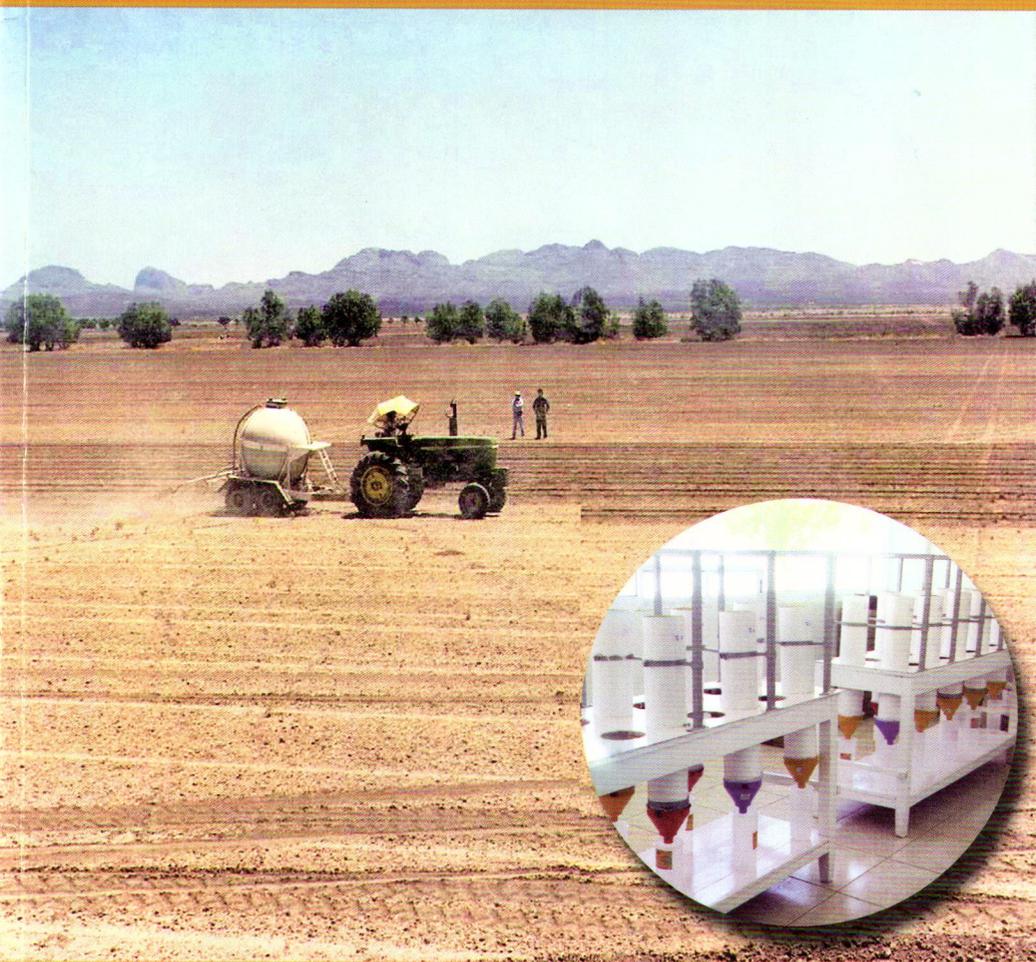


RECUPERACIÓN Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON PROBLEMAS DE SALES EN ÁREAS AGRÍCOLAS Y URBANAS

Miguel Rivera González, Ramón Trucíos Caciano, Juan Estrada Ávalos, Gerardo Delgado Ramírez y José Alfredo Montemayor Trejo



CENID-RASPA

Gómez Palacio, Dgo. Septiembre de 2012

Folleto Técnico Num. 24

Serie: MX-0-251199-52-10-00-09-24

ISBN: 978-607-425-876-9



Vivir Mejor

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

GOBIERNO FEDERAL

SAGARPA



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Lic. Francisco Javier Mayorga Castañeda
Secretario

M.Sc. Mariano Ruiz-Funes Macedo
Subsecretario de Agricultura

Ing. Ignacio Rivera Rodríguez
Subsecretario de Desarrollo Rural

Ing. Ernesto Fernández Arias
Subsecretario de Alimentación y Competitividad

M.Sc. Jesús Antonio Berumen Preciado
Oficial Mayor

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Arturo Cruz Vázquez
Encargado del Despacho de la Coordinación de Planeación y
Desarrollo

Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director

RECUPERACIÓN Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON PROBLEMAS DE SALES EN ÁREAS AGRÍCOLAS Y URBANAS

Autores

Miguel Rivera González

Ramón Trucíos Caciano

Juan Estrada Ávalos

Gerardo Delgado Ramírez

José Alfredo Montemayor Trejo

CENID - RASPA

2012

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias**

Progreso N°. 5, Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán, C. P. 04010 México D. F.
Teléfono: (55) 3871-8700

**Recuperación y mejoramiento de los suelos con
problemas de sales en áreas agrícolas y urbanas**

ISBN: 978-607-425-876-9

Primera Edición 2012

Derechos Reservados ©

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la Institución.

CONTENIDO

	Pag.
Introducción	3
Objetivos	4
Causas de salinidad	4
Clasificación de los suelos salinos	5
Métodos de recuperación	8
Métodos o mejoradores químicos	10
Métodos biológicos	10
Selección del tipo de mejorador químico	11
Reacciones químicas de los mejoradores en el suelo	12
Cálculo de la necesidad de mejorador	15
Cálculo del volumen y peso del suelo	15
Ejemplo	16
Cálculo del volumen de agua necesario para disolver el mejorador	18
Forma de aplicación del mejorador químico	19
Evaluación de los mejoradores químicos y biológicos	21
Cálculo de la norma o lámina de lavado	26
Conclusiones	32
Literatura citada	34



INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las tierras arables cubren alrededor de siete billones de hectáreas, de estas 1.5 billones son suelos cultivados, de la superficie de suelos cultivados el 23% son suelos salinos y el 37% son suelos sódicos (Szabolcs, 1994). En México un 10% del área irrigada tiene problemas de salinidad y de esta, el 64% se localiza en la parte norte del país. En la Comarca Lagunera (estados de Durango y Coahuila) un 15% de los suelos agrícolas presentan algún grado de salinidad y/o sodicidad (Santamaría *et al.*, 2006). Los problemas de salinidad y el exceso de sodio intercambiable no son exclusivos de las áreas agrícolas, estos también se presentan en plazas y bosques de áreas urbanas, lo cual constituye una limitante para el desarrollo y producción de muchas especies no tolerantes a salinidad.

Para el mejoramiento o recuperación de suelos salinos tradicionalmente se han utilizado los métodos hidrotécnicos y físicos y en suelos sódicos y salino sódicos el uso de los mejoradores químicos tales como el yeso agrícola, el ácido sulfúrico así como la incorporación de residuos de cosecha, biofertilizantes, lodos residuales y el establecimiento de cultivos tolerantes a salinidad (fitoremediación).

OBJETIVOS

Los objetivos del presente folleto son dar a conocer los criterios para la selección del tipo de mejorador químico a utilizar para la recuperación o mejoramiento de suelos sódicos o salino sódicos, el cálculo de la cantidad por aplicar, las reacciones químicas de los mejoradores en el suelo, así como los resultados de investigación más sobresalientes en cuanto a la evaluación de los diferentes tipos de mejoradores químicos y biológicos.

CAUSAS DE LA SALINIDAD

Los suelos salinos pueden ser de origen natural (salinidad primaria) o inducida por el hombre (salinidad secundaria). Cuando la salinidad es de tipo natural se distinguen dos tipos de acumulación: la salinidad continental y la de origen marino. En la continental las sales se originan, en los procesos de intemperismo (hidrólisis, solución, carbonatación y a veces precipitaciones) de las rocas. Estas sales se encuentran formando compuestos poco solubles y en otros casos disociados como iones (Redly, 1986). El tipo de sal presente en el suelo depende de la composición de la roca intemperizada. Este proceso se manifiesta principalmente en lugares donde la evaporación es mayor que la precipitación, como sucede en regiones de clima árido, semiárido y estepas, donde predominan las características mencionadas. Los suelos salinos de origen marino se desarrollan debido a la penetración del agua de mar, a la masa terrestre continental, como resultado de la contaminación de los acuíferos por las aguas costeras. Este fenómeno se presenta asociado a las regiones desérticas, semidesérticas y húmedas. La salinidad secundaria se produce fundamentalmente por el desconocimiento o el mal uso de las prácticas de manejo, tanto del suelo como del agua de riego, son de las principales causas inducidas por el hombre, que transforma los ecosistemas. La alteración rápida se produce por el asentamiento humano (explotación del petróleo, minerales etc.), la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la actividad agrícola e industrial (Flores *et al.*, 1993). También se deben de tomar en cuenta otros factores relacionados al manejo del

agua de riego tales como: a) drenaje inadecuado o insuficiente y ascenso de los niveles freáticos (Suárez, 1989; Conacher, 1990). b) mal manejo del riego con utilización de aguas de mala calidad (Thellier *et al.*, 1990a; Thellier *et al.*, 1990b; Lax *et al.*, 1994).

