

# MANUAL DE APLICACIÓN DE ENMIENDAS PARA SUELOS SALINOS Y SÓDICOS



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria



BICENTENARIO  
PERÚ  
2024



MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO  
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA  
DIRECCIÓN DE SUPERVISIÓN Y MONITOREO EN LAS ESTACIONES EXPERIMENTALES AGRARIAS

MANUAL DE APLICACIÓN  
**DE ENMIENDAS PARA**  
**SUELOS**  
**SALINOS Y SÓDICOS**



# MANUAL DE APLICACIÓN DE ENMIENDAS PARA SUELOS SALINOS Y SÓDICOS

## MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

**Ministro de Desarrollo Agrario y Riego**

Angel Manuel Manero Campos

**Viceministro de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario**

Christian Alejandro Garay Torres

**Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego**

Iván Ramos Pastor

**Jefe del INIA**

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

**Primera edición digital:**

Septiembre, 2024

**Publicado:**

Septiembre, 2024

**Disponible en:**

<https://repositorio.inia.gob.pe/>

**ISBN:** 978-9972-44-164-6

-

**Editado por:**

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 2402100 - 2402350

[www.gob.pe/inia](http://www.gob.pe/inia)

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2024-10233

**Autores:** Wendy E. Pérez-Porras, Ricardo Flores-Marquez, Emilee Calero-Rios, Yuri Arévalo-Aranda, Richard Solórzano-Acosta / **Colaboradores:** Italo Sandoval-Artega, Ulises Román-Montalbán, Hugo Cisneros-Córdova, Dixie Chuquimia-Vásquez / **Editor general:** Emely E. Lazo-Torreblanca / **Revisión de contenido:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante

# Tabla de contenido

<b>Presentación</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>2. Principios Fundamentales</b>	<b>10</b>
2.1. Definiciones sobre salinidad y sodicidad del suelo	10
2.2. Origen de los suelos salinos y sódicos	12
2.3. Consecuencias de la salinidad y sodicidad en suelos	20
<b>3. Diagnóstico y evaluación de suelos salinos y sódicos</b>	<b>25</b>
3.1. Métodos para determinar la salinidad del suelo	25
3.2. Métodos para determinar la sodicidad del suelo	31
3.3. Interpretación de resultados y evaluación de la gravedad del problema	34
<b>4. Manejo de suelos salinos y sódicos</b>	<b>37</b>
4.1. Métodos físicos	37
4.2. Métodos químicos	40
4.3. Enmiendas orgánicas	41
<b>5. Técnicas de aplicación</b>	<b>45</b>
5.1. Enmiendas químicas	45
5.2. Enmiendas orgánicas	47
<b>6. Estudios de caso</b>	<b>48</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>8. Referencias bibliográficas</b>	<b>52</b>

The image shows a landscape with a body of water in the middle ground and a foreground of dead, bleached vegetation. The water is a dark, muted green color. The foreground is a mix of light grey and brown, with many dead, skeletal plants and trees. The background is a dark green, almost black, sky. The overall tone is somber and desolate.

# Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia tecnológica, aprovechamiento y conservación de los recursos genéticos; además de la producción de semillas, plántones y reproductores de alto valor genético.

El INIA, a través del Proyecto Suelos y Aguas con CUI N° 2487112 tiene entre sus objetivos investigar, generar y transferir tecnologías relacionadas a suelos y aguas con fines de riego para mejorar la agricultura familiar del país.

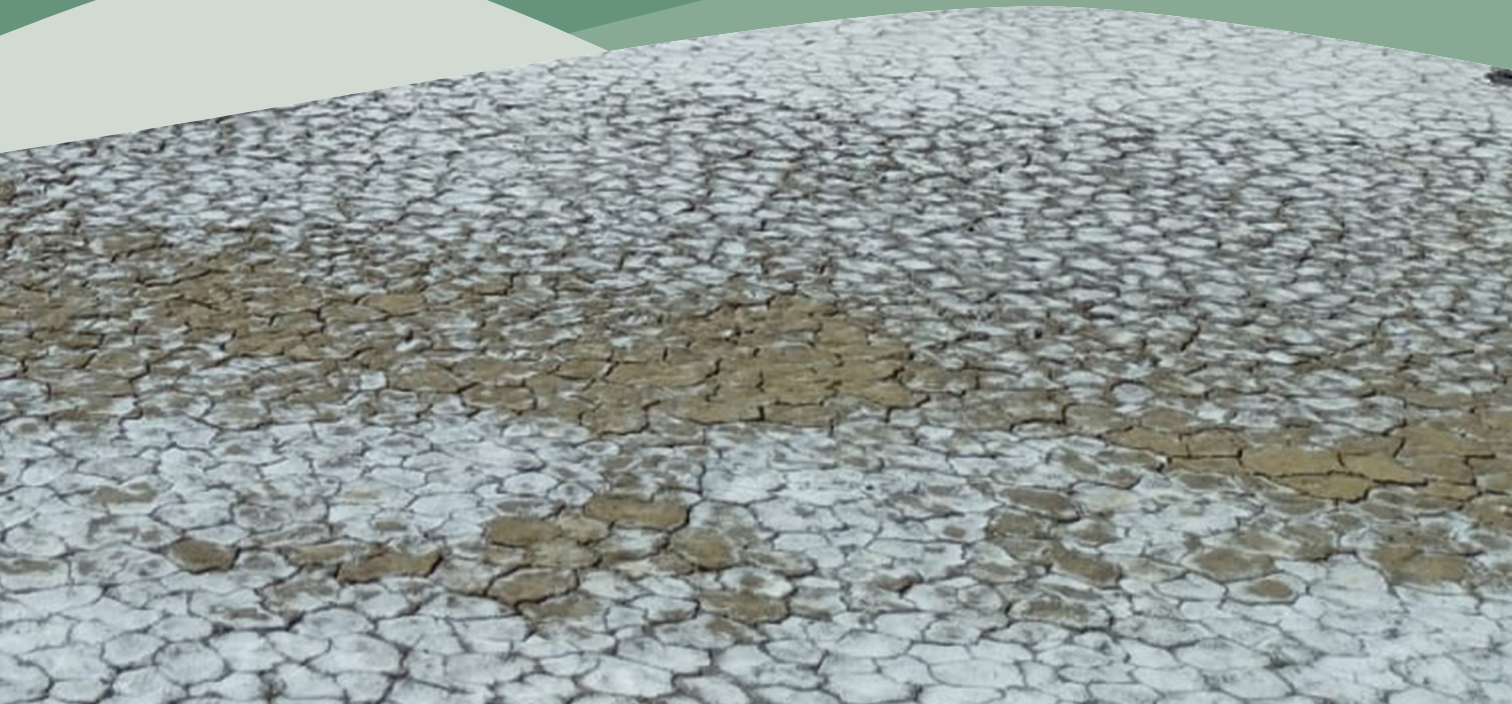
La presencia de salinidad y sodicidad en los suelos representa un problema para los agricultores en diversas regiones del país, el cual requiere ser atendido mediante técnicas de manejo de suelos, siendo el uso de enmiendas la opción más viable para revertir esta problemática.

En este contexto, el enfoque principal del “**Manual de aplicación de enmiendas para suelos salinos y sódicos**” es brindar conocimiento detallado y paso a paso sobre como seleccionar, aplicar y monitorear enmiendas adecuadas para corregir los problemas de salinidad y sodicidad en los suelos, donde se abordan y recomiendan enmiendas orgánicas y químicas; asimismo, se proporciona ejemplos específicos de casos exitosos de su uso. Esto contribuirá al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y productivas en entornos afectados por la degradación química como es la salinidad y sodicidad

Este manual está dirigido a agricultores, profesionales del sector agropecuario y público en general interesado en mejorar la calidad y productividad de los suelos.

**M Sc. Jorge Juan Ganoza Roncal**  
Jefe del INIA

# 1. Introducción



La salinidad y sodicidad del suelo son problemas que resultan de la acumulación excesiva de sales solubles y sodio intercambiable, respectivamente. Tienen un impacto significativo sobre la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, mermando su productividad. Esto debido a una menor disponibilidad de nutrientes, una reducción en la disponibilidad del agua en el suelo, la afectación de la microbiota y el incremento de la erosión hídrica (Tang et al., 2021).

Durante la presentación del Mapa Mundial de Suelos Afectados por Salinidad, se reportó que más de 424 millones de hectáreas de la capa superficial del suelo (0-30 cm) y 833 millones de hectáreas del subsuelo (30-100 cm) están afectadas por la salinidad. De estas áreas, se ha determinado que el 85 % de las capas superficiales afectadas son salinas, el 10 % son sódicas y el 5 % son salino-sódicas. En cuanto al subsuelo, el 62 % de las áreas afectadas son salinas, el 24 % son sódicas y el 14 % son salino-sódicas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

Una de las razones más importantes para abordar el problema de la salinidad es la reducción de la productividad, debido a que los suelos salinos y sódicos afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas al dificultar la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces. Esto resulta en una disminución en la productividad de los cultivos y puede llevar a cosechas de menor calidad (Majeed y Muhammad, 2019). Además de la escasez de recursos hídricos provocada por la acumulación de sales en el suelo y el agua subterránea, el riego con agua salina en suelos ya afectados exagera el problema (Musie y Gonfa, 2023). Asimismo, la degradación del suelo causada por la acumulación de sales puede ocasionar la pérdida de la estructura del suelo, conllevando a la erosión y la pérdida de la capa arable fértil (Tang et al., 2021).

La salinidad y la sodicidad pueden limitar el crecimiento de especies vegetales en un área determinada, lo que a su vez afecta la biodiversidad en los sistemas agrícolas y puede tener un impacto negativo en la fauna y los ecosistemas locales. Esto puede ocasionar el desplazamiento y cambio de cultivos, ya que limitan el tipo de especies que pueden ser cultivadas con éxito (Ramírez et al., 2001). Por otro lado, la disminución de la productividad agrícola debido a la salinidad y la sodicidad puede tener un impacto económico negativo en las comunidades agrícolas, ya que reduce los ingresos y las oportunidades de empleo. Esto repercute en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola, por lo que abordar la salinidad y la sodicidad es fundamental para lograr sistemas agrícolas sostenibles a largo plazo (Butcher et al., 2016; Haider y Hossain, 2013). Los suelos salinos también afectan tanto la entrada como la salida de carbono del suelo, lo que resulta en una disminución neta en la capacidad del suelo para secuestrar y almacenar carbono (Setia et al., 2013).

En este sentido, la salinidad y la sodicidad del suelo son desafíos que afectan diversos aspectos de la agricultura y el medio ambiente. Abordar estos problemas es crucial para asegurar la productividad agrícola, la seguridad alimentaria, la salud del suelo y la sostenibilidad en las regiones afectadas.

El manual de aplicación de enmiendas para suelos salinos y sódicos tiene como objetivo ofrecer información básica de los conceptos y problemas asociados con estos tipos de suelos en la agricultura. Además, busca proporcionar orientación práctica respaldada por evidencia científica sobre las mejores prácticas para manejar la salinidad y la sodicidad, permitiendo a los usuarios seleccionar las enmiendas más adecuadas para las condiciones particulares de su suelo.

# 2. Principios fundamentales

## 2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN SU AFECTACIÓN POR SALES


Los suelos que presentan problemas por sales se clasifican y presentan las siguientes características:

- **Suelos Salinos**

Los suelos que presentan una concentración de sales más solubles que el yeso, en cantidad suficiente para obstaculizar el desarrollo de la mayoría de los cultivos y otras plantas no especializadas, son conocidos como suelos salinos, estos coinciden con la clasificación de Solonchak según la World Reference Base ([WRB], Porta-Casanellas et al., 2003). Los suelos salinos son aquellos que presentan una conductividad eléctrica en un extracto de pasta saturada (CEe) superior a 4 dS/m, un pH inferior a 8.5, y un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) menor a 15 o una relación de absorción de sodio (RAS) inferior a 13. Esto significa que el complejo de intercambio en estos suelos está dominado por calcio y magnesio, no por sodio. El pH de los suelos salinos tiende a ser inferior a 8.5, ya que las sales solubles contribuyen a prevenir la dispersión de los coloides del suelo (Weil y Brady, 2017).

- **Suelos Sódicos**

Los suelos que poseen una cantidad de sodio intercambiable suficiente como para tener un impacto negativo en la producción de cultivos y la estructura de la mayoría de los mismos, son conocidos como suelos sódicos. Estos coinciden con la clasificación de Solonetz según la WRB (Porta-Casanellas et al., 2003). Los suelos sódicos son aquellos que tienen una CEe inferior a 4 dS/m, un pH superior a 8.5, y un PSI mayor a 15 o una RAS superior a 13 (Omuto et al., 2020), las cantidades excesivas de sodio (Na) dispersan las partículas de suelo, materia orgánica y arcillas; esto ocasiona reducción o pérdida



de la estructura del suelo, el Na reemplaza los cationes divalentes en el suelo, en modo adsorbido está hidratado y aumenta la electronegatividad hasta que las partículas se repelen; esto limita el movimiento de aire y agua, lo que trae como consecuencia la disminución de infiltración, percolación y drenaje deficiente, así como la toxicidad de iones: Na, Cl, B,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , en tallos y raíces; además de quemaduras en las puntas de las hojas, desbalances iónicos que conducen a deficiencias de Ca, K,  $\text{NO}_3$ , Mg, Mn, P (N. Vargas et al., 2018). Los suelos sódicos se caracterizan por su horizonte nátrico y se encuentran tanto en climas áridos como semiáridos, con exceso de sodio que afecta la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, tales como la estabilidad estructural y la permeabilidad, se encuentran vinculadas con la naturaleza del complejo de cambio y los efectos de dispersión coloidal (Szabolcs, 1969).

- **Suelos Salino-Sódicos**

Son aquellos que tienen sales más solubles que el yeso y sodio intercambiable. Estos suelos poseen una cantidad considerable de sales que limitan el crecimiento de algunos cultivos y presentan niveles elevados de sodio en los sitios de intercambio (Porta-Casanellas et al., 2003). Las sales proporcionan una cantidad excesiva de cationes que se adhieren a coloides con carga negativa, reduciendo su capacidad de dispersión. Estos suelos pueden convertirse fácilmente en suelos sódicos y presentan los mismos desafíos que los suelos salinos (N. Vargas et al., 2018). La hidrólisis de las sales de sodio en estos suelos provoca el aumento del pH transformándolos en suelos sódicos (Chhabra, 2004). Cuando las sales solubles están en altas concentraciones, el suelo conserva características salinas; sin embargo, si la concentración de sales solubles disminuye y las sales de sodio se hidrolizan, el suelo adquiere características propias de los suelos sódicos. Por tanto, estos suelos presentan una CEE mayor a 4 dS/m, pH menor a 8.5, y PSI mayor a 15 o RAS mayor a 13 (Omuto et al. 2020).

