



Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos

Saline soil application: saline agriculture and soil recovery

Julio Marcelo Terrazas Rueda

RESUMEN:

La salinidad es uno de los problemas más antiguos para la agricultura, con los efectos del cambio climático, el mal uso de las aguas de riego y fertilizantes, este problema incrementa año tras año. Este tipo de suelos representa un problema, puesto que, no solo afecta al suelo, sino también tiene un efecto en las plantas, causando dificultad en la absorción de agua, toxicidad y afecta los procesos fisiológicos reduciendo el crecimiento y la producción de muchos cultivos. Por lo tanto, es importante conocer alternativas para el aprovechamiento de este tipo de suelos, en este sentido una de estas alternativas es la agricultura salina que nos permite usar el suelo tal y como esta con el uso de plantas halófitas, plantas tolerantes a la salinidad, cultivos biosalinos o en su defecto mejoramiento genético, y por otro lado, la recuperación de suelos salinos mediante técnicas consideradas fundamentales como el lavado de sales, la aplicación de mejoradores químicos y el uso de técnicas auxiliares, mecánicas, biológicas o técnicas modernas para cultivos más sensibles. Por lo tanto, se considera importante realizar una revisión bibliográfica enfocado en el aprovechamiento del suelo salino cuyos fundamentos teóricos nos ayuden a producir y cultivar en este tipo de suelos.

PALABRAS CLAVE:

Salinidad, aprovechamiento del suelo salino, agricultura salina, recuperación de suelos.

ABSTRACT:

Salinity is one of the oldest problems for agriculture, with the effects of climate change, the misuse of irrigation water and fertilizers, this problem increases year in year out. This type of soil represents a problem, since it not only affects the soil, but also has an effect on plants, causing difficulty in water absorption, toxicity and affects physiological processes by reducing the growth and production of many crops. Therefore, it is important to know alternatives for the use of this type of soil, in this sense one of these alternatives is the saline agriculture that allows us to use the soil as it is with the use of halophyte plants, plants tolerant to salinity, biosaline crops or, failing that, genetic improvement, and on the other hand, the recovery of saline soils through fundamental techniques such as washing of salts, the application of chemical improvers and the use of auxiliary techniques, mechanical, biological or modern techniques for crops more sensitive. Therefore, it is considered important to carry out a bibliographic review focused on the exploitation of saline soil whose theoretical foundations help us to produce and cultivate this type of soil.

KEYWORDS:

Salinity, saline soil application, saline agriculture, soil recovery.

AUTOR:

Julio Marcelo Terrazas Rueda: Carrera Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés. julio18t@gmail.com

Recibido: 25/01/19. Aprobado: 15/03/19.



1. INTRODUCCION

La salinidad de los suelos es uno de los problemas mas antiguos conocidos para la agricultura, este problema se incrementa año tras año en regiones áridas y semiáridas del mundo como consecuencia de bajas precipitaciones y en respuesta a un mal manejo del agua de riego y fertilizantes. La acumulación de sales solubles en el suelo afecta el crecimiento, la producción, rendimiento y la sostenibilidad de muchos cultivos (Ramírez et al., 2017; Martínez et al., 2011; Camejo & Torres, 2000). En la década de los

90´ se estimaba que la proporción de suelos afectados por salinidad estaba alrededor de un 10% del total mundial (Rhoades et al., 1992), para la primera década del 2000 este problema afectó aproximadamente el 25% de los 230 millones de hectáreas irrigadas del planeta (Meloni et al., 2008).

La característica principal de los suelos salinos es la presencia de altas concentraciones de sales solubles, lo cual incrementa el potencial osmótico de la solución del suelo, causando estrés fisiológico, este tipo de suelos ofrece pocas opciones

de crecimiento de las plantas convirtiéndose en improductivos (Terrazas, 2018). En este sentido, la “Agricultura salina” se muestra como una solución viable, ya que permite utilizar estos suelos tal como están y sin costo adicional, en comparación a los costos que se tendría que realizar inicialmente si se quiere habilitar estas tierras para cultivos sensibles y además durante el desarrollo de los cultivos para controlar la elevación de la salinidad (Orsag, 2010). En contrapunto, la recuperación de suelos, a través de técnicas de recuperación de suelos salinos se muestra como una opción imprescindible a corto, mediano y largo plazo para que se garantice una producción agropecuaria sostenible para cultivos sensibles a la salinidad.

La salinización es un proceso paulatino y progresivo, por lo cual, es necesario realizar una revisión o estado del arte de la agricultura salina y recuperación de suelos para el aprovechamiento del suelo salino.

2. SUELOS SALINOS Y/O SODICOS

Los suelos denominados salinos, salino sódicos y sódicos presentan algunas limitaciones para la producción agropecuaria, debido a que las sales inciden no solo sobre las propiedades del suelo, sino en forma indirecta, sobre el desarrollo de las plantas. En este sentido es importante conocer los procesos de acumulación de sales en el perfil del suelo y poder clasificar estos según sus limitantes (Hervé et al., 2002).

2.1 Origen y formación de los suelos salinos y/o sódicos

Según Hervé *et al.* (2002), la presencia de sales en el suelo, en primer lugar, tiene que ver con los procesos naturales de mineralización o meteorización de las rocas durante la formación de los suelos. La presencia de sales solubles en zonas secas también se puede deber a la existencia de antiguos depósitos secundarios, donde antes existían lagos. Estas sales acumuladas en los sedimentos

contribuyen a la concentración de sales en los suelos formados a partir de estos minerales. En condiciones naturales, existe una relación marcada entre la ocurrencia y presencia de suelos salinos / sódicos con condiciones climáticas áridas y semiáridas, debido a que, en estos climas, la evapotranspiración potencial (ETP) en la mayoría de los meses del año es mayor a la precipitación (P). Bajo estas condiciones, las escasas precipitaciones no permiten el lavado de sales desde las capas superficiales del suelo y los movimientos ascendentes del agua del subsuelo facilitan su acumulación en los horizontes superficiales. Por otro lado, el riego aplicado con deficiencias de drenaje y aguas con contenido de sales pueden favorecer los procesos de salinización/alcalinización, estos procesos se conceptualizan en la Tabla 1.

Esta acumulación de sales que se produce como consecuencia de las actividades antrópicas no sustentables es conocida como salinización secundaria, esta puede ser explicada a partir de dos desencadenantes y, por lo tanto, se la divide a su vez en dos tipos: de tierras secas no irrigadas o por irrigación (Guida et al., 2017).

Diferencia entre salinidad y alcalinidad

Arvensisagro (2014) indica que en el suelo pueden existir diferentes tipos de sales, las principales son las formadas por calcio, magnesio y sodio, y que aportan unas características u otras a cada tipo de suelo dependiendo de su concentración. Cuando las acumulaciones del suelo son de calcio o de magnesio, se produce un fenómeno de salinización del suelo; sin embargo, si lo que se acumula en el suelo es el sodio, se produce una alcalinización.

2.2 Clasificación química y caracterización de los suelos salinos y sódicos

Los suelos halomórficos, formados por procesos de salinización, sodificación y solotización, son usualmente clasificados en base a dos criterios:

a) El contenido total de sales solubles.

b) El porcentaje de sodio intercambiable.

Tabla 1. Conceptos de procesos de formación de los suelos salinos y sódicos.

TERMINO	CONCEPTO	DESCRIPCION
Salinización	La salinización es el proceso inicial que provoca la acumulación paulatina de sales en el perfil del suelo, principalmente por la evaporación que sufre el agua de este (zonas secas) o cuando no se logra drenar adecuadamente las aguas superficiales y subterráneas del mismo. Los sulfatos y carbonatos de calcio son menos solubles por lo que se acumulan más lentamente.	El proceso de salinización consiste en la concentración de sales más solubles que el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuya solubilidad es de 2.41 g L ⁻¹ , en los horizontes o capas del perfil del suelo. Las principales sales solubles encontradas en los suelos salinos son cloruros, sulfatos y bicarbonatos de Na, Ca, y Mg. En menor cantidad podemos encontrar potasio (K^+), Amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}).
Sodificación	Este es el termino usado por la Sil Science Society of América para procesos pedogénicos, la sodificación es el “proceso por el cual aumenta el contenido de sodio intercambiable gracias al intercambio de sodio de las sales de la solución por otros cationes del complejo absorbente”. Este proceso de forma paulatina no necesariamente produce incremento en el pH.	Pasaje de Na^+ de forma de ion soluble para el complejo de intercambio, comienza a tener importancia cuando este catión constituye la mitad o más de los cationes solubles de la solución del suelo. En estas condiciones los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , por ser menos solubles, precipitan cuando la solución del suelo se concentra en consecuencia de evapotranspiración, quedando el Na^+ , prácticamente como un único catión presente en la solución. Por este motivo, el Na a pesar de tener menor poder de cambio, logra desplazar los otros cationes por acción de masa
Alcalinización	Al acumularse las sales en los suelos, se establece un equilibrio inicial entre los iones cargados positivamente en la solución y los absorbidos en los coloides del suelo. Como las sales de sodio se concentran más en la solución del suelo, se absorben mayores cantidades de este catión. Al aumentar el porcentaje de sodio intercambiable y acumularse carbonato de sodio, puede ocurrir una hidrólisis del Na^+ intercambiable o la formación de Na_2CO_3 , lo que produce un incremento del pH hacia valores cerca de 10. Bajo estas condiciones, se produce la dispersión de arcillas y de la materia orgánica.	La movilización de la materia orgánica en solución da lugar a la formación de eflorescencias negras en la superficie del suelo. En las clasificaciones antiguas estos procesos recibían el nombre de Alkali negro
Desalinización	La desalinización es el proceso por el que se lavan las sales solubles que se han acumulado en los suelos.	Generalmente, cuando las sales se han extraído en su mayor parte, los coloides tienden a dispersarse y a disminuir la permeabilidad del suelo
Solotización	La solotización, también denominada degradación, inicialmente remueve el sodio intercambiable del horizonte A, permaneciendo el B todavía sódico, y puede llegar a quitar el sodio de todo el perfil, resultando en perfiles no salinos y no sódicos. Si el suelo está sujeto a una desalinización y no contiene yeso o calcio, no existen bases para reemplazar al sodio, después de que se han extraído las sales solubles, el sodio intercambiable tiende a hidrolizarse y formar hidróxido de sodio y en el complejo de cambio este catión es reemplazado por el hidrógeno.	El hidróxido de sodio reacciona fácilmente con el anhídrido carbónico del aire, formando carbonato de sodio. Cuando se produce un lavado intenso de estos suelos, puede haber una eliminación del carbonato de sodio y el hidrogeno del complejo absorbente es reemplazado por el sodio, produciéndose un descenso del pH. Generalmente los suelos alcalinos degradados presentan un pH menor a 6.