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SALINOS

Díaz (1986) menciona que existen varias clasificaciones de suelos salinos, cada una con ventajas e inconvenientes, las tres más importantes son la rusa, la francesa y la americana. La clasificación americana utiliza fundamentalmente dos parámetros para caracterizar a los suelos: la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_s) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). La conductividad eléctrica indica los efectos de la salinidad sobre las plantas y el PSI es un índice de los efectos del sodio sobre las propiedades del suelo. La clasificación americana clasifica a los suelos con problemas de sales y/o sodio intercambiable en tres categorías: suelos salinos, sódicos y salino sódicos.

Suelos salinos: Se definen como los que contienen en la zona radical una gran cantidad de sales disueltas en la solución suficientemente alta para restringir el desarrollo normal de los cultivos. El pH puede variar entre 7 y menos de 8.5. La conductividad eléctrica es mayor de 4 dS m⁻¹ y el PSI es menor de 15%, por lo que su estructura no se ve afectada.

De acuerdo con el tipo de sales presentes que afectan la recuperación de estos suelos se clasifican en:

a).- Suelos salinos con sodio que contienen principalmente



b).- Suelos salinos con Calcio y Magnesio, que contienen principalmente



En estos suelos se pueden presentar pequeñas cantidades de bicarbonatos. Sin embargo, los carbonatos solubles no se presentan.

Suelos sódicos: Se definen como los suelos que contienen en la zona radical suficiente Na ($PSI > 15\%$), absorbido por el complejo de intercambio para desarrollar propiedades físicas y químicas desfavorables, restringiendo el normal crecimiento de las plantas. La reacción de estos suelos varía según y la presencia o ausencia de carbonatos y bicarbonatos. El pH varía de 8 a 9.5. El contenido de sales es generalmente bajo ($CEx < 4 \text{ dS m}^{-1}$). La solución del suelo contiene en su mayor parte cloruros, sulfatos y bicarbonatos. A un pH muy elevado y en presencia de iones carbonato, el Ca y el Mg se precipitan, por lo que las soluciones de los suelos sódicos, contienen pequeñas cantidades de Ca y Mg predominando el Na. En estos suelos las arcillas se dispersan, son arrastradas por el agua de lavado, pueden acumularse a poca profundidad formando una capa compacta de estructura prismática o columnar poco permeable. La capa superior presenta textura gruesa quebradiza. En los suelos de elevado PSI, la materia orgánica se dispersa y disuelve depositándose en la superficie, a lo que da el color oscuro característico, dando origen a la denominación de "Alcali negro".

Considerando una reducción del 50% de su rendimiento relativo en un rango de PSI determinado Gupta y Abrol (1990) y Tyagi (2000) clasifican a los cultivos por su tolerancia a la sodicidad del suelo en 7 grupos los cuales se presentan en el Cuadro 1. En base a esta clasificación, el cártamo y lenteja son de los cultivos más susceptibles al sodio intercambiable y el arroz figura como uno de los más tolerantes.

Suelos salinos sódicos: Son aquellos que en la zona radical contienen una cantidad de sales solubles y un PSI suficientes para restringir el crecimiento de las plantas. Como límite se adoptan CEx mayor a 4 dS m^{-1} y PSI mayor a 15%. La reacción en estos suelos varía con su grado de salinidad y con la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Siempre que contengan un exceso de sales su apariencia y propiedades son similares a la de los suelos salinos; su pH raramente es menor a 8.5 y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado,

las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando ser idénticas a la de los suelos sódicos.

Cuadro 1.- Tolerancia relativa de los cultivos al porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de los suelos.

Rango de PSI (%)	Cultivos
10-15	Cártamo, chícharo, frijol y lenteja
15-20	Garbanzo, soya, maíz
20-25	Cacahuate, cebolla, mijo perla y trébol
25-30	Linaza, ajo, pasto limón, caña de azúcar, algodón y haba
30-50	Trigo mostaza, girasol, algodón y avena
50-60	Cebada, remolacha, sesbania, pasto Rhodes
60-70	Arróz y pasto Karnal

Fuente: Tyagi (2000) y Gupta and Abrol (1990).

A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio, que a su vez con el CO_2 presente en la atmósfera del suelo puede formar carbonato de sodio en cualquier caso, el lavado de estos suelos pueden hacerlos más alcalinos ($\text{pH} > 8.5$) las partículas coloidales se dispersan de la misma manera que en los suelos sódicos. Cuando los suelos salino sódicos contienen yeso, al ser lavados el Ca se disuelve reemplazando al sodio absorbido, por lo que el lavado se produce sin deterioro de la estructura del suelo.

Los indicadores químicos de salinidad de carácter global utilizados para la clasificación, caracterización y diagnóstico de áreas afectadas por salinidad son la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH (Kochba *et al.*, 2004; Muller *et al.*, 2004; Shukla *et al.*, 2004) en base a estos parámetros los suelos se clasifican en 4 grupos (Cuadro 2) los cuales son: suelos salinos, sódicos, salino sódicos y suelos normales sin problemas de salinidad ni sodicidad.

Cuadro 2.- Clasificación de los suelos en base a la CE, PSI y pH de los suelos.

Clasificación	pH	CE_x	PSI	Proceso
Salinos	< 8.5	>4	< 15	Salinización
Sódicos	> 8.5	< 4	> 15	Sodificación
Salino sódicos	<8.5	> 4	>15	Salinización y sodificación
Suelos normales		< 4	<15	Ninguno de los dos procesos

Fuente: Kochba *et al.* (2004); Muller *et al.* (2004) y Shukla *et al.* (2004).

Tomando en cuenta la conductividad eléctrica del suelo y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y excluyendo el pH del suelo, la Secretaría de Fomento Agropecuario a través la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural (ODEIRUS) del Valle de Mexicali presenta una clasificación (Cuadro 3) que agrupa los suelos salinos en seis clases.

Cuadro 3.- Clasificación de los suelos salinos en base su CE y PSI.

Variable	Clases de suelos salinos					
	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta	Sexta
CE (dS m ⁻¹)	≤ 4	4-8	8-12	12-20	20-30	≥30
PSI (%)	≤15	15-20	20-30	30-40	40-50	≥50

Fuente: Secretaría de Fomento Agropecuario (2009).

MÉTODOS DE RECUPERACIÓN

La recuperación y rehabilitación de los suelos afectados por sales implica un conjunto de medidas que ayuden al mejoramiento de los mismos, que llevan implícitos a la propia elección del mejorador, la siembra de cultivos tolerantes, el manejo de la fertilización, riego, subsoleo, y los trabajos de recuperación (Yadav, 1993).

Pizarro (1985), indica que existen diversos métodos para recuperar los suelos con problemas de sales y/o sodio intercambiable y los agrupa de la siguiente forma:

1. **Métodos físicos.**- Los constituyen principalmente el barbecho profundo, el subsuelo y la adición de arena o inversión del perfil.
2. **Métodos biológicos.**- Consisten en incorporar estiércol, abonos verdes y establecimiento de cultivos tolerantes a las sales.
3. **Métodos eléctricos.**- Consisten en hacer pasar una corriente directa a un volumen dado de suelo.
4. **Métodos químicos.**- Se basan en el intercambio de sodio por calcio, mediante el uso de las sales cálcicas de alta solubilidad, así como de ácidos y sustancias formadas de ácido, cuando el suelo contiene calcio en forma precipitada como carbonato de calcio (CaCO_3).

Hanson *et al.* (1993), indican que básicamente existen cuatro tipos de enmiendas para la recuperación de suelos sódicos o salino sódicos: las que aportan Ca en forma directa, las que suministran Ca en forma indirecta, los polímeros y los ácidos orgánicos:

Enmiendas que aportan Ca en forma directa:

Cloruro de calcio y nitrato de calcio.- Estas enmiendas son altamente solubles en agua y tienen poco efecto en el pH del suelo.

Yeso agrícola.- Es la enmienda más utilizada debido a su bajo costo, sin embargo una de sus limitantes es su baja solubilidad de apenas 2.6 g l^{-1} (Torres y Rodríguez, 2009).

Limo/dolomita.- Es la enmienda preferida cuando el pH del suelo es menor de 7.2 y el agua de riego es baja en bicarbonatos.

Enmiendas de suministro indirecto de Ca:

Estas enmiendas liberan Ca al reaccionar con los carbonatos de

calcio del suelo, y son más apropiadas en suelos con pH menor de 7.5. A menudo se les llama enmiendas formadoras de ácido.

Ácido sulfúrico y ácido sulfúrico-urea.- Estos ácidos reaccionan con el carbonato de calcio para formar yeso. El yeso disuelto suministra Ca para su intercambio por el Na. Este proceso es rápido y puede efectivamente reducir el pH del suelo. El ácido sulfúrico debe manejarse con cuidado.

Azufre, azufre - limo y nitrosul .- Estas enmiendas proporcionan azufre, el cual es expuesto a las reacciones microbianas del suelo para formar ácido sulfúrico el cual reacciona con el carbonato de calcio para suministrar Ca. El uso de estas enmiendas es mas lento que usar ácido sulfúrico, debido a que la rección microbiana requiere calor y suelos bien aireados.

