CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

EL MANEJO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FERTIRRIEGO

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

PRESENTA:

ING. ALBERTO AGUIRRE HERNÁNDEZ

SALTILLO, COAHUILA **26 DE AGOSTO DE 2009**

092

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

HACE CONSTAR QUE EL CASO DE ESTUDIO TITULADO:

EL MANEJO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FERTIRRIEGO

PRESENTADO POR:

ING. ALBERTO AGUIRRE HERNÁNDEZ

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

Ha sido dirigido por:

MC. BOANERGES CEDEÑO RUVALCAVA†

SALTILLO, COAHUILA **26 DE AGOSTO DE 2009**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

A TRAVÉS DEL JURADO EXAMINADOR SE HACE CONSTAR

QUE EL CASO DE ESTUDIO TITULADO:

EL MANEJO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FERTIRRIEGO

PRESENTADO POR:

ING. ALBERTO AGUIRRE HERNÁNDEZ

HA SIDO ACEPTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

SINODALES

DR. LUIS IBARRA JIMENEZ **MC. JUANITA FLORES VELAZQUEZ**

SALTILLO, COAHUILA **26 DE AGOSTO DE 2009**

ÍNDICE

Contenido **Página**

I. INTRODUCCIÓN 1
II. REVISIÓN DE LITERATURA 2
Origen de la Salinidad 2
Factores que Favorecen la Salinidad 2
Problemática General de los Suelos Salinos 3
Definición de Conductividad Eléctrica 3
Calidad del Agua para Riego e Importancia de su Estudio 4
Conductividad Eléctrica del Suelo 6
La Salinidad como un Factor Operacional Negativo 7
Efecto de las Sales sobre el Suelo 7
Suelos Salinos 8
Parámetros que se Alteran por la Salinidad 9
Suelos Sódicos 9
Parámetros que se Alteran por la Sodicidad 10
Suelos Salinos-Sódicos 11
El Agua de Riego como Agente Salinizante 11
Efecto de las Sales sobre la Productividad de las Plantas 12
Efectos Fisiológicos 12
Efecto Osmótico 14
Efectos Nutricionales 16
Mecanismos de las Plantas para Adaptarse al Estrés Salino 17
Tolerancia de los Cultivos a la Salinidad 19
Relación de los Fertilizantes con la Salinidad. 22
Métodos para el Manejo de Suelos Salinos 25
III. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO 32
IV. AREAS DE OPORTUNIDAD 34
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 36
VI. REFERENCIAS 38

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido **Página**

Tabla 1. Valores de conductividad de algunas muestras típicas. 4

Tabla 2. Clasificación de las aguas según las normas de Riverside. 5

Tabla 3. Clasificación de las aguas de riego según su nivel de salinidad. 6

Tabla 4. Principales cationes y aniones de importancia en la agricultura 8

Tabla 5. Características de los suelos salinos y/o sódicos 11

Tabla 6. Tolerancia relativa de los frutales a la salinidad. 19

Tabla 7. Tolerancia de algunos cultivos a la salinidad del extracto de saturación del suelo, expresada en CEe x 10^3 (dS/m) para diferentes porcentajes de disminución de rendimientos*. 20

Tabla 8. Valor umbral de salinidad y valor de disminución del rendimiento. 21

Tabla 9. Incremento de la CE por efecto de la concentración de algunos fertilizantes sólidos. 24

Tabla 10. Incremento de la CE por efecto de la concentración de algunos fertilizantes líquidos. 25

Tabla 11. Conversión de meq/100g a ppm y viceversa 28

Tabla 12. Tipos de enmiendas para suelos sódicos y sus equivalencias con yeso. 28

Tabla 13. Peso del suelo a 30 cm con diferentes Densidades aparentes (Da). 30

ÍNDICE DE FÍGURAS

Figura 1. Efectos adversos y mecanismos de adaptación de las plantas a las sales. 18

Figura 2. Respuesta de los cultivos a la salinidad. 22

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Le dedico este trabajo a mis padres que gracias a ellos he logrado otro objetivo más en mi vida y por darme su optimismo a seguir siempre adelante y lograr las metas que me he propuesto. También le dedico este trabajo a mis hermanos mayores por darme buenos ejemplos, a mis hermanos menores y mis sobrinos para que a través de mi ejemplo logren siempre lo que se propongan y continúen adelante con sus estudios.

Por medio de estas líneas le agradezco al CIQA por haberme dado la oportunidad de prepararme profesionalmente.

Les agradezco a los catedráticos de esta institución por trasmitir sus conocimientos y por haber contribuido a nuestra formación como profesionales. También quiero agradecerle a mi comité evaluador a la MC. Juanita Flores Velázquez, al Dr. Luis Ibarra Jiménez y a quién en vida fue maestro y asesor principal de mi caso de estudio al MC. **Boanerges Cedeño Ruvalcava (q.e.p.d.).**

Por último quiero agradecer a mis compañeros de generación por su amistad.

Aricelda Uribe López

Carlos Enrique González Ovando

Celso M. Hernández Martínez

Jaime Albero Morales Rivera

Olivia Olivar Villaldama

I. INTRODUCCIÓN

La radiación, la temperatura, el agua y los nutrientes son factores del medio ambiente que afectan el crecimiento y el desarrollo de las especies vegetales. La distribución de las plantas sobre el suelo depende, por lo tanto, de la existencia y calidad de estos factores.

Todos los organismos vivos están expuestos a diferentes tipos de estrés, los cuales pueden ser originados por la actividad del hombre o causas naturales como la contaminación del aire, sequía, temperatura, intensidad luminosa y limitaciones nutricionales. Debido a que las plantas poseen limitados mecanismos para evitar el estrés, estas han desarrollado flexibles vías para adaptarse a los cambios medioambientales (Zhu, 2001).

El mayor estrés abiótico que perjudica la productividad y calidad de las cosechas ha sido y sigue siendo la salinidad. Aproximadamente el 20% del área cultivada a nivel mundial y cerca de la mitad de las tierras irrigadas son afectadas por este factor. Zonas extensas como en California (aproximadamente la mitad del área de cultivo está afectada por la salinidad), Pakistán, la cuenca mediterránea, Australia y el sur de Asia (Malik *et al.*, 1986).

Hasta la fecha han sido numerosos los estudios realizados para dilucidar las implicaciones a nivel molecular y los mecanismos bioquímicos que se desarrollan en los organismos vivos, a partir de este estrés medioambiental (Iwata *et al.*, 2001; Jia *et al.*, 2002; Zhu 2002).

Los problemas más importantes asociados a la calidad del agua de riego son la salinización y sodificación del suelo. Ambos procesos son consecuencia del aporte de sales durante el riego y el aumento de la concentración de la solución del suelo, cuando el agua es absorbida por el cultivo y ocurre evaporación desde la superficie.

El presente trabajo se desarrollo para conocer los aspectos más importantes y la influencia de la conductividad eléctrica en la producción agrícola, así como analizar los estudios de salinidad que se han realizado y sus efectos sobre las plantas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Origen de la Salinidad

El origen primario de las sales es la meteorización de los minerales. Pero esta fuente difícilmente causará la salinización de un suelo si no está acompañada de un aporte externo de sales. El medio de transporte es el agua. Por tanto, paralelo al ciclo hidrológico existe un ciclo de sales. La concentración de sales en la solución del suelo es mayor que la del agua que a él llega. Esta diferencia es consecuencia de que el agua evaporada no transporta sales y el agua transpirada lo hace de una forma muy selectiva. Por tanto, es fácil deducir que la salinidad es una verdadera amenaza en las zonas agrícolas de regiones áridas o semiáridas debido a las altas tasas de evapotranspiración (ET) y a la escasez de agua para el lavado.

Por otra parte, la salinidad también se puede adquirir por sales disueltas en las aguas que descienden de las montañas ya que se acumulan en las depresiones y al evaporarse la solución se forman acumulaciones salinas. Otra forma por la cual los suelos adquieren las sales es a partir de los mantos freáticos ya que estos siempre contienen sales disueltas y en las regiones áridas estas sales ascienden a través del suelo por capilaridad.

Los suelos salinos también se han producido artificialmente por riego defectuoso, pues el riego aporta muy frecuentemente sales al suelo al mismo tiempo que el agua.

Los suelos salinos se caracterizan por presentar niveles tóxicos de cloruro de sodio y sulfato de sodio. Los valores de conductividad eléctrica en extractos saturados de suelo salino oscilan alrededor de 4.0 dS/m ($\approx$ 40 mM NaCl; Marschner, 1995).

Factores que Favorecen la Salinidad

Clima con altos niveles de evaporación,

Fuente de agua,

Fuente de sales y

Problemas con drenaje de sales.

Problemática General de los Suelos Salinos

Entre las condiciones adversas de los sistemas agrícolas, la salinidad es el factor que más ha influido sobre el establecimiento de las poblaciones humanas. La irrigación de cultivos con aguas de alto contenido salino provoca, tras la evapotranspiración, la acumulación de sales en el suelo. Así, este fenómeno convierte en improductivos a los suelos agrícolas (10 de los 15 millones de hectáreas agrícolas en Pakistán son ya suelos salinos) (Wyn, 1981).

En la actualidad, más del 20% de los suelos cultivados y aproximadamente el 50% de las tierras irrigadas, están catalogados como potencialmente salinos (Rhoades y Loveday, 1990), gran parte de ellos ubicados en la cuenca mediterránea.

México es uno de los países donde alrededor del 60% de su extensión territorial corresponden a zonas áridas y semiáridas, concentrándose la mayor parte en el norte y noreste, en las que habita el 30% de la población total.

Definición de Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es el parámetro más extendido y ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con la que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Hasta hace unos años se expresaba en mmhos/cm. En la actualidad se expresa en dS/m (dS=deciSiemens), siendo ambas medidas equivalentes (1 mmhos/cm = 1 dS/m).

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo, el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar, dándose casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de conductividad de algunas muestras típicas.

Temperatura de las muestras 25 °C	Conductividad, dS/cm
Agua ultra pura	0.000.05
Agua de alimentación a calderas	0.001-0.005
Agua potable	0.05-0.1
Agua de mar	53
5 % NaOH	223
50 % NaOH	150
10 % HCl	700
32 % HCl	700
31 % HNO_3	865

Calidad del Agua para Riego e Importancia de su Estudio

La calidad del agua se refiere a las características de una fuente de agua que influyen sobre su aptitud para un uso específico. Es decir, en qué grado la calidad del agua cumple con los requerimientos del uso al cual se destinará. En la evaluación de la calidad de agua para riego se pone énfasis en las características químicas, aunque el efecto de su aplicación dependerá de otros factores como el tipo de suelo, cultivo a regar y condiciones climáticas (Bresler *et al.*, 1982).

La calidad del agua de riego puede variar significativamente según la concentración y composición de las sales disueltas.

El agua usada para el riego, se tome de un río o de pozos, nunca es agua pura, si no que siempre contiene sales disueltas. Buena parte del agua aplicada al terreno será absorbida por el cultivo y transpirada, y si la concentración de sales del agua es alta, la mayoría de las sales quedará en el suelo. (Muños, 2003).