Fuente: Elaboración propia en base a: Orsag (2010); Raj et al. (2016); Hervé et al. (2002); USSS Staff, (1954) y Eynard et al. (2005).



En virtud de la propiedad de los iones en conducir la corriente eléctrica, la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes) es el método más rápido y simple para determinar el total de sales solubles del suelo, teniendo en cuenta que la conducción de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la cantidad de iones en solución (Donahue *et al.*, 1977 citado en Raj *et al.*, 2016).

Los indicadores químicos de salinidad de carácter global utilizados para la caracterización y el diagnóstico de la afectación por la salinidad son la conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH (Otero *et al.*, 2007; Raj *et al.*, 2016; Hervé *et al.*, 2002; USSS Staff, 1954), cuyos parámetros permiten separar a los suelos afectados por salinidad en tres grupos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores químicos de suelos salinos y sódicos.

Clasificación	pH	CE (dS m ⁻¹)	PSI (%)	Proceso
Salinos	<8.5	>4	<15	Salinización
Sódicos	>8.5	<4	>15	Sodificación
Salino-Sódicos	>8.5	>4	>15	Salinización - Sodificación

Fuente: Otero *et al.* (2007).

2.3 Parámetros principales para la evaluación de la salinidad

Raj *et al.* (1983) citado en Raj *et al.* (2016) indican que diversas medidas de laboratorio son usadas para evaluar la salinidad del suelo, siendo las más importantes:

- pH.
- Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes).
- Porcentaje de sodio intercambiable (PSI).
- Para evaluar el peligro de sodificación del suelo por el uso del agua de irrigación se utiliza un índice denominado relación de adsorción de sodio (RAS).

2.3.1 El pH del suelo

La reacción de solución del suelo generalmente se expresa en términos de pH, Richards (1954) citado en Raj *et al.* (2016) indica que este es definido como el logaritmo negativo de la concentración molar de los iones de hidrogeno, es decir:

$$\text{pH} = \log \frac{1}{[\text{H}^+]} = -\log[\text{H}^+]$$

La reacción del suelo puede ser acida, neutra o alcalina, conforme la concentración de iones de hidrogeno (H⁺) o hidroxilo (OH⁻). Cuando hay predominio de iones de H⁺ sobre los iones OH⁻ la relación es acida, y en caso contrario es alcalina. En situaciones donde las concentraciones de iones H⁺ y OH⁻ son iguales, se dice que las reacciones son neutras.

Según Garcia *et al.* (2004), el pH puede venir medido en agua o en cloruro potásico. El valor de pH medido en cloruro potásico va a ser siempre menor que en agua. El pH del suelo nos va a dar idea de la movilidad de los nutrientes, variedades más aconsejables, toxicidades, actividad microbiana, etc. En la Tabla 3 se expresa la denominación de los suelos según el pH

Tabla 3. Denominación de los suelos según el pH.

pH	Denominación de los suelos
3 – 4.5	Suelos extremadamente ácidos
4.5 – 5	Suelos fuertemente ácidos
5 – 5.5	Suelos muy ácidos
6 – 6.75	Suelos débilmente ácidos
6.75 – 7.25	Suelos neutros
7.25 – 8.5	Suelos básicos o alcalinos
>8.5	Suelos muy alcalinos

Fuente: García *et al.* (2004).

2.3.2 Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes)

La conductividad eléctrica (CE) mide la concentración total de sales en una solución, pero esta

no indica que sales están presentes, esta es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente eléctrica a través de este. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. La CE se expresa en dS/m (anteriormente denominado mmho/cm). Cuando se habla de la CE, debemos especificar si es la CE del agua de riego, la CE del agua de drenaje o la CE de la solución del suelo. En el caso de la CE de la solución del suelo, hay que especificar en qué estado de humedad del suelo. En laboratorios de suelo se determina la CE del extracto de suelo saturado o una relación determinada de suelo: agua (Gat Fertilizantes, 2017).

Diferentes relaciones de suelo: agua son utilizadas para la determinación de la CE de una muestra de suelo, de forma rápida y eficiente (por ejemplo 1:1, 1:2 y 1:5). Sin embargo, la seguridad de las determinaciones depende del suelo y de las sales presentes en el suelo. (Queiroz et al., 2010).

2.3.3 Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

En el estudio de suelos con problemas de sales, el porcentaje que el sodio del suelo representa en relación con los cationes adsorbidos constituye un factor de gran importancia, siendo denominada por la literatura porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Tabla 4. Clasificación del suelo de acuerdo con el PSI.

Clase	PSI
No sódicos	<7
Ligeramente sódicos	7-10
Medianamente sódicos	11-20
Fuertemente sódicos	21-30
Excesivamente sódicos	>30

Fuente: Raj *et al.* (2010)

Este valor es obtenido por la siguiente fórmula:

$$PSI = \frac{Na}{(Ca + Mg + K + Na + H + Al)} * 100$$

Todas las concentraciones en miliequivalentes /litro. En la tabla 4 se muestra la clasificación de suelos de acuerdo con el PSI.

2.3.4 Relación de adsorción de sodio

El RAS es un índice que expresa la posibilidad de que el agua de irrigación provoque la sodificación del suelo. La relación de adsorción de sodio (RAS) del agua de irrigación es el parámetro de mejor correlación con el PSI del suelo. Entre el complejo de intercambio y la solución del suelo existe un equilibrio en lo que se refiere a los cationes adsorbidos y disueltos (Ferreira et al., 2010).

2.4 El suelo

Por suelo debemos entender desde el punto de vista edáfico, la parte superficial de la corteza terrestre que, por diferentes procesos de meteorización, intemperización, mineralización, adición, transformación y otros, se convierte en un cuerpo trifásico complejo. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos y materiales parentales. Este recurso se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas, desde el punto de vista agronómico idealmente debería estar conformado de manera proporcional por una parte sólida 50% (minerales y materia orgánica); una parte aérea: aproximadamente de 50%, que corresponde a la fase líquida (solución del suelo) y otra gaseosa (O₂, CO₂, NO₂, NH₄, etc.) (Orsag, 2010; FAO, 2019).

Los elementos que pueden estar presentes en los suelos como participantes de las sales solubles son: Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, H⁺, NH₄⁺, Al⁺⁺⁺, Fe⁺⁺, F⁺⁺⁺ y HCO₃⁻, CO₃⁼, Cl⁻, SO₄⁼, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₃⁼, OH⁻, F⁻, SiO₃⁻. La realidad es que en el suelo solo existen unas pocas sales solubles en mayores cantidades a partir de los cationes: Na⁺, Mg⁺⁺ y Ca⁺⁺ y de cuatro aniones Cl⁻, SO₄⁼, CO₃⁼ y -H CO₃ (Sánchez et al., 2015).

2.4.1 Efecto de las sales sobre el suelo

Según Rhoades et al. (1992) en el suelo los efectos negativos de la salinización son desestructuración, aumento de densidad aparente y la retención del agua del suelo, reducción de infiltración de agua por el exceso de iones sódicos y disminución de fertilidad fisicoquímica.

Al respecto Otero et al. (2013) mencionan que la salinidad afecta la fertilidad de los suelos, exceso de cationes solubles (principalmente sodio), desequilibrio entre los iones adsorbidos y el desbalance de las reacciones acido-base.

Así mismo, Zúñiga (2011) indica que la salinidad tiene como efecto la disminución de la actividad biológica, la reducción de la disponibilidad de nutrientes provoca la degradación, desertificación de tierras y genera cambios en la estructura.

El efecto de las sales sobre la estructura del suelo ocurre básicamente, por la interacción electroquímica existente entre los cationes y la arcilla. La característica principal de este efecto es la expansión de la arcilla cuando esta húmeda y la contracción cuando está seca, debido al exceso de sodio intercambiable. Si la expansión es exagerada, pudiera ocurrir la fragmentación de las partículas, causando la dispersión de la arcilla y modificando la estructura del suelo. De modo generalizado, los suelos sódicos, es decir, con exceso de sodio intercambiable, tienen problemas de permeabilidad y cualquier exceso de agua causara encharcamiento en la superficie del suelo, impidiendo la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas por falta de aireación (Raj *et al.*, 2010).

Al respecto Ayers & Westcot (1985) indican que el agua puede causar una reducción severa en la permeabilidad de los suelos cuando su concentración de sales es muy baja ($< 0.5 \text{ dS m}^{-1}$) y, especialmente, cuando es menor de 0.2 dS m^{-1} porque es corrosiva y tiende a lavar la superficie dejándola libre de minerales solubles y sales, especialmente de Ca reduciendo su influencia fuertemente estabilizadora sobre los agregados y sobre la estructura del suelo,

facilitando su dispersión y la oclusión de los poros más finos.

2.5 Efecto de las sales en la planta

Los efectos de la salinización, debido a la acumulación de sales en el suelo, sobre las plantas pueden ser causados por las dificultades de absorción de agua, toxicidad de iones específicos y por la interferencia de sales en los procesos fisiológicos (efectos indirectos) reduciendo el crecimiento y el desenvolvimiento de las plantas (Dias & Blanco, 2010; Xiu-wei et al., 2016).

El efecto de la salinidad en los suelos reduce la disponibilidad de agua para la planta estas sales incrementan el esfuerzo que la planta ejerce para extraer el agua, esta fuerza adicional se conoce como efecto osmótico, según Medina (2016) este estrés hídrico reduce la expansión foliar y pérdida de turgencia, esta situación genera señales químicas que desencadenan posteriores respuestas adaptativas.

Sánchez et al. (2015) indica que el ingreso del agua en la planta muestra una serie de etapas que comienza con la diferencia de succiones o presiones negativas entre suelo y epitelio radicular. A medida que el agua en el suelo va disminuyendo, las fuerzas de retención continúan aumentando, si a su vez el agua remanente contiene mayor concentración salina, la dificultad y en consecuencia la energía requerida es mayor (efecto osmótico).