Polímeros y ácidos orgánicos.- Reaccionan con el limo del suelo para, suministrar Ca, sin embargo la naturaleza exacta de las reacciones en el suelo aún no es bien entendida.

MÉTODOS O MEJORADORES QUÍMICOS

Los mejoradores químicos, son sustancias capaces de reemplazar el Na intercambiable por el Ca a través de la acción directa ó indirecta de los procesos biológicos o químicos (Gupta y Singh, 1988; Gupta y Abrol, 1990). La elección de los mejoradores depende de la disponibilidad, costo y efectividad. Un concepto clásico asume que los compuestos tanto de Ca como de S son similarmente transformados, cuando se aplican a suelos calcáreos en cantidades químicamente equivalentes, aunque el coeficiente del mejoramiento permite ser diferenciado, dependiendo de su solubilidad (Miyamoto y Enriquez, 1990).

MÉTODOS BIOLÓGICOS

Los métodos biológicos de mejoramiento de los suelos sódicos o salino sódicos son considerados como una técnica auxiliar para aumentar la eficiencia de las técnicas fundamentales (Pizarro, 1985). Estos pueden aumentar la efectividad del lavado (Cabrera, 1992). Al respecto, Abrol *et al.* (1988) consideran

que los métodos biológicos deben combinarse con métodos químicos, para desplazar las sales derivadas de la acción de los mejoradores a través del lavado.

Hernández (2000) menciona que dentro de los métodos biológicos de recuperación de suelos sódicos o salino sódicos está el uso los microorganismos (bacterias, hongos y micorrizas) los cuales en la actualidad adquieren importancia relevante para elevar la fertilidad de los suelos y su productividad (Bollag *et al.*, 1994; Garland, 1996; Kennedy y Gewin, 1997), como medio más integral para el manejo de los cultivos, utilizándose como alternativa ante los altos costos de los fertilizantes químicos y evitando la degradación de los suelos como parte fundamental del sistema de la agricultura sostenible (Parkin, 1993; Kennedy y Smith, 1995).

Qadir *et al.* (2007) define a la fitoremediación como el establecimiento de cultivos para la recuperación de suelos sódicos o salino sódicos calcáreos, para lo cual se han utilizado diferente especies tales como pastos, arbustos, árboles y cultivos anuales.

SELECCIÓN DEL TIPO DE MEJORADOR QUÍMICO

Las características de los suelos sódicos o salino sódicos más importantes para la selección del tipo de mejorador por aplicar son: el contenido de carbonatos de calcio y el pH del suelo (Aceves, 1979). De acuerdo a estas características, los suelos sódicos o salino sódicos se agrupan en tres grupos:

GRUPO I.- Suelos que contienen carbonato de calcio.

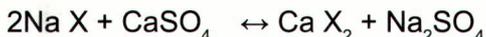
GRUPO II.- Suelos que no contienen carbonato de calcio y cuyo pH es mayor a 7.5.

GRUPO III.- Suelos que no contienen carbonatos de calcio y cuyo pH es menor a 7.5.

REACCIONES QUÍMICAS DE LOS MEJORADORES EN EL SUELO

Sales solubles de Ca

Yeso.- Aceves (1979), menciona que en suelos del grupo I la reacción que ocurre al aplicar el Yeso es la siguiente:



Donde: X representa el complejo de intercambio.

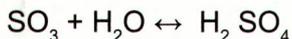
Al respecto indica que esta reacción es igual para los suelos del grupo II y III.

Korentager y Mokwunge (1981), comentan que el yeso es fisiológicamente inofensivo para las plantas, tiene una baja solubilidad alrededor de 1.9 g l⁻¹. Por lo tanto, la eficiencia de este compuesto como mejorador de suelos sódicos alcalinos es limitada por este factor, ya que la solubilidad en agua a 25°C apenas alcanza 0.26%, aumentado al disminuir el tamaño de las partículas. Sin embargo, en partículas de tamaño muy fino, la disolución del yeso baja en el suelo por la precipitación de CaCO₃ sobre las partículas de yeso.

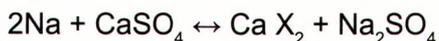
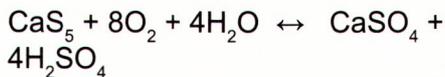
Ácidos o formadores de ácidos

Aceves (1979), indica que al aplicar ácidos o sustancias a formadoras de ácidos a suelos del grupo I, las reacciones ocurren de la siguiente forma:

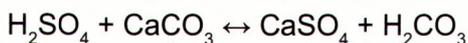
Azufre:



Polisulfuro de Calcio:

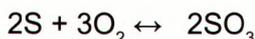


Sulfato Ferroso:



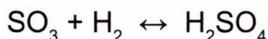
Donde: X representa el complejo de intercambio.

No se recomienda la aplicación de estos mejoradores en suelos del grupo II y grupo III, debido a que en el complejo de intercambio se fija hidrogeno, propiciando que el pH del suelo se abata y pueda causar problemas de disponibilidad de nutrientes en el suelo. Lo anterior se ejemplifica con la reacción siguiente:



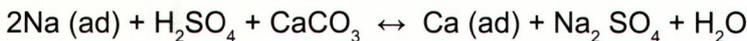
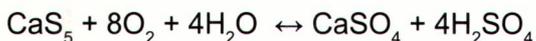
Lo mismo ocurre en los casos del polisulfuro de calcio, sulfato ferroso, sulfato de aluminio y ácido sulfúrico.

Korentager y Mokwunge (1981), indican que el S elemental en la recuperación de los suelos salino sódicos alcalinos, debe pasar por el proceso de oxidación y transformación en ácido sulfúrico, con la intervención de los microorganismos del suelo según la reacción siguiente:



Después de haberse formado el ácido sulfúrico este participa directamente en la recuperación de los suelos alcalinos, activando el carbonato de calcio precipitado. La oxidación del S elemental en el suelo sucede a través de procesos químicos y bioquímicos, con predominio de las reacciones microbianas, con influencia de varios factores (Tabatabai, 2005). La oxidación implica la transformación de S a SO_4^{2-} a través de una reacción fuertemente ácida con liberación de ácido sulfúrico. Esta reacción se aprovecha cuando se utiliza el S para corregir la alcalinidad de los suelos. Los grupos de organismos que participan en la oxidación son: a).- quimioautotróficos (bacterias de género *Thiobacillus*) b).- fotoautotróficos y 3).- heterótrofos (un amplio espectro de bacterias y hongos). Los primeros dos grupos son los responsables de la reducción de compuestos reducidos de S en suelos bien drenados. La oxidación del S es la resultante de la interacción de varios factores relacionados con el ambiente edáfico y también del tipo de fuente de S utilizada (Horowitz *et al.*, 2005).

Otro compuesto formador de ácido es el polisulfuro de calcio CaS_5 , el cual debe sufrir el proceso de oxidación por los microorganismos del suelo en condiciones anaeróbicas para luego transformarse en sulfato de calcio y ácido sulfúrico, los cuales participan en el proceso de recuperación de los suelos sódicos, según lo muestran las siguientes reacciones:



El polisulfuro de calcio tiene una reacción fuertemente alcalina y contiene alrededor de 24% de S y 9% de Ca.

Sales de Ca de baja solubilidad

Al respecto Aceves (1979), indica que para suelos del grupo II, donde el pH es mayor a 7.5 la roca caliza es prácticamente insoluble, pero las reacciones pueden ocurrir de la siguiente forma:



o mediante la hidrólisis del sodio adsorbido:



Solamente se recomienda la aplicación de este mejorador en suelos que no contienen carbonatos de calcio y el pH sea menor a 7.5.

CÁLCULO DE LA NECESIDAD DE MEJORADOR

Para el cálculo de la necesidad del mejorador, es necesario conocer las siguientes variables: Los porcentajes de sodio intercambiables inicial y final deseado, la profundidad del suelo a recuperar, el contenido de carbonatos de calcio, la capacidad de intercambio catiónico y la densidad aparente del suelo. Aceves (1979) propone la siguiente ecuación para el cálculo de la necesidad de mejorador

$$\text{NM} = \frac{\text{PSI}_i - \text{PSI}_f}{100} \times \text{CIC}$$

Donde:

NM = Necesidad de mejorador (meq/100 g de suelo).

Ps_i y PSI_f = Porcentajes de sodio intercambiables inicial y final (%).

CIC = Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g de suelo).