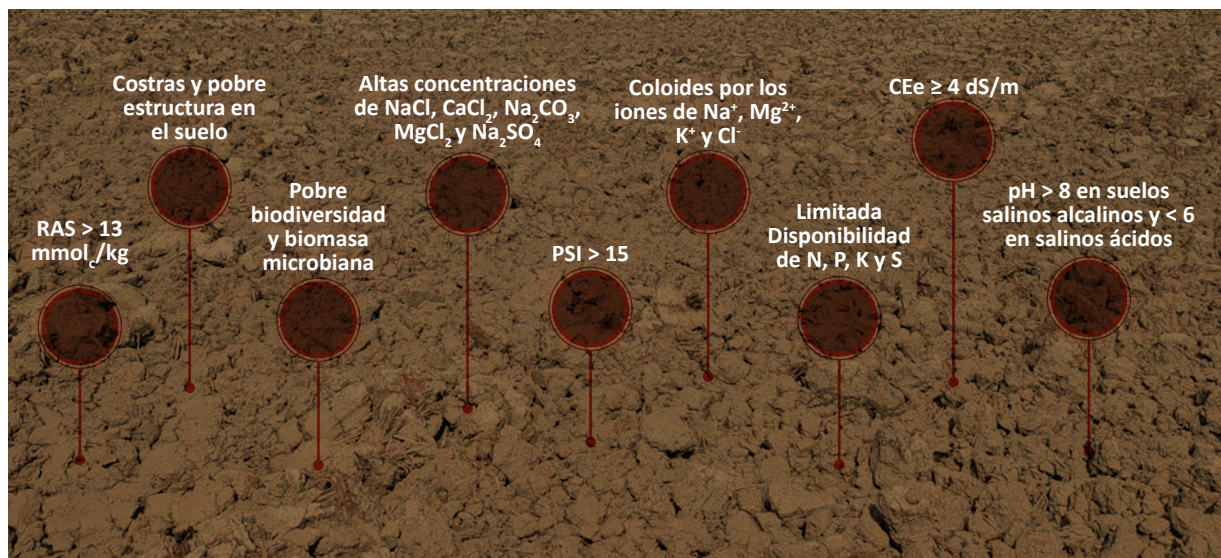


Figura 1. Características generales de suelos afectados por sales (adaptado de Bello et al., 2021)

## 2.2. ORIGEN DE LOS SUELOS SALINOS Y SÓDICOS

Los suelos salinos se forman debido a la acumulación excesiva de sales provenientes de una o varias fuentes, las cuales pueden actuar de manera individual o en conjunto (Mata-Fernández et al., 2014). Los principales orígenes de las sales en los suelos son:

- **Procesos de meteorización y material parental**

El material parental de los suelos se refiere a la roca o sedimento original a partir del cual se forma el suelo, la meteorización de éste determina cuáles serán los elementos que serán liberados e influyen en el equilibrio químico de los nutrientes del suelo (Anderson, 1988), se pueden liberar sales que se acumularán o serán removidas dependiendo de las condiciones ambientales predominantes (Zia-ur-Rehman et al., 2017). Bajo condiciones ambientales húmedas, las sales tienden a lixiviar a través de los suelos y ser transportadas hacia corrientes y ríos cercanos (Stavi et al., 2021), lo que resulta en la formación de áreas afectadas por la sal en áreas inferiores. En contraste, en climas áridos y semiáridos, los productos de la meteorización se acumulan en el lugar y contribuyen al desarrollo de condiciones salinas y sódicas en el suelo (Zia-ur-Rehman et al., 2017); de esta manera, los cationes tienden a mantenerse en el complejo intercambiable del suelo o a precipitar como minerales secundarios cuando la concentración iónica en la solución alcanza la saturación (Stavi et al., 2021). El agua y los suelos salinos de las regiones semiáridas y áridas contienen electrolitos disueltos, estos conforman cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de metales pertenecientes a los grupos IA y IIA de la tabla periódica (Porta-Casanellas et al., 2003), entre los más representativos tenemos (Tabla1):

Clase	Presencia en los suelos salinos	Solubilidad g/L	Toxicidad para las plantas
<b>Cloruros</b>			
Sódico	Común	264	Alta
Magnésico	Común	353	Muy alta
Cálcico	Raro	400-500	Media
Potásico	Baja	Elevada	Baja
<b>Sulfatos</b>			
Sódico	Común	-	Media
Magnésico	Común	262	Muy alta
Potásico	Baja	Elevada	Baja
<b>Carbonatos</b>			
Carbonato sódico	Suelos sódicos	178	Excesivamente alta
Bicarbonato sódico	Suelos sódicos	262	Muy alta

**Tabla 1.** Principales clases de sales que generan estrés salino (Porta-Casanellas et al., 2003)

- **Agua de irrigación**

En algunos suelos, el desarrollo de la salinidad puede estar relacionado con climas áridos y semiáridos, y con la incorporación de sales debido a las aguas de riego. Bajo estas condiciones, los procesos de acumulación tienden a superar a los procesos de lavado (Darab, 1981). Tras períodos lluviosos o de riego, en este tipo de suelos las aguas ricas en cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio se evaporan e infiltran, lo que inicia los procesos de desecación en las capas superficiales del suelo. A medida que estos procesos se intensifican, se produce un ascenso capilar del agua freática, lo que conduce a un enriquecimiento de sales en el perfil y la parte superior del suelo (Sheferia et al., 2021). En todas las aguas naturales se encuentran sales disueltas y el impacto positivo o negativo que el agua de riego pueda tener en la salinidad del suelo dependerá, principalmente, del tipo y la cantidad de estas sales. Así como del volumen de agua utilizado para el riego (Zia-ur-Rehman et al., 2017). En la Tabla 2 se muestra el riesgo de salinización causado por el agua de riego.

Concentración de sales (g/L)	Riesgo de salinización	Restricción de uso
< 0.5	Sin riesgo	No hay restricciones para su uso
0.5 - 2.0	Riesgo bajo o moderado	Puede ser usada, pero deben realizarse prácticas de manejo de agua apropiados
> 2.0	Alto riesgo	No se recomienda su uso, sin embargo, puede ser usada por aprobación de un especialista

**Tabla 2.** Riesgo de salinización por el agua de riego (adaptado de Brouwer et al., 1985)

En tal sentido, a manera de ejemplificar, si se diera el caso de que se tuviera una parcela de 1 ha y se riegue anualmente con 10 000 m<sup>3</sup> de agua, cuya conductividad eléctrica es de 0.5 dS/m y su concentración aproximada de sales es 0.3 g/L; se estarían aportando a la parcela 3000 kg de sales por hectárea al año. En ausencia de un buen drenaje y lixiviación, esto conduciría en el largo plazo a la salinización y reducción de rendimiento de los cultivos (Oosterbaan, 2020).

La salinización del suelo debido a las aguas de irrigación puede comportarse de diferentes maneras dependiendo de la topografía, el nivel de la napa freática y otros factores (Nosetto et al., 2013). Algunos ejemplos de cómo influye el agua de riego sobre la salinización de los suelos fueron ilustrados por Oosterbaan (2020), quien mostró patrones de flujo de agua que existen en los sistemas de irrigación costera. Como se puede observar en el escenario (A), se representa el desplazamiento de sales desde las áreas de riego elevadas hacia las regiones más bajas; las sales son arrastradas hacia las zonas inferiores por el agua de riego y se acumulan en los suelos planos debido al ascenso capilar y la filtración del agua. Por otro lado, en la situación (B) se observa cómo las sales en las zonas de terreno llano con un acuífero permeable son conducidas hacia las aguas subterráneas; posteriormente, estas sales son transportadas hacia las áreas no irrigadas, donde se acumulan en el suelo debido al ascenso capilar y la infiltración del agua. En el caso (C), que aborda las áreas de terreno plano con un acuífero poco profundo y permeable, las sales son transportadas hacia las zonas no irrigadas por el agua utilizada en el riego. Finalmente, en la (D) se muestra el movimiento de sales desde las zonas altas de irrigación hacia un delta costero, donde las sales son arrastradas hacia las aguas subterráneas y, debido al flujo ascendente de estas aguas y al bajo nivel de la napa freática, se depositan en los suelos costeros (Figura 2).

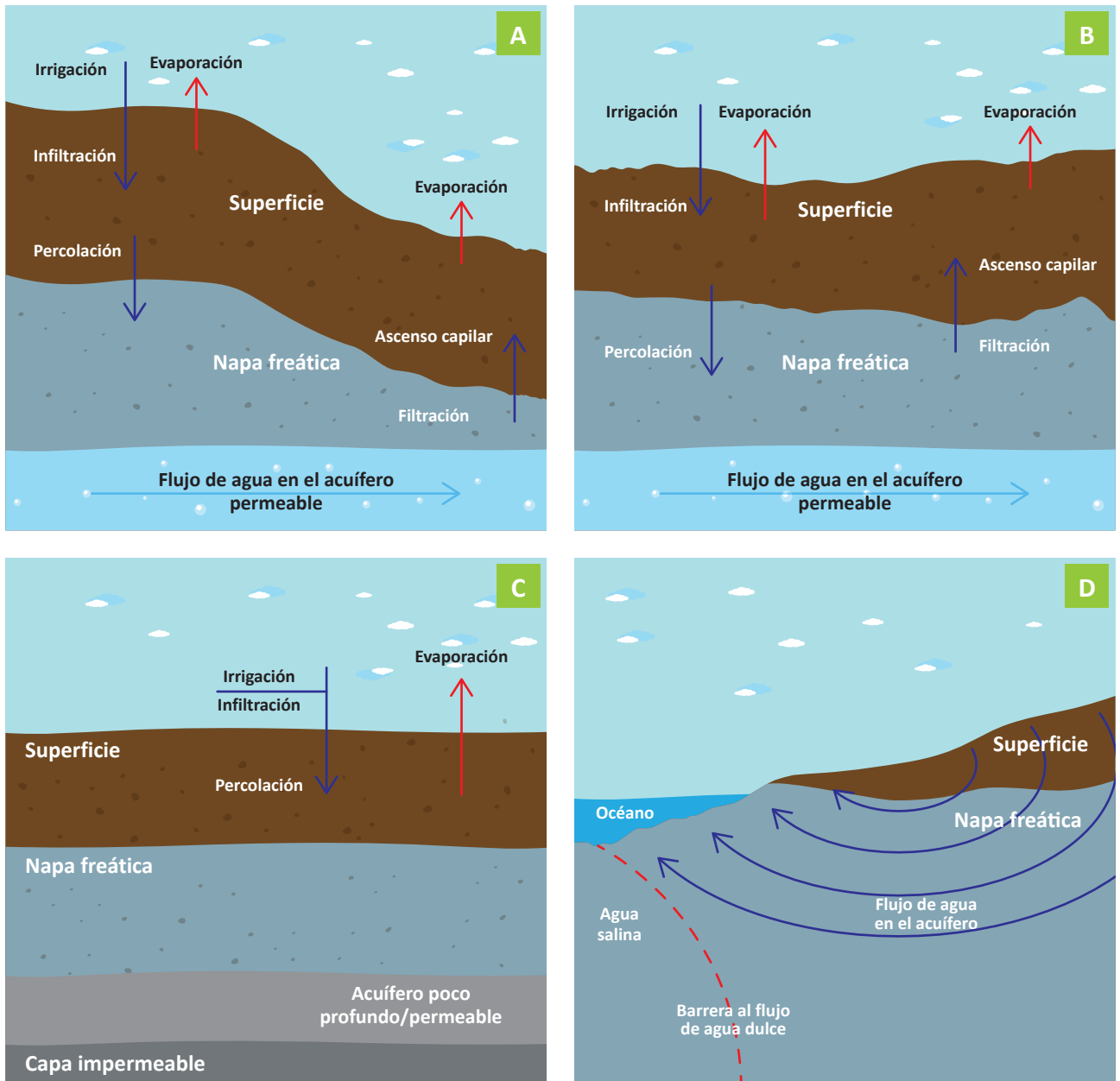


Figura 2. Flujos de agua de irrigación y subterránea (adaptado de Oosterbaan, 2020)

- **Aguas de inundación y efluentes residuales**

Las aguas de inundación, que no son fuentes directas de sales pero influyen en la redistribución de las sales ya presentes en el suelo, se destacan por su importancia en regiones propensas a inundaciones, como por ejemplo, durante la época de monzones en Pakistán (Zia-ur-Rehman et al., 2017). Los efluentes residuales tratados que suelen tener un alto contenido de sales cuando se utilizan para el riego, pueden contribuir a la acumulación de sales en el suelo, así como al aumento de los cationes de potasio, sodio, magnesio y calcio (Gao et al., 2021). En la Tabla 3 se puede observar la conductividad eléctrica de las aguas residuales tratadas y no tratadas de algunos países.

Tipo de agua residual	CEe (dS/m)	Ciudad, país	Referencia
Agua residual no tratada	0.22-1.78	Jiaying, China	Yu et al. (2019)
Agua residual tratada	0.15-1.78	Jiaying, China	Yu et al. (2019)
Agua residual no tratada	0.88-1.88	Ciudad de México, México	Ontiveros-Capurata et al. (2013)
Agua residual tratada	1.00-2.50	Algarrobo, España	Muñoz-Sánchez et al. (2018)
Agua residual no tratada (industrial + doméstica)	3.60	Bangladesh, India	Karmoker et al. (2018)

**Tabla 3.** Conductividad eléctrica de aguas residuales en diferentes ciudades del mundo

- **Agua de mar e influencia costera**

El agua de mar tiene una alta conductividad eléctrica ( $\approx 52$  dS/m) y una alta relación de adsorción de sodio (RAS > 50), lo que puede contribuir fuertemente sobre la salinidad de los suelos. Estas sales se pueden transportar a los suelos cercanos por acción de las mareas altas, el ingreso del agua de mar a través de ríos, estuarios, etc.; la afluencia hacia aguas subterráneas y la deposición de sales transportadas por aerosoles (Zia-ur-Rehman et al., 2017).

- **Sales fósiles**

La acumulación de sales en regiones áridas también puede ser causada por sales fósiles, que tienen su origen en antiguos depósitos marinos o lacustres. La liberación de estas sales puede ocurrir de forma natural o como resultado de actividades humanas. Un caso de salinización por sales fósiles ocurrió en Rajasthan (India), cuando se construyó un canal de riego sobre una capa de yeso subyacente, causando la salinización del área en pocos años (Zia-ur-Rehman et al., 2017).

