

# USO DE YESO PARA UNA AGRICULTURA ORGÁNICA

## SUSTENTABLE EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

Raúl López-Aguilar, Guadalupe Rodríguez-Quezada, Arturo Naranjo-Murillo,  
Luis F. Beltrán-Morales, Enrique Troyo-Diéguéz, Agustín Casanova-Cruz y Ofelia Peralta-Patrón

### RESUMEN

Se evaluó el efecto del yeso en la prevención de la sodificación en suelos de sistemas agrícolas orgánicos del noroeste de México. Se determinó la relación entre salinidad, alcalinidad y requerimiento de yeso directamente en campo. Los resultados indican que los suelos del noroeste de México necesitan entre 4 y 40 t·ha<sup>-1</sup> de yeso para prevenir o remediar la sodificación. Para evaluar el efecto del yeso en la sodificación del suelo y comportamiento de cultivos se aplicó 0, 2, 4 y 8 t·ha<sup>-1</sup> de yeso en siembras de calabacita, repollo, lechuga, betabel y pepino tres días antes del trasplante, y al inicio de floración en naranjos. Se colectaron muestras de suelos antes y después de tres meses de la aplicación del yeso. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se redujo gradualmente al incrementar el yeso,

mientras que la reducción en el pH fue mayor con 8 t·ha<sup>-1</sup>. La conductividad eléctrica (CE) aumentó con la aplicación de yeso en todos los terrenos, más evidente en los menos salinos. El yeso incrementó significativamente la capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> intercambiable, siendo su mayor efecto en suelos con más materia orgánica. El intercambio de Ca por Mg fue la reacción dominante. El incremento en rendimiento de las hortalizas evaluadas puede tener poca importancia económica pero, considerando principios de agricultura sustentable tales como mantenimiento de la salud del suelo y productos de mayor valor nutricional (aminoácidos, azúcares, proteínas, menos nitratos) relacionados con SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Ca<sup>2+</sup>, la aplicación de yeso en estos ecosistemas es importante.

### Introducción

Una premisa fundamental de la agricultura orgánica es fortalecer la actividad microbiana en el suelo y mantener a éste balanceado en nutrientes mediante aportaciones de sustancias orgánicas, en lugar de alimentar directamente a los cultivos con fertilizantes solubles (Watson *et al.*, 2002) que tarde o temprano dañan sus propiedades físico-químicas.

Sin embargo, los críticos de la corriente orgánica argumentan que no hay suficientes fertilizantes que cumplan las normas que rigen este sistema de producción, por lo que es indispensable aumentar considerablemente la superficie cultivada para lograr cosechar grandes cantidades de alimentos orgánicos (Trewavas, 2002).

En zonas áridas y semiáridas, como el noroeste de México, la producción orgánica

está limitada por la escasez de nitrógeno en el suelo (López *et al.*, 2003; Giese *et al.*, 2011). Para enfrentar este inconveniente se aplican abonos que proceden de restos de cosechas, estiércoles de animales, composta y vermicompost, y se establecen cultivos de leguminosas para fijar nitrógeno (N) biológicamente, incorporándolos como abonos verdes. El compost y vermicompost son los más utilizados en la agricultura orgánica,

pero su bajo contenido de N, que varía de 1 a 4% (Chaney *et al.*, 1992) obliga a los productores de zonas áridas y semiáridas a la aplicación de elevadas cantidades por hectárea cultivada, encareciendo sustancialmente el proceso. Una de las estrategias que se propone para resolver la escasez de N en estas zonas es el establecimiento de leguminosas para fijación biológica de N (FAO, 1993). Sin embargo, su efectividad se encuentra

### PALABRAS CLAVE / Agricultura Sustentable / Sodicidad / Yeso / Zonas Áridas /

Recibido: 29/03/2012. Modificado: 04/07/2012. Aceptado: 17/07/2012.