CÁLCULO DEL VOLUMEN Y PESO DEL SUELO

(V_s y Ps)

Una vez que se calcula la necesidad del mejorador en meq/100 g de suelo es necesario conocer el volumen y el peso del suelo a recuperar, estos se calculan conociendo la superficie o el área a recuperar, la profundidad de recuperación y su densidad aparente.

$$V_s = A \times \text{Pr}$$

y

$$\text{Ps} = V_s \times \text{Da}$$

Donde:

V_s = volumen de suelo (m^3)

P_s = peso del suelo (kg)

A = superficie a recuperar (m^2)

D_a = densidad aparente del suelo ($g\ cm^{-3}$ o $t\ m^{-3}$)

EJEMPLO

Se desea calcular la necesidad de mejorador químico para lo cual se dispone de la siguiente información:

$PS_{li} = 25\ %$

$PS_{if} = 15\ %$

Densidad aparente = $1.3\ g\ cm^{-3}$ ó $t\ m^{-3}$

Profundidad de suelo a recuperar = 30 cm

Capacidad de intercambio catiónico = 25 meq/100 g de suelo

Se dispone de los siguientes productos: ácido sulfúrico (90% de pureza)

Yeso agrícola (70% de pureza)

Ácido sulfúrico = \$1800.00 por t^{-1}

Yeso agrícola = \$900.00 por t^{-1}

Sustituyendo valores:

$NM = [(PS_{li} - PS_{if}) / 100] \times CIC = [(25 - 15) / 100] \times 25 = 2.5\ meq/100\ g\ de\ suelo$

$V_s = 10,000 \times 0.3 = 3000\ m^3\ ha^{-1}$

$P_s = 3000 \times 1.3 = 3900\ t\ de\ suelo\ ha^{-1}$

Ahora si tenemos 2.5 meq/100 g de suelo (0.1 kg) en 3900 t de suelo, cuantos meq tendremos:

$(3,900,000\ kg \times 2.5) / 0.1 = 97,500,000\ meq$ en un volumen de suelo de $3000\ m^3\ ha^{-1}$.

REQUERIMIENTOS DE MEJORADOR QUÍMICO

Para realizar este cálculo nos apoyamos en el Cuadro 4, donde aparecen los miliequivalentes que aporta una tonelada del mejorador, considerando una pureza del 100%.

Yeso agrícola = $(97.5/11.63)/0.70 = 11.9$ t, con un costo de \$10,710.00

Ácido sulfúrico = $(97.5/20.4)/0.9 = 5.3$ t, con un costo de \$9,540.00

Para este ejemplo resulta más barato utilizar el ácido sulfúrico.

Cuadro 4.- Miliequivalentes que contiene una tonelada de los diferentes mejoradores químicos, considerando una pureza del 100%.

Mejorador químico	Millones de miliequivalentes por tonelada de producto
Azufre	62.5
Polisulfuro de Calcio	17.4
Sulfato Ferroso	7.2
Sulfato de Aluminio	9.0
Acido Sulfúrico	20.4
Yeso	11.63
Cloruro de Calcio	18.0
Carbonato de Calcio	20.0

Fuente: Aceves (1979).

Como se puede observar en este cuadro, la misma cantidad en peso de diferentes mejoradores produce diferentes cantidades de meq. Por esta razón, la adquisición debe hacerse en función de lo que al comprador le cueste un equivalente químico, más que por lo que le cueste una tonelada de producto, considerando el porcentaje de pureza del mejorador.

Martínez (1988) analizó las características químicas de diferentes mejoradores, tales como el contenido de Ca en % en base a peso, utilizando absorción atómica y la capacidad solubilizadora

de Ca (CSCa) mediante el método del Eudiómetro utilizando la siguiente fórmula:

$$CSCa = (C \times H \times 100) / (F \times B \times D)$$

Donde :

CSCa = Capacidad solubilizadora de calcio (en % equivalente Ácido Sulfúrico)

C= volumen desplazado por el mejorador en el Eudiómetro

H= gramos de ácido utilizado

B= volumen desplazado por el ácido

F= ml de mejorador utilizados

D= densidad del mejorador

Los resultados de este análisis se presentan en el cuadro siguiente

Cuadro 5. Calcio que pone a disposición cada kg de mejorador para el intercambio por sodio.

Mejorador químico	Calcio		
	Contenido (g)	Solubilizado (g)	Calcio total
Ácido Sulfúrico	0	407.4	407.400
Yeso Agrícola	197.7	0	190.670
Polisul "C"	42.0	1.86	43.816
Promesol "N"	52.7	0.83	53.531
Promesol "S"	28.0	0.48	28.480
Urasul	0	27.34	27.340

Fuente: Martínez (1988).

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA NECESARIO PARA DISOLVER EL MEJORADOR

Para calcular la lámina de agua necesaria para disolver el mejorador cuando este es un ácido o sustancia formadora de ácido, debe considerarse en base a la cantidad de yeso que se calcula que se va a formar cuando el ácido reaccione con el carbonato de calcio existente en forma natural en el suelo para

producir yeso, y como se conoce que por cada meq de ácido o sustancia formadora de ácido que se aplique al suelo, se va a formar un meq de yeso, suponiendo que hay CaCO_3 suficiente en el suelo, entonces la necesidad de mejorador por hectárea expresada en meq ha^{-1} se divide entre la solubilidad del yeso en meq l^{-1} y se obtiene el volumen total de agua necesaria para disolver el mejorador.

Aceves (1979), aclara que no se debe calcular la lámina de agua para disolver el mejorador en base a la solubilidad del sulfato de aluminio, el sulfato ferroso y menos el polisulfuro de calcio y el S, que como se sabe es insoluble en agua; menciona también que para que estos mejoradores formen yeso en el suelo es necesario que haya la humedad suficiente, para lo cual hay que aplicar agua mediante un riego ligero.

Este mismo investigador presenta una ecuación que permite el cálculo del volumen de agua necesario para disolver el mejorador, la cual es la siguiente:

$$\text{VAN} = \text{NMH}/\text{SM}$$

Donde:

VAN = Volumen de agua necesario para disolver el mejorador, l/ha

NMH = Necesidad de mejorador por ha.

DM = Solubilidad de mejorador en meq l^{-1} .

FORMA DE APLICACIÓN DEL MEJORADOR QUÍMICO

Los mejoradores sólidos se deben de aplicar lo más finamente pulverizados directamente en el suelo, al voleo o con una sembradora de trigo e incorporados en los primeros 15 cm mediante dos pasos de rastra para mezclarlos bien con el suelo. Esto acelera la velocidad de reacción y aumenta la eficiencia del mejorador.

Las sales solubles de Ca pueden aplicarse en el agua de lavado a la entrada de la parcela. Lo mismo se debe de hacer con el ácido sulfúrico y el polisulfuro de calcio, teniendo cuidado de controlar la dosificación de tal forma que la cantidad aplicada

este de acuerdo al volumen de agua usado, considerando que el agua no vaya a mojar más allá de la superficie por recuperar. Esto es difícil de lograr con métodos de riego por superficie debido a la diferente eficiencia de la aplicación en todos los puntos, fundamentalmente en el caso del ácido sulfúrico, no es recomendable aplicarlo directamente al suelo, ya que puede oxidar los minerales y la materia orgánica. En el caso de la aplicación de ácido, se recomienda que se haga en forma intermitente en láminas de agua de 10 cm, poniendo un chorro de ácido directamente en la regadera de la parcela, en esta forma de aplicación la uniformidad de distribución del mejorador dependerá de la uniformidad de distribución del agua de riego (Aceves, 1979). En la Región Lagunera se han realizado aplicaciones en forma comercial aplicando el ácido sulfúrico directamente al suelo, antes del establecimiento del cultivo, esto utilizando equipo adecuado, con lo que se logra una mejor uniformidad de distribución del producto (Figura 1).

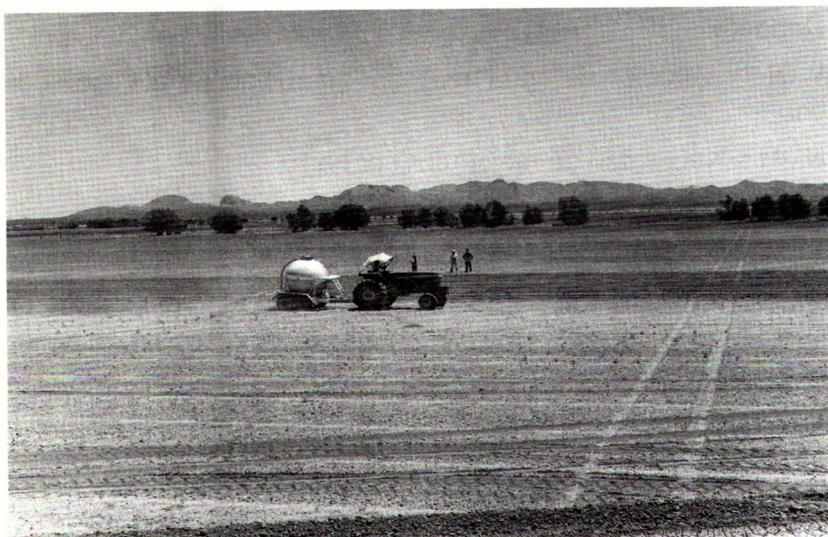


Figura 1. Aplicación de ácido sulfúrico directamente al suelo en la Región Lagunera.