García (2012), menciona que este es el efecto más común de las sales y es independiente de la clase de sales disueltas. El tipo de daño producido se conoce como la presión relacionada con el potencial osmótico y se identifica por una reducción en la producción proporcional al aumento en la salinidad del suelo por encima de un cierto nivel crítico.

2.5.1 Efecto osmótico

Según Raj *et al.* (2016) las plantas extraen agua del suelo cuando las fuerzas de succión de los

tejidos de las raíces son superiores a las fuerzas con que el agua queda retenida en la matriz del suelo, es decir, el mantenimiento de un gradiente de potencial hídrico favorable a la entrada de agua en las células de las raíces. En suelos salinos, las sales solubles en la solución del suelo aumentan las fuerzas de retención de agua debido al efecto osmótico, reduciendo así la absorción de agua por la planta. El aumento de la presión osmótica (PO), causada por el exceso de sales solubles puede llegar a un nivel en que las plantas no tengan fuerzas de succión suficiente para vencer esa PO y, en consecuencia, la planta no absorberá el agua, incluso en suelos húmedos.

Este autor indica que, dependiendo del grado de salinidad, en lugar de absorber, la planta puede incluso perder el agua que hay en sus células y tejidos. Este fenómeno es conocido como plasmólisis y ocurre cuando una solución altamente concentrada entra en contacto con la célula vegetal. El fenómeno se debe a que el movimiento osmótico del agua, que fluye desde las células a la solución más concentrada. Es importante destacar que la plasmólisis se vuelve evidente cuando la salinidad es demasiado alta en relación con la capacidad de tolerancia de la planta o cuando la raíces están expuestas a un choque osmótico. En otras situaciones, la planta tiende a ajustar osmóticamente, manteniendo el gradiente de potencial hídrico y la hidratación de los tejidos.

2.5.2 Efecto de iones específicos

Estos efectos suceden cuando las plantas absorben las sales del suelo, juntamente con el agua, permitiendo que haya toxicidad en la planta por exceso de sales absorbidas. Este exceso promueve, entonces, desbalanceamiento y daños al citoplasma, resultando en daños principalmente en el borde y ápice de las hojas, a partir de donde la planta pierde, por transpiración, agua habiendo en esas regiones acumulo de sal transportado del suelo a la planta y, obviamente, intensa toxicidad de sales (Dias & Blanco, 2010).

Aunque la mayoría de las plantas responden a la salinidad como una función del potencial osmótico total, hay otras que son susceptibles a ciertos iones en forma específica. Un problema de toxicidad difiere de uno de salinidad en que su efecto ocurre dentro de la planta misma y no se debe a un déficit de agua. Generalmente las plantas absorben los iones y los acumulan en los tejidos foliares; cuando esta acumulación excede ciertos niveles se presenta el daño, la magnitud del cual depende de la concentración, del tiempo, de la sensibilidad del cultivo y el uso de agua por la planta (García, 2012).

Cualquier elemento puede convertirse en toxico para la planta si su concentración en la solución del suelo es alta, o si se encuentra en desequilibrio con otros elementos. Los elementos que más frecuentemente pueden encontrarse en la solución del suelo en niveles perjudiciales para las plantas son cloro, boro y sodio, en algunos casos se presentan en menor extensión toxicidades por magnesio, litio, sulfatos y elementos traza, residuos de pesticidas y contaminantes provenientes de desechos industriales, el daño puede ser causado por un ion individualmente o en combinación con otros, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, aunque en determinadas condiciones pueden abundar también en regiones más húmedas (Gat Fertilizantes, 2017; García, 2012).

En un suelo salino, la elevada concentración de iones Na^+ y Cl^- o (SO_4^{2-}) , produce una interferencia en la absorción de nutrientes e impide la captación de los mismos, al tiempo que pueden alcanzar niveles citosólicos tóxicos para el metabolismo celular (Medina, 2016).

2.5.2.1 Efecto de los Cloruros

Es la más común de las toxicidades específicas de iones. Este aparece como anión cloruro (Cl^-). El cloruro es indispensable para el desarrollo de la planta, ya que actúa en procesos vitales como la fotosíntesis, transporte de cationes, apertura y cierre de estomas y división celular. Las plantas lo requieren

en pequeñas cantidades (no más de 0.5 meq l^{-1} en la solución del suelo), pero cuando su concentración es muy alta el cloruro puede convertirse en un elemento tóxico.

Este ion que permanece libre en la solución del suelo es absorbido por las plantas en forma activa y se mueve de las raíces hasta las hojas en forma rápida, siempre acompañando cationes, donde se acumula. Si en ellas la concentración excede la tolerancia de las plantas se presentan síntomas de toxicidad. Para plantas muy sensibles los síntomas aparecen cuando las hojas acumulan entre 0.3 y 1.0% de cloruros en base seca (García, 2012; Gat Fertilizantes, 2017).

INTAGRI (2018) señala que al igual que el sodio, es importante el sistema de riego debido a que el efecto negativo que causa el cloro en el follaje es de manera directa cuando se emplea riego por aspersión que cuando se utiliza riego por goteo o gravedad.

Este autor también indica que incrementar los niveles de nitratos en el agua reduce la entrada de cloro a la planta.

Gat Fertilizantes (2017) presenta una recopilación de varias fuentes sobre los daños que puede provocar el cloruro:

- Necrosis de las puntas de las hojas, que avanza con la acumulación de cloruros, en casos de toxicidad excesiva a menudo es acompañada por defoliación.
- Quemazón o secamiento de los tejidos foliares que se inicia por los ápices y se extiende a lo largo de los márgenes a medida que la severidad de la toxicidad aumenta.
- En casos graves aparecen necrosis también en las puntas de las ramas.
- Caída de hojas, flores y frutos.
- Reducción de la conductividad de los estomas.
- Reducción del potencial hídrico de las hojas.
- Reducción de la fotosíntesis.

- Fruta pequeña y baja producción.
- Inhibición del crecimiento de las plantas.
- Inhibición del crecimiento de las raíces.

Así mismo, este autor muestra que la toxicidad del cloruro está determinada por varios factores como:

- Concentración de cloruro en la solución del suelo.
- Presencia de otros aniones en la solución del suelo.
- Factores climáticos.
- Selectividad de adsorción por las raíces de la planta.
- Capacidad de translocación de raíces a hojas.
- Ritmo de crecimiento en la planta.
- Estado fisiológico de la planta.
- Tolerancia de los tejidos.
- Mecanismos fisiológicos de defensa.

2.5.2.2 Efecto del Boro

Es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas, en cantidades relativamente pequeñas, sin embargo, cuando se encuentra presente en cantidades apreciablemente mayores que las necesarias puede ser tóxico. Participa en el movimiento de fotosintatos (compuestos que tienen su origen en la fotosíntesis), favorece el movimiento de calcio y tiene mucha importancia en el proceso de polinización y fecundación del óvulo. Su carencia puede provocar problemas en el cuajado de los frutos. La diferencia entre la concentración requerida (0.3-0.5 ppm) y la toxicidad (1.0 ppm en la mayoría de las plantas cultivadas) es muy pequeña, por lo que se debe tener especial cuidado con este elemento. Para la mayoría de los cultivos los síntomas de toxicidad de B aparecen cuando las concentraciones en los tejidos foliares exceden de $250\text{-}350 \text{ mg kg}^{-1}$ (base seca). Incluyen amarillamiento inicial de las hojas más viejas, partiendo de las puntas y difundiéndose hacia la base, moteados necróticos o secamiento de los tejidos foliares en los ápices y en los bordes. El secamiento y la clorosis a menudo progresan

intervenalmente hacia el centro de la hoja a medida que el B se acumula con el tiempo (García, 2012; Gat Fertiliquidos, 2017; INTAGRI, 2018).

Al respecto Bingham (1984) demostró que el efecto del boro sobre las plantas sigue la misma tendencia que el efecto salino debido al potencial osmótico, por lo cual se puede utilizar una ecuación similar a la propuesta para las sales solubles (citado en García, 2012).

2.5.2.3 Efecto del Sodio

Además del daño estructural que causa en los suelos (floculación), también puede causar toxicidad en el cultivo ya que compite con otros iones, como potasio durante la absorción de nutrientes por las raíces y al acumularse en las hojas de algunos cultivos. Debe considerarse el cultivo a establecer al momento de interpretar este parámetro debido a que cada uno de ellos tiene un grado de tolerancia distinta al sodio. Así mismo, debe tomarse en cuenta el sistema de riego, puesto que en los sistemas por aspersión el sodio tiene un efecto tóxico directo sobre la hoja (INTAGRI, 2018).

Para la mayoría de las plantas cultivadas no se ha demostrado que el Na sea esencial, aunque se sabe que puede reemplazar al potasio en algunos casos. Muchas plantas cuentan con mecanismos que reducen la absorción y la translocación del sodio a las hojas, por lo que no es común que aparezcan síntomas de toxicidad en estas, ya que se acumula en tallos y raíces. Los síntomas de toxicidad incluyen quemaduras, encrespamiento de la hoja y muerte de tejidos (necrosis) lo cual ocurre inicialmente en los bordes externos y a medida que la severidad de la toxicidad aumenta, progresa en los tejidos intervenales. Los síntomas aparecen primero en las hojas más viejas y se diferencian de la toxicidad por cloruros en que esta se inicia en el ápice de la hoja (García, 2012; Gat Fertiliquidos, 2017).

Al respecto Días y Blanco (2010) expresan que la toxicidad del sodio es más difícil de

diagnosticar que los cloruros, pero ha sido identificada claramente como resultado de alta proporción de sodio en agua (alto contenido de sodio o RAS).

El efecto perjudicial del sodio sobre los cultivos, en la mayoría de los casos, es indirecto, debido a la influencia negativa que tiene este catión sobre la estructura del suelo. El sodio desplaza al calcio y al magnesio del complejo arcillo-húmico, provocando así la dispersión de las partículas del suelo, lo que acarrea el desmoronamiento de la estructura del suelo. El suelo pierde su capacidad de aireación y de infiltración; además, se produce la alcalinización del suelo, pudiéndose elevar el pH por encima de 8.5 (Gat Fertiliquidos, 2017).