Muños (2003), señala que el riesgo potencial del riego con agua de mala calidad es la incorporación de sodio al suelo, aunque también existe riesgo de salinidad y toxicidad específica. Lo cual deriva en un estrés para los cultivos disminuyendo su rendimiento.

El estudio de la calidad de agua para riego es un paso inevitable al emprender un proyecto de riego. La utilización continua de aguas de baja calidad, con manejo inadecuado, puede provocar un deterioro de la calidad de los suelos cuya recuperación puede ser técnicamente dificultosa y en algunos casos económicamente inviable (Prieto y Angueira, 1996). En la siguiente tabla se describe la clasificación de las aguas de riego según las normas de Riverside.

Tabla 2. Clasificación de las aguas según las normas de Riverside.

Tipos	Calidad y normas de uso
C_1	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C_2	Agua de salinidad media, apta para el riego.
C_3	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C_4	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C_5	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C_6	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S_1	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos.
S_2	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad.
S_3	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo.
S_4	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Fuente: Blasco y de la Rubia, 1973.

La salinidad del agua se evalúa por su conductividad eléctrica expresada en dS/m. Existe un problema de salinidad cuando las sales se acumulan en la zona radicular a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción. Estas sales provienen la mayor parte de las veces del agua de riego. Según Vogel (1985), el contenido de sales solubles tiene una relación directa con la latitud en que se encuentran los diversos cursos de agua, es así como en Chile el contenido salino tiende a disminuir de norte a sur, debido a un aumento de la pluviometría anual y mayor acumulación de nieve en la cordillera.

En la tabla 3 se muestran los rangos de clasificación de las aguas de riego con respecto a la salinidad.

Tabla 3. Clasificación de las aguas de riego según su nivel de salinidad.

Clasificación de las aguas	**Conductividad eléctrica (dS/m)**
Aguas satisfactorias para el riego	< 0.75
Aguas con riesgo medio para el riego	0.75 – 3
Aguas con alto riesgo para el riego	Sobre 3

Fuente: Vogel, 1985.

Conductividad Eléctrica del Suelo

Cuando se habla de conductividad eléctrica del suelo, usualmente se hace referencia a la conductividad eléctrica de su extracto de saturación. Y la conductividad eléctrica, como tal, es determinada en un medio líquido. Se supone, aunque esto aun no ha sido demostrado, que dicha conductividad corresponde a la conductividad eléctrica del líquido intersticial del suelo. Esta última aseveración adolece de una falla. Para determinar la conductividad eléctrica de un suelo es necesario agregarle más agua y esta última contribuye a diluir el contenido de sales de la solución intersticial, rebajando su conductividad original.

Los principales tipos de extractos o sistemas que se utilizan para medir la conductividad son los siguientes:

Extracto de Saturación: El que se le extrae a la Pasta Saturada: Es el extracto de referencia,

Extracto 1:1 (1 de Suelo: 1 de Agua),

Extracto 1:2 (1 de Suelo: 2 de Agua),

Extracto 1:5 (1 de Suelo: 5 de Agua),

Extracto obtenido mediante el uso de Sonda de Succión y

Extracto obtenido de camas hidropónicas.

Independientemente del método de extracción, la Conductividad Eléctrica hasta aquí mencionado se lee siempre en un medio líquido, por medio de un electrodo apropiado. El valor obtenido suele ser menor a medida que se incrementa el nivel de dilución.

El valor de la conductividad eléctrica en el extracto de equilibrio a capacidad de campo puede ser mayor o menor que el del extracto de saturación, dependiendo de qué tan saturado de sales está el interior de los terrones del suelo. Este tipo de extracto al igual que el obtenido mediante el uso de sondas de succión tiende a reflejar mas el contenido de sales externo a los terrones del suelo mientras que el extracto de saturación incorpora, promedia y homogeniza la totalidad del suelo. Algunas veces a mayor valor y otras veces a menor valor. Cuando un suelo

es nuevo y se empieza a fertilizar, el interior de los terrones, siempre es más pobre en nutrientes y por ende más baja su conductividad que la de la solución nutritiva que se está aplicando. Con el paso del tiempo, el suelo se va saturando de nutrientes y el interior de los terrones empieza a ser más rico que el exterior. Estas diferencias hacen que la interpretación de un extracto de Saturación a Capacidad de campo deba ser realizada cuidadosamente teniendo en cuenta estos factores.

Algunas sustancias se ionizan en forma más completa que otras y por lo mismo conducen mejor la corriente. Cada ácido, base o sal tienen su curva característica de concentración contra conductividad.

Son buenos conductores: los ácidos, bases y sales inorgánicas: HCl, NaOH, NaCl, Na_2CO_3, etc.

Son malos conductores: Las moléculas de sustancias orgánicas que por la naturaleza de sus enlaces son no iónicas: como la sacarosa, el benceno, los hidrocarburos, los carbohidratos, etc., estas sustancias, no se ionizan en el agua y por lo tanto no conducen la corriente eléctrica.

Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4 % por cada ° C.

Conociendo estos factores, la medición de la conductividad nos permite tener una idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas.

La Salinidad como un Factor Operacional Negativo

Efecto de las Sales sobre el Suelo

El agua de lluvia está prácticamente libre de sales, sin embargo, todas las aguas de riego contienen sales. La incorporación de sales al agua de riego dependerá de la lixiviación que genere ésta durante su paso por diferentes zonas geológicas, siendo mayor en zonas en cuyos orígenes geológicos existieron grandes depósitos de sales. El uso de agua de riego con altos contenidos salinos unido a factores propios del suelo, como textura y drenaje, produce problemas de salinización de los suelos. Esta situación se agrava cuando los cultivos se desarrollan en zonas áridas y/o desérticas, dada la falta de precipitaciones y elevada evaporación, que provoca el ascenso por capilaridad de las sales del suelo. Desde el punto de

vista agrícola, una alta concentración de sal en el suelo provoca una serie de dificultades en los cultivos, que van desde la reducción de la disponibilidad de nutrientes esenciales, la alteración metabólica, la reducción de los rendimientos, hasta la muerte.

Lo anterior no siempre obedece a la misma causa. En la mayoría de los casos los problemas son provocados por la presencia de sales tanto solubles como insolubles, dando lugar a la formación de diferentes tipos de suelos tal como se detallan a continuación.

Suelos Salinos

Son aquellos que contienen sales solubles en concentraciones mayores a 0.15%, las que en el agua se disocian en cationes y aniones. Los cationes son iones con carga eléctrica positiva, en tanto que los aniones poseen carga negativa. Los principales aniones y cationes solubles se detallan en Tabla 4.

Los suelos salinos, también son conocidos como "álcalis-blancos", por la presencia de costras blancas en su superficie. Las sales solubles se eliminan por lavado con agua que posea una menor concentración o se reducen por aplicación de altas cargas de agua de riego.

La salinidad es un factor muy importante de considerar, ya que se ha demostrado que suelos con una conductividad eléctrica mayor a los 2 dS/m pueden provocar aproximadamente un 10% de la pérdida del rendimiento. (Ayers y Westcot, 1987).

El tipo y cantidad de sales es muy variable. Los cloruros y los sulfatos son los principales aniones solubles, el contenido de bicarbonatos es relativamente bajo y no se encuentra carbonato. El contenido de sodio soluble supera la suma de Ca^{+} y Mg pero las relaciones de adsorción de sodio no son elevadas. Pueden estar presentes sales de baja solubilidad como el sulfato de calcio (yeso) y carbonatos de calcio y magnesio (caliza).

Tabla 4. Principales cationes y aniones de importancia en la agricultura

Cationes	Símbolo	Aniones	Símbolo
Sodio	Na^{+}	Cloruros	Cl^{-}
Potasio	K^{+}	Sulfatos	$SO_4^{=}$
Calcio	Ca^{++}	Bicarbonatos	HCO_3^{-}
Magnesio	Mg^{++}	Carbonatos	$CO_3^{=}$
Hidrógeno	H^{+}	Nitratos	NO_3^{-}
Amonio	NH_4^{+}	Boratos	BO_3^{-}

Parámetros que se Alteran por la Salinidad

Potencial osmótico. La presencia de elementos minerales, provoca una disminución del potencial osmótico en la solución del suelo, cuando estos se encuentran por sobre el 0.15% reducirán la disponibilidad del agua, esto se conoce también como "sequía osmótica".

Concentración de solutos. Se producirá un incremento de iones tóxicos por la excesiva disponibilidad y absorción de cloruros (Cl^-) y/o sodio (Na^+), lo que incide en una disminución en la productividad y rendimiento de los cultivos.

Conductividad eléctrica (C.E.). Otra característica de los suelos salinos es su gran conductividad eléctrica, cuando este parámetro está sobre 4 dS/m, nos encontramos ante un suelo de tipo salino. Esta variable se mide en el extracto de saturación de un suelo y tiene una alta correlación con la concentración de sales.

Suelos Sódicos

En los suelos sódicos, es el sodio el que causa la toxicidad, que podemos centrar en tres vías distintas: efecto nocivo de sodio activo para el metabolismo y nutrición de las plantas; toxicidad debida a los bicarbonatos y otros iones; elevación del pH a valores extremos por acción del carbonato y bicarbonato sódicos.

El sodio (Na) es un ion que imparte características indeseables a los suelos: dispersa la materia orgánica y destruye la estructura de las arcillas, lo que afecta la geometría de los poros y reduce la conductividad hidráulica. Por ello los suelos sódicos se tornan plásticos, pegajosos, húmedos, duros y difíciles de penetrar cuando están secos. (Pizarro, 1978).

Los suelos sódicos son los que contienen más de 15% de sodio intercambiable (PSI), pero menos de 4 dS/m.

Este fenómeno está asociado al proceso de intercambio iónico de los suelos. Los cationes se adhieren (adsorción) a la superficie de las partículas del suelo (arcilla o coloides orgánicos), los que poseen cargas negativas, de la misma forma como un anión puede atraer al catión. Por esta razón las características de los suelos cambiarán según sea el tipo y la proporción de elementos presentes en la solución suelo.

Cuando las partículas del suelo son hidratadas se expanden, de manera que se reduce el volumen de los poros del suelo, lo que se hace más evidente cuando existe sodio adherido. También la presencia de sodio provoca una dispersión de las partículas más finas del suelo,

bloqueando los poros; en ambos casos se afectan las propiedades de transmisión del agua o conductividad hidráulica.

Parámetros que se Alteran por la Sodicidad

Relación de Adsorción de Sodio (RAS). Los cationes sodio adheridos al coloide son difíciles de eliminar por lavado. Esto sólo ocurre cuando existen sales que aportan otros cationes capaces de intercambiarse con el elemento adsorbido, o por absorción de las plantas. El calcio y magnesio son algunos de los cationes que se intercambian con el sodio. De aquí que resulte importante conocer la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), parámetro que permite visualizar la proporción de sodio en función del calcio y magnesio.