EVALUACIÓN DE MEJORADORES QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

Mejoradores químicos

Miyamoto y Stroehlin (1986), comentan que la aplicación de ácido sulfúrico a suelos sódicos calcáreos, solubiliza el carbonato de calcio (CaCO_3) y a un pH ácido libera al P, Fe y Al, todo lo cual ayuda a incrementar la infiltración del agua en el suelo. La cantidad de Na intercambiable removido por el ácido es aproximadamente igual que una removida por una cantidad de equivalente químico de yeso en suelos afectados moderadamente por Na. La reacción en sistemas cerrados en la cual una mol de H_2SO_4 potencialmente libera 2 moles de Ca, lo que no ocurre en prácticas de recuperación ordinarias. El ácido proporciona movimiento más rápido de agua lixiviada que una cantidad equivalente de yeso en suelos calcáreos severamente afectados por Na. Cuando es aplicado a suelos moderadamente afectados por Na, el ácido proporciona lixiviación más rápida que el CaCl_2 aplicado a igual proporción de equivalentes químicos. Froto (1988), evaluó 5 mejoradores químicos: yeso, ácido sulfúrico, azufre, promesol y polisul a tiempos de incubación de 0, 15, 30 y 45 días. Dicha evaluación se efectuó bajo condiciones de laboratorio utilizando permeámetros llenos de suelo salino sódico. Durante el llenado de los permeámetros se incorporaron en el suelo los mejoradores sólidos (yeso y S) mezclados en los primeros 5 cm y en la lámina de agua los mejoradores líquidos (ácido sulfúrico, promesol y polisul) se aplicaron dosis de 26.7 g de yeso, 4.1 g de S, 7.1 ml de H_2SO_4 , 58.2 ml de promesol y 62.8 ml de polisul. Concluye que los mejoradores que dieron mejores resultados en cuando a disminución del PSI fueron: yeso, ácido sulfúrico, promesol y polisul, siendo estadísticamente iguales entre ellos. No encontró diferencia estadística a una probabilidad del 95% entre tiempos de incubación de 0, 15 y 30 días. Menciona que no es necesario someter al suelo con mejorador a un periodo de incubación antes del lavado. Martínez (1988), realizó un estudio sobre la eficiencia de seis mejoradores comerciales: ácido sulfúrico, yeso agrícola, polisul "C", promesol "N", promesol "S" y ureasul, para evaluar su uso en la rehabilitación de suelos salino sódicos, a nivel

laboratorio, de acuerdo a las equivalencias de la tabla que se elaboró en base a los resultados efectuados a los mejoradores para determinar tanto su contenido de Ca como su capacidad solubilizadora de Ca. Las láminas de lavado aplicadas fueron las siguientes: Una vez el contenido de humedad a capacidad de campo (Lámina₁), dos veces el contenido de humedad a capacidad de campo (Lámina₂) y tres veces el contenido de humedad a capacidad de campo (Lámina₃). Concluye que en base al PSI del suelo, los mejoradores que lograron abatirlo en mayor grado fueron el promesol "N" y el polisul "C" (rango de PSI de 46.2 a 14.6 %). Sin embargo, los productos que lograron un menor abatimiento (rango de PSI del 46.2 a 20.8) pero con menor cantidad de producto fueron el ácido sulfúrico y el yeso agrícola. Además encontró que existe tendencia general de reducción de los parámetros, Na soluble, PSI y CE, en todos los tratamientos, al incrementar la lámina de lavado, lo que demostró que los productores aumentan su eficiencia de sustitución de Na intercambiable al utilizar mayor volumen de agua.

Martín del Campo (1988), evaluó dos mejoradores químicos (yeso y ácido sulfúrico) para la recuperación de un suelo salino sódico. El experimento se efectuó bajo condiciones de laboratorio utilizando columnas de suelo; se evaluaron 3 concentraciones de ácido sulfúrico (3%, 4% y 5%) aplicando láminas de lavado equivalentes al 0.5, 1.0 y 2.0 del volumen poroso (Vp) del suelo. La cantidad de yeso se calculó para abatir el PSI del suelo de 88.5% a 5% utilizando las mismas láminas de lavado para el ácido sulfúrico. Basándose en el desplazamiento de Na intercambiable en suelos que presenten características calcáreas, menciona que se puede utilizar sin problema el ácido sulfúrico a bajas concentraciones y a bajos valores de láminas de lavado (ácido sulfúrico al 3% y lámina de lavado de 0.5 Vp), encontró además que tanto para el yeso como para el ácido sulfúrico la mejor lámina de lavado fue la lámina activa de 0.5 Vp; es decir la lámina de lavado total será igual a 1.5 veces el volumen poroso a capacidad de saturación de un suelo y que de acuerdo a los datos de velocidad de infiltración el ácido sulfúrico recupera más rápidamente un suelo.

Longo *et al.* (2005) comparó la aplicación del yeso y S en la recuperación de un suelo salino sódico y su efecto en la producción de lechuga bajo condiciones de invernadero. Se aplicaron 2.5 t de S y yeso agrícola respectivamente. Los rendimientos de lechuga fueron superiores para el tratamiento con S, así como una reducción del PSI para el primer año y una disminución del pH del suelo en los dos años de evaluación.

Las curvas de lixiviación son usadas como una herramienta para determinar la eficiencia de las enmiendas químicas y la óptima lámina de lavado utilizada en el proceso de recuperación Gharibeth *et al.* (2012) utilizaron esta técnica para evaluar la eficiencia de la recuperación de suelos sódicos altamente calcáreos utilizando ácido fosfórico y yeso agrícola. Reportan que la desalinización del suelo requirió más agua que la desodificación y que el ácido fosfórico requirió menos cantidad de agua para lixiviar y recuperar el suelo que el yeso agrícola.

Comparación de métodos biológicos vs químicos

Experimentalmente se ha encontrado que el establecimiento del cultivo de arroz en un suelo salino sódico puede abatir la conductividad eléctrica del suelo de 14 a 4 dS m⁻¹ y el PSI de 20 a un 9% en un solo ciclo de cultivo (Cinco *et al.*, 1990), también se tienen evidencias que el establecimiento de pasto Sudán (*Sorghum Sudanense*) es más eficiente en el desplazamiento de Na intercambiable en suelos sódicos calcáreos que la aplicación de 50 t de yeso agrícola (Robbins, 1986).

Rivera *et al.* (2009) evaluaron la efectividad de recuperación de un suelo sódico (PSI = 36%) de cinco especies de pastos: sudan (*Sorghum sudanense*), sorgo forrajero (*Sorghum bicolor L.*) mijo perla (*Pennisetum typhoides*), bermuda gigante (*Cynodon dactylon*) y el pasto buffel (*Cenchrus ciliaris*). De los cultivos evaluados el Sudán fue el más eficiente en el abatimiento del PSI del suelo, debido principalmente a una mayor producción de CO₂ de su sistema radical, sin embargo los cultivos no superaron al tratamiento de lavado (aplicación de agua únicamente) a un volumen drenado de agua de 1.5 veces el volumen poroso del suelo, concluyen que el Ca del agua de lavado fue la fuente

principal utilizada para el intercambio y que probablemente la menor eficiencia de los cultivos en el abatimiento del PSI se deba a una extracción considerable de Ca soluble de la solución del suelo por los cultivos, lo cual trae como consecuencia una menor disponibilidad de Ca para su intercambio por Na.

Qadir *et al.* (2007) realizó un análisis de 17 estudios realizados en diferentes partes del mundo, para comparar la reducción del PSI del suelo al comparar la aplicación de yeso agrícola contra el establecimiento de cultivos. Menciona que en promedio el yeso agrícola redujo el PSI del suelo en un 60% y los cultivos en un 48% con respecto a su valor inicial y únicamente en cuatro estudios la fitoremediación superó a la aplicación de yeso. También menciona que en algunos casos la fitoremediación fue menos eficiente que la aplicación de la enmienda química debido a las siguientes razones: a) No se utilizó un cultivo resistente a la salinidad y sodicidad del suelo al inicio de la rotación de cultivos b).- Los cultivos se establecieron en una fecha que no fue la más apropiada de acuerdo a su fecha óptima de siembra c).- La duración del experimento no fue suficiente para explotar el impacto de la fitoremediación y d).- No se aplicó una cantidad de agua suficiente para lixiviar el Na y sales fuera de la zona radical del cultivo.

Zúñiga *et al.* (2012) evaluaron diferentes técnicas y su efecto en la producción de biomasa y cambios en las propiedades físicas de un suelo salino sódico. Los tratamientos evaluados se presentan en el Cuadro 6.

De acuerdo a la producción de maíz y cambios en las propiedades físicas del suelo tales como la reducción de la densidad aparente y el incremento de la porosidad del suelo, concluyen que los tratamientos basados en el uso de microorganismos fueron los más efectivos en cuanto a la respuesta fisiológica y productividad. También comenta que sobresale la estimulación electromagnética, puesto que acelera la actividad microbiana, lo cual disminuye el tiempo de mejoramiento y enriquecimiento de los suelos.

Cuadro 6.- Técnicas evaluadas, dosis por hectárea y número de aplicaciones en la recuperación de un suelo salino sódico.

Tratamiento	Producto	Dosis ha⁻¹	Aplicaciones
Biofertilizantes	Multibioli	25 l	3
	Biosol New	25 kg	3
	Biofertil	25 l	3
	Humisoil	25 l	3
	Biocompost	2.5 t	1
	Micorrizas	125 kg	1
Convencionales	Yeso	3.75 t	1
	Azufre	1.25 t	1
	Biocompost	2.5 t	1
Biopolímeros	Desalt	25 l	1
	Biosol New	25 kg	1
	Humisoil	25 l	1
	Kimelgran	187.7 kg	1
	Codiphos	250 kg	1
Electromagnéticos	Multibioli	25 l	3
	Biosol New	25 kg	3
	Desalt	25 l	3
	Biocompost	2.5 t	1
	Micorrizas	125 kg	1
Testigo absoluto	Solo drenaje		

Fuente: Zuñiga *et al.* (2012).