2.5.3 Efectos indirectos

Según Raj *et al.* (2010), estos efectos indirectos ocurren cuando las altas concentraciones de sodio u otros cationes en la solución interfieren en las condiciones físicas del suelo o en la disponibilidad de algunos elementos, afectando el crecimiento y el desenvolvimiento de las plantas indirectamente.

Este autor refiere que la presencia de un ion en exceso podrá provocar deficiencia o inhibir la absorción de otro, debido a precipitación. La presencia de sales de sodio también tiende a restringir la tasa de mineralización de nitrógeno (N), ya que, con el aumento de su concentración en el suelo, en general la mineralización de N orgánico es reducida, afectando el crecimiento de la planta, por la reducción de N disponible y no por el exceso de sodio.

2.5.4 Desequilibrio nutricional de las plantas

Entre los factores estudiados para caracterizar los efectos de las sales en la planta, una gran atención debe ser dada al desequilibrio nutricional. Varios estudios han asociado los efectos de la salinidad bajo el desequilibrio nutricional y las interacciones iónicas en el tejido vegetal.

De acuerdo con Yoshida (2002) el aumento de NaCl en la solución del suelo perjudica la absorción radicular de nutrientes, principalmente de K y Ca, interfiriendo en las funciones fisiológicas de la planta. Entonces, la habilidad de los genotipos en mantener altos los niveles de K y Ca y bajos niveles de Na en el tejido vegetal es los mecanismos que contribuyen a expresar la tolerancia de las plantas a la salinidad. En la mayoría de los casos, los genotipos tolerantes a la salinidad son capaces de mantener altas relaciones de K/Na en los tejidos. Por el aumento de la absorción del K y consecuente reducción de la absorción de Na, el K contribuye para mantener la relación K/Na alta en la planta.

Durante las últimas décadas, la producción agrícola neta ha sufrido una caída significativa, aunque la productividad por unidad de área ha aumentado, esto se debe principalmente a la pérdida de áreas agrícolas productivas por salinización (Ismail et al., 2010).

En el mundo se pierden al menos, 10 ha de tierras arables cada minuto: cinco por causa de la erosión, tres por salinización del suelo, una que obedece a otros procesos degradativos y otra por ser usada en la agricultura (Mesa, 2003).

Según la “Guía metodológica para facilitar la evaluación y reducción de los efectos del cambio climático sobre los procesos de degradación de los suelos de América Latina” (Ontiveros, 2014), existen graves problemas de degradación de suelos en todos los países, ya sea en mayor o menor grado de extensión, afectando a zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas en forma de desertificación (un 35% del territorio 6.9 millones de km²). En las regiones húmedas el motor principal de la degradación del suelo es la deforestación; la pérdida de bosques afecta a un 6.5% del territorio (1.3 millones de km²). La extensión de suelo vulnerable a la erosión hídrica supone la mitad del territorio, el 49% (9.8 millones de km²), mientras que los suelos afectados por salinidad o acidez – degradación

química- suponen al menos el 56% del territorio (11.2 millones de km²) (Gardi et al., 2014).

El uso de aguas salinas, así como el reuso de aguas de drenaje en la irrigación, dependen de estrategias a largo plazo que garanticen la sostenibilidad socioeconómica y ambiental de los sistemas agrícolas, permitiendo la obtención de cosechas rentables sin que se produzca degradación del suelo. Entre estas estrategias, es posible citar: el cultivo de especies tolerantes, la utilización de prácticas de manejo del suelo, las mezclas de aguas de diferentes calidades y el uso de diferentes fuentes de agua en diferentes estadios de desarrollo de la planta (Rocha et al., 2009).

Bajo este contexto es importante buscar alternativas para el uso y aprovechamiento de suelos con elevadas concentraciones salinas mediante la agricultura salina y la recuperación de suelos, las cuales son planteadas en este trabajo.

3. AGRICULTURA SALINA

Por agricultura salina se entiende al uso de aguas o suelos salinos para el cultivo de especies tolerantes al estrés salino, en este tipo de agricultura predomina el uso de halófitas, especies naturalmente adaptadas a crecer y producir en condiciones con altas concentraciones de sales.

De modo general, la salinidad es un factor abiótico con alto impacto en las actividades agrícolas, que se caracteriza por la reducción del potencial osmótico y gran aumento de la actividad iónica de la solución del suelo. En síntesis, la salinidad induce a eventos de salinización que desencadenan cambios en la expresión génica y en el incremento y en la actividad de complejos proteicos, estas a su vez inducen alteraciones en los procesos metabólicos energéticos, teniendo como consecuencia, en corto y medio tiempo, la atenuación del impacto directo, por cambios en el potencial osmótico y en la actividad de los iones; a largo plazo, las plantas buscan adaptarse al estrés, como resultado de la expresión de genes y

cambios estructurales, bioquímicas y fisiológicas de las células, reflejándose en cambios en su crecimiento y desarrollo (Kosová et al., 2013).

En las últimas dos décadas en desiertos y zonas áridas, se han orientado los esfuerzos de investigación hacia el estudio y desarrollo de recursos vegetales que constituyan una alternativa a los cultivos tradicionales, estos estudios muestran que las halófitas son los recursos biológicos más promisorios para explotar o desarrollar económicamente zonas áridas y costeras, ya que toleran altas concentraciones de sales (Rueda et al., 2015).

En este sentido, son glicófitas las especies que tienen una baja tolerancia a la salinidad, muchas fuentes convencionales de alimentos utilizados, hasta los tiempos actuales, en la alimentación humana. Las especies de esta categoría son incapaces de compartimentalizar, eficientemente, los solutos orgánicos e inorgánicos en las células, contra el gradiente de concentración, en condiciones de alta salinidad (Fernandes et al., 2016).

3.1 Halófitas

Las halófitas son plantas especializadas geológica, fisiológica y bioquímicamente que pueden sobrevivir y producir en las condiciones que ofrece los suelos salinos. La domesticación de estas especies será una solución prometedora para aumentar el suministro de alimento y la utilización de los suelos

abandonados afectados por sales, así mismo ofrece un enfoque de bajo costo para recuperar y habilitar los hábitats salinos (Tawfik et al., 2011).

Los halófitos se pueden agrupar en un tipo halófito específico de acuerdo con los mecanismos más relevantes de resistencia a la sal. Se pueden caracterizar por el predominio de los procesos que regulan el transporte por vía oral en los órganos de las plantas, de acuerdo con la acumulación de sales. Una definición simplificada distingue entre halófitos que acumulan NaCl hasta concentraciones similares o superiores al nivel de salinidad del agua (incl.) O Especies excluyentes de NaCl (excluyentes). La adaptación a los ambientes salinos por parte de los halófitos puede tomar la forma de tolerancia a la sal (verhalotolerancia) o evitar la sal. Las plantas que evitan los efectos de un alto contenido de sal, aunque viven en un ambiente salino, pueden denominarse halófitos facultativos en lugar de halófitos "verdaderos", obligatorios. Un pequeño número de linajes de plantas en numerosas familias relacionadas han evolucionado mecanismos estructurales, fenológicos, fisiológicos y bioquímicos para la resistencia a la sal. Estas pueden dividirse en dos categorías: (a) especies halófitas de origen, las que evolucionaron bajo condiciones permanentes de alta salinidad, y (b) halófitas facultativas, que abarca especies evolucionadas en ambientes sujetos a variaciones en la concentración de sales, durante parte de las fases de crecimiento y desarrollo (Koyro et al., 2008).

Tabla 5. Clasificación de las plantas de ambientes salinos.

Denominación	Características	Ejemplos
Euhalófitos	Acumulación de sales en tejidos	<i>Arthrocnemum, Salicornia, Sarcocornia</i>
Crinohalófitos	Glándulas o pelos excretores	<i>Atriplex spongiosa, Limonium, Tamarix</i>
Glicohalófitos	Absorción selectiva de sales	<i>Hordeum, Rhizophora</i>
Locahalófitos	Confinan sal en estructuras especiales	<i>Atriplex halimus, Salsola oppositifolia</i>

Fuente: Alcaraz (2012).

Así mismo, es conocido que una de las etapas críticas en el ciclo de vida de los halófitos es el periodo de germinación y establecimiento, siendo la

respuesta germinativa en condiciones de estrés salino determinante del éxito de muchas poblaciones de

plantas características de salares (Herranz et al., 2004).

Por otra parte, Alcaraz (2012), menciona que las plantas de ambientes salinos se clasifican en 4 grupos, ver tabla 5.

3.2 Adaptaciones fisiológicas

3.2.1 Tolerancia a la salinidad

La tolerancia es una propiedad desarrollada por las plantas durante el proceso evolutivo, para poder perpetuar la especie en condiciones donde se producen estrés climáticos o edáficos constantes, o que se repiten periódicamente. Los ejemplares que no se adaptan a esas condiciones adversas se eliminan de la población, mientras que se conservan y dan descendencia los que logran sobrevivir, hasta que aparecen organismos adaptados a la situación de estrés. Esa adaptación se fija genéticamente y se transmite de generación en generación asegurando la supervivencia de la especie y conformando una población más tolerante (González et al., 2002).

Es importante resaltar que, aunque la salinidad del suelo reduzca la disponibilidad del agua en el suelo, los cultivos no responden igualmente a los efectos negativos de las sales, puesto que algunas son más tolerantes que otras y pueden extraer agua con más facilidad.

Raj et al. (2010) menciona que la diferentes especies y cultivares de las plantas responden deferentemente a los efectos negativo de la salinidad, habiendo para cada especie o cultivar un límite tolerable de salinidad que no causa reducción en la productividad potencial a partir del cual la productividad pasa a disminuir a medida que se incrementa la salinidad del suelo.

Para Maas y Hoffman (1977) además de la variación de la tolerancia entre las especies y los cultivares, dentro de una misma especie puede también existir diferencias entre las fases fenológicas (citados en Raj et al., 2010).

Este autor menciona que la tolerancia y la sensibilidad de las plantas a la salinidad dependen, sobre todo, del tipo de sal, del método y la frecuencia de riego y de las condiciones climáticas.