La sodicidad de un suelo se puede determinar evaluando la concentración de Na^+ en la solución del suelo en vez de medir su concentración en el complejo absorbente como lo hace el PSI. Para estimar así el grado de sodificación, Richards, (1954) propone la razón de adsorción de sodio (RAS), calculada a partir de las concentraciones de Na^+, Ca^{++} y Mg^{++} en $mmol/dm^3$ de solución Salina.

El RAS se determina con la siguiente ecuación.

$$RAS = \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:
RAS = Relación de adsorción de sodio.
Na = Concentración de sodio (meq/l).
Ca = Concentración de calcio (meq/l).

La concentración de sodio se mide en la solución del suelo o en el complejo de cambio. En el primer caso se denomina razón de adsorción de sodio (RAS) y en el segundo hablamos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI). En los suelos es muy importante determinar qué tipo de cationes predominan en el complejo adsorbente (si es el Ca^{++} o por el contrario el Na^+).

Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI): Tal como se mencionó anteriormente, los suelos sódicos poseen más de 15% de Na^+ intercambiable.

Este término se refiere al grado relativo mediante el cual el complejo de adsorción (arcilla y coloides orgánicos) de un suelo es ocupado por un catión, como calcio, magnesio u otro, en este caso es el sodio. A esto se le conoce como el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y es uno de los parámetros que sirve para caracterizar los suelos sódicos.

$$PSI = \left(\frac{Na}{CIC}\right) * 100$$

Donde:
PSI = Por ciento de sodio intercambiable (%).
Na = concentración de sodio (meq/l).
CIC = capacidad de intercambio catiónico (meq/l).

Suelos Salinos-Sódicos

Son aquellos suelos que poseen ambas características, es decir poseen salinidad y sodio, denominándose suelos salinos-sódicos.

Este tipo de suelo se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Su conductividad eléctrica es mayor de 4 dS/m a 25°C y el PSI es mayor de 15. El ph rara vez es mayor de 8.5 cando hay exceso de sales y el suelo está floculado. En la siguiente Tabla se resumen las características de los diferentes tipos de suelos:

Tabla 5. Características de los suelos salinos y/o sódicos.

Clase de Suelo	CE dS/m	PSI %	pH del Suelo	P.O C.C Mpa*	P.O. PMP Mpa*
Normal	<4	<15	<8.5	<0.29	<0.58
Salino	≥4	<15	<8.5	≥0.29	≥0.58
Sódico	<4	>15	>8.5	≥0.29	≥0.58
Salino-Sódico	≥4	>15	8.5 - 10	<0.29	<0.58

*Megapascal (MPa)=9.87 Atmósferas = 10 Bares. 1mmhos/cm=dS/m. P.O.=Presión osmótica, C.C. = Capacidad de campo y PMP = punto de marchitez permanente.
Fuente: http://www.unap.cl/~agrodes/publicaciones/Otras/Seminariosqm/salinidad2.pdf

El Agua de Riego como Agente Salinizante

Como ha sido mencionado, el agua proveniente de las lluvias y la nieve se considera como muy pura, en particular la que proviene de zonas no contaminadas.

Las características salinas o sódicas que los suelos pueden adquirir o desarrollar estarán influenciadas por la calidad del agua, existiendo cuatro factores importantes que acentuarán dicha condición: a) la concentración total de sales; b) la proporción relativa del sodio con respecto a otros cationes; c) la concentración de boro y otros elementos tóxicos y d) la concentración de bicarbonatos. En función de algunas de las limitantes se han establecido diversas pautas para clasificar el agua de riego. La clasificación aquí propuesta (ver tabla 2) corresponde a la desarrollada por el Laboratorio del Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA), de España, debido a que considera un rango más amplio de sales. Esto resulta importante para nuestro país, debido a la existencia de zonas con agua de riego que poseen alta concentración de sales. La acción de las aguas salinas sobre el suelo es más dañina que sobre las plantas, debido a que las sales disueltas pueden acumularse en el suelo volviéndolo improductivo.

Efecto de las Sales sobre la Productividad de las Plantas

Efectos Fisiológicos

Desde el punto de vista salino las plantas pueden ser clasificadas como aquellas que requieren altas concentraciones de sales, en cuyo caso se denomina halófitas como la remolacha y la palma datilera o las que no toleran la presencia excesiva de sales, denominadas glicófitas como el maíz, cebolla, cítricos, lechuga y judía entre otras.

Existen categorías intermedias entre ambos grupos (pseudohalófitas), así como plantas que sin ser halófitas requieren sodio como elemento esencial como el algodón y la cebada. La sensibilidad de las plantas a las sales cambia durante su desarrollo fenológico.

Este puede decrecer o aumentar, dependiendo de la especie, cultivares o factores ambientales.

Efectos de la Salinidad sobre las Plantas

El efecto más común de la salinidad sobre las plantas es la reducción del desarrollo debido a: una disminución del potencial osmótico del medio y, en consecuencia del potencial hídrico del suelo; una toxicidad específica, normalmente asociada con la absorción excesiva de Na^+ y de Cl^-; un desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos con

los nutrientes esenciales; y la combinación de los efectos antes indicados. Como consecuencia de estos efectos primarios, a menudo ocurren otros estreses secundarios, como el daño oxidativo (Zhu, 2001).

Las plantas disponen de complejos mecanismos moleculares de respuesta a estos efectos de la salinidad, que incluyen biosíntesis de solutos compatibles, control del flujo hídrico, y transporte de iones para restablecer la homeostasis (Zhu, 2001).

Levitt (1980), señala que existen dos formas mediante las cuales se produce un estrés salino: aumento del potencial osmótico, como resultado de la concentración de solutos, y un efecto tóxico debido a la alta concentración de iones. En consecuencia, existe un estrés salino, en el cual el potencial hídrico tiene valores de 0.05 a 0.1 MPa y un estrés iónico provocado por un ión específico en un medio con baja concentración de sales.

La edad de la planta puede afectar la tolerancia a las sales, así como la evaluación de la resistencia. En las especies frutales, las plantas se hacen más sensibles conforme avanzan en edad. Los iones sodio y cloro se acumulan más rápidamente en las hojas, observándose que las quemaduras de las hojas se desarrollan más temprano durante la estación de crecimiento y con una mayor severidad en plantas más viejas. La causa de esta susceptibilidad con la edad estaría dada por la acumulación de sales en las raíces y en el tronco (Quamme y Stushnoff, 1988).

Los solutos disueltos en la zona radicular reducen el potencial osmótico (lo hacen más negativo), así como el potencial hídrico del agua. La mayoría de las plantas pueden ajustarse osmóticamente cuando crecen en suelos salinos, lo que ayuda a prevenir la pérdida de turgencia.

Los efectos tóxicos específicos de los iones se producen cuando ésos se acumulan en las células a concentraciones perjudiciales (Na^+, Cl^- o $SO_4^=$). Una relación anormalmente alta de Na^+ y K^+ y alta concentración de sales totales inactiva las enzimas e inhibe la síntesis de proteínas.

A altas concentraciones el Na^+ puede desplazar el Ca^{++} en la membrana plasmática de los pelos radicales de ciertos cultivos como el algodón provocando un cambio de permeabilidad de la membrana plasmática y cuando se acumulan altas concentraciones de Na^+ y/o Cl^- en los cloroplastos se inhibe la fotosíntesis (Zeiger y Taiz, 2007)

Los mecanismos de tolerancia que se han descrito, son los siguientes (Levitt, 1980):

a. Suculencia, cuyo efecto es la dilución intracelular de sales.

b. Glándulas excretoras de sal, que reducen la concentración de éstas en la planta.

c. Aumento del potencial hídrico a valores de – 2 a 4 MPa, lo que equivale a una concentración de iones de 400 a 700 mM.

d. Alta absorción de iones, con una alta concentración de éstos para mantener el turgor.

e. Síntesis y acumulación de solutos orgánicos (como carbohidratos, aminoácidos y ácidos orgánicos), para mantener el turgor.

Las plantas minimizan el daño por sal, excluyendo las sales de los meristemos, sobre todo en los brotes y de las hojas que se están expandiendo y realizando fotosíntesis activamente. En las plantas sensibles a la sal, la resistencia a niveles moderados de salinidad depende de la capacidad de las raíces de evitar que los iones potencialmente perjudiciales lleguen hasta el vástago (Zeiger y Taiz, 2007)

Los principales síntomas de estrés salino en frutales son: una reducción del tamaño del fruto y su calidad, quemaduras en las hojas desde las puntas hacia los márgenes y hasta necrosis en estados avanzados de acumulación (Quamme y Stushnoff, 1988). Según estos mismos autores, los mecanismos de resistencia al daño por sales no están aun definidos, pero en las glicófitas que incluyen a la mayoría de los frutales, se ha advertido que resisten a la salinidad mediante la regulación del movimiento de las sales a la parte aérea, la absorción de los iones vía membrana y el tonoplasto. Las halófitas (donde solo hay pocas especies frutícolas) absorben sales, pero las eliminan mediante la excreción o compartimentación.

Efecto Osmótico

Este efecto está relacionado con la disminución del potencial osmótico del agua en el suelo, originado por la presencia de las sales disueltas. Esto produce en la planta una disminución de la capacidad de las raíces para absorber agua del medio.

En un principio, la reducción del rendimiento por la salinidad se relaciona con la alteración en el balance del agua (Bernstein y Hayward, 1958). Matsuda y Riazi (1981) observaron que las hojas de cebada reducían su crecimiento a los pocos minutos de iniciar la salinización de forma proporcional a la disminución del potencial osmótico de la solución externa. Munns y Termaat (1986) demostraron directamente que el déficit hídrico foliar en trigo y cebada es limitante de su crecimiento.

Toxicidad Iónica

Algunos solutos tienen efecto tóxico directo sobre los cultivos. Los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad en que ocurren dentro de las plantas. Se producen cuando un ión absorbido se acumula en las hojas, por efecto de la transpiración, hasta un nivel que daña la planta. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua. Los iones de las aguas de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son: cloro (Cl), sodio (Na) y boro (B) (Maas, 1984).

La toxicidad más común a partir del agua de riego es la producida por el cloro, que no es adsorbido por el suelo, y se mueve fácilmente en la solución desde donde es absorbido por la planta y circula en ella hasta acumularse en las hojas. Si la concentración sobrepasa la tolerancia del cultivo aparecen claros síntomas de toxicidad que incluyen hojas quemadas y necrosis de tejidos (Bernstein, 1974; Maas, 1984; 1986). El cloro y el sodio también pueden ser absorbidos directamente por el follaje, cuando se riega por aspersión, en períodos de alta temperatura y baja humedad relativa (Maas, 1986). En los cultivos sensibles, los síntomas ocurren cuando la concentración de cloro alcanza los 0.3 a 1.0 % del peso seco, aunque algunos árboles frutales muestran síntomas importantes en el límite inferior del rango (Bernstein, 1975).

La presencia de iones salinos en los tejidos de las plantas, a niveles de concentración superiores a los tolerados origina lesiones características en ellas, dependiendo de la naturaleza y concentración de los iones. La respuesta dada por las plantas ante la presencia de los iones puede resultar beneficiosa en el caso de las halófitas, siempre que se mantengan en unos niveles determinados de concentración (Flowers y Yeo, 1986).