**Raúl López-Aguilar.** Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), México. Ph.D. en Ciencias de los Biorecursos, Universidad de Tottori, Japón. Investigador, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR), México. Dirección: Mar Bermejo N° 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. México. CP 23090. e-mail: daguilard04@cibnor.mx  
**Guadalupe Rodríguez-Quezada.** Ingeniera Agrónoma, UABCS,

México. Técnica, CIBNOR, México.  
**Arturo Naranjo-Murillo.** Técnico Agrícola, Centro de Estudios Tecnológicos del Mar. Técnico del Programa de Agricultura en Zonas Áridas del CIBNOR, México.  
**Luis Felipe Beltrán Morales.** Licenciado en Economía, UABCS, México. Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile. Investigador, CIBNOR, México. e-mail: lbeltran04@cibnor.mx

**Enrique Troyo-Diéguéz.** M.Cs. en Uso y Conservación del Agua y Suelo, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Doctor en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Investigador, CIBNOR, México. e-mail: etroyo04@cibnor.mx  
**Agustín Casanova Cruz.** Ingeniero Mecánico, Instituto Regional N° 7 de Cd. Madero, México. Maestría en Administración, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Maes-

tría en Desarrollo Organizacional, Universidad de Monterrey (UM), México. Director General, Compañía Occidental Mexicana, S.A. de C.V. (COMSA). e-mail: agustin.casanova@comsamexico.com.mx  
**Ofelia Peralta Patrón.** Ingeniera Mecánica Electricista, Universidad Autónoma de Baja California, México. Maestría en Administración de la Calidad Integral, UM, México. Directora, Planta Yeso Agrícola, COMSA, México. e-mail: ofelia.peralta@comsamexico.com.mx

## THE USE OF GYPSUM FOR A SUSTAINABLE ORGANIC AGRICULTURE IN ARID AND SEMIARID ZONES

Raúl López-Aguilar, Guadalupe Rodríguez-Quezada, Arturo Naranjo-Murillo, Luis F. Beltrán-Morales, Enrique Troyo-Diéguez, Agustín Casanova-Cruz and Ofelia Peralta-Patrón

### SUMMARY

The use of gypsum for preventing soil sodification in organic agricultural systems was evaluated in Northwestern Mexico. The relationship between salinity, alkalinity and gypsum requirements was determined by direct measurements on the field. Results indicate that in Northwestern Mexico soils need from 4 to 40t-ha<sup>-1</sup> of gypsum for the prevention or remediation of soil sodification. To evaluate the effect of gypsum on soil sodification and crop response 0, 2, 4 and 8t-ha<sup>-1</sup> of gypsum were applied before transplanting pumpkin, cabbage, lettuce, beet and cucumber, and to orange trees at the start of flowering. Soil samples were collected before and three months after gypsum treatments. The exchangeable sodium percentage (ESP) was reduced gradually as gypsum dose was increased,

while the pH reduction was most marked when applying 8t-ha<sup>-1</sup>. In all experimental fields electrical conductivity (EC) increased by gypsum application but more so in the less saline soils. Gypsum significantly increased cationic exchange capacity (CEC), exchangeable Ca<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup>, the effect being more pronounced in soils with higher organic matter content. Ca for Mg exchange was the dominant reaction. The yield increase of vegetables evaluated may be of little economic importance, but considering principles of sustainable agriculture such as maintenance of soil health and products with higher nutritional value (amino acids, sugars, proteins, less nitrate) related to SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Ca<sup>2+</sup>, the application of gypsum in these ecosystems is important.