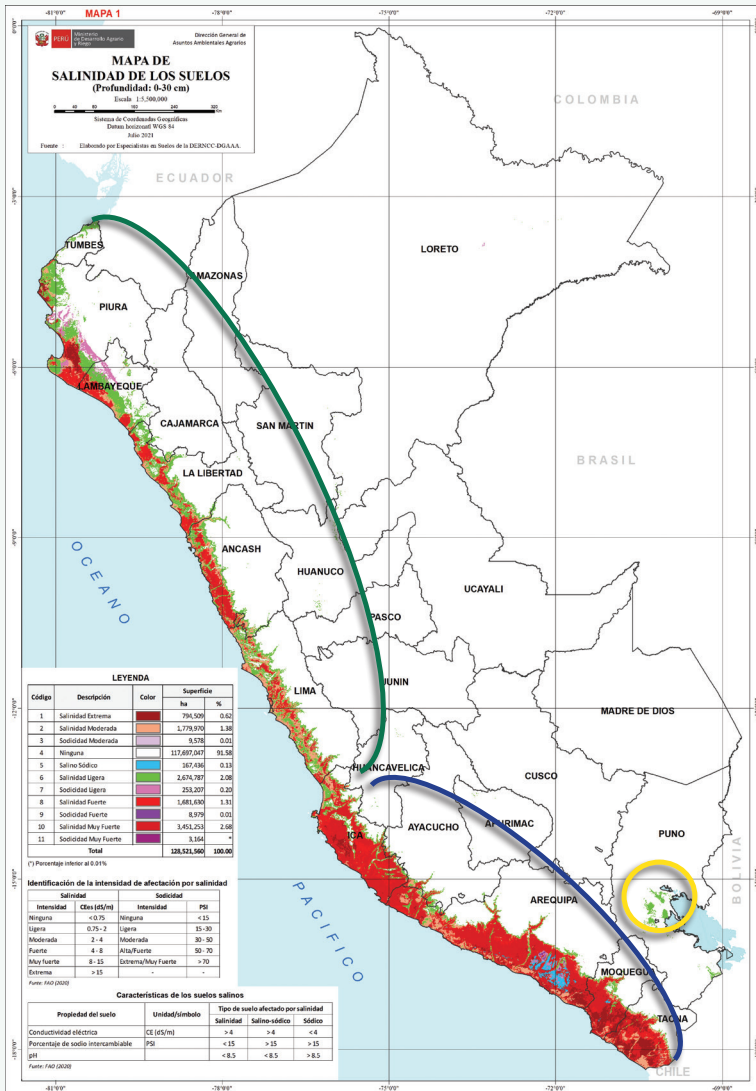
- **Fertilización química y materiales de desecho**

La excesiva utilización y el inapropiado manejo de ciertos materiales como estiércol de vacuno, lodos residuales, compost y vermicompost pueden dar lugar a la salinización progresiva de los suelos a largo plazo, como señalan Zia-ur-Rehman et al. (2017) y Torres et al. (2016). Este fenómeno se atribuye principalmente a que las materias primas empleadas en su producción pueden contener niveles elevados de sales (Torres et al., 2016). A modo de ilustración, los resultados obtenidos por Li-Xiana et al. (2007) indican que la aplicación consecutiva de estiércoles de pollo, cerdo y paloma resultó en un aumento de la concentración de sales solubles totales, promoviendo la salinización secundaria del suelo. Además, se observó un incremento significativo o positivo en los contenidos de  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  en relación con la tasa de aplicación de los estiércoles de pollo y cerdo.

En Perú, la mayoría de los problemas de salinización de suelos se concentran en la franja costera; sin embargo, las causas subyacentes de este fenómeno varían en los valles irrigados, las pampas y los desiertos. En los valles irrigados, la salinización se origina principalmente por el uso de aguas de riego, en este escenario, el exceso de riego eleva el nivel freático en las áreas bajas de los valles, generando problemas de drenaje y salinización debido a la acumulación de sales en el perfil del suelo; así también, la escasez de agua, la elevada concentración de sales en las aguas de riego y la alta evapotranspiración también contribuyen a la salinización en los valles. En cambio, en las pampas y desiertos costeros, la salinización del suelo se atribuye principalmente a su origen marino; estas sales tienden a acumularse en capas de hardpánicas, comúnmente conocidas como caliche (Masson, 1973).

En la Figura 3 se puede visualizar la distribución en la franja costera y zona lacustre, y la categoría correspondiente al grado de afectación según la profundidad del suelo, mostrándose en la Figura 3-A encontrado en un intervalo de profundidad de 0-30 cm y en la Figura 3-B, lo observado entre 30-100 cm.

A



Profundidad del suelo: 0-30 cm

**LEYENDA**

Código	Descripción	Color	Superficie	
			ha	%
1	Salinidad Extrema	[Red]	794,509	0.62
2	Salinidad Moderada	[Orange]	1,779,970	1.38
3	Sodicidad Moderada	[Light Purple]	9,578	0.01
4	Ninguna	[White]	117,697,047	91.58
5	Salino Sódico	[Light Blue]	167,436	0.13
6	Salinidad Ligera	[Light Green]	2,674,787	2.08
7	Sodicidad Ligera	[Pink]	253,207	0.20
8	Salinidad Fuerte	[Red]	1,681,630	1.31
9	Sodicidad Fuerte	[Purple]	8,979	0.01
10	Salinidad Muy Fuerte	[Dark Red]	3,451,253	2.68
11	Sodicidad Muy Fuerte	[Dark Purple]	3,164	*
<b>Total</b>			<b>128,521,560</b>	<b>100.00</b>

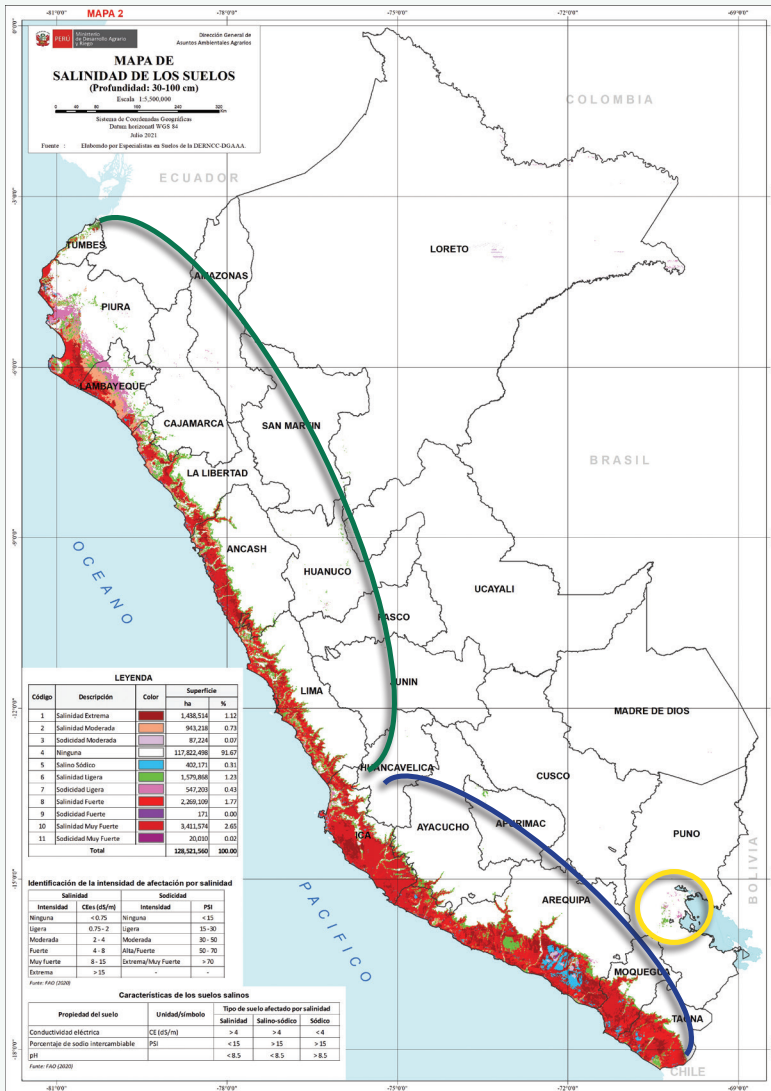
(\*) Porcentaje inferior al 0.01%

- Zona Norte: Mayor precipitación anual
- Zona Sur: Menor precipitación anual
- Suelos lacustres

Resolución: 1:1 000 000

**Figura 3.** Distribución espacial de los suelos afectados por salinidad en el Perú: (A) Profundidad de 0-30 cm; (B) profundidad de 30-100 cm (R. Balta, comunicación personal, 10 de diciembre 2021)

B



Resolución: 1:1 000 000

Profundidad del suelo: 30-100 cm

LEYENDA

Código	Descripción	Color	Superficie	
			ha	%
1	Salinidad Extrema	[Red]	1,438,514	1.12
2	Salinidad Moderada	[Orange]	943,218	0.73
3	Sodicidad Moderada	[Purple]	87,224	0.07
4	Ninguna	[White]	117,822,498	91.67
5	Salino Sódico	[Blue]	402,171	0.31
6	Salinidad Ligera	[Green]	1,579,868	1.23
7	Sodicidad Ligera	[Pink]	547,203	0.43
8	Salinidad Fuerte	[Red-Orange]	2,269,109	1.77
9	Sodicidad Fuerte	[Purple-Blue]	171	0.00
10	Salinidad Muy Fuerte	[Dark Red]	3,411,574	2.65
11	Sodicidad Muy Fuerte	[Dark Purple]	20,010	0.02
<b>Total</b>			<b>128,521,560</b>	<b>100.00</b>

- Zona Norte: Mayor precipitación anual
- Zona Sur: Menor precipitación anual
- Suelos lacustres

### 2.3. CONSECUENCIAS DE LA SALINIDAD Y SODICIDAD EN SUELOS

El incremento del contenido de sales en los suelos por encima de un umbral crítico tiene un impacto negativo en sus características fisicoquímicas, en los procesos microbiológicos y en el metabolismo de la flora y fauna asociada (Tejada et al., 2006). Los altos contenidos de sodio y sales solubles en los suelos agrícolas influyen sobre la inherente relación agua-suelo-planta. Esto disminuye el agua total disponible, afecta el balance nutricional, genera toxicidad específica a ciertos iones, afecta la composición y actividad de microorganismos beneficios, lo que en conjunto conlleva a la reducción de la productividad agrícola. El suelo mantiene una constante interacción con su entorno, por lo que su afectación por salinidad y sodicidad tiene repercusiones ambientales, sociales y económicas. De esta manera, el limitado acceso a suelos no degradados, la necesidad de mayores inversiones para el tratamiento de los suelos, la baja productividad, rentabilidad de los cultivos y las restricciones sociales asociadas exacerban las inequidades socioeconómicas (Daba y Qureshi, 2021).

Los umbrales para definir los grados de afectación ocasionados por salinidad en los suelos parten de los valores de conductividad eléctrica (CEe: 4 dS/m) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI: 15 %) (Richards et al., 1954) (Figura 4). En base a éstos, se han desarrollado investigaciones para adecuar los umbrales a las características pedogénicas, físicas y climáticas en distintas regiones.

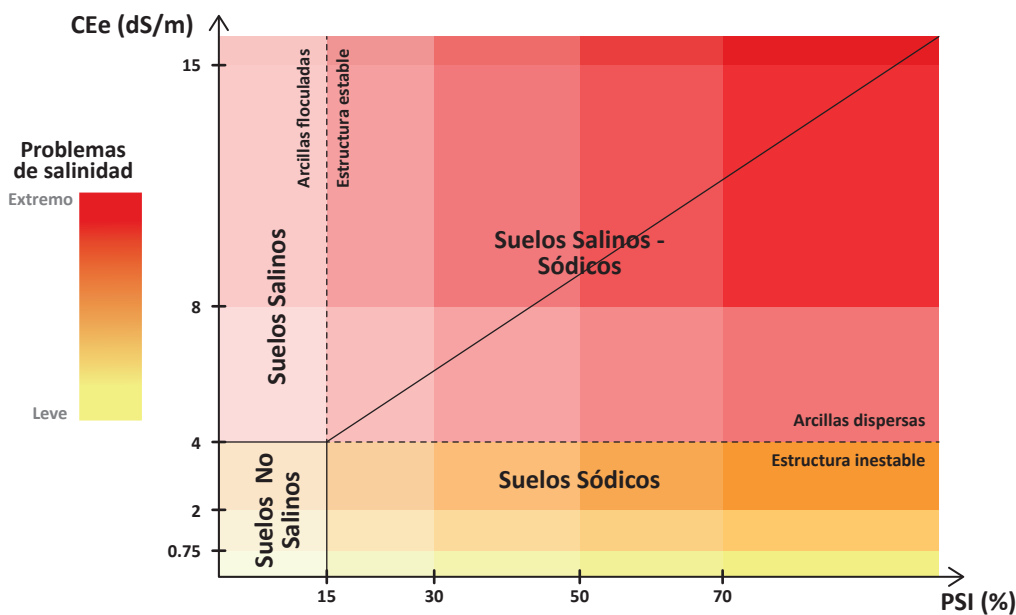


Figura 4. Intensidad de afectación por salinidad de suelos (elaborado a partir de Omuto et al., 2020)

## Los principales efectos identificados sobre los sistemas agroecológicos son:

- **Efectos en las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos**

En suelos salinos, a medida que aumenta el contenido de sales, el potencial osmótico se vuelve más negativo; esto implica que el agua total disponible disminuye y que las plantas gasten más energía para absorber y retener agua y nutrientes (Omuto et al., 2020). Estos suelos suelen estar bien estructurados y con buena permeabilidad; además, en climas semiáridos, especialmente durante la temporada seca, se observan costras blancas de sales en su superficie debido a la evaporación (Daba y Qureshi, 2021).

En suelos sódicos, el incremento del contenido de sales solubles en el suelo tiene una relación directa con el deterioro de su estructura. Esto se debe al efecto de expansión y dispersión de las partículas coloidales de los suelos a raíz de la presencia predominante de cationes de sodio, lo que trae como consecuencia una pobre circulación de agua y aire; así como una disminución en la capacidad de retención de agua en el suelo (Daba y Qureshi, 2021). Las partículas coloidales del suelo adsorben preferentemente los cationes sodio ( $\text{Na}^+$ ) debido a su menor carga eléctrica en comparación con los cationes calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ); sin embargo, la baja capacidad de floculación del  $\text{Na}^+$  propicia procesos de disgregación de los macroagregados ( $>250 \mu\text{m}$ ) en micro agregados ( $20\text{-}200 \mu\text{m}$ ), lo que reduce el volumen de macroporos, incrementa la densidad aparente y la compactación del suelo. Esto permite la migración de partículas de menor tamaño, lo cual produce el taponamiento de poros y la disminución de la conductibilidad hidráulica; como consecuencia se reduce la emergencia de plántulas, la capacidad de penetración radicular y complica las labores de labranza (Daba y Qureshi, 2021; Levy et al., 2005; Oster y Shainberg, 2001). Aunado a ello, la desagregación permite que los procesos erosivos se intensifiquen y se arrastren sales hacia los cuerpos de agua en la parte baja de la cuenca (Warrence et al., 2002). En tal sentido, los suelos sódicos se caracterizan por la presencia de horizontes superficiales compactados y cementados con charcos turbios color marrón oscuro o costras negras debido a la presencia de arcillas y materia orgánica dispersa en la superficie (Daba y Qureshi, 2021).

- **Impactos en las propiedades químicas de los suelos**

A nivel molecular, en suelos salinos se puede identificar toxicidad específica por la acumulación de iones específicos entre los que destaca el sodio ( $\text{Na}^+$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), ocasionalmente carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y, en menor proporción, pero con alta importancia, el boro (B), flúor (F) y litio (Li) (Qureshi et al., 2020). Además, en suelos sódicos ocurren procesos de hidrólisis de las arcillas saturadas de sodio en los que se liberan radicales hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) y se alcaliniza rápidamente el medio (Chorom, 1994). En estas condiciones de pH elevado se presentan deficiencias de macronutrientes (N, P, K) y reducción en la disponibilidad de micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn) (Gangwar et al., 2020).