Los síntomas de toxicidad por boro (B) se presentan en la mayoría de los cultivos cuando las concentraciones en las hojas alcanzan de 250 a 300 mg/kg de materia seca, sin embargo, muchos de los cultivos considerados sensibles no acumulan el Boro en las hojas y muestran síntomas de fitotoxicidad mucho antes de alcanzar estos niveles, en cuyo caso no sirven los análisis foliares y hay que apoyarse en los análisis de agua de riego, del suelo y en los síntomas externos de la planta.

La mayoría de las especies arbóreas son muy sensibles al sodio que se concentra en las hojas al perderse el agua por la transpiración, los riesgos más importantes se observan cuando se riega por aspersión, ya que la difusión del sodio a través de los estomas es muy rápida y

tiende a quedar en la hoja como consecuencia de la fuerte transpiración que se produce en las épocas de riego. Al regar con este método se detectan problemas cuando el contenido de sodio en el agua es superior a 3 meq/l. En los riegos por superficie el riesgo de fitotoxicidad es menor ya que una parte del sodio queda fijado por el suelo (Terrón, 1995).

Efectos Nutricionales

La presencia en la solución del suelo de iones salinos, a partir de un determinado nivel crítico de concentración, origina un desplazamiento del equilibrio nutricional mineral de las plantas. Este efecto se produce de dos maneras:

1) La fuerza iónica del sustrato tiene un efecto directo sobre la absorción y translocación de nutrientes. Una evidencia de este efecto es que la salinidad induce una absorción y acumulación de fósforo en ciertas especies. Este es un efecto osmótico y se presenta, independientemente del tipo de sal utilizado (Kafkafi, 1991).

2) El mecanismo más común, por el que la salinidad altera la nutrición mineral de las plantas es por la interacción directa del Cl^- y el Na^+ sobre la absorción y translocación de nutrientes dentro de la planta (Marschner, 1995).

Uno de los primeros resultados que revelaron desequilibrios nutricionales en las plantas, como consecuencia de la presencia de los iones salinos, se alcanzaron en estudios de nutrición del Ca^{++}, comprobándose en judías que la absorción de Ca^{++} depende de la relación Na^+/Ca^{++} (LaHaye y Epstein, 1971).

La reducción en la absorción de K^+ en la planta por el Na^+ es un proceso competitivo. Aunque las plantas tienen una selectividad alta de K^+ con respecto al Na^+, cantidades excesivas de K^+ pueden tener un efecto negativo sobre las plantas (Rush y Epstein, 1981). Quizás por ello, a pesar de los numerosos estudios, que indican la disminución en la absorción y translocación de K^+ en las plantas cultivadas en sustratos donde predomina el Na^+, hay pocos datos que demuestren que la adición de K^+ en dichas condiciones mejore el desarrollo de las plantas.

En condiciones salinas, también pueden surgir problemas con la disponibilidad de micronutrientes, aunque la influencia de la salinidad sobre las concentraciones de los mismos en las plantas depende, tanto de la planta como del micronutriente considerado. Distintos

estudios muestran que la concentración de hierro aumentaba con la salinidad en plantas de guisante (Dahiya y Singh, 1976).

Mecanismos de las Plantas para Adaptarse al Estrés Salino

Caliandro, *et al.* (2000) dividen a las plantas superiores en dos grupos en relación al mecanismo de adaptación a la salinidad, plantas que impiden el ingreso de los iones presentes en la solución del suelo, al interior de sus tejidos o sitios más activos (yemas y hojas en expansión) definidas como "excluyentes de iones" y plantas que acumulan los iones en su interior de la misma planta o en órganos especiales llamadas "incluyentes de iones" Las plantas para enfrentar la salinidad presentan principalmente dos mecanismos, el primero de ellos es la producción de solutos compatibles de manera de disminuir internamente su potencial osmótico (osmorregulación), ya sea con sales minerales inorgánicas absorbidas desde la solución del suelo, compuestos orgánicos solubles producidos por la propia planta, pudiendo ser azúcares, alcoholes, compuestos de azufre ternario, compuestos de amonio cuaternario como la prolina y la glicina (Flagella *et al.*, 1999), lo que fue comprobado por Bañuls y Primo-Millo (1992) en cítricos, donde encontraron una alta correlación entre el potencial osmótico y la concentración de prolina en las hojas como consecuencia de concentraciones crecientes de NaCl en la solución del suelo.

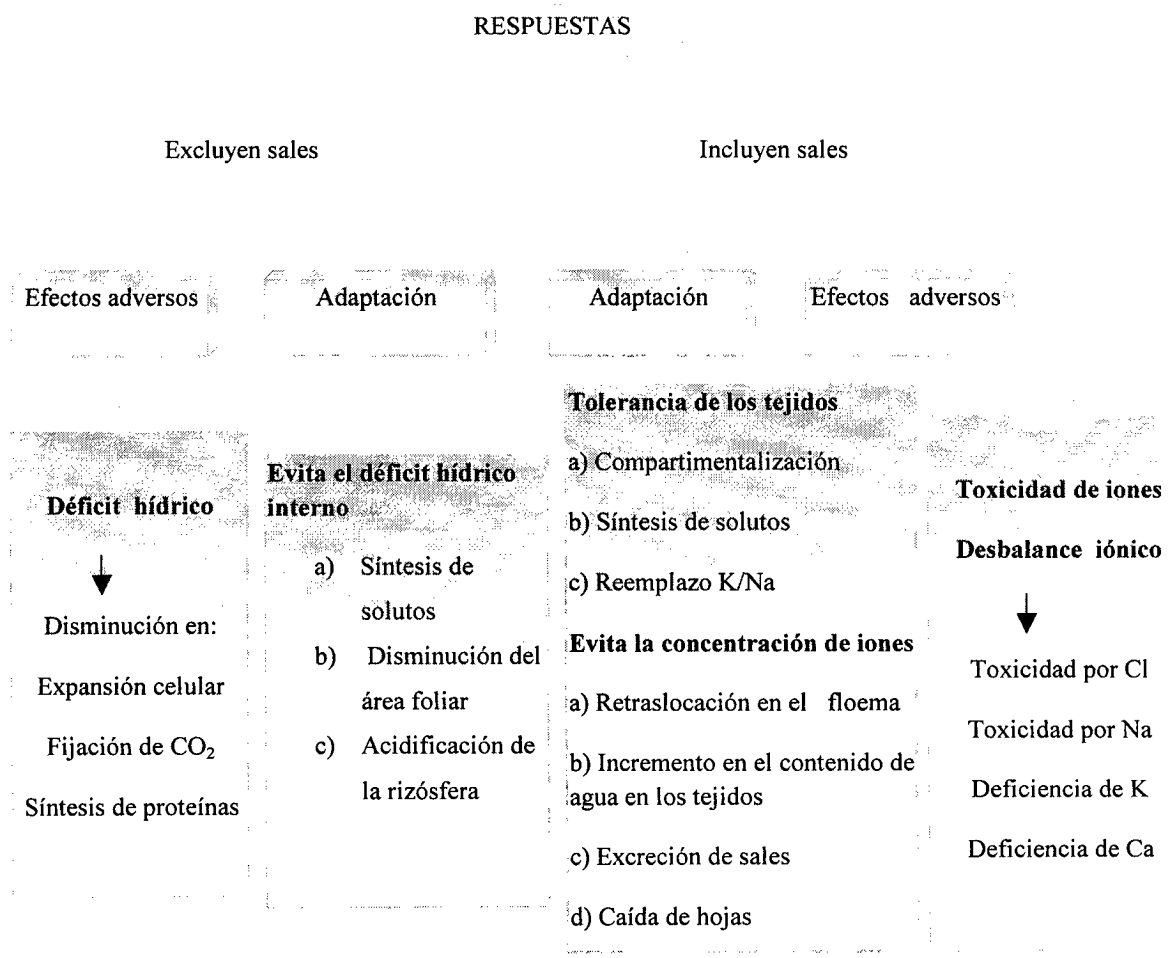
Una importante característica del ajuste osmótico de las halófitas es el de acumular las sales dentro de las hojas en vacuolas, manteniendo de esta manera una baja concentración salina en el citoplasma, de manera de no interferir con la actividad de las enzimas y en el metabolismo, mientras que el ajuste osmótico dentro del citoplasma lo efectúan por medio de la producción de solutos compatibles con la actividad enzimática (Laüchi y Epstein, 1984).

Muchas glicófitas responden a las bajas concentraciones salinas, disminuyendo la velocidad del transporte sodio y/o cloruro desde las raíces a los brotes, generalmente gran parte de estas glicófitas no poseen un buen ajuste osmótico vía síntesis de solutos orgánicos, sufriendo una disminución del turgor celular. Las glicófitas sensibles a la salinidad, tienen un control inadecuado a la absorción de iones cuando están sometidas en un medio salino, generándose una alta concentración al interior de la célula, debido a que este tipo de plantas no tiene desarrollado un mecanismo de compartimentalización; el incremento del contenido de

iones en el citoplasma podría provocar daños a nivel de enzimas y organelos, como también a nivel de membrana celular (Laüchi y Epstein, 1984).

El segundo mecanismo es la regulación del transporte iónico, a nivel de los canales transportadores de Cl^- y Na^+, y el transporte activo (es decir, con gasto de energía) de Na^+ desde el citoplasma al medio externo en contra del gradiente electroquímico (Flagella et al., 1999). En la siguiente figura se muestra un resumen de los efectos adversos y los mecanismos de adaptación a los excesos de sales.

Figura 1.Efectos adversos y mecanismos de adaptación de las plantas a las sales.



Fuente: Marschner (1995).

Tolerancia de los Cultivos a la Salinidad

Existen tres criterios para estimar la tolerancia de un cultivo a suelos salinos: la habilidad de un cultivo para sobrevivir; el rendimiento neto y el rendimiento relativo comparado con el rendimiento en suelos no salinos bajo condiciones similares de desarrollo.

En la Tabla 6, podemos definir la tolerancia que presentan diversos cultivos a la salinidad, por ejemplo, utilizando la columna 1, podemos apreciar que la vid soporta 1.5 dS/m sin que su rendimiento se vea afectado. En la columna 2 se muestran los valores de la CE necesaria para reducir en un 50% el rendimiento, para el caso de la vid esto sucede cuando la conductividad eléctrica del suelo se incrementa hasta 6.7 dS/m. Por otra parte en la columna 3 permite pronosticar lo que pasará cuando la C.E se eleve en una unidad, para el mismo caso de la vid podemos apreciar que cuando la C.E pasa de 1.5 a 2.5 dS/m el rendimiento se reduce en un 12%.

Tabla 6. Tolerancia relativa de los frutales a la salinidad.