En cuanto a la recuperación y mejoramiento de suelos sódicos ó salino sódicos en áreas verdes urbanas se han realizado muy pocos trabajos de investigación en México; al respecto Rivera (2012) realizó una evaluación de cinco mejoradores químicos y un mejorador biológico, los mejoradores químicos fueron: el ácido sulfúrico, yeso agrícola, calcimag, Saltrad y Regensoil y el AgBlend como mejorador biológico. La evaluación de los mejoradores se realizó en condiciones controladas de laboratorio (columnas de suelo) utilizando un suelo salino sódico y aplicando una lámina de lavado equivalente a 1.5 el volumen poroso a saturación del suelo. Se aplicó una cantidad de 8.3 t

ha⁻¹ de ácido sulfúrico, calculada para abatir un 20% el PSI del suelo, en base al costo de esta cantidad de ácido sulfúrico, este se dividió entre el costo unitario de los otros mejoradores, para calcular sus dosis, es decir se aplicaron diferentes dosis de los mejoradores para igualar a un mismo costo. No obstante que no se encontró diferencia significativa en el abatimiento del PSI entre los mejoradores evaluados, el más eficiente en abatir el porcentaje de sodio intercambiable fue el mejorador biológico AgBlend, siguiéndole en orden descendente el calcimag, saltrad, yeso agrícola, regensoil y ácido sulfúrico (Figura 2). Sin embargo el efecto del mejorador biológico en mejorar la velocidad y filtración del suelo, fue muy lento ya que tardó casi un mes más que el ácido sulfúrico, yeso y calcimag en iniciar el drenado de las columnas, constituyendo esto una limitante para su uso.

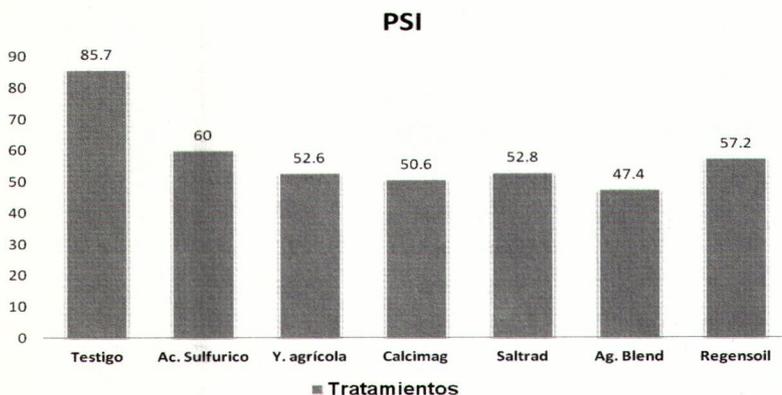


Figura 2.- Abatimiento del porcentaje de sodio intercambiable para cada uno de los mejoradores evaluados Rivera (2012).

CÁLCULO DE LA NORMA O LÁMINA DE LAVADO

La determinación de la norma o lámina de lavado es uno de los problemas importantes en la teoría y práctica del mejoramiento de los suelos; generalmente las formular utilizadas para el lavado de los suelos con problemas de sales involucran en su estructura parámetros que consideran la textura del suelo, la profundidad de las aguas freáticas, el contenido salino de estas aguas y la

cantidad de las sales del perfil a lavar; sin embargo, también existen ecuaciones que se adaptan de una manera universal a las condiciones naturales de los suelos salinos, tal es el caso de las ecuaciones de Volobuyev, Safonov, Penin y Rhoades, citados por Díaz (1988).

Aceves (1979), menciona que la fórmula de Volobuyev, tiene varias limitaciones entre las cuales destacan las siguientes:

$$L = \alpha \text{ Log } (CE_i/CE_f)$$

Donde:

L = lámina total de agua necesaria para lavar un metro de profundidad de suelo (cm).

α = coeficiente cuyo valor depende del contenido de cloruros y textura del suelo.

CE_i = conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

CE_f = conductividad eléctrica final deseada o permisible para un cultivo por establecer.

Log = logaritmo decimal.

El coeficiente α está dado solo en función del contenido de cloruros del suelo y textura, sin considerar la influencia que pueden tener las otras sales del suelos y las incorporadas con el agua de riego sobre el comportamiento físico-químico de los suelos que se someten a lavado; por otra parte, esta fórmula fue desarrollada para calcular la lámina de agua necesaria para lavar un metro de profundidad en el suelo, y como se sabe en el lavado de sales de diferentes espesores no existe linealidad, lo que indica que si por ejemplo, un espesor de 10 cm de suelo se lava con 7 cm de lámina de agua, 20 cm de espesor no se lavaran con 14 cm de lámina. Por otra parte esta fórmula no considera el rango de salinidad de los suelos que se están lavando, ya que en la expresión logarítmica se tiene una relación cuyo coeficiente puede obtenerse con diferentes valores de CE y pareciera que es lo mismo bajar la CE de un suelo de 80 a 20, cuyo valor del coeficiente sería 4, que bajarla de 20 a 5, que sería el mismo valor y, como la experiencia práctica lo ha

demostrado, es mucho más fácil abatir la CE de un suelo de 80 a 20 que de a 20 a 5 milimhos.

Partiendo de la ecuación de Volobuyev, Sejas, citado por Aceves (1979), experimentando en campo y laboratorio desarrollo una fórmula para calcular láminas de lavado de suelos donde el valor de α se ha puesto en función de la calidad química del agua de lavado del rango de salinidad de los suelos y del espesor del suelo por lavar, aspectos sumamente importantes en los procesos de lavado de suelos ensalitrados y que no se toman en cuenta la expresión de Volobuyev, la fórmula es la siguiente:

$$L = 9.0 (P)^{0.75} [(70 - C_{Er}) / (C_{Ei} - C_{Er})]^{0.3} \log(C_{Ei} / C_{Ef})$$

Donde:

L = lámina de agua para lavado en cm.

P = profundidad de suelo a lavar (cm).

C_{Er} = conductividad eléctrica del agua de lavado ($dS\ m^{-1}$ a $25^\circ C$).

C_{Ei} = conductividad eléctrica inicial del extracto de saturación en ($dS\ m^{-1}$ a $25^\circ C$).

C_{Ef} = conductividad eléctrica final del suelo o permisible para un cultivo por establecer ($dS\ m^{-1}$ a $25^\circ C$).

Aceves (1979), comenta que al usar esta fórmula se debe de tener cuidado de que el valor de la CE final o permisible (C_{Ef}), no sea menor que la conductividad eléctrica del agua de lavado (C_{Er}), porque aun con esto se obtendrá un valor de lámina lo cual es ilógico, ya que lo máximo que se puede lavar un suelo es hasta un valor igual a la CE del agua que se está utilizando para el lavado. Por otra parte, si el valor de CE es igual a C_{Er} , no habrá lavado y la lámina tomará un valor de infinito.

Esta fórmula tiene la ventaja de que en los coeficientes están integrados otros factores inherentes a las prácticas agrícolas de los suelos bajo riego, como son la calidad química del agua, las condiciones de salinidad del suelo, la tolerancia del cultivo de las sales y la profundidad de lavado, que se puede hacer igual a la profundidad radical del cultivo.

Esta fórmula se probó utilizando datos de experimentos de lavado realizados en el Distrito de Riego No. 014, Mexicali, Baja California, cuyos resultados aparecen en el cuadro 8. Se puede apreciar que los valores obtenidos con la fórmula son bastante satisfactorios y las diferencias posiblemente no son mayores que la precisión con la que se aplican las láminas de agua a nivel de campo; sin embargo, esta fórmula puede usarse con algunas ventajas. Aceves (1979), menciona que en suelos donde se establecen cultivos bajo riego para controlar la salinidad es necesario aplicar, conjuntamente con la lámina de riego requerida para mantener un nivel deseado de salinidad en el suelo, de acuerdo con la tolerancia del cultivo por establecer utilizando la fórmula siguiente:

$$RL = [CEr / (CEf - CEr)] \times LCa$$

Donde:

RL = requerimiento de lavado.

CEr = CE del agua de riego ($dS\ m^{-1}$).

CEf = CE de la solución del suelo después del lavado (final) en $dS\ m^{-1}$.

LCa = lámina de consumo de agua por el cultivo.

Cuadro 6. Comparación entre láminas de lavado aplicadas y calculadas en el Distrito de riego 014 de Mexicali Baja California, México.

Profundidad del suelo a lavar (cm)	CE del agua de riego ($dS\ m^{-1}$)	Salinidad inicial del suelo ($dS\ m^{-1}$)	Salinidad final del suelo ($dS\ m^{-1}$)	Lámina de lavado aplicada (cm)	Lámina de lavado cálculo (cm)
100	1.6	47.6	26.4	75	81.6
100	1.6	43.8	25.0	75	79.9
100	1.6	53.5	31.4	75	71.5
100	1.6	48.3	27.5	75	78.0

Fuente: Aceves (1979).