- **Consecuencias para la biota de los suelos**

Los microorganismos del suelo tienen un impacto significativo tanto en la nutrición de las plantas como en la captura de carbono (Yan et al., 2015). Según Daba y Qureshi (2021); Tejada et al. (2006); y Yan et al. (2015), el incremento de sales en el suelo afecta a la composición microbiana del suelo. Esto debido a que el potencial osmótico del suelo se hace más negativo, lo que propicia que los microorganismos pierdan agua, disminuyan su turgencia y consecuentemente se produzca la muerte celular. Algunos microorganismos absorben osmolitos con la finalidad de contrarrestar los efectos del alto potencial osmótico; sin embargo, este mecanismo requiere de un alto consumo energético, lo cual limita el crecimiento y ciertos procesos celulares. Solo algunos tipos de microorganismos halófilos pueden mostrar esta adaptación, por lo que, los hongos tienden a ser más susceptibles que las bacterias a la salinidad. Por otro lado, la actividad de ciertas enzimas puede inhibirse ante altos valores de conductividad eléctrica (CE).

- **Influencia en el desarrollo de las plantas**

La dispersión de las partículas coloidales debido a la alta concentración de sodio en el suelo puede mermar la capacidad de penetración radicular de las plantas desde etapas tempranas, y no permite que las semillas puedan establecerse correctamente en su medio (Daba y Qureshi, 2021). Asimismo, los altos niveles de sales repercuten sobre el desarrollo de las plantas, efecto conocido como estrés por salinidad. En primera instancia ocurre una fase osmótica (cierre estomático, incremento en la temperatura foliar, inhibición del desarrollo de los brotes), y posteriormente una fase iónica (acumulación de sales en los brotes, senescencia foliar y abscisión prematura) (Mukhopadhyay et al., 2021). A nivel químico, se genera un desbalance nutricional, pues altos niveles de sodio y cloruro reducen la captación de iones como  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ . Además, esto conduce a un incremento en la producción de especies reactivas de oxígeno, los cuales dañan las macromoléculas (Nawaz et al., 2010, citando a Greenway y Munns, 1980), lo que genera mermas en el rendimiento del cultivo, el cual depende de la tolerancia de la planta a la salinidad y del manejo que se le dé al conjunto suelo, agua y planta (Oster y Shainberg, 2001; Tejada et al., 2006).

De forma referencial, en la Tabla 4 se presenta el grado de afectación que tendría un alto contenido de sales en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos.

Efecto en el rendimiento del cultivo	CEe (dS/m)	Intensidad de salinidad	PSI (%)	Peligro de sodicidad
Ninguno	< 0.75	Ninguna	< 15	Ninguno
Ninguno	0.75-2	Ligera	15-30	Ligero
Rendimiento de cultivos sensibles puede estar restringido	2-4	Moderada	30-50	Moderado
Rendimientos de muchos cultivos es limitado	4-8	Fuerte	50-70	Alto
Solo cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente	8-15	Muy fuerte	> 70	Extremo
Solo algunos cultivos muy tolerantes rinden satisfactoriamente	> 15	Extremo		

**Tabla 4.** Grado de afectación de los suelos sobre el rendimiento de cultivos en base a su salinidad y sodicidad (FAO, 2021)



# 3. Diagnóstico y evaluación de suelos salinos y sódicos

## 3.1. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA SALINIDAD DEL SUELO

Según Zaman et al. (2018), los indicadores utilizados para su evaluación y medición son:

- **Métodos visuales**
  - \* Costras blancas.
  - \* Superficie del suelo esponjosa.
  - \* Manchas de sal en la superficie del suelo seco.
  - \* Germinación reducida de las semillas.
  - \* Establecimiento irregular de cultivos.
  - \* Reducción del vigor de las plantas.
  - \* Daño foliar (hojas quemadas).
  - \* Cambios marcados en el color y la forma de las hojas.
  - \* La aparición natural de halófitas (plantas indicadoras).
  - \* Los árboles están muertos o próximos a hacerlo.
  - \* El área afectada empeora después de la lluvia.
  - \* Anegamiento.



**Figura 5.** Indicadores visuales de salinidad en el suelo. (A, C, D) Manchas de sal en superficie del suelo; (A, C) Costras blancas; (B) Establecimiento irregular y reducción del vigor de las plantas (elaborado a partir de Omuto et al., 2020)

- **Métodos de campo**

Para cuantificar la salinidad en campo, se pueden realizar mediciones de conductividad eléctrica. Dado que no siempre es posible coleccionar el extracto de pasta saturada, se utilizan suspensiones de suelo en agua (1:1, 1:2.5, 1:5) (Zaman et al., 2018). En la figura 6, se puede observar la determinación en una suspensión suelo: agua (1:1).



**Figura 6.** Determinación de la conductividad eléctrica en suspensión de suelo: agua 1:1 con potenciómetro portátil

La medición de conductividad eléctrica (CE) a capacidad de campo (CC) es la más representativa; sin embargo, la limitación en dicha medición es la dificultad para extraer suficiente agua. La relación entre CE<sub>cc</sub> a CE<sub>e</sub> para la mayoría de los suelos, excepto para los de textura arenosa y franco arenosa es generalmente:

$$CE_{cc} = 2CE_e$$

Donde:

**CE<sub>cc</sub>:** Conductividad eléctrica a capacidad de campo.

**CE<sub>e</sub>:** Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

Las proporciones suelo: agua comúnmente usadas son:

- 10 g de suelo + 10 mL de agua destilada (1:1).
- 10 g de suelo + 25 mL de agua destilada (1:2.5).
- 10 g de suelo + 50 mL de agua destilada (1:5).

Una vez establecidas las correlaciones con la CE<sub>e</sub>, se puede utilizar de forma fiable para el manejo y la selección de cultivos. En la Tabla 5, se presentan algunos factores de conversión mencionados por Zaman et al. (2018), donde el factor elegido dependerá del tipo de suelo:

Proporción	Lugar/textura del suelo
<b>CEe versus CE<sub>1:1</sub></b>	
$CEe = CE_{1:1} \times 3.35$	Emiratos Árabes Unidos/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:1} \times 2.42$	Turquía/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:1} \times 3.35$	Turquía/Suelo franco
$CEe = CE_{1:1} \times 3.35$	Turquía/Suelo arcilloso
<b>CEe versus CE<sub>1:2.5</sub></b>	
$CEe = CE_{1:2.5} \times 4.77$	Emiratos Árabes Unidos/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:2.5} \times 4.41$	Turquía/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:2.5} \times 3.96$	Turquía/Suelo franco
$CEe = CE_{1:2.5} \times 3.75$	Turquía/Suelo arcilloso
<b>CEe versus CE<sub>1:5</sub></b>	
$CEe = CE_{1:5} \times 7.31$	Emiratos Árabes Unidos/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:5} \times 7.98$	Turquía/Suelo arenoso
$CEe = CE_{1:5} \times 7.62$	Turquía/Suelo franco
$CEe = CE_{1:5} \times 7.19$	Turquía/Suelo arcilloso
$CEe = CE_{1:5} \times 6.92$	Irán/Top soil

**Tabla 5.** Factores de conversión para la conductividad eléctrica (adaptado de Zaman et al., 2018)

Entre los métodos indirectos no convencionales se encuentra la inducción electromagnética (EM) que utiliza una bobina transmisora para crear un campo magnético que penetra en el suelo. El campo magnético crea una corriente eléctrica que, a su vez, crea un campo magnético secundario, el cual es recibido por la bobina receptora del medidor (Mc Neill JD, 1980). La relación entre el campo magnético secundario y primario es proporcional a la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo. En consecuencia, la CEa representa la conductividad eléctrica, tanto del suelo como del agua; y está influenciada por el contenido de sal, la porosidad del suelo, la permeabilidad, el contenido de humedad, la temperatura del suelo y la composición de la arcilla (Spies y Woodgate, 2005). La condición es que siempre que el contenido total de humedad del suelo sea superior al 10 %, los enfoques electromagnéticos suelen ser un medio confiable para la determinación rápida de salinidad del suelo (Williams y Baker, 1982).

La interpretación de la salinidad del suelo a partir de mapas de CEa requiere la calibración de los valores de CEa con mediciones de conductividad eléctrica determinadas en laboratorio ( $CE_{1:5}$ ,  $CE_e$ ). Estas mediciones deben realizarse en diversas ubicaciones y profundidades del suelo para garantizar la precisión de los valores de CEa (Hardie y Doyle, 2012). Estos últimos destacan la capacidad de la inducción electromagnética aérea (AEM) para mapear rápidamente grandes áreas de suelo, combinada con otras tecnologías como LIDAR y radiometría; asimismo, resaltan la importancia de la calibración de los estudios AEM con datos de calibración sustanciales y la necesidad de software especializado para su interpretación; también, mencionan ventajas de los estudios AEM, como su menor costo por hectárea y la capacidad para resolver variaciones espaciales en CEa a intervalos de profundidad discretos.

- **Métodos de laboratorio**

La salinidad en laboratorio se puede determinar mediante la conductividad eléctrica de extractos, concentraciones de iones solubles del agua del suelo, masa de sólidos disueltos totales (TDS) o iones disueltos totales (TDI) (Hardie y Doyle, 2012).

Para determinar si un suelo es salino, es necesario tener información sobre la concentración total de sales solubles, que se conoce como conductividad eléctrica (CE). Este valor debe ser de al menos 4 dS/m a 25 °C en el extracto de pasta saturada del suelo (Shadid, 2013). Para determinar este parámetro, se añade suficiente agua para humedecer el suelo y se mezcla hasta alcanzar el equilibrio. Luego, se calcula la humedad y el resto del suelo se transfiere a un embudo Büchner con papel filtro, al cual se le aplica una bomba de vacío. El líquido recolectado constituye el extracto acuoso de saturación. Además, se puede determinar la lectura en la suspensión suelo-agua en proporciones como 1:2 o 1:5 (Bazán, 2017). Es importante tener en cuenta que los valores de conductividad eléctrica aumentan con la temperatura, por lo que es necesario corregirlos si no se miden a 25 °C. Se puede hacer una corrección aproximada aumentando los valores en 2 % por cada grado que la temperatura ambiente esté por debajo de 25 °C, y disminuyendo cuando la temperatura es superior a 25 °C (Hardie y Doyle, 2012; citando a Rayment y Higginson, 1992) (Figura 7).



A



B

**Figura 7.** Determinación de la conductividad eléctrica: (A) Filtrado de la solución suelo previo a la lectura y (B) lectura con potenciómetro de mesa

La salinidad del suelo también puede expresarse como el total de sales disueltas o TDS (mg/L). Esta medición implica evaporar un volumen conocido de agua filtrada hasta que se seque. Posteriormente, se debe pesar el residuo sólido restante. Sin embargo, este método tiene sus limitaciones debido a la posibilidad de una filtración incompleta o a la presencia de materiales no relacionados con la sal en el sólido remanente. La relación entre la conductividad eléctrica (CE) medida en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el total de sólidos disueltos expresado en ppm no tienen una relación exacta, ya que depende de la composición específica de las sales presentes. A pesar de esto, en agua con una alta concentración de cloruro de sodio, se puede estimar el TDS multiplicando la CE por un factor entre 0.5 y 0.67 (Mc Neill JD, 1980).

Los métodos como CE y TDS no pueden identificar las especies de iones que causan la salinidad del suelo. Esta salinidad puede deberse a diversas sales solubles, como los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Los fertilizantes solubles también pueden agregar otros iones como  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Para determinar los tipos y la relevancia relativa de los diferentes iones que contribuyen a la salinidad del suelo, se deben medir las concentraciones de aniones y cationes solubles en los extractos de agua del suelo utilizando técnicas como espectroscopía de absorción atómica por llama, métodos colorimétricos, cromatografía iónica y métodos de titulación (Hardie y Doyle, 2012, citando a Miller y Curtin, 2008).

### 3.2. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA SODICIDAD DEL SUELO

La sodicidad mide los iones de sodio en el suelo o agua en relación a los iones de calcio y magnesio, se expresa como la relación de adsorción de sodio (RAS) o como el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Si la RAS del suelo es igual o mayor a 13 (mmoles/L)<sup>0.5</sup> o el PSI es igual o mayor a 15; se considera que el suelo es sódico (Shahid, 2013, citando a Richards, 1954).

La RAS se calcula mediante la relación  $\text{RAS} = \text{Na} / [(\text{Ca} + \text{Mg})/2]^{0.5}$ , donde las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  están en miliequivalentes por litro (meq/L) en extracto de suelo de pasta saturada, y la RAS se expresa como (mmoles/L)<sup>0.5</sup> (Shahid, 2013). Según Zaman et al. (2018), los indicadores utilizados para su evaluación y medición son:

- **Métodos Visuales**

Se pueden observar los siguientes indicadores:

- \* Crecimiento vegetativo más pobre de lo normal, con pocas plantas sobreviviendo, o con muchas plantas o árboles atrofiados o enanos.
- \* Alturas variables de las plantas.
- \* Mala penetración del agua de lluvia, se produce encharcamiento superficial.
- \* Salpicadura de gotas de lluvia: sellado de superficies y formación de costras (fraguado duro).
- \* Agua opaca o turbia en charcos.
- \* Las plantas exhiben enraizamiento poco profundo.
- \* El suelo suele ser de color negro debido a la formación de sustancias húmicas de sodio.
- \* Se requiere mucha fuerza para la labranza (especialmente en suelos de textura fina).

- \* Dificultad al obtener extractos de saturación del suelo en el laboratorio debido a un bloqueo del filtro con la arcilla dispersa.

### • Métodos de campo

Según Zaman et al. (2018), la evaluación de campo del nivel relativo de sodicidad del suelo se puede determinar mediante el uso de una prueba de turbidez en suspensiones suelo: agua (1:5), con las clasificaciones:

- \* Suspensión transparente: no sódica.
- \* Parcialmente turbio u opaco: sodicidad media.
- \* Muy turbio y opaco: alta sodicidad.

La sodicidad relativa se puede evaluar más detalladamente colocando una cuchara de plástico blanca en estas suspensiones, como se indica a continuación:

- \* Si la cuchara es claramente visible, significa que no es sódica.
- \* Si la cuchara es parcialmente visible, significa sodicidad media.
- \* Si la cuchara no es visible, significa alta sodicidad.

### • Métodos de laboratorio

Según Bazán (2017), los cationes cambiables del suelo, principalmente  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , se encuentran en el extracto preparado durante el proceso de saturación con acetato de amonio para el análisis de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). En suelos salinos que contienen estos cationes procedentes de las sales depositadas en el suelo, estas cantidades disueltas aumentarán la medición de su concentración, por lo cual se deben tener en cuenta durante el proceso de extracción y en los cálculos.