Cultivos	**Salinidad máxima (limite) sin afectar el rendimiento (dS/m).**	**CE a la que se reduce el 50 % del rendimiento (dS/m)**	**% de disminución del rendimiento por el aumento de 1 mmhos/cm en el suelo**
Cultivos tolerantes	4.0 -12.0		
Palma datilera	4	17.9	3.6
Moderadamente sensibles	2.0 - 4.0		
Olivo	2.7	8.4	14
Granado	2.7	8.4	14
Sensibles	< 2		
Pomelo	1.8	4.9	16
Naranjo Limonero	1.7	4.8	16
Peral y Manzano	1.7	4.8	21
Durazno	1.7	4.1	6.5
Ciruelo	1.5	4.3	18
Almendro	1.5	4.1	19
Vid	1.5	6.7	12
Chirimoya	1.5		22

Fuentes: Ayers y Westcot (1976); Maas (1984); Tanji (1990).

En la siguiente Tabla se presentan los valores de tolerancia a la salinidad en algunos cultivos hortícolas, básicos e industriales.

Tabla 7. Tolerancia de algunos cultivos a la salinidad del extracto de saturación del suelo, expresada en CEe x 10^3 (dS/m) para diferentes porcentajes de disminución de rendimientos*.

	% de disminución de rendimiento		
Cultivo	**10**	**25**	**50**
		dS/m	
Algodón	10.0	12.0	16.0
Sorgo	6.0	9.0	12.0
Soya	5.0	7.0	9.0
Arroz	5.0	6.0	8.0
Maíz	5.0	6.0	7.0
Frijol	1.0	2.0	3.0
Brócoli	4.0	6.0	8.0
Tomate	4.0	6.5	8.0
Pepino	2.5	3.0	4.0
Melón	2.5	3.0	3.5
Esparrago	6.0	8.0	10.0
Pimiento	2.0	3.0	5.0
Lechuga	2.0	3.0	5.0
Rábano	2.0	2.5	3.0
Cebolla	2.0	3.5	4.0
Zanahoria	1.0	3.0	4.0
Papa	2.5	4.0	6.0

*Tomado de Palacios y Aceves, citado por Garavito, 1979; modificado por Flores, 1989.

La respuesta de las plantas a la concentración total de sales varía ampliamente según las diferentes especies. En el caso de las plantas ornamentales, no hay consistencia en la respuesta de los diferentes componentes de los rendimientos a la salinidad. Por ejemplo gerbera y rosa responden a incrementos en la conductividad eléctrica reduciendo el número de flores, en lugar del tamaño y peso de las flores. En cambio, clavel y bouvardia presentan una respuesta inversa. En el caso de Anturium, con baja salinidad se deprime el número de flores, pero con niveles de conductividad eléctrica se comporta como la gerbera.

Normalmente, con niveles bajos de salinidad en un contenedor el cultivo no presenta síntomas y, ante aumentos de la concentración salina leves, aun puede llegar a mejorar su rendimiento. Sin embargo, un eventual incremento en la salinidad en el

contendor llega a lo que se llama valor umbral de salinidad. A partir de ese valor, toda elevación de la concentración de sales está acompañada por una depresión en los rendimientos. Esa depresión muchas veces es proporcional al incremento de la conductividad eléctrica.

Sobre esta base distintos investigadores han establecido dos términos: valor umbral de salinidad y valor de disminución del rendimiento. El valor umbral de salinidad es el valor de conductividad eléctrica a partir del cual la concentración salina comienza a afectar negativamente a los cultivos y el valor de disminución del rendimiento expresa el porcentaje de rendimiento que disminuye el cultivo frente al incremento de 1 unidad de conductividad eléctrica, por encima del valor umbral. La siguiente tabla presenta estos valores, para algunos cultivos.

Tabla 8. Valor umbral de salinidad y valor de disminución del rendimiento.

Cultivo	**Valor umbral de salinidad dS/m**	**Valor de disminución del rendimiento (%)**
Anturium	0.8 – 0.9	7.8 – 13.2
Bouvardia	2.1	16.8
Clavel	4.3	3.9
Gerbera	1.5	9.8
Lily	1.6	4.6 – 9.6
Rosa	2.1	5.3

En términos generales los cultivos florales son más sensibles a la salinidad que los hortícolas y por lo tanto, con la excepción del clavel, su valor umbral de salinidad es más bajo. Por otro lado, la disminución del rendimiento a medida que aumenta la conductividad eléctrica, varía según cada especie. Además, hay que tener en cuenta que un importante aspecto concerniente a la respuesta a la concentración salina es la dependencia de los resultados frente a las condiciones climáticas: la humedad ambiental y la intensidad de la luz interaccionan fuertemente con la salinidad. Como una regla, frente a alta intensidad lumínica y baja humedad del aire el efecto de la concentración salina es más pronunciado.

Las sales pueden afectar a los cultivos por efecto de la salinidad (presión osmótica) y por efecto tóxico de los iones (cloro, sodio y boro principalmente).

Esto último se puede expresar de acuerdo a la ecuación propuesta por Meiré and Plaunt (Mass, 1984).

Yr = 100 – b (C.E.es – a)

Donde:
Yr = Rendimiento relativo en condiciones salinas
100 = Rendimiento potencial en condiciones no salinas
b = Pendiente disminución del rendimiento por cada unidad de sales de incremento
a = Umbral de tolerancia

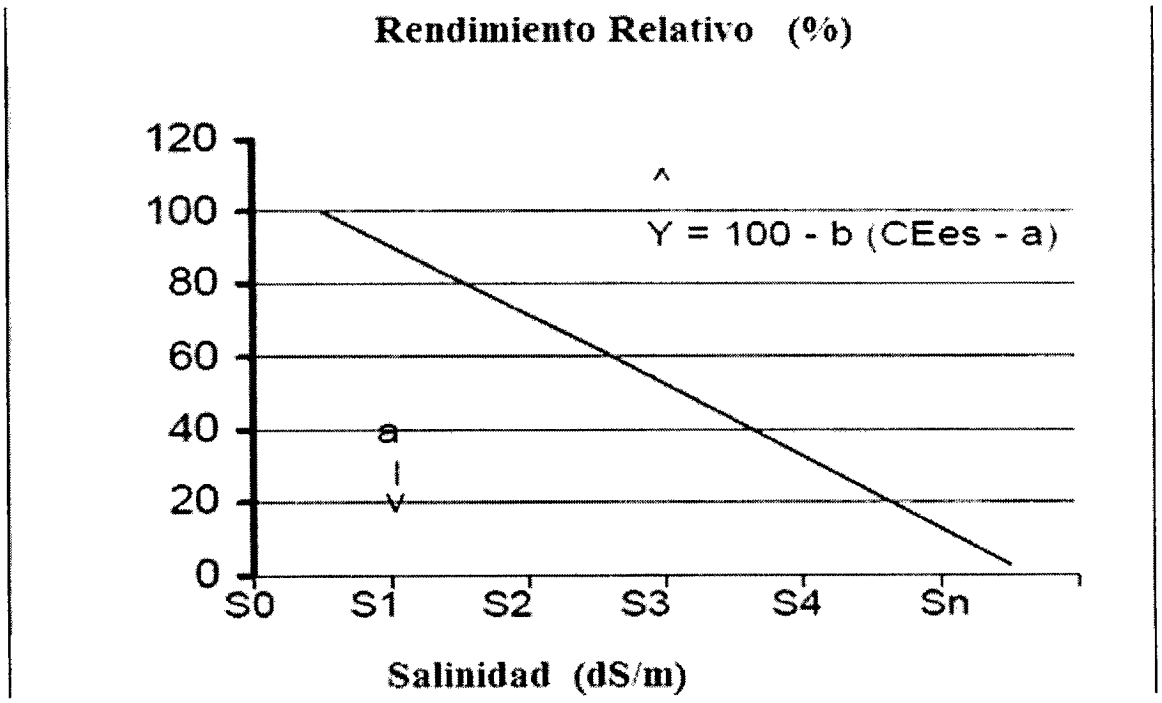


Figura 2. Respuesta de los cultivos a la salinidad.
Fuente: Mass & Hoffman. En: Mass, 1984.

Relación de los Fertilizantes con la Salinidad.

Los fertilizantes son sales que, agregadas con el agua de riego, forman una solución salina que se aplica al suelo. Está tiene efectos benéficos sí las sales son fertilizantes y se dosifican sin exceder los límites de calidad de agua para los cultivos; esto debido a que existe una relación entre la salinidad del agua de riego, de la solución del suelo y del agua de drenaje.

C.E.ss = 3 C.E. ar

C.E.es = 1.5 C.E. ar

C.E.ss = 2 C.E es

Donde :
C.E. ar = Conductividad Eléctrica – agua de riego
C.E. ss = Conductividad Eléctrica – solución suelo
C.E. es = Conductividad Eléctrica – del extracto

Índice de Salinidad del Fertilizante y Manejo de la Conductividad Eléctrica

El índice de salinidad de un fertilizante es la relación del aumento de la presión osmótica de la solución suelo, producida por un fertilizante, y la producida por la misma cantidad de nitrato de sodio. Cuando las características del agua de riego y del suelo supongan un riesgo de salinización, se ha de tener en cuenta el índice de sal de los abonos que se van a utilizar.

Independientemente del equilibrio nutricional elegido, la concentración total de sales disuelta en la disolución no debe sobrepasar determinados valores de conductividad eléctrica total del fertirriego ya que tendríamos problemas de absorción de agua y nutrientes por un elevado potencial osmótico en el medio radical. De igual manera, valores bajos de conductividad supondrían una escasa disponibilidad de nutrientes en el medio.

Es muy importante considerar la conductividad eléctrica del agua empleada y la cantidad que se puede incrementar por la adición de fertilizantes. Cuanto mejor es la calidad del agua de riego, mayor será la proporción de incremento de la conductividad eléctrica que se pueda y deba realizar con los nutrientes añadidos. El limite e podría establecer entre 1.7 y 2.2 dS/m de aumento por los fertilizantes cuando la conductividad del agua de riego es inferior a 0.5 dS/m, dando una conductividad de la solución final entre 1.7 y 2.2 dS/m. En el extremo opuesto, en aguas de mala calidad con conductividad por encima de 3.5 dS/m se debería bajar la proporción de conductividad debida a los nutrientes que se han de añadir, obteniéndose entre 0.5 y 0.75 decimas más en la conductividad final de la solución, resultando esta en el mejor el mejor de los casos de 3.5 dS/m (sals y urrestarazu, 2004). Evidentemente, esta última situación no es la más deseable, pero debemos asumir la limitación del desarrollo del cultivo por la salinización del medio o por la falta de nutrientes.

En las tablas 9 y 10 se muestran algunas de las características de los fertilizantes sólidos y líquidos y su relación con la salinidad.

Tabla 9. Incremento de la CE por efecto de la concentración de algunos fertilizantes sólidos.