## USO DE GESSO PARA UMA AGRICULTURA ORGÂNICA SUSTENTÁVEL EM ZONAS ÁRIDAS E SEMIÁRIDAS

Raúl López-Aguilar, Guadalupe Rodríguez-Quezada, Arturo Naranjo-Murillo, Luis F. Beltrán-Morales, Enrique Troyo-Diéguez, Agustín Casanova-Cruz e Ofelia Peralta-Patrón

### RESUMO

Avaliou-se o efeito do gesso na prevenção da sodificação em solos de sistemas agrícolas orgânicos do noroeste do México. Determinou-se a relação entre salinidade, alcalinidade e requerimento de gesso diretamente em campo. Os resultados indicam que os solos do noroeste de México necessitam entre 4 e 40t-ha<sup>-1</sup> de gesso para prevenir ou remediar a sodificação. Para avaliar o efeito do gesso na sodificação do solo e comportamento de cultivos se aplicou 0, 2, 4 e 8t-ha<sup>-1</sup> de gesso em plantações de abobrinha, repolho, alface, beterraba e pepino três dias antes do transplante, e no início da floração em laranjeiras. Recolheram-se amostras de solos antes e depois de três meses da aplicação do gesso. A porcentagem de sódio intercambiável (PSI) se reduziu gradualmente ao incrementar o

gesso, enquanto que a redução no pH foi maior com 8t-ha<sup>-1</sup>. A condutividade elétrica (CE) aumentou com a aplicação de gesso em todos os terrenos, mais evidente nos menos salinos. O gesso incrementou significativamente a capacidade de intercâmbio catiônico (CIC), Ca<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> intercambiável, sendo seu maior efeito em solos com maior quantidade de matéria orgânica. O intercâmbio de Ca por Mg foi a reação dominante. O incremento em rendimento das hortaliças avaliadas pode ter pouca importância econômica, mas considerando princípios de agricultura sustentável tais como manutenção da saúde do solo e produtos de maior valor nutricional (aminoácidos, açúcares, proteínas, menos nitratos) relacionados com SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Ca<sup>2+</sup>, a aplicação de gesso nestes ecossistemas é importante.

limitada por la poca disponibilidad de agua de riego y las fechas de siembra de los cultivos de interés comercial. Por otro lado, el cultivo orgánico de hierbas aromáticas es muy común, pero la mayoría son perennes y no es posible cultivar anualmente abonos verdes para incrementar el N en el suelo para beneficio de este tipo de plantas.

La mayoría de los productores orgánicos del noroeste de México trabajan mediante contratos con empresas establecidas en los EEUU. Esto significa que deben emplear cantidades elevadas de abonos nitrogenados permitidos para tener la seguridad de producir

orgánicamente en una escala muy grande y competitiva. Estos abonos no siempre cumplen con el concepto de una agricultura sustentable y la conservación del suelo, pero cumplen con los requisitos de las normas establecidas para el mercado orgánico de los EEUU. Algunos de los insumos nitrogenados comúnmente utilizados en la agricultura orgánica son la harina de pescado, harina de sangre, estiércol semilíquido o purines, y nitrato chileno. Aunque estos abonos son ricos en N (Hartz y Johnstone, 2006) y permiten obtener altos rendimientos en los suelos de las zonas áridas y semiáridas,

también contienen altas concentraciones de sodio (Abdurrahman *et al.*, 2004) que destruye la estructura del suelo, compacta la superficie y reduce la tasa de infiltración del agua de riego (Halliwell *et al.*, 2001; Misra y Sivongxay, 2009). El yeso (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O) no solamente previene y corrige los problemas que ocasiona el Na en los suelos, como los mencionados anteriormente, sino que también contribuye a la nutrición eficiente de las plantas. La aplicación de yeso produce un mayor aprovechamiento de otros nutrientes esenciales. El N y el P son absorbidos más eficientemente cuando el suelo tiene suficien-

te cantidad de S y Ca. En el noroeste de México se han registrado incrementos de 4 a 10 veces en el rendimiento de forrajes fertilizados con P con un nivel adecuado de S y Ca (Zúñiga-Escobar *et al.*, 2011).

