10.3390/land11122307>
- Zhou, D., Lin, Z., Liu, L., & Zimmermann, D. (2013). Assessing secondary soil salinization risk based on the psr sustainability framework. *Journal of Environmental Management*, 128, 642-654. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.025>