Fuente fertilizante	Solución madre (kg / 100 l)	Conductividad Eléctrica Concentración (g/l)	dS/m	pH
Sulfato de amonio "S" (21% N)	12 – 20	0.25	0.540	5.5
		0.5	1.040	
		1.0	2.140	
		2.0	3.450	
Nitrato amónico (33.5 % N)	50	0.25	0.490	5.9
		0.5	0.780	5.6
		1.0	0.940	5.5
		2.0	2.780	5.4
Urea cristalina (46 % N)	50 -100	0.25	0.1	5.63
		0.5	0.1	5.7
		1.0	0.1	5.84
		2.0	0.1	6.1
Fosfato – Urea (17 - 44 - 0)	25	0.25	0.480	3.2
		0.5	0.840	2.9
		1.0	1.470	2.7
		2.0	2.430	2.5
Fosfato monoamónico (12 – 61 - 00)	20 -22	0.25	0.210	5.3
		0.5	0.420	5.0
		1.0	0.800	4.9
		2.0	1.570	4.7
Nitrato potásico (13 – 00 – 46)	13 -15	0.25	0.340	6.5
		0.5	0.640	6.6
		1.0	1.270	7.0
		2.0	2.440	7.5
Nitrato potásico (13 – 00 – 46)	7 - 12	0.25	0.320	6.5
		0.5	0.765	6.6
		1.0	1.415	7.10
		2.0	2.580	7.47
Sulfato potásico ácido (15 % K_2O)	10	0.25	0.399	5.00
		0.5	0.749	5.10
		1.0	1.430	4.87
		2.0	2.710	4.77
Nitrato de magnesio (11 % N + 15.7 % MgO)	10-25	0.25	0.375	5.26
		0.5	0.462	5.52
		1.0	0.860	4.43
		2.0	1.610	4.37

Fuente: http://www.infoagro.com/abonos/abonado_salinidad.htm#CUADRO%201

Tabla 10. Incremento de la CE por efecto de la concentración de algunos fertilizantes líquidos.

Fuente fertilizante	Conductividad Eléctrica		pH
	Concentración (g/l)	dS/m	
Solución N-32 (32 %)	0.25	0.320	6.11
	0.5	0.580	6.62
	1.0	1.100	7.12
	2.0	2.290	7.23
Solución N-20 (20 %)	0.25	0.400	6.91
	0.5	0.730	6.85
	1.0	0.990	6.79
	2.0	1.320	6.37
Nitrato magnésico (6.6 % N + 9.5 % MgO)	0.25	0.140	5.90
	0.5	0.250	5.95
	1.0	0.470	6.09
	2.0	0.870	6.44
Nitrato de Cal (7 % N + 9.5 % CaCO)	0.25	0.180	6.89
	0.5	0.330	6.80
	1.0	0.570	6.57
	2.0	1.130	6.40
Ácido fosfórico Preparar Sol. madre al 50 %	0.25	0.510	3.06
	0.5	0.959	2.81
	1.0	1.672	2.62
	2.0	2.590	2.09
Solución ácida de potasio (10 % K_2O) Sol. Madre al 50 %	0.25	0.280	3.28
	0.5	0.425	2.98
	1.0	0.810	2.71
	2.0	1.590	2.50

Fuente: http://www.infoagro.com/abonos/abonado_salinidad.htm#CUADRO%201

Métodos para el Manejo de Suelos Salinos

Para el manejo de suelos salinos existe una serie de prácticas que ayudan a controlar el problema de la salinidad. Estas incluyen uso de especies tolerantes, sistemas de riego adecuados, cambios en el volumen y tiempos de riego, modificaciones en la rotación de cultivos e instalación de drenajes. La información acerca de las especies tolerantes ha sido

presentada en la sección anterior. En esta sección nos referiremos principalmente al control de la salinidad mediante el riego.

Sistemas de riegos adecuados. Se han logrado importantes avances en el manejo de la salinidad mediante el uso de sistemas de riegos adecuados, fundamentalmente goteo y aspersión. Los sistemas de riego tradicionales generalmente salinizan la zona de cultivo, donde las sales se acumulan en el centro del camellón.

Por esta razón cuando se riega con aguas salinas se deben considerar las siguientes medidas:

a) Riegos frecuentes con alta carga de agua, para provocar un arrastre del exceso de sales acumuladas en los horizontes.

b) Utilizar esta agua en suelos con buen drenaje. En caso contrario el excedente de agua provoca un aumento del nivel freático. Posteriormente, cuando el agua se evapora, las sales suben por capilaridad, salinizando el terreno.

c) Construir drenajes. Para evacuar el exceso de agua.

El uso de sistemas de riego presurizados como goteo y aspersión en el manejo de la salinidad es una de las tantas ventajas de estos.

Se recomienda no utilizar riego por aspersión cuando la conductividad eléctrica (C.E) del agua o solución nutritiva exceda los 2.0 dS/m, debido a que las hojas se dañan, al secarse y concentrarse las sales.

Cambios en el volumen y tiempos de riego. La salinidad puede ser manejada también mediante el uso de altas cargas de agua a fin de mantener baja la concentración de sales, así como por el tiempo de riego para lixiviar las sales fuera de la zona de raíces. Para este efecto se debe adicionar a las tasas de riego una cantidad de agua extra (NL) para producir el lavado de sales. Para este cálculo se utiliza la siguiente relación:

$$NL = \frac{CEa}{CEes} * 100$$

En donde CEa es la conductividad eléctrica del agua de lavado y CEes es la conductividad eléctrica admisible en el extracto de saturación del suelo, para un rendimiento mínimo del 50%.

El resultado obtenido (NL) deberá ser utilizado para corregir la tasa de riego, agregándole este porcentaje al volumen de agua utilizado para regar. Un ejemplo para el uso de la ecuación anterior se presenta a continuación:

Supuestos
Cultivo: aguacate
CEa: 1.2 dS/m
CEes: 3.7 dS/m

$$NL = \left[\frac{1.2}{3.7}\right] * 100 = 32\%$$

Es decir, para obtener un rendimiento adecuado en aguacate se necesita mantener la C.E del extracto del suelo en 3.7 dS/m, por lo que la tasa de riego debe incrementarse en un 32%.

Otra forma, corresponde a lavados con altas cargas de agua al término de la temporada en el caso de hortalizas y en el caso de frutales cuando estos entren en reposo. En cada actividad para disminuir las sales del suelo se debe considerar la textura del suelo, suelos arcillosos requieren un mayor volumen que los suelos arenosos.

Con respecto al aumento de la frecuencia de riego, no existe claro consenso por parte de los especialistas. Entre cada riego el suelo pierde humedad y las sales se concentran, aumentando el potencial osmótico y disminuyendo el mátrico. Mientras más corto sea el intervalo mayor será el potencial total del agua. Si el agua posee una gran cantidad de sales, el secado del suelo será más lento. Sin embargo, cuando mayor es la frecuencia de riego mayor será la carga del suelo con nuevas sales.

Recuperación de Suelos Sódicos

El manejo de los suelos sódicos requiere de la aplicación de enmiendas o mejoradores, para provocar el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio, de manera tal que el sodio se libere a la solución y el calcio se adhiera al coloide o partículas de arcillas. La mayoría de los laboratorios expresan los resultados de los análisis en miliequivalentes por 100 gramos de suelo (meq/100 g). En otros casos los resultados se presentan en partes por millón (ppm), lo que es igual a miligramos por kilogramo (mg/kg). Por esta razón resulta útil poder transformar los meq/100g en ppm, para cuyo efecto en la Tabla 11 se presentan las equivalencias.

Tabla 11. Conversión de meq/100g a ppm y viceversa.

De meq/100 g a ppm	De ppm a meq/100 g
Ca x 200.4	Ca / 200.4
Mg x 121.6	Mg / 121.6
Na x 230.0	Na / 230.0
K x 391.0	K / 391.0
Cl x 354.5	Cl / 354.5

Antes de elegir las enmiendas o mejoradores se requiere detectar los problemas específicos del suelo, como por ejemplo, salinidad, presencia de costras calcáreas y pie de arado, de manera de solucionar previamente estos problemas. De igual forma hay que tener presente que la aplicación de mejoradores no entrega respuestas inmediatas y muchas veces requiere de aplicaciones posteriores. Además hay que considerar que el uso de agua con alto contenido de sodio, termina sodificando el suelo.

Si el suelo contiene calcio ya sea como carbonato o bicarbonato, se debe utilizar mejoradores que permitan dejar este elemento disponible. De lo contrario se deberá utilizar enmiendas que contengan calcio soluble. En la tabla 12 se indican algunos de los compuestos que pueden ser utilizados como mejoradores en suelos sódicos y su equivalencia con el yeso.

Tabla 12. Tipos de enmiendas para suelos sódicos y sus equivalencias con yeso.

Mejoradores para suelos que no tienen Ca solubilizable*	**kg equivalentes a 1 kg de yeso**
Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	1.0
Nitrato de Cálcio [$Ca(NO_3)_2$]	1.0
Polisulfuro de Cálcio al 24 % (CaS_5)	0.78
Caliza ($CaCO_3$)	0.58
Dolomita ($CaCO_3 + MgCO_3$)	0.50
Mejoradores para suelos que tienen Ca (enforma de carbonatos y bicarbonatos)	
Sulfato Ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	1.82
Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)	0.57
Azufre (S)	0.19

*Productos puros

A un suelo sódico que no posee calcio en forma de carbonato o este es escaso, necesariamente debe incorporársele alguna enmienda que contenga calcio. De acuerdo con

la literatura, se considera como pobre valores inferiores a 2,000 mg de cal por kg de suelo. Las reacciones que se producen en el suelo pasan por la incorporación del calcio a la partícula adsorbente y la liberación del sodio a la solución. De esta forma si se agrega yeso a un suelo sódico, el suelo se transformará en cálcico y se formará sulfato de sodio.

Luego debe efectuarse necesariamente un proceso de lavado del suelo para lixiviar el sodio. En la siguiente ecuación se presentan las reacciones que ocurren en el suelo cuando se incorpora calcio como yeso:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \leftrightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$$

En suelos sódicos que poseen calcio no soluble en cantidades adecuadas (sobre 2,000 mg/kg), se puede aplicar alguna enmienda que permita dejar disponible el calcio. Si se aplica ácido sulfúrico, este reaccionará con el calcio no soluble formando yeso, dióxido de carbono y agua; posteriormente el yeso seguirá el mismo proceso señalado anteriormente.

Si se desea agregar azufre, éste en cambio requiere de etapas previas a la del ácido sulfúrico, por cuanto primero debe oxidarse, formar trióxido de azufre (SO_3); este luego se une al agua y se transforma en ácido sulfúrico y luego seguir los mismos pasos más arriba señalados.

a) $H_2SO_4 + CaCO_3 \leftrightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$

b) $H_2SO_4 + 2CaCO_3 \leftrightarrow CaSO_4 + Ca(CO_3H)_2$

De acuerdo a estas reacciones 1 mol de azufre libera un mol de calcio que reemplazará a 2 moles de sodio.

Para que ocurra la ecuación deben existir una mayor cantidad de humedad y materia orgánica en el suelo.

Para saber en forma práctica si el suelo posee carbonatos o bicarbonatos, se puede añadir algunas gotas de ácido clorhídrico o sulfúrico a un pequeño volumen de suelo; si el suelo burbujea estamos ante la presencia de carbonatos o bicarbonatos, la cantidad real se debe determinar mediante análisis de suelo.