Los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son medidos por:

- \* Espectrofotometría de absorción atómica (AAS) (Figura 8).
- \* Por titulación del  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  con EDTA.

Los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por espectrofotometría de emisión (fotómetro de llama) o por absorción (AAS) (Figura 8) (Bazán, 2017).

La presentación estándar de la sodicidad del suelo es el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), obtenido mediante la relación de adsorción de sodio (RAS).

La RAS denota la cantidad de sodio existente respecto al calcio y al magnesio. Se halla con los datos de la cantidad de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del análisis químico de solución suelo a través de la siguiente operación (Bazán, 2017, citando a Richards et al., 1954), donde el resultado es obtenido en meq/L (miliequivalentes por litro).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Se entiende que el PSI es la proporción de sodio intercambiable en relación con otros cationes intercambiables en el suelo. La determinación del PSI puede hacerse midiendo el sodio intercambiable ( $\text{Na}^+$ ) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. La CIC es una medida de la capacidad total del suelo para retener cationes intercambiables, como calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), entre otros. El PSI se expresa típicamente como un porcentaje, calculado como el sodio intercambiable dividido por la CIC y multiplicado por 100 (Zaman et al., 2018):

$$\text{PSI} = 100 \times \text{Na}^+ / \text{CIC}$$

**Donde:**  $\text{Na}^+$  y CIC se representan como (cmol/kg o meq/100g).



**Figura 8.** Análisis de cationes cambiabiles por espectrofotometría de absorción atómica (EAA)

### 3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE LA GRAVEDAD DEL PROBLEMA

Con los resultados proporcionados por el laboratorio, se deben de considerar los siguientes parámetros:

- Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe).
- Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), presente en la capacidad de intercambio catiónico (CIC pH 7).
- Relación de absorción de sodio (RAS).

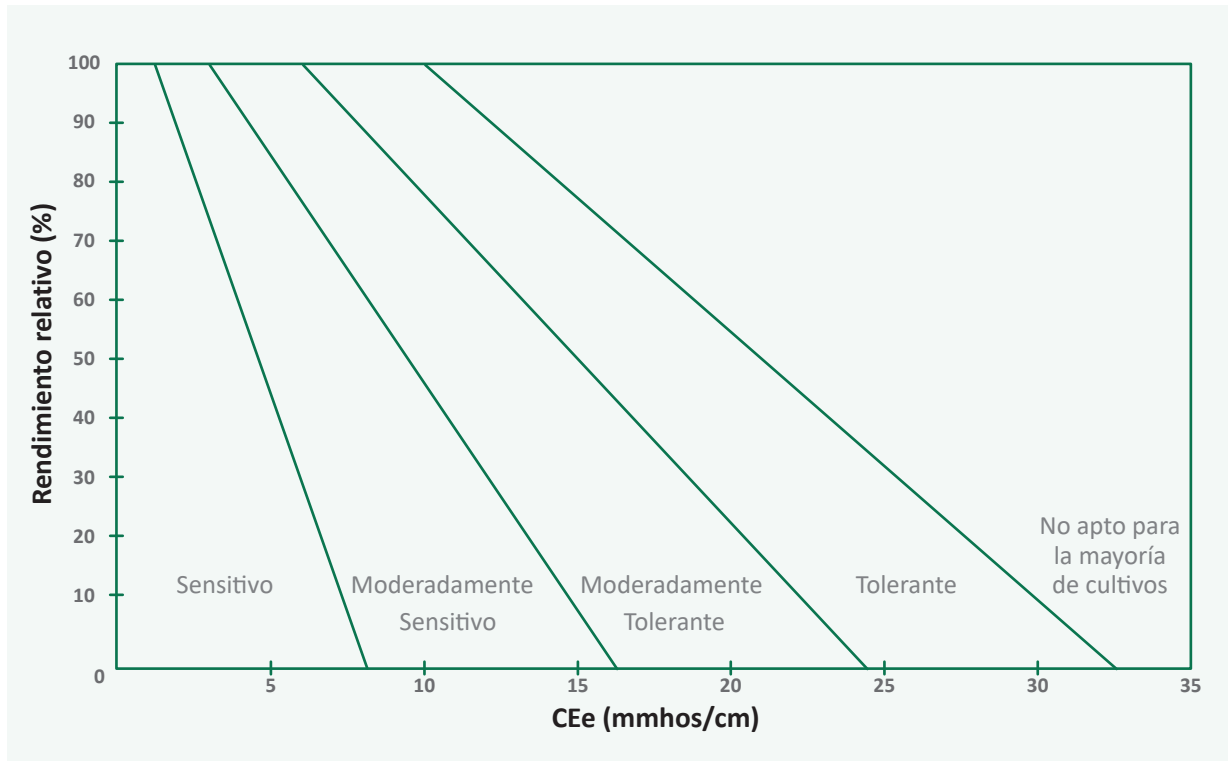
Según Barth et al. (2023), la clasificación de un suelo como salino, salino - sódico o sódico; estará en función a los parámetros de CEe y PSI, RAS (Tabla 6):

Clasificación	CEe (dS/m)	PSI (%)	RAS	pH
Salino	$\geq 4$	$< 15\%$	$< 13$	$< 8.5$
Salino-Sódico	$\geq 4$	$\geq 15\%$	$> 13$	$\leq 8.5$
Sódico	$< 4$	$\geq 15\%$	$> 15$	$> 8.5$ $< 10$

Clasificación	Características
Salino	La acumulación de sal se eleva hasta provocar estrés osmótico en las plantas. Se puede presentar en la época seca, el suelo se visualiza cubierto por una capa blancuzca formada por la acumulación de sales (eflorescencia salina).
Salino-Sódico	Presenta un nivel alto de sales y sodio intercambiable, lo cual puede suceder cuando el agua utilizada para irrigación presenta niveles altos de sodio, como en el caso del uso de agua salobre o en lugares donde el mar invada los canales de regadío o el suelo.
Sódico	Cuando la relación de sodio intercambiable es alta, puede originarse a partir de un suelo salino-sódico. Esto ocurre cuando, a través de un drenaje natural o artificial, se produce la lixiviación de cationes, dejando el sodio en el complejo de cambio. Como consecuencia, se eleva el pH y se dispersan las arcillas y la materia orgánica. En algunos casos, aparece una coloración oscura conocida como álcali negro. Las arcillas se desplazan a mayor profundidad, formando un horizonte compactado con un alto contenido de sodio, lo que genera condiciones físicas muy desfavorables para el crecimiento de las raíces y el movimiento del agua.

**Tabla 6.** Clasificación de suelos acorde a los parámetros de Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEe), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y Relación de Absorción de Sodio (RAS) (adaptado de Barth et al., 2023)

Si el análisis de suelos revela problemas de salinidad, se puede tomar en cuenta la Figura 9, donde se muestra la tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad:



**Figura 9.** Tolerancia de los cultivos según la concentración de sales (adaptado de Maas y Hoffman, 1977)



# 4. Manejo de suelos salinos y sódicos

De lo descrito en los capítulos previos, los procesos de salinización del suelo son eventos que ocurren de un mediano a largo plazo. Por ello, es importante realizar un manejo adecuado de los suelos agrícolas para prevenir que los campos alcancen niveles perjudiciales para el crecimiento de las plantas, entendiendo que la recuperación de suelos afectados por salinización implica la implementación de planes a mediano y largo plazo (R. Vargas et al., 2018).

## 4.1. MÉTODOS FÍSICOS

Los métodos físicos de manejo de suelos salinos-sódicos implican la remoción física de las sales existentes en el perfil del suelo y la mejora de su permeabilidad. En este sentido, en la literatura se han descrito técnicas tradicionales como el subsolado o el lavado del perfil de suelo (Choudhary y Kharche, 2018), así como técnicas más novedosas como el uso de electromagnetismo para la corrección temporal de la salinidad en las aguas para riego (Hachicha et al., 2018). A continuación, se resumen los métodos físicos más difundidos para el manejo de suelos salinos y sódicos (Tabla 7):

Método	Descripción	Beneficio	Limitación
Arado profundo subsolado	Rotura de la capa compactada, cementada o impermeable del perfil del suelo.	Mejora la penetración de agua, aireación y desarrollo radicular. Mejora la infiltración y lixiviado de sales.	Beneficios de corto plazo y de poca duración.
Inversión de perfil	Conservación de capa superficial del suelo (cuando éste tiene pocas sales) e inversión del subsuelo a capas más profundas del perfil.	Las capas de buena calidad son reubicadas en corto tiempo en la superficie.	Procedimiento complicado y no escalable. Con napa freática elevada los problemas pueden reaparecer prontamente.
Incorporación de arena	Incorporación y mezclado de arena con suelo salino.	Mejora permeabilidad y porosidad.	Poco práctico para grandes áreas. En suelos arcillosos sódicos puede generar problemas de cementación.
Raspado de sales	Raspado y eliminación por medios mecánicos de las sales acumuladas en la superficie del suelo.	Mejora temporal del desarrollo del cultivo.	Una incorrecta disposición de sales puede llevar los problemas a otras zonas. Frente a una napa freática elevada, el problema de sales será recurrente.
Lavado del perfil	Aplicación de lámina de agua de baja CE sobre la superficie del suelo a fin de disolver y lixiviar las sales superficiales hacia las capas profundas del suelo.	Puede mejorar la CE y PSI.	Está limitado por la calidad y cantidad del agua para riego y puede lavar nutrientes. Requiere manejo de drenaje y cuidado con potencial contaminación de acuíferos.

**Tabla 7.** Técnicas de manejo físico en suelos salinos y sódicos (adaptado de Choudhary y Khariche, 2018)

En torno al lavado de sales, como método físico de mayor difusión, cuando se aplica agua para lavar las sales del perfil de suelo suceden interacciones fisicoquímicas entre los elementos transportados por el agua y aquellos presentes en el suelo; en tal sentido, para desarrollar un adecuado plan de manejo se debe conocer las características de los suelos a tratar, las características de las aguas para riego y del tipo de cultivo a trabajar (Qadir et al., 2000). En relación al suelo, como se ha desarrollado en los capítulos previos, es necesario considerar su caracterización fisicoquímica (incluyendo la identificación de los cationes y aniones presentes en el suelo), la determinación de sus constantes

hídricas (contenido de agua a capacidad de campo y la saturación) y el conocimiento de la estructura del suelo (por su influencia sobre el tiempo de contacto, la velocidad del paso y el consiguiente arrastre de sales a través del perfil de suelo). En torno a las aguas para riego, Hopkins et al. (2007) recomienda realizar la caracterización de cationes, aniones e índices complementarios que permitan estimar el efecto de su uso sobre la concentración de sales en los suelos a través del riego (Tabla 8). Por otro lado, el tipo de cultivo, por su adaptabilidad y tolerancia a las sales, determinará el nivel de salinidad permitido; mientras que, por su profundidad radicular determinará la franja donde se deberán concentrar los trabajos de manejo, pues, normalmente el 70 % del agua se asimila en la primera mitad de la zona radicular (Ayers y Westcot, 1985).

Tipo de análisis	Elemento analizado	
<b>Cationes</b>	Calcio	Ca <sup>2+</sup>
	Magnesio	Mg <sup>2+</sup>
	Sodio	Na <sup>+</sup>
	Potasio	K <sup>+</sup>
<b>Aniones</b>	Cloro	Cl <sup>-</sup>
	Boro	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>
	Carbonato	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
	Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	Nitrato	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<b>Índices químicos</b>	Acidez/Alcalinidad	pH
	Relación de adsorción de sodio	RAS
	Conductividad eléctrica	CE

**Tabla 8.** Análisis recomendados para calidad de agua para riego (adaptado de Hopkins et al., 2007)

El manejo mediante el lavado del perfil consistirá en realizar riegos de machaco y/o la aplicación de una lámina adicional de agua durante el riego (fracción de lavado) para disolver y desplazar las sales fuera de la zona radicular de interés (Ayers y Westcot, 1985). Ello debe ir de la mano con un correcto manejo de drenajes que permitan movilizar las aguas con alta conductividad eléctrica fuera de la zona de producción agrícola, pero con cuidado de trasladar los problemas de alto contenido de sales a cauces y acuíferos aguas abajo (Villafañe et al., 2004).

## 4.2. MÉTODOS QUÍMICOS

En terrenos afectados por salinidad, el procedimiento de lavado se muestra como una opción efectiva para restaurar su fertilidad y capacidad agrícola. Esto se debe a que las sales solubles ya están disueltas en la solución del suelo, lo que permite que sean transportadas por el agua. Sin embargo, en situaciones donde el suelo es sódico o salino-sódico, es crucial emplear productos químicos mejoradores para eliminar el sodio que está adherido a las partículas de arcilla (Terrazas, 2019).

Según Choudhary y Kharche, 2018 y Zia et al., 2007, los productos más utilizados se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Sales de calcio**
  - Solubles**
    - \* Cloruro de calcio
    - \* Yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
  - Poco solubles**
    - \* Caliza molida
- **Ácidos y sales acidificantes**
  - \* Azufre
  - \* Sulfato de hierro
  - \* Ácido sulfúrico
  - \* Sulfato de alúmina

Productos que contienen sales de calcio, como el yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), se utilizan como enmiendas para suelos afectados por problemas de salinidad y sodicidad. El yeso agrícola actúa liberando calcio en el suelo a través de un proceso en el que reemplaza iones de sodio en el intercambio catiónico. Durante este proceso, dos átomos de sodio son sustituidos por un átomo de calcio, dando lugar a la formación de sulfato de sodio soluble que será eliminado durante el lavado del suelo, dando lugar al enriquecimiento con calcio, lo cual mejora la estructura del suelo, la floculación de las arcillas, disminuye el pH del suelo, mejora la disponibilidad de nutrientes para la planta e incrementa la cantidad de poros que provean un ambiente físico favorable para el movimiento de agua y para el crecimiento y desarrollo del sistema radical (Panzardi et al., 2020).

El azufre también se emplea como un agente químico de mejora debido a su costo económico. Sin embargo, experimenta una serie de cambios antes de ejercer su efecto en el suelo; un factor esencial es la presencia de carbonatos de calcio en el suelo como condición para la aplicación de azufre, esto facilita la reacción con el ácido sulfúrico, dando lugar a la formación de sulfato de calcio; posteriormente, se produce un intercambio entre el calcio y el sodio en el suelo. Durante la primera fase de su transformación, el azufre se oxida por acción microbiana, formando  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . La velocidad de esta transformación depende de factores como la finura del azufre, la cantidad aplicada, el tipo

de suelo y otros aspectos que favorecen la actividad microbiana. Dado que el azufre es un mejorador lento, se sugiere no lavar los suelos tratados hasta después de un tiempo, asegurándose de mantener el suelo húmedo por la acidez del suelo (Pasache, 2021, citando a Pizarro, 1978).

### 4.3. ENMIENDAS ORGÁNICAS

Una enmienda orgánica es un material natural, de origen vegetal y/o animal, que se agrega al suelo para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Chen et al., 2018).