Autores como Kranner & Seal (2011) resaltan que la protección, reparación, aclimatación y adaptación son vistos como los bloques de construcción de la fase de “resistencia”. La falla de los mecanismos de protección y reparación, dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición al estrés resulta en un “agotamiento”, que comprende la muerte celular y de la planta, de este modo se discuten las implicaciones para las plantas tolerantes y sensibles a la sal.

Con base a la tolerancia y la sensibilidad de las plantas a la salinidad, estas son clasificadas en glicofitas y halófitas. Las glicofitas representan a un grupo de plantas cultivadas que, en su mayoría, son las menos tolerantes a los efectos de las sales, las glicofitas pertenecientes a diferentes familias botánicas y géneros se pueden diferenciar gradualmente por su nivel de tolerancia e incluso entre géneros y especies de una misma familia, mientras que las halófitas componen el grupo de plantas que acumulan gran cantidad de NaCl en sus tejidos y hasta pueden beneficiarse del exceso de sodio, ajustándose osmóticamente en medio altamente salino (Raj et al., 2016; Raj et al., 2002).

En los últimos años se ha intensificado estudios dirigidos a la tolerancia de la salinidad, así como la búsqueda de nuevas especies y variedades tolerantes, esto ha llevado a los investigadores a trabajar, con el objetivo de establecer un concepto claro sobre la tolerancia a la salinidad y las vías para determinarlas, especies como *Prosopis strombulifera* (Reginato et al., 2011) y *Thinopyrum ponticum* (Terrazas, 2018) se estudiaron por su alta tolerancia a contenidos de cloruro de sodio, en este sentido, para definir los conceptos de tolerancia a la salinidad, es necesario establecer dos aspectos fundamentales: uno bilógico y otro agronómico:

- **Desde el punto de vista biológico**, por tolerancia a la salinidad en determinada especie o variedad, se debe entender aquel nivel de salinidad, hasta el cual las plantas son capaces de completar su ciclo de desarrollo y producir semillas viables.
- **Desde el punto de vista agronómico**, la tolerancia a la salinidad en determinada especie o variedad se define como la habilidad de las plantas para sobrevivir y producir rendimientos económicos en condiciones de estrés y se expresa como la relación entre el rendimiento de una variedad en condiciones salinas con respecto a su rendimiento en condiciones normales. Con diferentes niveles de sales en el suelo esta relación puede variar, por lo que al caracterizar el grado de tolerancia de las variedades se debe indicar el nivel de salinidad del sustrato (Gonzales, 1996; Udovenko, 1977 citados en González et al., 2002).

Entre las plantas cultivadas, no existen especies o formas con alta tolerancia a la salinidad, esta característica es propia de las plantas halófitas.

Mecanismos involucrados en la tolerancia a la salinidad

Según González et al. (2002), la tolerancia a la salinidad es un fenómeno complejo que envuelve cambios morfológicos y de desarrollo, en estrecha relación con los principales procesos fisiológicos y bioquímicos que operan en las plantas. Entre los mecanismos que explican la capacidad de las especies vegetales para tolerar el estrés por sales se encuentran:

- **El ajuste osmótico**, ya que las plantas al crecer en condiciones de salinidad pueden disminuir su potencial osmótico interno para compensar el potencial osmótico externo y mantener la actividad enzimática y el transporte del floema y de esta manera evitar la deshidratación y la muerte, según (Lamz et al., 2013), este confiere a estas la capacidad de tolerar condiciones de escasez de agua y salinidad elevada, con la

expresión de mecanismos adaptativos, este ajuste osmótico está basado en la acumulación activa de solutos, utilizando tanto iones tales como Na^+ y K^+ y sintetizando solutos orgánicos compatibles. Sin embargo, la acumulación de iones no reviste gran importancia en la tolerancia por ajuste osmótico en algunos cultivos como es el caso del arroz, debido a que la tolerancia se asocia con la exclusión de Na^+ y a una mayor capacidad de absorción de K^+ .

- **La eliminación del exceso de sales**, directamente a través de glándulas o estructuras especializadas como los cabellos vesiculares. Algunas especies de plantas han desarrollado estructuras especiales como glándulas y cabellos vesiculares que permiten la eliminación del exceso de sales y mantener el equilibrio iónico-osmótico del citoplasma y un buen funcionamiento en la permeabilidad de las membranas.
- **La pérdida de sales a través de la caída de las hojas y pérdida de los frutos**. Las plantas son capaces de tolerar el estrés salino a través de la eliminación de sales mediante la regulación de la caída de sus hojas y en casos extremos de sus frutos.

En general, puede decirse que la complejidad en el grado de tolerancia y en el modelo de comportamiento de las plantas ante el estrés salino, evidencian la diversidad de estrategias que han logrado desarrollar las plantas a través de su curso evolutivo.

Mecanismos empleados para evadir la salinidad

- **Homeostasis iónica**, es fundamental para el normal desarrollo de las células, se requiere una correcta regulación del flujo iónico para mantener una baja concentración de iones tóxicos y una óptima concentración de aquellos que son esenciales. Ante una situación de estrés salino, la regulación de la absorción de K^+ y la prevención de entrada de Na^+ , el eflujo de Na^+ de la célula y la utilización de Na^+ para el ajuste osmótico, son

estrategias comunes utilizadas por las plantas, lo cual permite mantener una óptima relación K^+/Na^+ en el citosol. Para la homeostasis iónica se ha planteado la existencia de antiportadores Na^+/H^+ en el plasmalema (SOS) y en el tonoplasto (NHX) que utilizan gradientes de H^+ creados por las H^+ -ATPasas, tanto citoplasmáticas como vacuolares, y por la pirofosfatasa del tonoplasto, los cuales permiten intercambiar H^+ por Na^+ . En estudios realizados en plantas de arroz sometidas a condiciones de salinidad, se ha planteado que el gen *nhx1* del antiportador Na^+/H^+ de tonoplasto, es inducido por salinidad y por incremento de ABA lo que relaciona a este transportador con la tolerancia al estrés ocasionado (Munns y Tester 2008; Shi et al. 2002 citado en Lamz et al., 2013).

- **Desintoxicación de ROS**, las plantas emplean antioxidantes, tales como ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR), carotenoides y enzimas detoxificantes, como por ejemplo superóxido dismutasa (SOD), catalasas (CAT) y enzimas del ciclo del glutatión-ascorbato, con el fin de combatir el estrés oxidativo causado en condiciones salinas. Diversas señales de estrés abiótico convergen en cascadas de MAPK (del inglés Mitogen-Activated Protein Kinase) regulando los sistemas de defensa antioxidantes. Numerosos informes han demostrado el aumento de SOD, APX y GR en la respuesta al estrés salino. De esta manera, estos sistemas antioxidantes confieren tolerancia a aquellos cultivares que en condiciones salinas tengan altos niveles en sus tejidos, tanto constitutivamente como inducidos por el estrés. Los resultados que aparecen en la bibliografía indican que el aumento de la resistencia al estrés salino parece estar asociado, al menos en parte, a la capacidad de las especies más tolerantes de supra-regular sistemas antioxidantes y así aliviar el daño oxidativo asociado (Lamz et al., 2013).

3.2.2 Escape

Los mecanismos de adaptación al estrés salino involucran situaciones diferentes, el concepto de 'escape' (fuga), en la que las plantas evitan la exposición a las condiciones estresantes, por completar el ciclo en corto tiempo (Koyro et al., 2008). La variabilidad del contenido de sales cambia en función de la estación del año, aumentando su concentración en la temporada de estiaje lo cual afecta el estado físico de la superficie del suelo (Giron et al., 2009).

En casos de ciclo más largo, puede producir una reducción de la actividad metabólica, resultando en un estado de inactividad en los períodos menos favorables. Como ejemplos de escape, tenemos: (a) plantas anuales que completan su ciclo en el corto tiempo de condiciones climáticas favorables (lluvias, por ejemplo), evitando las estaciones más secas, cuando tiende a aumentar la concentración de sales en el medio; y (b) plantas con raíces profundas (*Prosopis* y *Tamarix* por ejemplo) capaces de absorber agua del subsuelo, donde, generalmente, son más bajos los niveles de sales (Mosher & Bateman, 2015). El término escape o 'fuga' se aplica también a los casos en que el vegetal protege sus tejidos del efecto del estrés. En algunas halófitas, sucede la prevención o disminución de la entrada de sales en algunos tejidos de la planta, conocido como exclusión de iones, estos tejidos generalmente relacionados con los órganos de reproducción (florecimiento y fructificación) de la entrada de sales en algunos tejidos de la planta (Fernandes et al., 2016).

Según este autor, el escape contrasta con el término tolerancia, por si relacionar este último a la presencia del factor anti estresante dentro de la planta; en el caso de estrés hídrico, ocurre la tolerancia a la desecación de los tejidos y en el estrés salino hay tolerancia a la alta concentración de sales en los tejidos de las halófilas. Los mecanismos de tolerancia están asociados, generalmente, a la prevención de daños oxidativos a las estructuras de macromoléculas y de membranas. La resistencia es más amplia, debido a la combinación de varios mecanismos de escape y de tolerancia.

3.3 Cultivos Biosalinos

La agricultura con agua de mar es una idea antigua, puesta en práctica después de la Segunda Guerra Mundial. En 1949, el ecologista Hugo Boyko (nacido en Viena) y la horticultora Elisabeth Boyko (natural de Connecticut-USA), durante la formación del Estado de Israel, fueron a la ciudad de Eilat, próxima al Mar Rojo, con el objetivo de cambiar el paisaje de su vivienda e instalación de colonias (Tromp, 1971, Glenn et al., 1998 citado en Fernandes et al., 2016). A falta de agua dulce, los Boykos usaron agua salada de pozos y agua bombeada directamente desde el mar. Los frutos de este trabajo difundieron la idea a áreas similares en todo el globo. Los nuevos ecosistemas se crearon, en países como India, México, países del Golfo Árabe, China, entre otros, donde las áreas se están cultivando, utilizando agua salada, directamente a través de dilución con aguas residuales. Autores como Radulovich (2006) también resaltan la agricultura en espacios marinos, con agua de mar destilada, cosecha de agua de lluvia o cultivos flotantes expresados como “producción marina multipropósito” que consiste en agregar producción sobre el agua y en la superficie del agua, sin embargo, este tipo de cultivos no utiliza agua salina para ello.