Richards (1973), señala que la conductividad eléctrica del extracto de saturación es proporcional a la presión osmótica de la solución y se afirma que en la mayoría de los casos esta es la que determina la respuesta vegetal. Estos aspectos mencionados son válidos en lo que se refiere a una evaluación real de la salinidad que existe en un momento determinado y un punto en un perfil de suelo. Sin embargo, como lo han determinado Cervantes (1983), Del Cristo (1982) y Díaz (1986), cuando se tienen procesos de lixiviación continua e intermitente, sobre todo en los procesos de lavado de suelos salinos, es evidente que la cantidad de sales que lixivian sobrepasan en dos o tres veces aquellas cantidades que se evaluaron como iniciales, pero las láminas de lavado por aplicar serán menores cuando la determinación de las reservas salinas se hagan en base a conductividad eléctrica, según lo demostró Del Cristo (1982) y Díaz (1986). La lámina de lavado se puede sobrestimar hasta 10 veces en contraste con lo realmente requerido para desalinizar un suelo.

Díaz (1988), comparando 10 metodologías sobre el lavado de suelos las cuales fueron las recomendadas por la Escuela Pedológica Americana (manual 60), las de la Escuela Pedológica Soviética (Volobuyev y Pannin) y las propuestas por el autor de esta investigación. Concluye que no se recomienda utilizar las ecuaciones propuestas por el manual 60 del U.S.D.A. porque sobrestimar o subvalúan la lámina de lavado; se recomienda usar la metodología de lavado derivada de ecuaciones potenciales o semilogarítmicas obtenidas del laboratorio de salinidad del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera (CENID-RASPA) por dar valores de la lámina de lavado que coadyuvan a ahorros de agua y desplazamiento eficiente del exceso de sales solubles; dichas formulas son las siguientes:

$$N = \eta \text{ Log } (S_i/S_o)^\alpha$$

Donde: N = Norma de lavado ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

η = volumen poroso a capacidad de saturación.

S_i = concentración inicial de sales (%).

S_o = concentración residual de sales (%).

α = coef. de lixiviación a determinar en condiciones de campo.

Log = logaritmo base 10.

$$N = \eta K \ln(S_i/S_o)$$

Donde: N = normal de lavado $m^3 ha^{-1}$

η = volumen poroso a capacidad de saturación.

S_i = concentración inicial de sales (%).

S_o = concentración residual de sales (%).

Ln = logaritmo base e.

K = 1.01 para suelos salino sódicos-clorhídricos (obtenidos en laboratorio)

$$N = a\eta [(S_i - S_o)^b / S_i]$$

Donde: N = normal de lavado ($m^3 ha^{-1}$).

η = volumen poroso a capacidad de saturación.

S_i = concentración inicial de sales (%).

S_o = concentración residual de sales (%).

a y b = parámetros de lixiviación obtenidos experimentalmente.

CONCLUSIONES

En suelos sódicos o salino sódicos que contienen carbonatos de calcio, de los mejoradores químicos evaluados el ácido sulfúrico es el que ha dado mejores resultados.

En suelos sódicos o salino sódicos que no contienen carbonatos de calcio, la aplicación de yeso es más eficiente que el ácido sulfúrico.

La aplicación de ácido sulfúrico a concentraciones altas, no solo incrementa las concentraciones electrolíticas por un cierto periodo, sino también disuelve el Fe, Al y P, lo cual ayuda a estabilizar la estructura del suelo.

Considerando el costo actual por ha para substituir un meq de Na, el ácido sulfúrico es el mejorador químico más económico para recuperación de suelos sódicos con características calcáreas.

La mayor parte de los trabajos de investigación de evaluación de mejoradores químicos se han efectuado bajo condiciones de laboratorio principalmente en columnas de suelo alterado, y manteniendo una carga o lámina constante de agua para el lavado, lo cual es difícil mantener en el campo.

Se ha determinado que las ecuaciones propuestas por el manual 60 del U.S.D.A. sobre estiman o subevalúan la lámina de lavado, en cambio las ecuaciones potenciales o semi-logarítmicas obtenidas en el laboratorio de salinidad del CENID-RASPA, son más adecuadas ya que con éstas se tienen ahorros de agua y un desplazamiento más eficiente de sales solubles.

No obstante que a la fecha se han demostrado las bondades de la utilización de mejoradores biológicos y biofertilizantes en comparación con los mejoradores químicos, muchos de estos

estudios no muestran el análisis económico del costo de la utilización de estos métodos en comparación con los mejoradores químicos.

La fitoremediación y el uso de biofertilizantes o inoculantes en la recuperación de suelos sódicos y salino sódicos calcáreos, constituye una alternativa ecológica factible para no contaminar el medio ambiente y lograr una producción sustentable de los cultivos.

LITERATURA CITADA

1. Abrol, I. P., J. S. P. Yadav and F. T. Massoud. 1988. *Reclamation and management. In: salt affected soil and their management.* FAO soil Bulletin, 39, 131 p.
2. Aceves N., E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 1981. los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación, México. Patronato Universitario de la Universidad Autónoma de Chapingo.
3. Bollag, J. M., T. Mertz and L. Otjen. 1994. *Role of microorganisms in soil bioremediation. In: Bioremediation through rhizosphere. Technology.* (Eds). T. A. Anderson, J. R. Coats cap 1, 2-10.
4. Cabrera, G. R. 1992. Fundamentos de las medidas para el mejoramiento y la recuperación de los suelos salinos del Valle de Guantánamo. Tesis para optar por el grado de Dr. en ciencias agrícolas. MINAZ, INICA, 116 p.
5. Cervantes R, M. 1983. La lixiviación de las sales en suelos salinos sódicos del Valle de Mexicali, durante un proceso de lavado, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
6. Cinco C., R. A., M. Ponce J. y F. Carrillo M. 1990. Rehabilitación de suelos salinos y salino sódicos con el cultivo de arroz en el DDR002 Rio Colorado. *In: Resúmenes del XXIII congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.* Toreón Coahuila (Región Lagunera) México. 261 p.
7. Conacher, A. J. 1990. Salt of the earth. *Secondary soil salinization in the Austrationwheat bilt.* Environment. 32, 9-42.
8. Del Cristo, G. P. 1982. Establecimiento de relaciones funcionales en láminas de lavado, sales desplazadas y sales residuales en los suelos salinos. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

9. Díaz E., L. F. 1986. Descripción de las regularidades del proceso de lavado de los suelos salinos. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Chapingo, México.
10. Díaz E., L. F. 1988. Comparación de metodologías para recuperar un suelo salino. Informes de Investigación del CENID-RASPA INIFAP. Gómez Palacio, Dgo. México.
11. Flores D. A., V. Gálvez V., O. Hernández L., J. G. López A., A. Obregón S., R. Orellana G., L. Otero G., y M. Valdés P. 1993. Salinidad: Un nuevo concepto. Ed. Universidad de Colima. 137 p.
12. Froto M., M. de L. 1988. Evaluación de Mejoradores de suelos. Informes de Investigación del CENID-RASPA INIFAP. Gómez Palacio, Dgo., México.
13. Garland, J. L. 1996. *Patterns of potential C source utilization by rhizosphere communities*. Soil Biol. Biochem. 28, 223-230.
14. Gharaibeth, M. A., N. I. Etaif and S. H. Shady. 2012. *Desalination and desodification curves of highly saline-sodic soil amended with Phosphoric acid and by product gypsum*.
15. Gupta, R. J. and I. P. Abrol. 1990. *Reclamation and management of alkali soils*. India Journal of Agricultural Science, 60, 10 -16.
16. Gupta, R. K. and R. R. Singh. 1988. *A comparative evaluation of the reclamation efficiency of surface concentrated versus internally incorporated calcium - chloride and gypsum in an Alkali Soil*. Soil Sci; 146, 277 - 283.
17. Hanson, B., S. Grattan and A. Fulton. 1993. *Agricultural salinity and drainage*. Universidad of California Irrigation Program University of California, Davis. 125 p.
18. Hernández L., O. 2000. Uso de métodos químico-biológicos como mejoradores de la conductividad hidráulica en un suelo salino sódico. Tesis de doctorado, Universidad de Colima, Colima, México.
19. Horowitz, N., E. J. Meurer y Enofre. 2005. *Uso de exofre elemental como fertilizante*. In: *Informacoes Agronomicas* N° 12 Dezembro POTAFOS.