A continuación, se describen algunas de ellas:

- **Abono Verde:** Los abonos verdes o cultivos de cobertura son plantas verdes leguminosas y no leguminosas incorporadas al suelo, ya sea adoptándolas in situ o desarrolladas en el exterior, para cubrirlo y mejorar sus características físicas, químicas y biológicas. Pueden sembrarse de forma independiente o en asociación con otros cultivos (Florentín et al., 2011; Maitra et al., 2018).
- **Compost:** Producto inocuo y libre de efectos fitotóxicos que resulta del proceso de compostaje constituido por una materia orgánica estabilizada donde no se reconoce origen, puesto que se habrá degradado generando partículas más finas y oscuras (INACAL [NTP 201.207:2020], 2020).
- **Extracto húmico:** Fracción de la materia orgánica de los suelos u otros compuestos orgánicos. Está compuesto por los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas.
- **Lodo:** Es un residuo sólido proveniente de procesos de tratamiento de aguas residuales que cuentan con alta concentración de materia orgánica.
- **Vermicompost:** Se conoce comúnmente como humus de lombriz, es producido por las lombrices de tierra y microorganismos mesófilos, esta enmienda es rica en nutrientes y hormonas, altamente porosa y retentiva de agua (Pérez et al., 2022).

La utilización de enmiendas orgánicas tiene el potencial de incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mejorar la retención de agua, aumentar la fertilidad del suelo, elevar el contenido de carbono orgánico y reducir la salinidad, la conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (Yang et al., 2018). Los compuestos, semejantes a un pegamento, producidos por las bacterias y hongos que se encuentran en la materia orgánica, fomentan la unión entre las partículas del suelo y dan lugar a la formación de agregados. Esto resulta en un aumento en la porosidad y la aireación del suelo, se observa una mayor capacidad de infiltración y una disminución de contenido de sales en el suelo al ser lavado (Diacono y Montemurro, 2015, citando a Diacono y Montemurro, 2010).

La materia orgánica también contribuye a las actividades biológica y química, las cuales tienen la capacidad de mitigar los impactos adversos causados por la salinidad, al mismo tiempo que favorecen los ciclos de nutrientes (Rao y Pathak, 1996). Reportes previos indican —por ejemplo— que el ácido

húmico influye tanto directa como indirectamente en la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas, impactando sobre su crecimiento, rendimiento y calidad del fruto (Ennab et al., 2023). Con la incorporación de enmiendas orgánicas como estiércoles y abonos verdes, se producen mecanismos como el incremento de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en la zona radicular; la solubilidad del carbonato de calcio nativo y la promoción de la recuperación en la zona radicular. Esto mejora la estructura del suelo mediante el crecimiento y la actividad de las raíces (Al-Elwany et al., 2023; Qadir y Oster, 2002).

La generación de residuos orgánicos de procesos industriales, también es vista con interés para la biorremediación, en torno a esto, se han encontrado respuestas positivas a la aplicación de mezclas de cenizas de plantas termogeneradoras y lodos residuales de plantas depuradoras en suelos sódicos (Ors et al., 2015). Sin embargo, se debe considerar que las enmiendas orgánicas no eliminan por completo los efectos adversos de la salinidad. No obstante, el uso continuo de compost mejora las propiedades biológicas y químicas de los suelos salinos, por lo cual, el compost puede ofrecer un acondicionamiento del suelo para la producción de cultivos bajo estas condiciones (Meena et al., 2016).

Tejada et al. (2006) reportan el uso de compost de residuos de algodón y estiércol de aves. Ambas enmiendas, no solo mostraron mejoras en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, sino que también mejoraron la estructura del suelo, redujeron el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) e incrementaron actividades enzimáticas diversas. El compost de residuos de algodón tuvo efectos positivos en las propiedades físicas del suelo y el PSI. En cambio, el estiércol de aves principalmente incrementó la actividad enzimática del suelo.

El estiércol contiene grandes cantidades de compuestos orgánicos de fácil descomposición, su incorporación en el suelo casi siempre resulta en un aumento en la actividad biológica; además, se incrementa la disponibilidad de nutrientes para las plantas, así como, la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica y la retención de agua mientras que la densidad aparente disminuye (Castellanos, 1985).

Los residuos orgánicos pueden utilizarse como cobertura en la superficie o incorporarse al suelo. Cuando estos se aplican en la superficie, reducen la evaporación, manteniendo el suelo húmedo y reduciendo los riesgos de salinización. Sin embargo, el efecto de esta práctica es temporal y requiere incorporaciones periódicas durante los cultivos (Cavalcante et al., 2016). Según Orsag (2010), los beneficios de incorporar estiércol o enterrar abonos verdes en suelos salinos o alcalinos incluyen la mejora de la estructura y permeabilidad del suelo, y la liberación de  $\text{CO}_2$ , lo que resulta en un aumento en la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ .

Es importante tener en cuenta que cuando usemos alguna enmienda orgánica esta debe de ser de buena calidad, por lo que a continuación se muestra las características que debe tener un compost (Tablas 9, 10 y 11).

Parámetro	Rango
Humedad (%)	15 - 35 %
Conductividad eléctrica (mS/cm)	≤ 5 (dilución 1:5)
pH	5 - 8.5 (dilución 1:5)
Materia orgánica (%)	≥ 20
Tamaño de partícula (mm)	≤ 16
Materias inertes	No se permiten impurezas
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	≤ 700
Relación Carbono/Nitrógeno	10/1 - 25/1

**Tabla 9.** Características físico químicas del compost (Instituto Nacional de Calidad (INACAL, [NTP 201.207:2020], 2020)

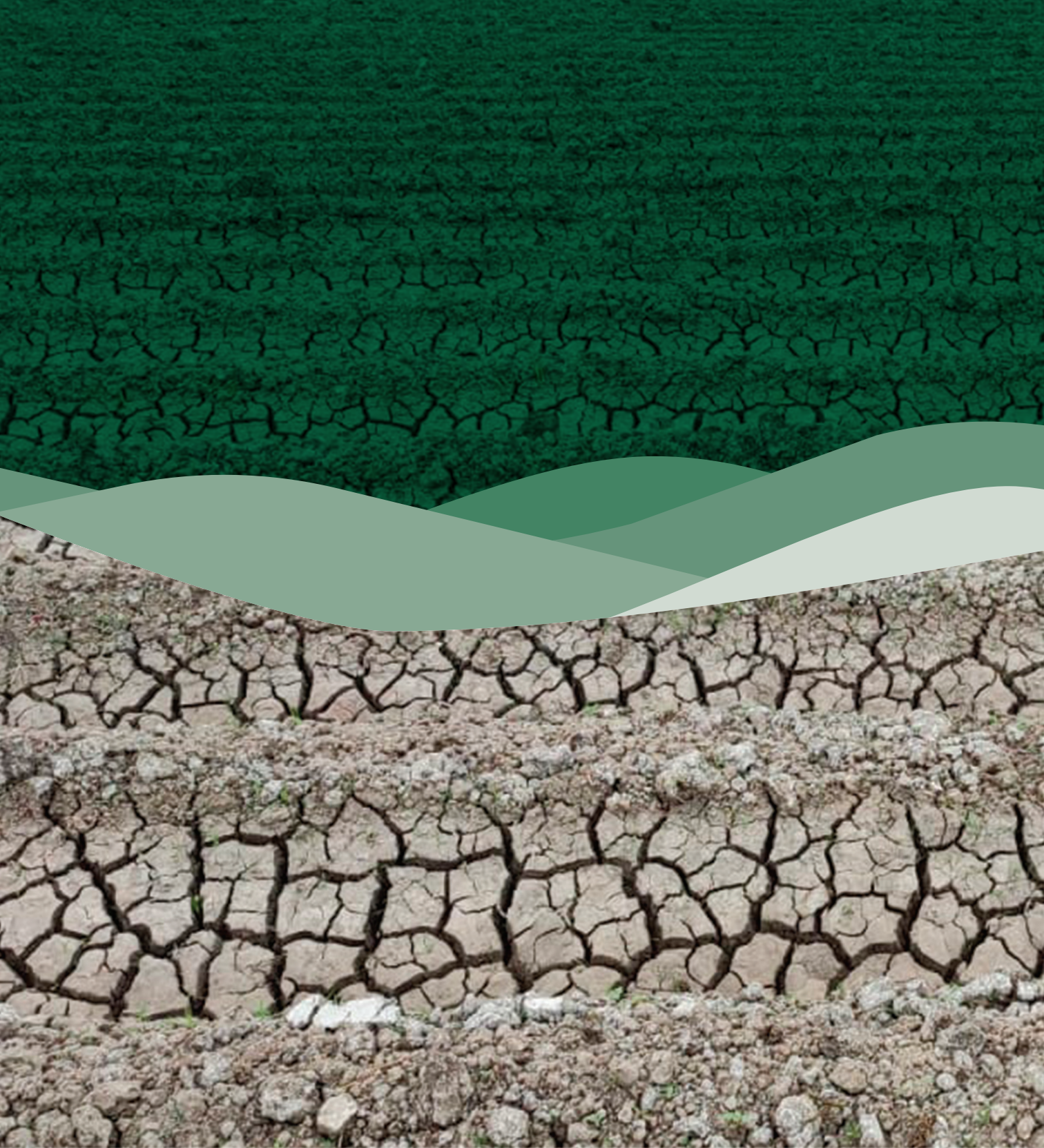
Tipo de microorganismo	Tolerancia en base seca
Coliformes fecales	< 1000 NMP en 1 g de compost
<i>Salmonella</i> spp.	3 NMP en 4 g de compost
Huevos de helmintos viables	1 en 4 g de compost

**Tabla 10.** Características biológicas del compost (INACAL [NTP 201.207:2020], 2020)

**Nota.** NMP: Número Más Probable

Metal pesado	Concentración máxima en mg/kg de compost en base seca
Arsénico	20
Cadmio	1
Cromo	100
Mercurio	1
Níquel	60
Plomo	150

**Tabla 11.** Concentraciones máximas de metales pesados en el compost (INACAL [NTP 201.207:2020], 2020)



# 5. Técnicas de aplicación

Existen diferentes estrategias para enmendar un suelo salino, entre ellas, las enmiendas químicas y orgánicas.

## 5.1. ENMIENDAS QUÍMICAS

Según Fernando (2020), la cantidad de enmienda cálcica que se debe aplicar en un suelo sódico, se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Enmienda (t/ha)} = \frac{(\text{PSI final} - \text{PSI inicial}) \times \text{CIC}}{100} \times \frac{\text{Eq Yeso}}{1000} \times \frac{\text{PCA}}{100}$$

Donde:

**PSI** = Porcentaje de sodio intercambiable

**Eq Yeso** = (Peso molecular del yeso/2) = 86

**CIC** = Capacidad de intercambio catiónico (cmol<sub>c</sub>/kg)

**PCA (t/ha)** = Peso de la capa arable = Densidad aparente (t/m<sup>3</sup>) x profundidad (m) x 10 000 (m<sup>3</sup>/ha)

En cuanto a la forma de aplicación, se puede esparcir directamente sobre el suelo o mezclarlo con el agua de riego. En el primer caso, se distribuye “al voleo” y luego se integra al suelo mediante discos o arado. Ocasionalmente, el yeso se aplica en dos etapas: una antes de pasar los discos y otra después (Figura 10), lo que asegura una distribución más uniforme entre la capa superficial y la superior del suelo (Pasache, 2021, citando a Pizarro, 1978).

Este tipo de enmiendas no solo abordan los problemas generados por el sodio en los suelos, sino que también desempeñan un papel esencial al contribuir a la nutrición óptima de las plantas (Terrazas, 2019).

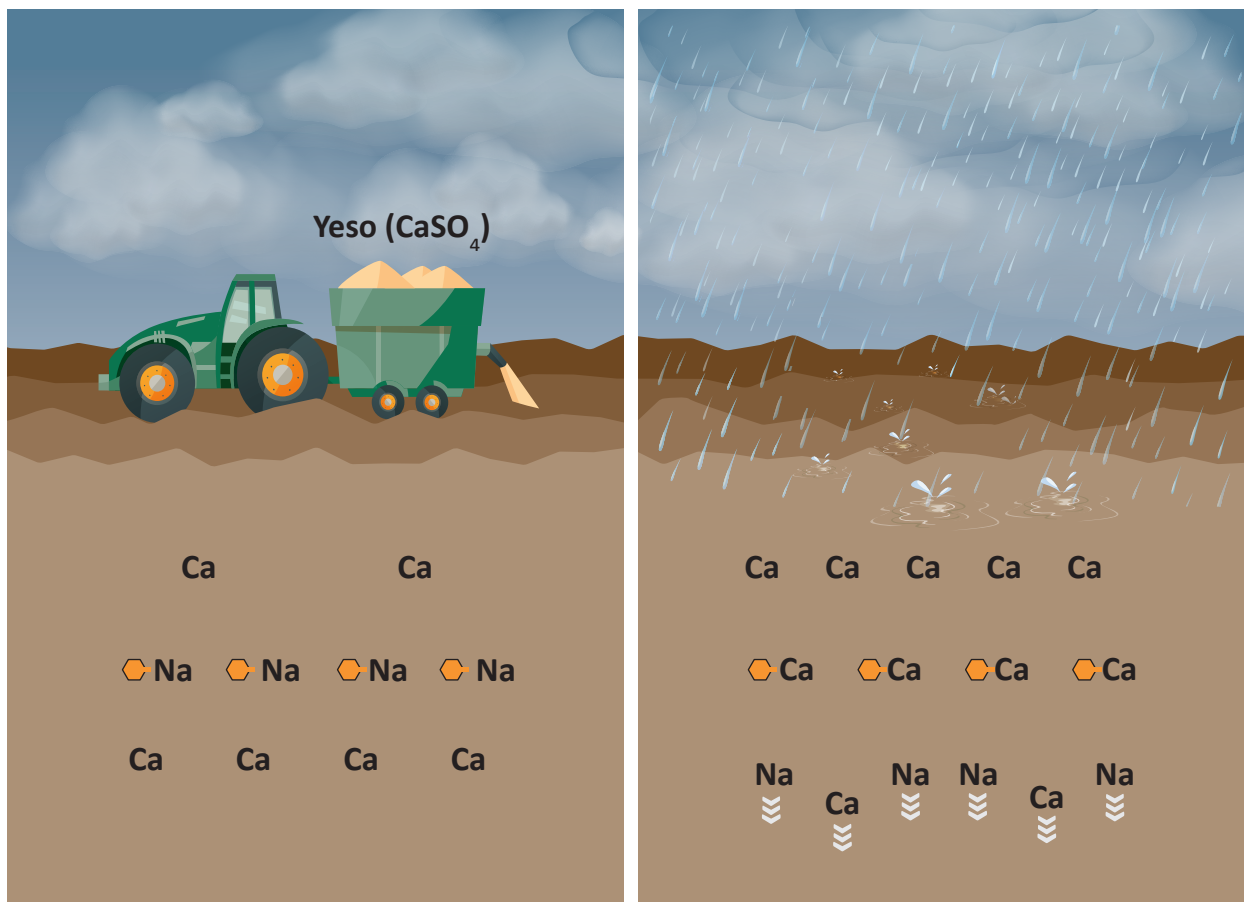
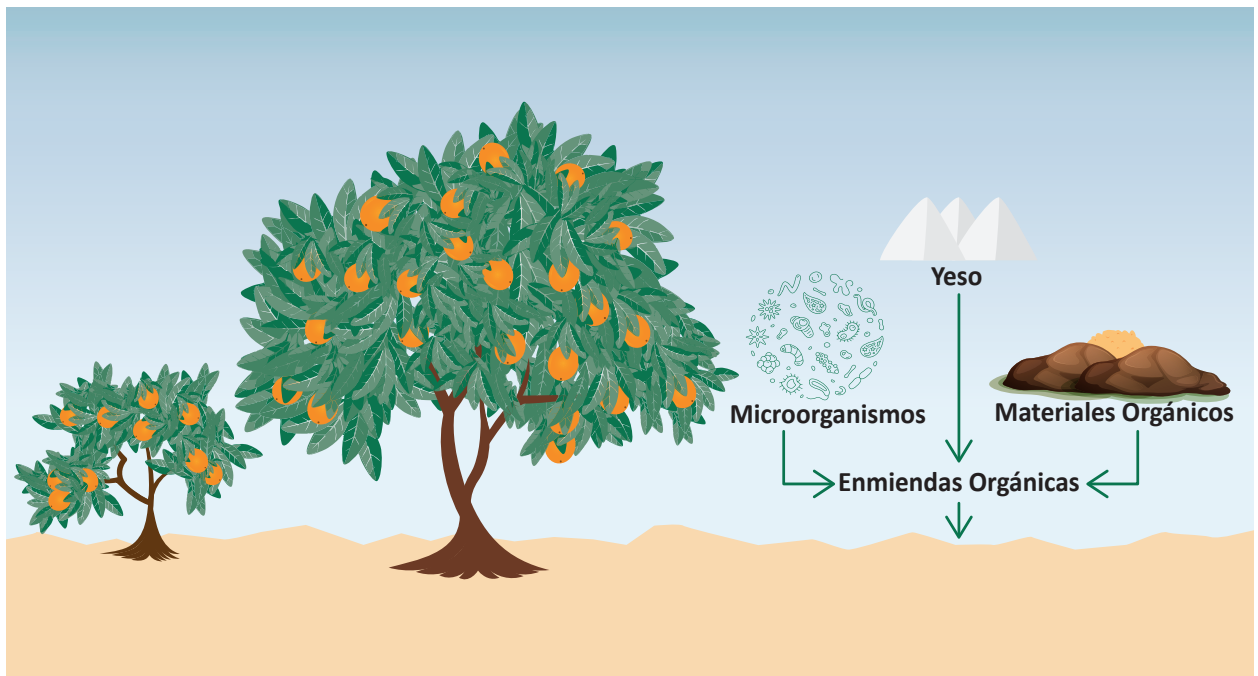