Según Glenn et al. (1998), la utilización de las aguas saladas de océanos y mares debe atender a dos condiciones:

- Los cultivos deben ser útiles, con un rendimiento suficiente para justificar los costes de bombeo del agua de mar.
- Deben desarrollarse tecnologías para el cultivo de forma sostenible, sin agresión adicional al medio ambiente.

En el desarrollo de la agricultura con agua de mar, los investigadores han buscado dos alternativas: (a) intentan mejorar genéticamente las culturas tradicionales, como avena y trigo para tolerancia a sales o (b) buscan domesticar plantas salvajes tolerantes a sales.

3.4 Mejoramiento genético

La mejora genética se convierte en una herramienta que, sin lugar a duda, se ofrece a favorecer un aumento tanto en la recuperación de áreas subutilizadas, como en los rendimientos en aquellas zonas donde la salinidad sea un factor limitante de la producción agrícola. Para ello, por diversas vías se trabaja para la obtención de materiales que se ofrezcan en esta dirección. Entre esta cobra principal atención en nuestros días, la incorporación de genes procedentes de parentales silvestres tolerantes, la domesticación de plantas halófitas silvestres, la identificación de caracteres relacionados con tolerancia empleando marcadores moleculares, isoenzimáticos y morfoagronómicos que permiten la selección de genotipos tolerantes o bien la incorporación de genes cuya expresión modifica mecanismos bioquímicos y fisiológicos involucrados en la tolerancia. Desde etapas tempranas del cultivo de tejidos, la multiplicación *in vitro*, la selección o adaptación de suspensiones celulares o callos en condiciones de salinidad y el aprovechamiento de la variación somaclonal para posterior regeneración de plantas con mayor tolerancia, han sido uno de los métodos propuestos para la mejora de la tolerancia a la salinidad (Lamz & Gonzáles, 2013).

Al respecto, González et al. (2002), menciona que la salinidad es un carácter de origen poligénico, o sea, es regulado por varios genes localizados en varios loci de diferentes grupos de cromosomas.

Casasierra et al. (2013), resaltan que no solo los caracteres relacionados con el rendimiento son importantes en los estudios de mejoramiento de plantas tolerantes a la salinidad, debido a que la salinidad afecta a casi todos los aspectos fisiológicos y bioquímicos de la planta, por lo que el incremento de la tolerancia de los cultivos a la salinidad requiere la combinación de algunos o muchos rasgos fisiológicos y no simplemente aquellos que influyen directamente en el rendimiento.

4 RECUPERACION DE SUELOS

Desde el punto de vista global, la salinidad se divide en dos categorías; la de origen natural conocida por la salinidad primaria debido a la intemperización de las rocas y la solubilización de sus componentes minerales, y la salinidad secundaria o antrópica provocada por la irrigación, la fertilización mineral del suelo, además de otros factores. En ambos casos, los suelos alcanzan niveles salinos que, en exceso, afectan negativamente a las actividades agrícolas con supremacía en las áreas salinizadas sometidas a la salinidad de naturaleza secundaria o antrópica. En este sentido, a pesar de las ventajas de la agricultura irrigada en elevar la producción de alimentos, actualmente en más del 40% en todo el mundo, la irrigación incluso con agua de baja salinidad agrega las sales a los suelos que, con la elevada intensidad de evaporación, típica de regiones áridas y semiáridas,

provocan el incremento salino y pérdidas de extensas áreas productivas (Cavalcante et al., 2016).

Diversas técnicas son utilizadas para la recuperación de suelos afectados por sales, entre ellos, dos son consideradas fundamentales: el lavado de las sales y la aplicación de mejoradores químicos, por actuar directamente en la reducción o corrección de los problemas de salinidad y / o sodicidad; sin embargo, existen también las técnicas auxiliares, como: de acuerdo con la normativa vigente, las labores superficiales, las mezclas con arena, la inversión de perfiles, aplicación de residuos orgánicos y cultivos de alta evapotranspiración, que ejercen la función no exactamente de recuperar, pero de actuar sobre algunas propiedades de los suelos, que hacen que las técnicas fundamentales de recuperación más eficientes (Tabla 6).

Tabla 6. Técnicas de recuperación de suelos afectados por sales.

Técnicas de recuperación de suelos afectados por sales	
Técnicas básicas (fundamentales)	Lavado de sales
	Mejoramiento químico
Técnicas auxiliares	Técnicas Mecánicas
	Aradas profundas
	Subsolado
	Mezcla con arena
	Inversión de perfiles geológicos
	Técnicas Biológicas
	Fertilización Orgánica
Técnicas modernas	
	Cultivos con elevada ET
	Métodos eléctricos

Fuente: Elaborado en base a: Orsag (2010); Cavalcante et al. (2016) y Mesa (2003).

4.1 Técnicas básicas (fundamentales)

4.1.1 Lavado de sales

El lavado es la técnica más eficiente de reducir los niveles de sales solubles del suelo, implica hacer pasar una lámina de agua, adicional al punto de saturación del suelo, cualquier volumen adicional al necesario para saturación ejercerá en el suelo un efecto de lavado, lo que constituye un volumen o norma activa de lavado, este lleva las sales solubles más allá de la zona radicular, en este sentido es indispensable que el suelo sea permeable y que exista

una salida para el agua de drenaje (Sánchez et al., 2012; Serrato et al., 2002).

Según (Cavalcante et al., 2016), esta técnica se puede realizar con dos propósitos:

- a. Disminución de la salinidad inicial del suelo a niveles tolerables por la mayoría de los cultivos, denominada lavado de recuperación.
- b. Prevenir contra la salinización de los suelos no salinos irrigados, denominados lavado de mantenimiento y se caracteriza también como

técnica de prevención contra la acumulación de los niveles salinos en las áreas irrigadas.

perfil del suelo. Hay también el método del lavado superficial del suelo.

Métodos de lavado

Los métodos de lavado del suelo se refieren al mantenimiento del suelo cubierto con una lámina definida de agua durante todo un período determinado caracterizado por el lavado continuo, o en intervalos alternos conocido como lavado intermitente o intercalado para la remoción de las sales solubles del

- Lavado por inundación continua: El método de la aplicación de agua y la textura del suelo son las principales variables para la estimación del volumen o lámina de agua requerida para lixiviar las sales utilizando este método. Dependiendo de la textura del suelo, el grado de recuperación es diferente para una la misma lámina aplicada, las ventajas y desventajas de este método de lavado ver en la tabla 7.

Tabla 7. Ventajas y desventajas del lavado por inundación continua.

Ventajas	Desventajas
Lixiviación de las sales en el perfil del suelo, de la capa superficial a las profundidades además de la zona radicular de las plantas	Requiere más tiempo para la recuperación que cualquier otro método de recuperación
Adecuado para el suelo con una capa freática salina y cerca de la superficie, debido a que la lámina para el lavado por inundación continua impide el flujo capilar a la superficie, reduciendo la acumulación de sales	Es necesario mayor lamina de lavado, debido a que el agua se mueve más rápidamente por los poros mayores, ocurriendo gran desperdicio de agua
	Exige nivelamiento de terreno o construcción de parcelas en curvas de nivel.
	La eficiencia del lavado depende de la textura del suelo, siendo mayor en suelos de textura media en relación con suelos arcillosos.

Fuente: Cavalcante et al. (2016)

Tabla 8. Ventajas y desventajas del lavado por inundación intermitente.

Ventajas	Desventajas
La mayor eficiencia en comparación con el lavado continuo, porque necesita una menor lámina de agua para el mismo grado de lixiviación de sales.	No lixivian las sales de las capas de profundidades por encima de 1.0 m o menos.
No es necesario nivelar o construir parcelas en curvas de nivel en el suelo.	No puede aplicarse cuando la sabana este cerca a la superficie y al agua freatica
En el flujo no saturado de agua en la lixiviación intermitente, la humedad es más baja y su desplazamiento es más lento, permitiendo una mayor difusión de las sales del suelo.	Necesita de un sistema de irrigación (aspersión o microaspersión) para aplicar láminas de agua uniformes.
La recuperación del suelo es más rápida en menor profundidad.	

Fuente: Cavalcante et al. (2016).



- **Lavado por inundación intermitente:** El método del lavado por inundación intermitente o intercalada consiste en aplicaciones de láminas de agua por ciclo a intervalos de tiempo inundaciones semanales, quincenales o mensuales. Este intervalo no debe ser grande para evitar un aumento en la concentración de sales asociadas al flujo capilar, principalmente en suelos de textura fina o cuando la capa freática está cerca de la superficie. En este método de lavado, hay una relación entre la lámina de agua y la profundidad de suelo a ser lixiviado y, en general, la cantidad de sales transportadas varía entre 80 y 90% contenidos inicialmente en la profundidad del suelo igual a lámina de agua aplicada y tiene ventajas y desventajas en relación con los demás métodos de lavado. Las

ventajas y desventajas de este método de lavado, ver la tabla 8.

Al respecto Orsag (2010), menciona que se pueden realizar dos tipos de lavados que se denominan de mantenimiento y consisten en:

- Aprovechar el riego para lavar el suelo, añadiendo en cada aplicación agua en exceso.
- Realizar lavados periódicos independientes del riego. Estos lavados pueden tener distintas frecuencias en función de los factores que influyen en la salinización y en función también de otros factores como épocas de cosecha, disponibilidad de agua, etc.

4.1.2 Mejoramiento químico

Tabla 9. Resumen de mejoradores comunes usados para tratar suelos sódicos.