Los pasos necesarios para disminuir el contenido de sodio de un suelo se presentan a continuación:

a) Determinar contenido sodio, mediante un análisis en laboratorio.

b) Determinar la cantidad de sodio que se desea que quede en el perfil. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Sodio Final}(Sf) = \text{Sodio Inicial}(Si) - \text{Sodio desplazado } (Sd).$$

c) Relaciones de desplazamiento del sodio:

Para decidir que producto usamos para desplazar el sodio, se deben conocer una serie de relaciones importantes, según se detalla a continuación:

1 meq Ca^{++} contenido en el yeso ($SO_4Ca.\ 2H_2O$) desplaza 1 meq de Na^+

1meq de $SO_4Ca.\ 2H_2O$ equivalen a 86 miligramos de yeso

Esto se calcula a partir de la suma de los pesos atómicos dividido por la Valencia

$$1 \text{ meq de } SO_4Ca \cdot 2H_2O = \frac{32+64+40+36}{2} = 86 \text{ mg de yeso.}$$

Si un meq de calcio contenido en el yeso desplaza 1 meq de Na+; por tanto 86 miligramos de yeso/100 g suelo desplazan 1 meq de Sodio/100 g suelo.

Por otra parte también se podría utilizar azufre, si el suelo tuviera suficiente calcio:

1 meq de azufre (S) desplaza 1 meq de Na.

1 meq de S/2 equivale a 16 mg de S

1 meq de S = 32/2 = 16

Por tanto: 16 mg de S/100 gr de suelo desplazan 1 meq de Sodio/100 gr

d) Determinación del peso específico del suelo por hectárea (Pha).

Para determinar el peso del suelo, además del volumen se debe conocer la densidad aparente del suelo (Da). A modo de referencia en la Tabla 13 se presentan algunos valores de peso del suelo, en función de su densidad aparente.

Tabla 13. Peso del suelo a 30 cm con diferentes Densidades aparentes (Da).

Da (ton/m^3)	**Peso del suelo a 30 cm (ton/ha)**
0.80	2400
1.0	3000
1.25	3750
1.50	4500
1.80	5400
2.0	6000

e) Cálculo de la cantidad de yeso necesaria por meq que se desea desplazar

Siguiendo el mismo ejemplo anterior, si desea, desplazar 3 meq/100g se deberá aplicar la siguiente cantidad de yeso:

3 meq/g * 86 = 258 mg de yeso/100 gr o 2.58 g de yeso/kg suelo

f) Cálculo de la cantidad de yeso (kg/ha)

Utilizando la tabla 13 un suelo con Da = 1, tendrá un peso específico de 3000 ton/ha. Por lo que para corregir con yeso se deben aplicar:

0.000258 kg * 3,000000 kg = 7740 kg/ha

g) Corrección de la dosis (Cd)

La dosis calculada debe corregirse por la eficiencia de desplazamiento del yeso, la que alcanza a 75%.

$$Cd = \frac{\text{Dosis calculada}}{\text{Factor de corrección}} = \frac{7740}{0.75} = 10320 \text{ kg/ha.}$$

h) Fórmula

Utilizando el ejercicio anterior podemos resumir el cálculo de la dosis de yeso necesaria para desplazar el sodio en exceso (D):

$$D = \frac{Y * P}{Ef}$$

En donde D es la cantidad de yeso por hectárea que se debe aplicar para desplazar una determinada cantidad de sodio, Y es la cantidad de yeso necesario (kg) por meq a desplazar; P es el peso del suelo (kg) y Ef es la eficiencia de desplazamiento del yeso.

i) Tiempo necesario para la rehabilitación

No se debe incorporar más de 5 ton/ha por vez, pues la eficiencia del yeso disminuye debido a pérdidas por lavado. Por ello un proceso de rehabilitación debe durar a lo menos 5 años. En consecuencia, siguiendo el ejemplo anterior:

Dosis anual = 10320/5 = 2064 kg/ha/año.

III. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Hasta nuestros días se han obtenido importantes avances y grandes logros en cuanto a la salinidad se refiere, algunos de los conocimientos que se han generado se mencionan a continuación:

La aplicación de aminoácidos puede potenciar los mecanismos naturales que posee la planta para resistir a la salinidad, dotándola de aminoácidos fácilmente translocables; además, puede incrementar la velocidad de respuesta de la planta frente a estas condiciones ya que no ha de invertir tiempo en crear aminoácidos imprescindibles en estas circunstancias (Franco, 1998).

En un estudio realizado para determinar los efectos de 24-epibrassinolide en plantas de pimiento y como induce este la tolerancia a las sales. Se encontró que el 24-epibrassinolide mejora la tolerancia del pimiento a la salinidad a corto plazo debido a que estimula la elongación de los tallos, área foliar y reduce la producción de biomasa (Samira, *et al.*, 2008).

Uno de los efectos más evidentes del estrés salino es la reducción en la capacidad de absorción de agua, que se puede manifestar como los efectos del estrés hídrico: reducción de expansión foliar y pérdida de turgencia. Una célula vegetal expuesta a un medio salino equilibra su potencial hídrico perdiendo agua, lo que produce la disminución del potencial osmótico y del de turgencia. Esta situación genera señales químicas (aumento del Ca^{++} libre intracelular, síntesis de ABA, etc.) que desencadenan posteriores respuestas adaptativas (Hasegawa *et al.*, 2000).

En un suelo salino, la elevada concentración de iones Na^+ y Cl^- (o $SO4^=$), produce una interferencia en la absorción de nutrientes (K^+, Ca^{++}, NO_3^-) e impide la captación de los mismos, al tiempo que pueden alcanzar niveles citosólicos tóxicos para el metabolismo celular. El mantenimiento del equilibrio iónico de la célula frente a los cambios del medio externo, esto es la homeostasis iónica, depende de las proteínas de membrana que regulan el flujo de iones, como las bombas de protones (ATPasas y pirofosfatasas), transportadores secundarios y canales iónicos (Niu *et al.*, 1995; Maathuis y Amtmann, 1999).

El flujo de agua provocado por la transpiración foliar produce el movimiento de sales desde las raíces hasta las hojas. En las raíces, los solutos que entran siguiendo el flujo transpiratorio, se mueven por el apoplasto, y si atraviesan la membrana de una célula radical, continúa su transporte por el simplasto hasta alcanzar el xilema. En teoría, el movimiento de iones por el apoplasto se interrumpe en la endodermis: la impermeabilidad de las paredes de las células endodérmicas engrosadas con suberina y lignina (banda de Caspary) impiden el libre flujo. En este punto, los iones deberían atravesar la barrera selectiva de las membranas para continuar su camino hacia los vasos del xilema (Clarkson, 1991). Sin embargo, en algunas especies como arroz, existen sitios de paso donde los iones pueden saltarse la barrera selectiva de membranas y continuar su curso en el flujo transpiratorio por vía apoplástica (Yadav *et al.*, 1996; García *et al.*, 1997).

El K^+ es uno de los principales solutos empleados para el ajuste osmótico en células vacuoladas o poco vacuoladas (Greenway y Munns, 1980). En estas últimas, el papel más importante en el ajuste osmótico lo tienen diferentes compuestos orgánicos (azúcares, aminoácidos, etc.). Uno de los principales cambios bioquímicos durante la adaptación a salinidad resulta en la acumulación de esos compuestos orgánicos con actividad osmótica. Se consideran solutos compatibles porque no inhiben el metabolismo celular mientras generan el potencial osmótico requerido para permitir la absorción de agua en condiciones de menor potencial hídrico. En algunos casos tienen más función protectora y/o estabilizante de membranas y enzimas que propiamente osmótica (Hasegawa *et al.*, 2000). Entre los metabolitos más frecuentes se indican aminoácidos, azúcares y compuestos de amonio cuaternario. Algunos de estos compuestos podrían actuar como protectores físico-químicos reemplazando el agua de la superficie de proteínas y membranas por su naturaleza hidrofílica (Rhodes y Hanson, 1993), mientras que otros podrían tener una función de protección química desactivando radicales libres (Smirnoff y Cumbes, 1989).

IV. AREAS DE OPORTUNIDAD

A pesar de la considerable información que se ha venido acumulando en los últimos años, sobre el efecto de la salinidad en las plantas aún se desconocen aspectos moleculares y fisiológicos de las causas y efectos que este estrés medioambiental provoca. En estos tiempos, el estudio sobre los mecanismos que median los procesos de estreses abióticos tiene una gran vigencia dado a que la salinización de los suelos continúa siendo el factor abiótico más importante que afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas y la productividad en el caso de los cultivos agrícolas.

En nuestro país se han realizado trabajos experimentales para tratar de solucionar los problemas de salinidad que ocasión severos daños a la producción agrícola, pero son muy pocos los trabajos relacionados con el estrés salino a nivel molecular haciendo uso de la biotecnología, para así determinar los factores fisiológicos intrínsecos que protegen a las plantas de los efectos adversos de carácter abiótico. Haciendo uso de la biotecnología se puede realizar un estudio comparativo de especies de plantas tolerantes y sensibles a la salinidad para determinar las funciones que las hacen comportarse de manera muy diferente.

Aun se desconocen las funciones de algunas sustancias de carácter hormonal y que se podría profundizar más en su estudio para relacionarlos con la protección de las plantas ante los efectos de la salinidad como ejemplo se menciona la hormona 24-epibrassinolide ó brasinoesteroide, la producción de aminoácidos, etc.

Los avances recientes en el mapeo de genomas de plantas y las técnicas de biología molecular, ofrecen una nueva oportunidad para el esclarecimiento de la regulación de los genes involucrados en el estrés salino y los mecanismos en los cuales participan para la recuperación del balance osmótico en las plantas afectadas. Estos avances biotecnológicos proveerán de nuevas herramientas para la siembra de plantas en ambientes estresados. Los mapas genéticos ya han sido desarrollado para la mayoría de los cultivos que incluye el arroz, el trigo, maíz, sorgo y tomate, haciendo esto posible para los científicos localizar características genéticas deseables utilizando los marcadores moleculares.

Otra estrategia molecular la cual depende de la clonación de genes y la tecnología de transformación en plantas, es la ingeniería genética de genes seleccionados dentro de las líneas élites de cultivo. Las razones que permiten el éxito de los experimentos transgénicos se basan en los siguientes aspectos: los genes de interés, una técnica efectiva para transferir los genes deseados de una especie a otra y las secuencias promotoras para la regulación de la expresión de los genes.

Aunque la estrategia por mejora convencional no ha fructificado en la mayor parte de los casos. Existen algunos ejemplos como variedades de arroz y trigo desarrolladas por medio del cruzamiento con otras variedades.

En México existen variedades de especies tolerantes a la salinidad y la mayoría de los estudios realizados sobre injertos no se relacionan con la salinidad, más bien se enfocan a mejorar la resistencia ante enfermedades que están presentes en el suelo.

V. CONCLU SIONES Y RECOMENDACIONES

No existe un solo camino seguro para el uso de agua con restricciones. En la mayoría de los casos, se deben adoptar conjuntamente distintas prácticas agronómicas, para realizar un trabajo más eficiente y asegurar la sustentabilidad del proceso productivo.