Figura 10. Aplicación de yeso para el reemplazo del sodio por calcio (adaptado de Fernando, 2020)

## 5.2. ENMIENDAS ORGÁNICAS

Yang et al. (2018), recomiendan una dosis entre 5-10 t/ha de materia orgánica, que puede ser de origen vegetal (por ejemplo, residuos de cosecha) o animal (por ejemplo, estiércol de aves); en el caso de estiércoles de vaca, cerdo y pollo se recomienda la dosis de 20 g/kg de suelo para el uso en macetas. Por otro lado, Tejada et al. (2016) proponen aplicar entre 8.14-16.29 t/ha de estiércol de ave, lo cual es equivalente a 5 t/ha y 10 t/ha de materia orgánica. Se recomienda aplicar este tipo de residuos a una profundidad de 25 cm mediante arado con cincel y disco al día siguiente de la aplicación.

En el caso de las enmiendas de origen vegetal, la aplicación se debe realizar como mínimo una aplicación anual. Por ejemplo, en el caso de uso de compost de residuos de algodón, se recomienda aplicar entre 14.04 t/ha y 28.08 t/ha de este tipo de compost, lo cual es equivalente a 5 t/ha y 10 t/ha de materia orgánica (Tejada et al., 2006). Por otro lado, el uso de herramientas que combinen estrategias químicas y orgánicas nos dan mayores posibilidades para abordar exitosamente el problema de fondo, así como revertirlo e incluso obtener mejores rendimientos agrícolas (Figura 11).




**Figura 11.** Estrategias para enmendar un suelo salino (adaptado de Bello et al., 2021)

# 6. Estudios de caso

Vásquez y Loli (2018), en su investigación realizada en La Molina (Lima, Perú), estudiaron la aplicación de enmiendas orgánicas, compost y vermicompost, preparadas a base de residuos de poda de jardín y estiércol de vacuno en diferentes dosis (0.25 %, 0.50 %, 1.00 %, 2.00 %) en suelos degradados por monocultivo. Se sembraron plantas de *Gypsophila paniculata* como indicador biológico para tres ciclos de cultivo y se caracterizaron las enmiendas, mostrando que el compost tenía un pH de 6.87, una conductividad eléctrica de 12.70 dS/m y un contenido de materia orgánica del 40.73 %; mientras que el vermicompost presentó, un pH de 6.51, conductividad eléctrica de 7.16 dS/m, concentración de sodio de 0.18 % y materia orgánica de 37.75 %. Los resultados de este trabajo demostraron que el sustrato de mayor calidad fue el vermicompost, ya que tuvo un pH más bajo, menor salinidad, menor concentración de sodio y una mayor retención de humedad, disminuyendo la conductividad eléctrica de los suelos degradados. Esto lo convierte en una opción más adecuada para su uso debido a que contribuye en la capacidad de regulación del suelo, mejorando la porosidad, afectando positivamente en las características fisicoquímicas para un buen desarrollo del cultivo.

Mogollón-Sandoval et al. (2015), enfocó su investigación en el efecto de aplicación del vermicompost en las propiedades biológicas de un suelo salino-sódico. Para ello se aplicaron tres dosis de vermicompost (1, 5 y 10 %), incluyendo un testigo sin enmienda. Las evaluaciones se realizaron a los 7, 14, 21 y 28 días y se evaluaron las variables de carbono orgánico, carbono de la biomasa microbiana, actividad ureásica e índice de carbono disponible. Los resultados de la investigación indican que la aplicación de vermicompost mejoró significativamente las propiedades biológicas del suelo salino-sódico en el sector. Se observó un aumento en el carbono orgánico del suelo en todos los tratamientos evaluados, siendo los valores más altos encontrados en el tratamiento con una dosis del 10 % de vermicompost. Además, se encontró que la actividad ureásica y el índice de carbono disponible también aumentaron significativamente con la aplicación de vermicompost.




Suaña y Nina (2019) realizaron un experimento en el distrito de Orurillo (Puno) para comparar diferentes dosis de enmiendas orgánicas y lavado de sales para la recuperación de suelos degradados, los cuales presentaban pH fuertemente alcalino, con presencia de cloruro de sodio. Las fuentes de materia orgánica usadas fueron estiércol de cuy y vacuno. Se evaluó pH, CE, textura, PSI y RAS. Los resultados mostraron que el suelo que no contaba con enmiendas, tenía un filtrado lento del agua lo que impedía una buena absorción de nutrientes. Mientras que en los tratamientos con enmiendas se observó una mejor filtración, menos CE, disminuyendo hasta un 81 % mediante el lavado con agua desionizada; el PSI disminuyó un 80 % y RAS en un 48 %. Se concluyó que el tratamiento con enmienda de vacuno tuvo el mejor resultado que los tratamientos con estiércol de cuy. Adicionalmente, se recomienda la aplicación de un mejorador químico como el yeso para el reemplazo del Na intercambiable con el Ca, además de un nivelado de terreno para una distribución homogénea del agua.

Entre otras investigaciones, Aimituma et al. (2023) realizaron un estudio que tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas (estiércol de cuy y vaca) para la biorrecuperación del suelo salino en Cachipampa (Perú). Se tomaron muestras de suelo y se construyó una planta piloto para el tratamiento del suelo salino. Se midieron parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de absorción de sodio (RAS). Los resultados demostraron que la incorporación de enmiendas orgánicas de cuy en el suelo salino fue eficiente en la biorrecuperación del suelo, reduciendo el pH de 8.05 a 7.3, la conductividad eléctrica hasta 1.2 mmhos/cm. El PSI tuvo un porcentaje de 7 %, mejorando las características fisicoquímicas del suelo y aumentando la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica.

En general, los resultados sugieren que la aplicación de vermicompost y estiércoles pueden ser soluciones efectivas para la recuperación de suelos degradados y pueden mejorar significativamente las propiedades biológicas del suelo. Estos hallazgos pueden ser útiles para la implementación de estrategias de manejo de suelos en zonas semiáridas y para la promoción de prácticas agrícolas sostenibles.

# 7. Conclusiones

- La salinidad y sodicidad de los suelos presenta numerosas causas, tanto naturales como antrópicas; sin embargo, la problemática afecta en gran medida a la actividad agrícola.
- Para la toma de decisiones orientadas a la corrección y manejo de los suelos salinos y sódicos, es necesario el diagnóstico y evaluación de la magnitud de la afectación; para ello se tienen a disposición múltiples metodologías, entre ellas, visuales, de campo y laboratorio.
- La incorporación de enmiendas al suelo es capaz de reducir los niveles de sales, disminuyendo el estrés osmótico en las plantas, y permitiendo un mayor acceso al agua y nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos.
- Las enmiendas pueden mejorar la estructura del suelo, incrementando su porosidad, aumentando su capacidad para retener agua y promoviendo una mayor infiltración; esto ayuda a evitar la acumulación de sales en la zona radicular de las plantas y favorece el desarrollo de sistemas radiculares más extensos y saludables.

- 
- Las enmiendas orgánicas promueven la actividad de microorganismos benéficos en el suelo, los cuales contribuyen a la descomposición de materia orgánica y al ciclo de nutrientes.
  - Al mejorar las condiciones del suelo, las enmiendas ayudan a reducir el estrés hídrico en las plantas, lo que se traduce en un crecimiento más vigoroso, menos susceptibilidad a enfermedades y una mayor tolerancia a condiciones ambientales adversas.
  - La corrección de suelos salinos y sódicos mediante enmiendas contribuye a la sostenibilidad agrícola, permitiendo el uso productivo de tierras previamente improductivas. Los cultivos en suelos enmendados pueden mostrar un mayor rendimiento y calidad nutricional.
  - Al reducir la necesidad de riego excesivo y la lixiviación de sales al subsuelo, las enmiendas pueden ayudar a mitigar los problemas ambientales asociados con la salinidad y la contaminación del agua.

# 8. Referencias bibliográficas



- Aimituma-Franco, K. M., Llanqui-Ticona, S. E. y Fernández-Rojas, H. (2023). Biorremediación de suelos salinos con enmiendas orgánicas de estiércol de cuy y vacuno, Cusco-Perú. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(1), e388. <https://doi.org/10.51252/reacae.v2i1.388>
- Anderson, D. W. (1988). The effect of parent material and soil development on nutrient cycling in temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 71-97. <https://doi.org/10.1007/BF02180318>
- Al-Elwany, O. A. A. I., Mohamed, A. M. H. A., Abdelbaky, A. S., Tammam, M. A., Hemida, K. A., Hassan, G. H. S., El-Saadony, M. T., El-Tarabily, K. A., AbuQamar, S. F., y Abd El-Mageed, T. A. (2023). Application of bio-organic amendments improves soil quality and yield of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) plants in saline calcareous soil. *Scientific Reports*, 13(1), 19876. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45780-2>
- Ayers, R. S., y Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. (Vol. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/012596a1-df82-45c5-b488-ae130a4f918b/content>
- Bazán, R. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). [https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual\\_de\\_procedimientos\\_de\\_los.pdf](https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf)
- Barth, E., Ferreira, R., y Cantú, R. (2023). *Salinidade em cultivo protegido*. EPAGRI. <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/publicacoes/publicacoes-tecnico-cientificas/>
- Bello, S. K., Alayafi, A. H., Al-Solaimani, S. G., y Abo-Elyousr, K. A. (2021). Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review. *Agronomy*, 11(9), 1735. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091735>
- Brouwer, C., Goffeau, A., y Heibloem, M. I. I. (1985). Salty soils. En C. Brouwer, A. Goffeau, y M. Heibloem, *Irrigation Water Management: Training Manual No. 1-Introduction to Irrigation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/r4082e/r4082e08.htm#chapter%207%20%20%20salty%20soils>
- Butcher, K., Wick, A. F., DeSutter, T., Chatterjee, A., y Harmon, J. (2016). Soil Salinity: A Threat to Global Food Security. *Agronomy Journal*, 108(6), 2189-2200. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0368>
- Castellanos, J. Z. 1985. *El medio ambiente físico del suelo y su modificación mediante la aplicación de materia orgánica. Publicación 2*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Cavalcante, A. C. P., Neto, M. A. D., Cavalcante, L. F., Cavalcante, A. G., Diniz, B. L. M. T., Araujo, R. da C., Mesquita, E. F. de, y Zuza, J. F. C. (2016). Saline water and organic matter in the development and quality of *Licania rigida* Benth. Seedlings. *African Journal of Agricultural Research*, 11(30), 2796-2805. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11061>

- Chen, Y., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Singh, B., y Cayuela, M. L. (2018). The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: A meta-analysis and review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 111(2), 103-125. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9903-5>
- Chhabra, R. (2004). Classification of Salt-Affected Soils. *Arid Land Research and Management*, 19(1), 61-79. <https://doi.org/10.1080/15324980590887344>
- Chorom, M., Rengasamy, P., y Murray, R. S. (1994). Clay dispersion as influenced by pH and net particle charge of sodic soils. *Soil Research*, 32(6), 1243-1252. <https://doi.org/10.1071/SR9941243>.
- Choudhary, O. P., y Kharche, V. K. (2018). Soil salinity and sodicity. En *Soil Science: An Introduction* (Capítulo 12, pp. 353–385). Indian Society of Soil Science.
- Daba, A. W., y Qureshi, A. S. (2021). Review of soil salinity and sodicity challenges to crop production in the lowland irrigated areas of Ethiopia and its management strategies. *Land*, 10(12), 1377. <https://doi.org/10.3390/land10121377>
- Darab, K. (1981). The role of sodium compounds in the formation and properties of salt affected soils. *Agrokémia és talajtan*, 30(sup), 105-120. <http://real.mtak.hu/id/eprint/97321>
- Diacono, M., y Montemurro, F. (2015). Effectiveness of organic wastes as fertilizers and amendments in salt-affected soils. *Agriculture*, 5(2), 221-230. <https://doi.org/10.3390/agriculture5020221>
- Ennab, H. A., Mohamed, A. H., El-Hoseiny, H. M., Omar, A. A., Hassan, I. F., Gaballah, M. S., Khalil, S. E., Mira, A. M., Abd El-Khalek, A. F., y Alam-Eldein, S. M. (2023). Humic Acid Improves the Resilience to Salinity Stress of Drip-Irrigated Mexican Lime Trees in Saline Clay Soils. *Agronomy*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071680>
- Fernando, G. (2020). *Suelos Salinos y Sódicos*. Universidad Nacional de Tucumán. <https://s9a0d11af78cd478d.jimcontent.com/download/version/1563476239/module/9026474176/name/Suelos%20Salinos%20y%20s%C3%B3dicos%202019.pdf>
- Florentín, MA.; Peñalva, M.; Calegari, A. y Derpsch, R. (2010). *Green Manure/Cover Crops And Crop Rotation In Conservation Agriculture On Small Farms*. Integrated Crop Management Vol.12. FAO. Roma.
- Gangwar, P., Singh, R., Trivedi, M., y Tiwari, R. K. (2020). Sodic Soil: Management and Reclamation Strategies. En V. Shukla y N. Kumar (Eds.), *Environmental Concerns and Sustainable Development* (pp. 175-190). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6358-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6358-0_8)
- Gao, Y., Shao, G., Wu, S., Xiaojun, W., Lu, J., y Cui, J. (2021). Changes in soil salinity under treated wastewater irrigation: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 255, 106986. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106986>