20. Kennedy, A. C. and K. L. Smith. 1995. *Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils*. Collins, H. P., G. P. Robertson and M. J. Klug. (Eds) *The significance of soil biodiversity* (75-86). Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.
21. Kennedy, A. C. and V. L. Gewin. 1997. *Soil Microbial diversity: Present and future considerations*. *Soil Science*, 162, 607-617.
22. Kochba, M., G. Ritvo and Y. Avnimelech. 2004. *The effect of municipal solid waste compost (msw) on the replacement of sodium in sodic soil models*. *Soil Science*. 169: 567-572.
23. Korentager, L. and V. Mokwunge, 1981. *The use of sulfur containing materials for improving the properties of sodic (Sodium-Affected) soils*. In: Primer Simposio sobre uso de azufre para el desarrollo de modernización de la agricultura latina. México, D.F.
24. Lax, A., E. Diaz, V. Castillo and J. Albaladejo. 1994. *Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by Organic Amendment*. *Arids Soil Research and Rehabilitation*. 8, 9 - 17.
25. Longo, A., J. Ferrato, M. C. Mondino y R. Grasso. 2005. Incorporación de azufre y yeso en suelo salino sódico: su efecto sobre el rendimiento y calidad de lechuga bajo invernadero. *Ciencias Agrícolas* 4(1-2).
26. Martín del Campo C., A. 1988. Evaluación del mejoramiento de suelos salino sódicos, utilizando yeso y ácido sulfúrico a distintos valores de lamina de lavado. Tesis de Maestría. Centro de Investigación de Graduados Agropecuarios, Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Gómez Palacio, Dgo. México.
27. Martínez R. de C., E 1988. Evaluación de la eficiencia de seis mejoradores químicos a tres láminas de lavado en un suelo salino sódico. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Gómez Palacio, Dgo. México.
28. Miyamoto, S. and C. Enriquez. 1990. *Comparative effects of chemical amendments on salt and Na leaching*. *Irrig. Sci.* 11,

- 83-92. Mohite, A. V. and A. K. Shingte. (1981).
29. Miyamoto, S. and J. L. Stroehlein. 1986. *Sulfuric Acid Effects on water Infiltration and Chemical Properties Of Alkaline Soils and Water*. Transactions of the ASAE 29: 1288-1296.
30. Mueller, T. G., B. Mijatovic, B. G. Sears, N. Pusulorin and T. S. Stombaugh. 2004. *Soil electrical conductivity map quality*. Soil Science. 169: 841-851.
31. Parkin, T. B. 1993. *Spatial variability of microbial processes in soil-ArcView*. J. Environ. Qual. 22, 409-417.
32. Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Segunda edición. Editorial Agrícola Española, S. A. Madrid, 542 p.
33. Qadir, M., J. D. Oster, S. Shubert, A. D. Noble and K. L. Sahrawat. 2007. *Phytoremediation of sodic and saline sodic soils*. Advances in Agronomy, 96: 97-247.
34. Richards, L. A. (editor) 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Ed. Limusa, México.
35. Redly, M. 1986. Métodos para la determinación de la concentración total y la composición iónica de las sales solubles totales de los suelos. Cien. Agr. 26, 114-131.
36. Rivera G., M., J. Estrada A. y R. Trucíos C. 2009. Evaluación de cultivos para la recuperación de un suelo sódico calcáreo. *In: XXI Semana Internacional de Agronomía, Gómez Palacio Durango. México. 417-422 pp.*
37. Rivera G., M. 2012. Aprovechamiento eficiente del agua residual tratada y disminución de los problemas de salinidad y erosión del bosque Filadelfia. Informe Final de Investigación FOMIX - DGO.
38. Robbins, C. W. 1986. *Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops*. Agron. J. 78: 916-920.
39. Santamaría C., J., D. Reta S., F. J. Chavez G. J. A. Cueto W. Y J. I. R. Paredes R. 2006. Caracterización del medio físico en relación a cultivos forrajeros alternativos para la Comarca lagunera. Libro Técnico N° 2 INIFAP. CELALA.

40. Secretaría de Fomento Agropecuario. 2009. Estudio Bibliográfico sobre la salinidad del Valle de Mexicali. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural sustentable del Valle de Mexicali (ODEIRUS), Baja California, México. 27 p.
41. Suárez, D. L. 1989. *Impact of Agricultural practices on groundwater salinity*. Agriculture Ecosystems y Enviroment 26, 215 – 227.
42. Shukla, M. K., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. *Soil quality indicators for the north Appalachian experimental watersheds in Coshocton, Ohio*. Soil Science. 169:195-205.
43. Szabolcs, I. 1994. *Soils and salinization In: Handbook of Plant and Crop. Stress*. M. Pessarakli, Ed. New York: Marcell Dekker pp. 3-11.
44. Tabatabai, M.A. 2005. *Chemistry of sulfur in soils. In Chemical Processes in soils*. Tabatabai, M .A. and D. L. Sparks (Co-editores). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
45. Thellier, C., K. N. Hotzslow, J. D. Rhoades y G. Sposito. 1990a. *Chemical effects of saline irrigation water on a San Joaquin valley soil: II, Field soil sample*. Journal of Environmetal Quality, 19, 50-55.
46. Thellier, C., G. Sposito, y K. N. Hotzslow. 1990b. *Chemical effects of saline irrigation water on a San Joaquin Valley Soil.I.Column studies*. Journal of Environmental Quality, 19, 50-55.
47. Torres, D., M y M. B. Rodríguez. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. *In: Simposium de Fertilidad*. IPNI Cono Sur. Fertilizar Asociación Civil. Rosario, Pcia. De Santa Fé, Argentina.
48. Tyagi, N. K. 2000. *Management of salt-affected soils. In: G. B. Singh & B. R. Sharma, eds. Fifty years of natural resource management research*, pp. 363–401. New Delhi, Indian Council of Agricultural Research.
49. Yadav, J. S. P. 1993. *Problems and prospects of crop*

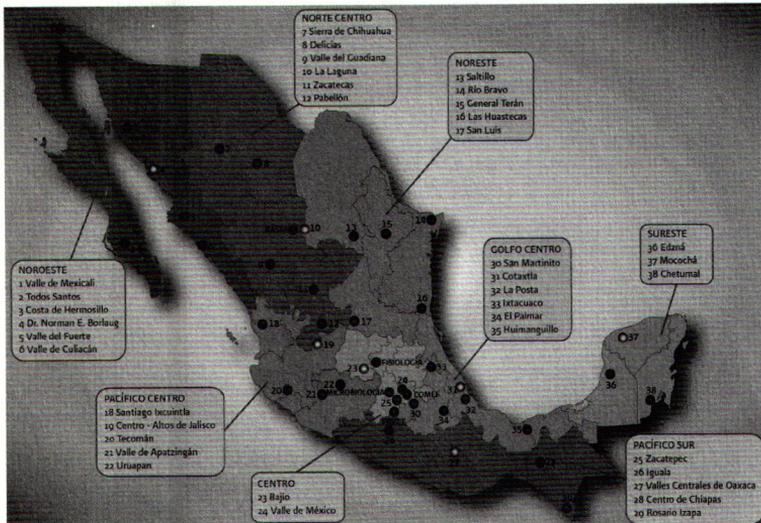
productions and afforestation on salt affected soils with special reference to India. Agrokemia e's Talajtán, 42(1-2), 157-172.

50. Zúñiga E., O., J. C. Osorio S., R. Cuero G. y J. A. Peña O. 2011. Evaluación de tecnologías para la recuperación de suelos degradados por salinidad. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellin pp. 5769-5779.

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



Comité Editorial del CENID-RASPA

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong

Secretario: Dr. Miguel A. Velásquez Valle

Vocales: Dr. Juan Estrada Ávalos
M.C. Miguel Rivera González

Revisores Técnicos

Dr. Pablo Preciado Rangel

Dr. Rogelio Armando Aldaco Nuncio

Diseño:

Ing. Alan J. Servín Prieto

La presente publicación se terminó de imprimir en Septiembre de 2012 en la imprenta Carmona, Impresores. Calzada Lázaro Cárdenas No. 850, Col. Eduardo Guerra, Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 500 ejemplares

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
DISCIPLINARIA RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-
ATMÓSFERA**

DR. JOSÉ ANTONIO CUETO WONG

Director

ING. ARMANDO ESTRADA GONZÁLEZ

Jefe de Operación

LIC. FLOR CARINA ESPINOZA DELGADILLO

Jefe Administrativo

PERSONAL INVESTIGADOR

Bueno Hurtado Palmira

Burgos Córdova David Aarón

Catalán Valencia Ernesto Alonso

Cerano Paredes Julián

Cerda Cerda Alma Yadira

Cervantes Martínez Rosalinda

Constante García Vicenta

Delgado Ramírez Gerardo

Esquivel Arriaga Gerardo

Estrada Ávalos Juan

González Barrios José Luis

González Cervantes Guillermo

Inzunza Ibarra Marco Antonio

Macías Rodríguez Hilario

Muñoz Villalobos Jesús Arcadio

Potisek Talavera María del Carmen

Rivera González Miguel

Román López Abel

Sánchez Cohen Ignacio

Trucíos Caciono Ramón

Velásquez Valle Miguel Agustín

Villa Castorena María Magdalena

Villanueva Díaz José

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT Gobierno del Estado de Durango y al Instituto Municipal de Ecología y Protección al Ambiente de Gómez Palacio, Dgo., por su apoyo económico brindado para la realización del proyecto titulado: "Aprovechamiento Eficiente del Agua Residual Tratada y Disminución de los problemas de Contaminación Salinidad y Erosión del Bosque Filadelfia", proyecto bajo el cual se elaboró el presente folleto técnico.



Vivir Mejor

www.gobiernofederal.gob.mx
www.sagarpa.gob.mx
www.inifap.gob.mx

inifap