La aplicación de yeso para reducir los riesgos de sodificación en los suelos es practicada en algunas regiones áridas y semiáridas (Gharaibeh, 2009; Rhoton y McChesney, 2011). Con su aplicación se mejoran las propiedades del suelo al desplazar el Na<sup>+</sup> y ocupar estos sitios de intercambio con Ca<sup>2+</sup>, aumentando la fuerza iónica alrededor de las partículas del suelo y por la formación de complejos

iónicos con  $\text{SO}_4^{-2}$  durante la solubilización del yeso (Renjasamy y Olsson, 1991). Se ha generado abundante información sobre los beneficios de la utilización del yeso en diferentes países, pero su evaluación como insumo orgánico capaz de mitigar o prevenir el proceso de sodificación en sistemas agrícolas orgánicos establecidos en zonas áridas y semiáridas ha sido poco explorada y documentada. Además, el uso inevitable de agua de riego de baja calidad por su contenido de NaCl en la agricultura de las zonas áridas y semiáridas, obliga a los productores a implementar estrategias para prevenir la sodificación de los suelos. Por tanto, en el presente trabajo se planteó como objetivo general evaluar el efecto del yeso agrícola en la remediación y prevención de la sodificación de suelos. Específicamente, los estudios se enfocaron a determinar requerimiento de yeso agrícola, remediación de suelos sódicos y respuesta de algunos cultivos a la aplicación de yeso agrícola en sistemas orgánicos del noroeste de México.

## Materiales y Métodos

### Zona experimental

El estudio se realizó en diversos sitios localizados en el noroeste de México. Los suelos de esta zona se clasifican en su mayoría como Aridisoles (Endo *et al.*, 2000), en los que es común encontrar problemas de salinidad en aguas de riego y suelos que están disminuyendo la capacidad productiva de los terrenos agrícolas. La zona noroeste representa el 60% del país y se caracteriza por una precipitación anual baja, entre 0 y 600mm; temperaturas generalmente elevadas, hasta 48°C; y una alta evaporación, hasta 4000mm anuales. Estas características ocasionan que se acumulen con facilidad sales en los terrenos agrícolas, ya que el movimiento de agua a través del perfil del suelo es mínimo.

TABLA I  
CULTIVOS Y ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUELOS DE LOS SITIOS SELECCIONADOS ANTES DE APLICAR TRATAMIENTOS

Cultivo	P. Exp m <sup>2</sup>	Rep r	Sitio (Estado)	Textura	MO %	PSI %	pH (H <sub>2</sub> O) rel. 1:2	CE dS·m <sup>-1</sup>
Calabacita	30	6	San Joaquín (BC)	Franco limoso	0,82	19	8,43	1,96
Repollo	36	4	Vizcaíno (BCS)	Franco arenoso	0,47	38	9,35	2,36
Lechuga	36	6	Mulegé (BCS)	Franco	0,88	12	8,45	1,27
Betabel	36	6	Mulegé (BCS)	Franco	0,73	11	8,52	1,30
Naranja	48	4	S. Domingo (BCS)	Franco limoso	0,44	34	9,22	1,18
Pepino	36	4	El Carrizal (BCS)	Franco	0,79	14	8,46	0,96

P. Exp: parcela experimental, Rep: repeticiones, MO: materia orgánica, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, CE: conductividad eléctrica.

### Origen del yeso de los tratamientos

El yeso utilizado en el estudio es procesado por Compañía Occidental Mexicana, S.A., (COMSA), localizada en Isla San Marcos, Baja California Sur, México. Actualmente COMSA es la empresa con mayor potencial productor y principal exportadora de roca de yeso en el mundo. La compañía fue constituida en 1923 y posee yacimientos a cielo abierto originados hace alrededor de  $200 \times 10^6$  años como resultado de depósitos marinos cuando la isla sobre la que están era parte de las inmensas extensiones oceánicas. Durante este período algunos mares se secaron dejando lechos de yeso que se recubrieron para ser descubiertos posteriormente por el hombre. El yeso es comercializado por COMSA con fines agrícolas, y el utilizado en este estudio contiene 22,5% de Ca y 17,5% de S.