- Hachicha, M., Kahlaoui, B., Khamassi, N., Misle, E., y Jouzdan, O. (2018). Effect of electromagnetic treatment of saline water on soil and crops. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.03.003>
- Haider, Z.M, y Hossain, Z.M. (2013). Impact of salinity on livelihood strategies of farmers. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(2), 417-431. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000033>
- Hardie, M., y Doyle, R. (2012). Measuring Soil Salinity. En S. Shabala y T. A. Cuin (Eds.), *Plant Salt Tolerance: Methods and Protocols* (pp. 415-425). Humana Press. [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0_28)
- Hopkins, B. G., Horneck, D. A., Stevens, R. G., Ellsworth, J. W., y Sullivan, D. M. (2007). *Managing irrigation water quality for crop production in the Pacific Northwest*. Pacific Northwest Extension. <https://extension.oregonstate.edu/sites/default/files/documents/pnw597.pdf>
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2020). *Norma Técnica Peruana 201.207:2020: FERTILIZANTES. Compost para uso agrícola. Requisitos*. 1.ª Edición. Instituto Nacional de Calidad (INACAL). <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- Karmoker, J., Kumar, S., Pal, B. K., Sorowar, M. S., Rahman, M. A., Khan, M. H. R., y Islam, R. (2018). Characterization of wastewater from Jhenaidah municipality area, Bangladesh: a combined physico-chemical and statistical approach. *AIMS Environmental Science*, 5, 389-401. <https://doi.org/10.3934/environsci.2018.6.389>
- Levy, G. J., Goldstein, D., y Mamedov, A. I. (2005). Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 653-662. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0232>
- Li-Xiana, Y., Guo-Lianga, L., Shi-Huab, T., Gavinc, S. y Zhao-Huan, H. (2007). Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application. *Science of the Total Environment*, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.05.027>
- Maas, E. V., y Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
- Majeed, A., y Muhammad, Z. (2019). Salinity: A Major Agricultural Problem-Causes, Impacts on Crop Productivity and Management Strategies. En M. Hasanuzzaman, K. Hakeem, K. Nahar, y H. Alharby (Eds.), *Plant Abiotic Stress Tolerance* (83-99). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_3)
- Maitra, S., Zaman, A., Mandal, T. K., y Palai, J. B. (2018). Green manures in agriculture: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 1319-1327. <https://www.phytojournal.com/archives?year=2018&vol=7&issue=5&ArticleId=5728>

- Masson, M. L. (1973). *Evaluación de la salinidad en el Perú. Evaluación y Control de Degradación de Tierras en Zonas Áridas de América Latina*. Boletín Latinoamericano sobre fomento de Tierras y Aguas, 6, 363-384. [Fhttps://edepot.wur.nl/485146](https://edepot.wur.nl/485146)
- Mata-Fernández, I., Rodríguez-Gamiño, M. L., López-Blanco, J., y Vela-Correa, 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](http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf)
- Mc Neill, J.D. (1980). *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Geonics Limited. <https://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf>
- Meena, M. D., Joshi, P. K., Narjary, B., Sheoran, P., Jat, H. S., Chinchmalatpure, A. R., Yadav, R. K., y Sharma, D. K. (2016). Effects of municipal solid waste compost, rice-straw compost and mineral fertilisers on biological and chemical properties of a saline soil and yields in a mustard-pearl millet cropping system. *Soil Research*, 54(8), 958-969. <https://doi.org/10.1071/SR15342> <https://doi.org/10.1071/SR15342>
- Mogollón-Sandoval, J. P., Martínez, A. E., y Torres, D. G. (2015). Efecto de la aplicación de un vermicompost en las propiedades químicas de un suelo salino-sódico del semiárido venezolano. *Acta agronomica*, 64(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.47115>
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C., y Bolan, N. S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>
- Muñoz-Sánchez D., Bogodist V., García-Cañizares V. M., Frías-Gil D., López-Díaz M. R., Jaime-Fernández E., y Romero-Aranda M. R. (2018). Assessing quality of reclaimed urban wastewater from Algarrobo municipality to be used for irrigation. *Journal of Water Resource and Protection*, 1090–1105. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.1011064>
- Musie, W., y Gonfa, G. (2023). Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
- Nawaz, K., Hussain, K., Majeed, A., Khan, F., Afghan, S., y Ali, K. (2010). Fatality of salt stress to plants: Morphological, physiological and biochemical aspects. *African Journal of Biotechnology*, 9(34), 5475–5480. <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Nosetto, M. D., Acosta, A. M., Jayawickreme, D. H., Ballesteros, S. I., Jackson, R. B., y Jobbágy, E. G. (2013). Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agricultural Water Management*, 129, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.017>
- Omuto, C. T., Vargas, R. R., El Mobarak, A. M., Mohamed, N., Viatkin, K., y Yigini, Y. (2020). Mapping of salt-affected soils: Technical manual. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.017>

org/10.4060/ca9215en

- Ontiveros-Capurata, R. E., Diakite-Diakite, L., Álvarez-Sánchez, M. E., y Coras-Merino, P. M. (2013). Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 127–140. Fhttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S2007-24222013000400008&lng=es&tling=es
- Oosterbaan, R.J. (2020). *Soil salinity*. Wageningen University. [https://www.researchgate.net/publication/343184706\\_Soil\\_salinity](https://www.researchgate.net/publication/343184706_Soil_salinity)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). Global map of soil affected soils. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/global-map-of-salt-affected-soils/es/>
- Ors, S., Sahin, U., y Khadra, R. (2015). Reclamation of Saline Sodic Soils with the Use of Mixed Fly Ash and Sewage Sludge. *Arid Land Research and Management*, 29(1), 41-54. <https://doi.org/10.1080/15324982.2014.903314>
- Orsag, V. (2010). *El recurso suelo principios para su manejo y conservación* (1.ª ed.). Editorial Zeus.
- Oster, J. D., y Shainberg, I. (2001). Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. *Soil Research*, 39(6), 1219-1224. <https://doi:10.1071/sr00051>
- Panzardi, C. A., Quiroz, N. C., y Erkia, S. (2020). Recuperación de suelos sódicos. *Agrotecnia*, 29, 73-76. <https://doi.org/10.30972/agr.0294523>
- Pasache, R. (2021). Rehabilitación de suelos salinos-sódicos con dos mejoradores químicos en la parte baja del Valle de Chancay-Lambayeque, 2018. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4885/pasache-chapo%c3%b1an-roso-prospero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, W.; Arévalo, Y.; Palomino, L.; Quintanilla, J.; Ortiz, L. y Duarte, S. (2022). *Manual de producción de enmiendas orgánicas para restablecer la fertilidad del suelo*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2030>
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., y Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Editorial Mundi-Prensa.
- Qadir, M., Ghafoor, A., y Murtaza, G. (2000). Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation and Development*, 11(6), 501-521. [https://doi.org/10.1002/1099-145X\(200011/12\)11:6<501::AID-LDR405>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1099-145X(200011/12)11:6<501::AID-LDR405>3.0.CO;2-S)
- Qadir, M., y Oster, J. (2002). Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: History, mechanisms, and evaluation. *Irrigation Science*, 21(3), 91-101. <https://doi.org/10.1007/s00271-001-0055-6>

- Qureshi, A. S., Tesfaye, E. M., y Melese, M. G. (2020). *Extent Characterization and Management Strategies for the Salt Affected Soils in Ethiopia*. International Center For Biosaline Agriculture Dubai. <https://www.biosaline.org/sites/default/files/project-report-2-final-reduced.pdf>
- Ramírez-García, C., San Martín-Padovani, C., y Mac Donald-Hadida, R. (2001). Efectos del drenaje sobre la biodiversidad vegetal en suelos de la X Región de Chile. En *Realidad y perspectivas de la habilitación de suelos mal drenados en el sur de Chile, Regiones IX y X* (pp. 73-90). Comisión Nacional de Riego, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Universidad Austral de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/9711>
- Rao, D. L. N. y Pathak, H. (1996). Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10(4), 311–319. <https://doi.org/10.1080/15324989609381446>
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils*. United States Department of Agriculture (USDA). <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Setia, R., Gottschalk, P., Smith, P., Marschner, P., Baldock, J., Setia, D., y Smith, J. (2013). Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. *Science of The Total Environment*, 465, 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.028>
- Shahid, S.A. (2013). Developments in Soil Salinity Assessment, Modeling, Mapping, and Monitoring from Regional to Submicroscopic Scales. En S. Shahid, M. Abdelfattah y F. Taha (Eds.), *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation* (3-43). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5684-7_1)
- Sheferia, B., Alem, M., y Seid, A. (2021). Effect of Saline Water and Irrigation Interval on Soil Physicochemical Properties. *Advances in Applied Science Research*, 12(10), 1-9. <https://www.primescholars.com/articles/effects-of-saline-water-and-irrigation-interval-on-soil-physicochemical-properties.pdf>
- Spies, B. y Woodgate, P. (2005). *Salinity Mapping Methods in the Australian Context-User Guide*. Department of the Environment and Heritage o Australia, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry of Australia. [https://www.researchgate.net/profile/Peter-Woodgate/publication/275465475\\_Salinity\\_Mapping\\_Methods\\_in\\_the\\_Australian\\_Context-User\\_Guide/links/554ac5c60cf29752ee7c339c/Salinity-Mapping-Methods-in-the-Australian-Context-User-Guide.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Peter-Woodgate/publication/275465475_Salinity_Mapping_Methods_in_the_Australian_Context-User_Guide/links/554ac5c60cf29752ee7c339c/Salinity-Mapping-Methods-in-the-Australian-Context-User-Guide.pdf)
- Stavi, I., Thevs, N., y Priori, S. (2021). Soil Salinity and Sodictity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring and Restoration Measures. *Frontiers in environmental sciences*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>
- Suaña, H., y Nina, J. (2019). *Recuperación de suelos degradados por salinización con lavado y uso de enmiendas orgánicas (estiércol de vacuno y cuy) en el Centro Poblado de Balsapata, distrito de Orurillo de la Provincia de Melgar del Departamento de Puno, 2019*. [Tesis para optar el grado de Bachiller]. Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2684>

- Szabolcs, I. (1969). The influence of sodium carbonate on soil forming processes and on soil properties. *Agrokémia és talajtan*, 18(sup), 37-68. <http://real.mtak.hu/id/eprint/96397>
- Tang, S., She, D., y Wang, H. (2021). Effect of salinity on soil structure and soil hydraulic characteristics. *Canadian Journal of Soil Science*, 101(1), 62-73. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0018>.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., y Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1413-1421. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.017>
- Terrazas-Rueda, J.M. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5(1), 1539-1563. <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/28>
- Torres, D., Mendoza, B., Meru Marco, L., y Gómez, C. (2016). Riesgos de salinización y sodificación por el uso de abonos orgánicos en la depresión de Quibor - Venezuela. *Multiciencias*, 16(2), 133-142. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/multiciencias/article/view/22726>
- Vargas, N. J. R., Ruiz, F. C., Salgado, O. M. D., Estrada, C. O. X., Hernández, P. P., y Garcia, A. A. (2018). *Metodología para la rehabilitación de suelos salinos con drenaje subterráneo parcelario*. IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2018. Aguascalientes, México. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2018/assets/ponencias/extenso/18042.pdf>
- Vargas, R., Pankovoy, E. I., Balyuk, S. A., Krasilnikov, P. V., y Hasanhanova, G. M. (2018). *Handbook for saline soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Lomonosov Moscow State University. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i7318en>
- Vásquez, J. y Loli, O. (2018). Compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *Gypsophila paniculata*. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 43-52. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.05>
- Villafañe, R., DeLeón, N., Camacho, F., Ramírez, R., y Sánchez, L. (2004). Acumulación y lavado de sales en columnas de suelo regadas con agua salina procedente de un pozo petrolero. *Agronomía Tropical*, 54(1), 93-120. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2004000100007&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000100007&lng=es&tlng=es)
- Warrence, N. J., Bauder, J. W., y Pearson, K. E. (2002). *Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties*. Montana State University-Bozeman. <http://waterquality.montana.edu/energy/cbm/background/soil-prop.html>
- Weil, R. R. y Brady, N. C. (2017). *Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.

- Williams, B. G., y Baker, G. C. (1982). An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Soil Research*, 20(2), 107-118. <https://doi.org/10.1071/sr9820107>.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., y Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. En *International Soil and Water Conservation Research* (Vol. 3, Número 4, pp. 316-323). International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation and China Water and Power Press. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>
- Yang, L., Bian, X., Yang, R., Zhou, C., y Tang, B. (2018). Assessment of organic amendments for improving coastal saline soil. *Land Degradation y Development*, 29(9), 3204-3211. <https://doi.org/10.1002/ldr.3027>
- Yu, Q., Liu, R., Chen, J., y Chen, L. (2019). Electrical conductivity in rural domestic sewage: An indication for comprehensive concentrations of influent pollutants and the effectiveness of treatment facilities. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104719>
- Zaman, M., Shahid, S. A., y Heng, L. (2018). *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>
- Zia, M. H., Sabir, M., Ghafoor, A., y Murtaza, G. (2007). Effectiveness of sulphuric acid and gypsum for the reclamation of a calcareous saline-sodic soil under four crop rotations. *Journal of agronomy and crop science*, 193(4), 262-269. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00262.x>
- Zia-ur-Rehman, M., Murtaza, G., Qayyum, M., Saqib, M., y Akhtar, J. (2017). *Salt-affected soils: sources, genesis and management. Soil science concepts and applications*. University of Agriculture Faisalabad. [https://www.researchgate.net/publication/320583309\\_Salt-affected\\_Soils\\_Sources\\_Genesis\\_and\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/320583309_Salt-affected_Soils_Sources_Genesis_and_Management)



*Instituto Nacional de Innovación Agraria*





D. : Av. La Molina 1981, La Molina  
T. : (511) 240-2100 / 240-2350  
www.gob.pe/inia

ISBN: 978-9972-44-164-6



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru  @INIAPeru  @iniaperu  @IniaPeru  @iniaperu  @iniaperu