MEJORADOR QUÍMICO	FUNCIÓN	SE USA EN SUELOS*	REACCIONES EN EL SUELO *	OBSERVACIONES*
Sales solubles de Calcio: 1.- Yeso 2.- Cloruro de Calcio	Suministrar Calcio al suelo	1.-Con contenido de carbonatos alcalinotérreos 2.- Libres de carbonatos alcalinotérreos	$2NaX + CaSO_4 \rightarrow CaX_2 + Na_2SO_4$	La eficiencia depende del tamaño de partícula, es mejor entre más pequeña sea. Tienen la ventaja de poderse aplicar con el agua de riego. No requieren incorporación. El yeso no solamente previene y corrige los problemas que ocasiona el Na en los suelos, sino también contribuye a la nutrición eficiente de las plantas.
Ácidos formadores de ácido: 1. Azufre 2. Ácido Sulfúrico 3. Sulfato de Hierro 4. Sulfato de Aluminio	Reaccionar con los carbonatos presentes en el suelo para liberar Calcio	Con contenido de carbonatos alcalinotérreos	$2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_3$ (oxidación microbiológica) $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ $H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$ $2NaX + CaSO_4 \rightarrow CaX_2 + Na_2SO_4$	La oxidación microbiológica es muy lenta toda vez que la transferencia de oxígeno no es la más apropiada. (la técnica empleada para la aireación es mediante rastrillada). El tiempo de oxidación depende del tipo de suelo, su estado de dispersión y su contenido de humedad.
Sales de Calcio de baja solubilidad: • Caliza	Suministrar Calcio	Libres de carbonatos alcalinotérreos	1.- $2NaX + CaCO_3 \rightarrow CaX_2 + Na_2CO_3$. 2.- $2HX + CaCO_3 \rightarrow CaX_2 + CO_2 + H_2O$ $H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$	Debido a la baja solubilidad de la cal (0.01 gr/L a 20°C), las reacciones 1 y 2 son muy lentas por lo que el uso de la cal requiere de un medio ácido para mejorar la disolución y liberación del calcio.

*Se hace referencia a los mejoradores más usados que son Yeso y Azufre.

Fuente: Elaborado en base a: Rojas (2005); Orsag (2010) y López et al. (2012).



En los suelos salinos, el lavado es suficiente para recuperación, debido a las sales solubles ya disueltas en la solución del suelo, siendo fácilmente transportados por la lámina de agua; sin embargo, en suelos salino-sódicos y sódicos el uso de mejoradores o correctivos químicos se hace necesario para remover el sodio que está adsorbido a la micela, mediante la adición de sustancias que contengan, preferentemente, calcio. De este modo, los correctores tienen el propósito de proporcionar el calcio, o liberarlo, cuando está presente en el suelo, para sustituir el sodio intercambiable, pues el calcio desplaza el sodio del complejo de intercambio para la solución que a continuación es lixiviado mediante el lavado. El calcio por tener mayor selectividad, es decir, mayor fuerza de atracción por las partículas de arcilla, aun estando presente en menor proporción en relación con el sodio, logra sustituirlo como se indica en el siguiente esquema: $[MICELA]_{Na}^{Na} + Ca^{++} \leftrightarrow [MICELA] Ca + 2Na^{+}$ (Cavalcante et al., 2016).

En la práctica los que tienen mayor uso son la aplicación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y yeso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Ruiz et al., 2007). En la tabla 9 se presenta un resumen de los diferentes mejoradores que existen, ver tabla 9.

4.2 Técnicas Auxiliares

4.2.1 Técnicas Mecánicas

Para Cavalcante et al. (2016), Orsag (2010), Hervé et al. (2002), Mesa (2003) las técnicas mecánicas más utilizadas son las siguientes:

Arado profundo

Consiste en arar el suelo hasta la profundidad de 60 -70 cm, con el objetivo de promover la ruptura del suelo y la formación de terrones. Esta práctica contribuye para la mejora de la estructura del suelo, favoreciendo la infiltración y la percolación del agua, resultando en menor acumulación de sales solubles en la zona de cultivo. Esta técnica se recomienda cuando el suelo posee capas de baja permeabilidad entre dos capas más permeables, debido al arado revertir y

mezclar el suelo, haciéndolo más homogéneo, más poroso para el movimiento de agua, aire y nutrientes.

Subsolado

El subsolado es una práctica que tiene básicamente los mismos objetivos de la aración profunda, pero es aplicada en mayor profundidad. Tiene el objetivo de romper las capas compactadas en el perfil del suelo para aumentar porosidad total mejorando la drenabilidad. La subsolación reduce los efectos perjudiciales de las capas compactadas que están a más de 30 cm de profundidad, a pesar de su efecto es temporal, variando de uno a dos años. El efecto de este tipo de práctica tiene una duración limitada (uno a dos años).

Mezcla con arena

La adición y mezcla de arena en capas de suelos de textura fina tiene la finalidad de aumentar macroporosidad y la permeabilidad para el crecimiento más efectivo de las raíces. Así mismo, mejora la infiltración, percolación profunda facilitando el lavado del agua.

Inversión de perfiles

Consiste en desplazar el horizonte superficial de un suelo de características indeseables y sustituirlo por materiales provenientes de horizontes más profundos para mejoras en los atributos fisicoquímicos. En el caso de que el Horizonte superior del suelo presente características no deseables (arcilloso) y el subsuelo tenga condiciones más favorables (franco), se puede invertir los horizontes del suelo con la ayuda de un arado de vertedera.

4.2.2 Técnicas biológicas

Fertilización Orgánica

La adición de materia orgánica tiene como objetivo, mejorar la estructura, reducir la densidad y aumentar la permeabilidad y la actividad

microbiológica con reflejos positivos en la mejora física y en el aumento de la fertilidad del suelo. Los residuos orgánicos pueden utilizados como cobertura en la superficie o incorporados al suelo; cuando se aplican en la superficie reducen la evaporación manteniendo el suelo húmedo, reduciendo los riesgos de salinización. El efecto de esta práctica es temporal y requiere incorporaciones periódicas durante los cultivos. Los abonos orgánicos pueden ser abonos verdes y / o compuesto orgánico (Cavalcante et al., 2016), la adición de estiércol, o el enterrado de abonos verdes tanto en suelos salinos como alcalinos tiene dos efectos que ayudan a la corrección de los suelos mejorando la estructura, permeabilidad y liberando CO₂, lo que aumenta la solubilidad del Co₃Ca (Orsag, 2010).

Cultivos de elevada evapotranspiración (ET)

Son cultivos que por la elevada absorción y transpiración de agua provocan el descenso de la capa freática, contribuyendo a mayor eficiencia del lavado de las sales. Además de esta ventaja la sombra de las plantas reduce la intensidad de la evaporación por la superficie del suelo, disminuyendo la acumulación de sales. Cuando el alto nivel de la salinidad inicial del suelo no permita el cultivo de especies económicamente viables, se pueden utilizar cultivos de alta evapotranspiración tales como caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y bambú (*Bambus avulgaris*) (Cavalcante et al., 2016).

4.2.3 Técnicas modernas

La exposición del suelo a altas y bajas temperaturas mejora la permeabilidad, hecho explicado por la expansión y contracción de los argilo-minerales del suelo cuando hay variaciones de temperatura. El paso de corriente eléctrica mediante electrodos instalados en el suelo durante el lavado acelera el proceso de recuperación de los suelos afectados por sales. El cátodo, electrodo negativo, atrae los cationes de la solución del suelo, principalmente el sodio, haciendo el lavado más

eficiente; en cuanto al anión cloruro, éste es atraído por el ánodo, electrodo positivo, transformado en gas (Cl₂ nascente) que es altamente corrosiva y liberada a la atmósfera. Los métodos eléctricos de recuperación fueron tentados en los años setenta del siglo pasado, en condiciones de campo, pero debido a altos costos no tuvieron continuidad, mientras que las técnicas térmicas mostraron eficacia en la escala de laboratorio (Cavalcante et al., 2016), según pruebas realizadas en Montana (EUA), la aplicación de corriente eléctrica elevó la salinidad del agua de los drenes de 1500 ppm a 37000 ppm, lo que significa que la aplicación de altos voltajes al suelo ayuda a desalinizarlos (Orsag, 2010).

También existen técnicas como la inducción electromagnética que es una técnica geofísica adecuada a la arqueología y estudio de los suelos el cual permite definir la distribución espacial de las sales del suelo y tomar las decisiones mas convenientes para resolver esta situación con un drenaje apropiado de las aguas de riego (Olivier et al., 1998).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcaraz, F. J. (2012). Salinidad y vegetacion. En *Geobotánica*.
- Arvensisagro. (25 de abril de 2014). *arvensis*. Recuperado el 3 de abril de 2019, de El blog de arvensis: <https://www.arvensis.com/blog/el-suelo-salinidad-y-alcalinidad/>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29). FAO.
- Bertram, N. (2017). Efecto de la salinidad en la producción forrajera. *25° Congreso anual Aapresid; 7° Congreso mundial de Agricultura Convencional*. Rosario, Santa Fe Argentina: Kairós.

- Camejo, D., & Torres, W. (2000). La salinidad y su efecto en los estadios iniciales del desarrollo de dos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). *Cultivos Tropicales*, 21(2), 23-26.
- Casierra-Posada, F., Arias-Aguirre, J., & Pachón, C. A. (2013). Efecto de la salinidad por NaCl en híbridos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Miller). *ORINOQUIA*, 17(1), 23-29.
- Cavalante, L. F., dos Santos, R. V., Ferreyra, F. F., Gheyi, H. R., & Dias, T. J. (2010). Recuperação de solos afectados por sais. En G. Raj, N. da Silva, & C. Feitosa, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 425-448). Fortaleza-Ce: INCT Sal.
- Cavalcante, L. F., dos Santos, R. V., Hernandez, F. F., Gheyi, H. R., Dias, T. J., Nunes, J. C., & de Lima, G. S. (2016). Recuperação de solos afetados por sais. En H. R. Gheyi, N. da Silva, & C. Feitosa, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 461-477). Fortaleza: INCT Sal.
- Dias, N., & Blanco, F. F. (2010). Efeitos dos sais no solo e na planta. En H. Raj, & N. F. da Silva Dias, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 129-141). Fortaleza CE: INCTSal.
- Eynard, A., Lal, R., & Wiebe, K. (2005). Crop Response in Salt-Affected Soils. *Journal of Sustainable Agriculture*, 27(1). Obtenido de <http://www.haworthpress.com/web/JSA>
- FAO. (17 de abril de 2019). FAO. Recuperado el 17 de abril de 2019, de Portal de suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Fernandes, P. D., Brito, M., Gheyi, H. R., de Andrade, A. P., & Medeiros, S. (2016). Halofitismo e agricultura bioessalina. En H. Raj Gheyi, N. da Silva Dias, & C. Feitosa de Lacerda, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 209-242). Fortaleza.
- Ferreira, P. A., da Silva, J. B., & Ruiz, H. A. (2010). Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. En H. Raj, N. da Silva, & C. Feitosa, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 22-41). Fortaleza CE: INCTSal.
- García Zamorano, F., Ruiz Coletto, F., Cano Rodríguez, J., Pérez García, J., & Molina de la Rosa, J. (2004). *Suelo, riego, nutrición y medio ambiente del olivar*. Viseconsejería Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- García, Á. (6 de Junio de 2012). Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego PRIMERA PARTE. *Chair Person Soil Fertility and Plant nutrition Commission*, 27-36.
- García, Á. (7 de Septiembre de 2012). Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego SEGUNDA PARTE. *Chair Person Soil Fertility and Plant Nutrition Commission*, 26-34.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., . . . Vargas, R. (Edits.). (2014). *Atlas de los suelos de America Latian y el Caribe*. L-2995 Luxembourg: Comision Europea - Oficina de Publicaciones de la Union Europea.
- Gat Fertiliquidos. (2017). Salinidad en cultivos agrícolas. España: Departamento agronomico.