### Evaluación del yeso agrícola en la remediación de suelos sódicos

Para evaluar el efecto del yeso agrícola en la remediación y prevención de la sodificación de los terrenos se seleccionaron sitios con diferentes niveles de sodicidad del suelo y se cultivaron en ellos distintas especies de hortalizas y frutales. Las dimensiones de las parcelas experimentales no fueron iguales para todos los cultivos, pero sí se conservaron las mismas dimensiones en la superficie concedidas a tra-

tamientos y parcela útil dentro de cada cultivo (Tabla I).

Los tratamientos consistieron de tres dosis de yeso agrícola (2, 4 y 8t·ha<sup>-1</sup>) y un testigo sin aplicación de yeso. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. La aplicación de yeso agrícola se realizó en una sola vez, tres días antes del trasplante para las hortalizas y a inicio de floración en el cultivo de naranjos. Las dosis correspondientes en las parcelas experimentales se distribuyeron en forma manual y se incorporaron en los primeros 20cm mediante dos pasos de rastra. Las dimensiones de las parcelas experimentales fueron variables en los sitios seleccionados y las formaron de cuatro a seis surcos de 8-10m, dependiendo del sitio y cultivo en las hortalizas, mientras que en los naranjos se consideraron parcelas experimentales líneas comprendidas por 10 individuos. La separación entre surcos para las hortalizas fue de 0,8m. La separación entre plantas para calabacita, repollo, lechuga, repollo y pepino fue de 0,4m, mientras que en betabel se separaron 0,2m. El marco de plantación de los naranjos fue de 4×6m. Como parcela útil se consideraron solo los dos surcos centrales en las hortalizas y los seis arboles centrales en los naranjos. En las hortalizas se utilizó riego por goteo aplicando una lámina de riego promedio de 8mm cada tercer día, mientras que los naranjos se regaron con micro-aspersores y aportando una lámina de 18mm

cada cinco días. En algunos sitios las aplicaciones de agua se llevaron a cabo con base en lecturas de tensiómetros colocados a 30cm de profundidad en el suelo. De manera general, los suelos se mantuvieron en una condición de humedad de capacidad de campo con un contenido de humedad >50% en base a peso seco.

### Muestreo de suelo y análisis químico

Para determinar la relación entre salinidad, alcalinidad y requerimiento de yeso agrícola, el pH (HI 99121, Hanna) y la conductividad eléctrica (HI 993310, Hanna) del suelo de zonas agrícolas de Baja California, Baja California Sur y Sonora se determinaron directamente en campo utilizando equipo portátil y siguiendo los procedimientos indicados por el fabricante. El pH y la conductividad eléctrica (CE) se midió en un extracto suelo:agua en proporción (v:v) 1:2. Los requerimientos de yeso agrícola se cuantificaron utilizando un kit de análisis (Hanna, HI 38083) que está basado en el método de laboratorio propuesto por USDA (1954).

En los sitios donde se establecieron parcelas experimentales con hortalizas y frutales, el muestreo de los suelos fue realizado antes y después de tres meses de haberse aplicado los tratamientos. Se colectaron muestras de suelo en los valles agrícolas de San Joaquín, Vizcaíno, Mulegé, Santo Domingo y El Carrizal, localizados en dos estados del noroeste de

México: Baja California y Baja California Sur. El muestreo fue sistemático, en zig-zag, y se obtuvieron muestras compuestas (10 submuestras/muestra compuesta) representativas a profundidad de 0-30cm. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron con una malla de 2mm para remover los fragmentos gruesos y posteriormente se almacenaron hasta el momento de su análisis químico.

La densidad aparente fue evaluada por medio del método del cilindro, mediante tres repeticiones en cada parcela. El pH y CE del suelo se midió en extracto en agua (suelo:solución 1:2). La materia orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (1934). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se cuantificó por el método de acetato de amonio con pH de 7,0 (Rhoades, 1982) y los cationes intercambiables se determinaron por espectroscopía de absorción atómica.