Existen pocos antecedentes a nivel nacional de investigaciones que evalúen conjuntamente los efectos de la calidad de agua sobre las propiedades del suelo y productividad de los cultivos.

Los antecedentes indican cambios de las propiedades físicas y químicas de los suelos por efecto de distintas calidades de agua utilizadas para riego. Esta variación está en función de la composición y cantidad del agua de riego aplicado, características del suelo (textura, drenaje, contenido de materia orgánica, pH, CIC, entre otros parámetros), condiciones climáticas que prevalecen en la zona y cultivos a regar. En general se reportan incrementos del pH, CE, PSI en valores variables según situaciones de riego. Otros antecedentes indicaron que a pesar del incremento de algunos parámetros por aplicación del riego, se verificaron disminuciones de la CE y PSI después de períodos variables sin riego.

A medida que disminuye la CE y aumenta la RAS de la solución aplicada al suelo disminuye la conductividad hidráulica por expansión y dispersión de las arcillas reduciendo notablemente la infiltración. La germinación y emergencia del cultivo también se ve afectada por encostramiento superficial producto de la dispersión de las partículas del suelo. La disminución del K está directamente relacionada con la concentración de sodio en el agua de riego.

La intensidad del deterioro del suelo depende de su historia previa de riego, siendo más marcada en las primeras aplicaciones de agua.

Los horizontes texturales limitan el pasaje normal del agua y producen una concentración de sales a esa profundidad.

Adoptada la decisión de regar, se impone la necesidad de realizar un monitoreo de forma periódica del contenido de sales y de sodio de los suelos regados.

Las investigaciones futuras deberían continuar con las evaluaciones de parámetros físicos, químicos del suelo y de productividad de los cultivos, en condiciones de riego y secano considerando distintas situaciones de calidad de agua, tipos de suelo y rotación. Se debería estandarizar las metodologías de trabajo en cuanto al momento de muestreo, profundidad de las muestras según sistemas de labranzas y parámetros a evaluar, como así también los métodos de laboratorio. Los resultados de ensayos de laboratorios deben validarse a nivel de campo ya que en la naturaleza interactúan otras variables que mitigan los efectos que se miden en condiciones controladas (reacciones de intercambio por la aplicación de fertilizantes y enmiendas, degradación biológica de la materia orgánica, etc.).

Se puede realizar investigación de los rangos óptimos de conductividad eléctrica de los diferentes cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo para conocer los niveles críticos o de riesgo en los que la planta sufre un estrés o toxicidad.

VI. REFERENCIAS

Ayers, R. S. and D. W. Westcot, 1976. Water quality for irrigation. Irrigation and Drainage Paper 29. FAO. Rome. Italy.

Ayers, R. y D. Westcot, 1987. La Calidad del agua en la agricultura. Roma. FAO. N° 29. 174 p.

Bañuls, J. y E. Primo-Millo, 1992. Effects of chloride and sodium on gas exchange parameters and water relations of Citrus plants. Physiol. Plant. 86: 115-123.

Bernstein, L. y H. E. Hayward. 1958. Physiology of salt tolerance. Annu. Rev. Plant Phisyol. 9:25-46.

Bernstein, L. 1974. Crop growth and salinity. In: Shilfgaarde J. Van (Ed) Drainage for agriculture. Agronomy 17:39-54.

Bernstein, L.1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. Annu. Rev. Phytopathol. 13:295-312.

Bresler, E.; B. L. Mcneal and D. L. Carter. 1982. Saline and sodic soils: Principles-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag, Berlín Heidelberg New York. 236 pp.

Blasco, F. y J. de la. Rubia, 1973. Guía para la clasificar las aguas en relación con su calidad para el riego. Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). Madrid, España.

Caliandro, A., V. Cantatore, y S. Musacchi. 2000. Applicazione de acque salmastre su colture ortofruticole in Italia. Frutticoltura 7/8: 26-36.

Clarkson, D.T. 1991. Root structure and sites of ion uptake. En: Plant roots - the hidden half (Y. Waisel, A. Eshel, U. Kafkafi, eds), Marcel Dekker, New York, pp. 417-453.

Dahiya S.S. and M. Singh. 1976. Effect of salinity, alkalinity and iron application on the availability of iron, manganese, phosphorus and sodium in pea (*Pisum sativum)* crop. Plant Soil 44, 697-702.

Flagella, Z., V. Cantatore, F. Boari, D. Volpe y A. De Caro. 1999. Tolleranza allo stress salino delle specie coltivate in reazione agli aspetti fisiologici, produttive equalitativi. in: Tarantino, E. ed. Le acque salmastre come risorsa idrica: limiti e prospecttivi. Foggia, Istituto di produzione e preparazioni alimentari, Facoltá de Agraria di Foggia. Pp. 47-67.

Flores, L. 1989. Factores abióticos que intervienen en la producción de flores de corte. CINDE, Boletín Informativo de Floricultura No. 13 p. 2.

Flowers T.J., A.R. Yeo. 1986. Ion relations of plants under drought and salinity. Australian Journal of Plant Physiology 13: 75-91.

Franco, J.A. 1998. Efectos de la aplicación de hidrolizados de proteínas (aminoácidos) en cultivos hortícolas bajo condiciones salinas. Agrícola Vergel, 197:268-273.

Garavito, F. 1979. Propiedades químicas de los suelos. Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 146-163.

García, A., R.J. Rizzo, S.L. Bartos, A. D. Senadhir, T. J. Flowers, y A.R. Yeo. 1997. Sodium and potassium transport to the xylem are inherited independently in rice, and the mechanism of sodium:potassium selectivity differs between rice and wheat. Plant, Cell and Environment, 20: 1167-1174.

Greenway, H. y R. Munns. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. Annual Review of Plant Physiology, 31: 149-190.

Hasegawa P.M., R.A. Bressan, J.K. Zhu and H.J. Bohnert, 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 51: 463-499.

Iwata K., M. Tazawa, T. Itoh, 2001. Turgor pressure regulation and the orientation of cortical microtubules in Spirogyra cells. Plant Cell Physiol 42:594-598.

Jia W., Y. Wang, S. Zhang, J. Zhang. 2002. Salt-stress-induced ABA accumulation is more sensitively triggered in roots than in shoots. J Exp Bot 53:2201-2206

Kafkafi, U. 1991. Root Growth under Stress. Salinity In Plant Roots, The Hidden Half (Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi eds.), Dekker, pp. 375-391.

Lahaye, P. A., and E. Epstein. 1971. Calcium and salt toleration by bean plants. Physiologia Plantarum25: 213–218.

Laüchi, A. and E. Epstein. 1984. Mechanisms of salt tolerance in plants. California Agriculture 38(10): 18 – 20.

Levitt, J. 1980. Responses of Plants To environmental Stresses. 2nd. Ed. New York, Academic Press. 488 p.

Maas, E. 1984.Crop Tolerance. California Agriculture: 38 (10):20-21.

Maas, E. V. 1986. Salt tolerance of plants. Applied agricultural research. 1:12-26.

Maas, E.V. 1990. Crop salt tolerance. En: Agricultural Salinity Assessment and Management (Tanji, K.K., ed.), pp. 262-304. Amer. Soc. Civil Eng., ASCE Manual and Reports on Engineering Practice N°. 71, ASCE, New York.

Malik, K.A., Z. Aslam and M. Naqui. 1986. Kallar grass-a plant for saline land. The Nuclear Institute for Agriculture an Biology, Faisabaland.

Matsuda, K. and A. Riazi, 1981. Stress induced osmotic adjustment in growing regions of barley leaves. Plant Physiol. 68, 571-576.

Marschner, H. 1995 Mineral nutrition of higher plants, 2nd edition, Academic Press, London.

Munns R. and A.Termaat 1986. Whole-plant responses to salinity. Australian Journal of Plant Physiology 13, 143–160.

Niu, X., R.A. Bressan, P.M. Hasegawa and J.M. Pardo. 1995. Ion homeostasis in NaCl stress environments. Plant Physiology, 109: 735-742.

Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salino. Ed. Agrícola Española. Madrid, España.

Prieto, D. y C. Angueira. 1996. Calidad de agua para riego. Módulo II. En: Curso a distancia de "Métodos de riego". INTA- PROCADIS, Programa Clima y agua. 94 pp.

Quamme, H. A. and C. Stushnoff. 1988. Resistencia al estrés ocasionado por el medio ambiente. In: Moore, J. N. y J. Eds. Métodos genotecnicos en frutales. Ciudad de México, AGT. Pp. 323-355.

Qui, Q., Y. Guo, A.M Dietrich., K.S. Schumaker, J. Zhu. 2002. Regulation of SOS1, a plasma membrane Na+/H+ exchanger in Arabidopsis thaliana, by SOS2 and SOS3. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 99:8436-8441.

Rhoades, G. and Loveday, 1990. Salinity and irrigated agriculture. B.A. Steward and D.R. Nilson (eds). Irrigation of Agricultural Crops Agronomy Monograph N°30, 1089-1142.

Rhodes, D. and A.D. Hanson. 1993. Quaternary ammonium and tertiary sulphonium compounds in higher plants. Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology, 44: 357-384.

Richards, L. A. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 171 pp.

Rush, W. & E. Epstein. 1981. Comparative studies on the sodium, potassium and chloride relations of a wild halophytic and a domestic salt-sensitive tomato species. Pl. Physiol. 68: 1308-1303.

Samira, I., M. H., D. Mounir1, and B.E. Salem2. 2008. EurAsian Journal of BioSciences. EurAsia J BioSci 2, 83-90.

Smirnoff, N. and Q.J. Cumbes. 1989. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. Phytochem., 28: 1057-1060.

Tanji. K. 1990. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. New York.

Terrón, U. P. 1995. Tratado de fitotecnia general mundi-prensa.

Urrestarazu M G. y M. del C. Salas. 2004. Editores: Mundi Prensa Libros S.A. España

Vogel, O. 1985. Composición química de las aguas de riego de los ríos en Chile. Simiente. 55(1-2): 83-85.

Wyn Jones, R.J., 1981. Salt tolerance. In: Physiological Processces Limiting Plant Productivity. (C.B. Johson, ed.) Butterworths, London.

Yadav, R., T.J. Flowers, and A.R. Yeo. 1996. The involvement of the transpirational bypass flow in sodium uptake by high- and low-sodium-transporting lines of rice developed through intravarietal selection. Plant, Cell and Environment, 19: 329-336.

Zhu, J. K. 2001. "Plant salt tolerance". Trens Plant Sci., 6: 66-71.

Direcciones de Internet

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/bolarios/Investigacion/salinidad.htm

http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Conductividad/La_Conductividad_Electric a.htm

http://www.avantel.net/~arbolag/html/conducti.htm

http://www.unap.cl/~agrodes/publicaciones/Otras/Seminariosqm/salinidad2.pdf

http://www.newplant.com.ar/infonewplant/Info_NewPlant_No9.pdf

http://www.fertitec.com/PDF/Fertirrigacion%20Comex1.pdf

http://www.mag.go.cr/rev_agr/v15n1-2_167.pdf