- Giron-Rios, Y., Oleschko-Lutkova, K., Parrot, J.-F., Hernández-Alcantara, J. M., Camarillo García, E., & Velázquez-García, J. J. (2009). ANÁLISIS FRACTAL DE LA REFLECTANCIA DE LOS SUELOS SALINOS. *Agrociencia*, 43(4), 403-416. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30211257007>
- Glenn, E. P., Brown, J. J., & O'Leary, J. W. (1998). Irrigating crops with seawater. *Scientific American*, 279, 76-81.
- González, L. M., González, M. C., & Ramírez, R. (2002). Aspectos generales sobre la tolerancia a la salinidad en las plantas cultivadas. *Cultivos tropicales*, 23(2), 27-37. Recuperado el 10 de abril de 2019, de <http://www.redalyc.org/html/1932/193218114005/>
- Guida Johnson, B., Abraham, E., & Cony, M. (2017). Salinización del suelo en tierras secas irrigadas: perspectivas de restauración en Cuyo, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO*, 49(1), 205-215.
- Herranz, J. M., Ferrandis, P., & Copete, M. A. (2004). Germinación de tres halófitos amenazados en Castilla-La Mancha en condiciones de estrés salino. *Investigación Agraria Sistemas y recursos forestales*, 13(2), 357-367.
- Hervé, D., Ledezma, R., & Orsag, V. (2002). *Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sodicos en el altiplano Boliviano*. La Paz: Talleres Graficos "Perez".
- INTAGRI. (2018). Clasificación de aguas para riego agrícola. *Serie agua y riego*(20), 5.
- Ismail, S., Taha, F., & Rehman, K. (2010). Plant based management of saline environments. En R. Thomas (Ed.), *Proceedings of the Global Forum on Salinization and Climate Change*, (pág. 42). Valencia.
- Kosová, K., Vitámvás, P., Oldrich Urban, M., & Prásil, I. T. (2013). Plant proteome responses to salinity stress - comparison of glycophytes and halophytes. *Functional Plant Biology*, 40, 775-786. Obtenido de <http://www.publish.csiro.au/fp/FP12375>
- Koyro, H. W., Geibler, N., Hussin, S., Debez, A., & Huchzermeyer, B. (2008). Strategies of halophytes to Survive in an Salty Environment. En N. A. Khan, *Abiotic stress and plant responses* (págs. 83-104). New Delhi: Internacional Publishing House.
- Kranner, I., & Seal, C. E. (2011). What is stress? Concepts, definitions and implications for plant growth in saline environments. En R. P. Thomas (Ed.), *Proceedings of the Global Forum on Salinization and Climate Change*, (pág. 44). Valencia.
- Lamz Piedra, A., & Gonzáles Cepero, M. C. (octubre-diciembre de 2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos tropicales*, 34(4), 31-42.
- López Aguilar, R., Rodríguez Quezada, G., Naranjo Murillo, A., Beltrán Morales, L. F., Troyo Diéguez, E., Casanova Cruz, A., & Peralta Patrón, O. (2012). Uso de yeso para una agricultura orgánica sustentable en zonas áridas y semiáridas. *Interciencia*, 37(8), 594-601.
- Martínez Villavicencio, N., López Alonzo, C., Basurto Sotelo, M., & Pérez Leal, R. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 5(3), 156-161.

- Medina García, L. R. (2016). La agricultura, la salinidad y los hongos micorrízicos arbusculares: una necesidad, un problema y una alternativa. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 42-49.
- Meloni, D. A., Ayrault, G., David, R. N., & Abdala, G. (2008). Tolerancia a la salinidad en dos portainjertos de citrus: crecimiento, composición mineral y ajuste osmótico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, XL(2), 97-104.
- Mesa, D. (2003). Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3), 217-226. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193018048001>
- Mosher, K. R., & Bateman, H. L. (2015). The effects of riparian restoration following salcedar (*Tamarix* spp.) biocontrol on habitat and herpetofauna along a desert stream. *Restoration Ecology*, 24, 71-80.
- Olivier Job, J., Rivera González, M., & González Barrios, J. L. (1998). Algunos usos de la inducción electromagnética en el estudio de los suelos salinos. *Terra Latinoamericana*, 16(4), 309-315.
- Ontiveros, R. (2014). *Guía metodológica Cambio climático y degradación de los suelos en América Latina: escenarios, políticas y respuestas*. Bruselas, Bélgica: Programa EUROCLIMA, Dirección general de Desarrollo y Cooperación - EuropeAid.
- Orsag, V. (2010). *El recurso suelo Principios para su manejo y conservación*. La Paz, Bolivia: Zeus.
- Otero Gómez, L., Valdes, M., Morales Díaz, M., Ortega Sastriques, F., Vázquez, I., & Delgado Calzadilla, Z. (2013). Modificación al método Schatchabell para la determinación de las bases intercambiables en suelos con salinidad. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 20-23. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193228546003>
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Morales, R., Sánchez, I., Labaut, M., . . . Rivero, L. (2007). Caracterización y evaluación de la salinidad. *Instituto de suelos Cuba*.
- Queiroz, J. E., Gonçalves, A. C., Souto, J. S., & Folegatti, M. V. (2010). Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. En H. Raj, N. da Silva, & C. Feitosa, *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (págs. 63-82). Fortaleza-CE: INCTSal.
- Radulovich, R. (2006). Cultivando el mar. *Agronomía Costarricense*, 30(1), 115-132. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43630111>
- Raj Gheyi, H., da Silva Dias, N., & Feitosa de Laceda, C. (Edits.). (2016). *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos basicos y aplicados* (Segunda ed.). Brasil: Fortaleza, CE.
- Raj, H., da Silva, N., & Feitosa de Lacerda, C. (Edits.). (2010). *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. Fortaleza: INCT sal.
- Ramírez, M., Urdaneta, A., & Pérez, E. (2017). Germinación del guayabo tipo "criolla roja" bajo condiciones de salinidad por cloruro de sodio. *BIOAGRO*, 29(1), 65-72.
- Reginato, M., Sgroy, V., Lanes, A., Cassán, F., & Luna, V. (2011). An American legume, *Prosopis strombulifera*, as a new model for

- understanding extreme salt tolerance. *Proceedings of the Global Forum on Salinization and Climate Change*, (pág. 47). Valencia.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The use of saline waters for crop production* (Vol. 48). Rome: FAO-IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER.
- Rocha Neves, A. L., Feitosa de Lacerda, C., Guimaraes, F., Ferreyra Hernandez, F. F., da Silva, F., & Tarquinio, J. (2009). Acumulação de biomassa e extração de nutrientes por plantas de feijão-de-corda irrigadas com água salina em diferentes estádios de desenvolvimento. *Ciência Rural*, 39(3), 758-765.
- Rojas Cruz, C. A. (2005). *Recuperacion de suelos afectados por sales en el departamento del valle del cauca mediante el uso de vinaza concentrada*. Bogota.
- Rueda Puente, E. O., Holguin Peña, R. J., Preciado Rangel, P., Hernandez, M., Hernández Montiel, L. G., & Ruiz Espinoza, F. H. (2015). Identificación y dinámica poblacional de nemátodos fitoparásitos asociados a la halófito *Salicornia bigelovii* (Torr.) en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(4), 707-720. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263138102004>
- Ruiz Cerda, E., Aldaco Nuncio, R. A., Montemayor Trejo, J. A., & Fortis Hernández, H. (2007). Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Técnica Pecuaria en México*, 45(1), 19-24. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61345102>
- Sánchez Bernal, E. I., Ortega Escobar, H. M., Sandoval Orozco, G. T., Hernández Viruel, R. A., & Estrada Vázquez, C. (2012). Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México, con aguas residuales municipales tratadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(4), 343-360. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37025139007>
- Sánchez, R. M., Guerra, L., & Scherger, M. (2015). Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. *FAO- INTA Programa nacional del agua*.
- Serrato Sánchez, R., Ortíz Arellano, A., Dimas López, J., & Berúmen Padilla, S. (2002). Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra Latinoamericana*, 20(3), 329-336. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57320312.pdf>
- Tawfik, M. M., Thalooh, A. T., & Zaki, N. M. (2011). Sustainable restoration of salt-affected soil through revegetation of *Leptocloa fusca* and *Sporobolus virginicus*. En R. P. Thomas (Ed.), *Proceedings of the Global Forum on Salinization and Climate Change*, (pág. 43). Valencia.
- Terrazas Rueda, J. M. (2018). Efecto de tres niveles de salinidad en el crecimiento del pasto agropiro variedad Alkar (*Thinopyrum ponticum*) mediante reproducción sexual y vegetativa. *Apthapi*, 4(3), 1295-1311. Obtenido de <http://ojs.agro.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/261>
- USSL Staff. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils* (Vol. 60). (L. A. Richards, Ed.) Washington.

Xiu-wei, L., Feike, T., Su-ying, C., Li-wei, S., Hong-yong, S., & Xi-ying, Z. (2016). Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(12), 2886-2898.

Yoshida, K. (2002). Plant biotechnology genetic engineering to enhance plant salt tolerance. *Journal bioscience Bioengineering*, 94(4), 585-590.

Zúñiga, O., Osorio, J., Cuero, R., & Peña, J. (2011). Evaluacion de tecnologias para la recuperacion de suelos degradados por salinidad. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, 64(1), 5769-5779. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922364003>