#### Diagnóstico nutricional

Para el diagnóstico nutricional se realizó el muestreo foliar después de 54-60 días de aplicados los tratamientos en las hortalizas, mientras que en los árboles de naranjo este se llevo a cabo 85 días después de la aplicación del yeso agrícola. En calabaza y pepino se colectaron hojas recientemente maduras en la etapa de cuarta cosecha; en betabel hojas recientemente maduras al momento de cosecha; en repollo y lechuga se colectaron cabezas formadas; y en naranjos hojas de 4-6 meses de edad de la parte media de brotes no fructíferos. Las muestras fueron lavadas con agua destilada y frotadas con papel toalla para eliminar el agua adherida. Posteriormente se secaron a 70°C en un horno de convección forzada (Yamato, DK 85) durante tres días. Las muestras de materia seca se pulverizaron con un molino de café (Mr.Coffee Products, IDS57) suficientemente para pasar una criba de 1mm. Posteriormente se llevaron a cabo los análisis minerales. Ca, Mg,

K y Na fueron extraídos mediante mezcla de  $H_2SO_4:HNO_3:HClO_4$  en proporción 1:10:4 (v/v) y su contenido estimado por espectrofotometría de absorción atómica (Shimadzu, AA-660). Los sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) fueron extractados con agua hirviendo y sus concentraciones se determinaron por cromatografía de iones (Shimadzu, HIC-6A).

#### Diseño experimental y análisis estadístico

Los experimentos en los distintos sitios fueron establecidos en un diseño de bloques completos al azar en los cuales las repeticiones de los tratamientos variaron de 4 a 6. Para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS versión 9.1 (SAS, 2002). Los datos obtenidos de las variables medidas fueron sometidos a análisis de varianza y cuando se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, las medias se separaron utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey. Utilizando el mismo paquete estadístico se aplicó un análisis de correlación entre los requerimientos de yeso y el pH del suelo.

#### Resultados y Discusión

##### Requerimiento de yeso agrícola

Desde hace muchos años se han reportado los efectos benéficos de la aplicación de yeso en suelos alcalinos (Loveday, 1976; Armstrong y Tanton, 1992; Gharaibeh *et al.*, 2009), pero en aquellas zonas donde no se tienen recomendaciones concretas, como es el caso del noroeste de México, es importante que mediante experimentos sencillos de campo se genere información que permita determinar la cantidad de yeso agrícola necesaria para reducir la alcalinidad y mejorar el desarrollo de los cultivos. En la Tabla II se presenta una relación entre salinidad, al-

TABLA II  
REQUERIMIENTO DE YESO AGRÍCOLA DE ACUERDO AL GRADO DE SALINIDAD Y ALCALINIDAD EN TERRENOS AGRÍCOLAS LOCALIZADOS EN EL NOROESTE DE MÉXICO

Salinidad CE: dS·m <sup>-1</sup>	Alcalinidad pH: H <sub>2</sub> O,rel. 1:2	RYeso tha <sup>-1</sup>	Muestras N	Ecuación	R <sup>2</sup>
0 - 2	7,00 - 7,85	0,0 - 4,1	16	y = 5,26x -36,32	0,5229
	7,86 - 8,79	4,8 - 11,8	37	y = 6,04x -41,54	0,5950
	8,80 - 9,60	7,3 - 18,1	33	y = 9,10x -70,36	0,6282
2 - 4	7,00 - 7,85	1,5 - 7,6	17	y = 6,96x -46,25	0,5017
	7,86 - 8,79	7,5 - 18,4	35	y = 9,89x -69,66	0,6756
	8,80 - 9,60	11,3 - 20,4	27	y = 9,28x -69,12	0,6540
4 - 6	7,00 - 7,85	3,0 - 8,7	19	y = 5,71x -37,14	0,6620
	7,86 - 8,79	7,4 - 28,6	33	y = 17,34x -127,8	0,7141
	8,80 - 9,60	15,6 - 39,3	29	y = 25,32x -207,0	0,6303

CE: conductividad eléctrica, RYeso: requerimiento de yeso, N: número de muestras.

calinidad y requerimiento de aplicación de yeso agrícola para suelos de tres estados del noroeste de México.

El 80% de las mediciones directas efectuadas en campo revelan que el pH de los suelos se encuentra en el intervalo de 7,86 a 9,60, clasificándose de alcalinos a muy alcalinos (USDA-SSDS, 1993). Esto indica que la mayoría de los cultivos que se establecen sufren una reducción en su potencial de producción, ya que el pH del suelo está muy relacionado con la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Solamente un número muy reducido de cultivos de importancia socioeconómica, tales como betabel, cebada, algodón, palma datilera y olivo, están adaptados a esos niveles de alcalinidad y sus rendimientos no son afectados significativamente por el pH elevado de los suelos (Majerus, 1996). De acuerdo a la CE medida directamente en campo existe una distribución similar para las clases establecidas, pero es necesario señalar que el 65% de los suelos ya presentan altas concentraciones de sales solubles. La medición de estos dos parámetros aconseja la necesidad de aplicar yeso agrícola para revertir el daño químico que la agricultura está ocasionando en los suelos. Considerando este estudio, los resultados indican que los suelos del noroeste de México requieren entre 4 y 40tha<sup>-1</sup> de yeso agrícola para prevenir o remediar

el fenómeno de sodificación. Una de las principales limitantes en el uso de yeso agrícola para mejorar la capacidad productiva de los suelos sódicos es la aplicación de dosis uniformes a grandes extensiones de terrenos que generalmente varían ampliamente en sus características fisicoquímicas. Esta variación reduce significativamente la eficacia del yeso, y solamente puede incrementarse si se aplican dosis variables en función del requerimiento de yeso conforme a las condiciones fisicoquímicas del terreno. Sin embargo, para lograr esto se necesita el análisis químico de un número elevado de muestras de suelo, lo cual incrementa sustancialmente los costos de producción. Por esta razón, la elaboración de una base de datos en la que se incluyan parámetros estrechamente vinculados con la degradación química de suelos como CE y pH, y los relacione con el requerimiento de yeso, es una estrategia de bajo costo para realizar un diagnóstico en campo de la necesidad de aplicación de dosis variables de yeso para incrementar la eficacia en el mejoramiento de suelos con problemas de sales solubles y exceso de sodio intercambiable en zonas áridas y semiáridas.

##### Remediación de suelos sódicos

En el noroeste de México es muy difícil que los suelos

agrícolas encuentren un balance ideal en cationes intercambiables, ya que generalmente las aguas de riego contienen cantidades significativas de  $\text{Na}^+$  (Endo *et al.*, 2000; López *et al.*, 2003). Esto conduce a una acumulación gradual de este ión y el desplazamiento de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  del complejo de intercambio (Hanay *et al.*, 2004; Gharaibeh *et al.*, 2009). Además, las prácticas inadecuadas de aporte de nutrientes sin base científica acentúa en muchos casos el desbalance de cationes en el complejo de intercambio. En el presente estudio las aplicaciones de yeso agrícola disminuyeron significativamente el pH y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

en todos los sitios (Tabla III).

El PSI se redujo gradualmente conforme se incrementaron las dosis de yeso agrícola, mientras que la reducción en el pH del suelo fue más acentuada cuando los terrenos recibieron la dosis más alta ( $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Al igual que en este estudio, diversos autores han reportado una contribución efectiva del yeso en la reducción del pH del suelo en terrenos con problemas de sodicidad (Dubey y Mondal, 1994; Makoi y Verplancke, 2010). Con la aplicación de yeso agrícola no solamente el  $\text{Ca}^{2+}$  ocupa los sitios de intercambio disponibles al desplazar el  $\text{Na}^+$  del complejo de intercambio, sino que también el  $\text{H}^+$  disociado del agua de riego se apropia de una parte de estos sitios, ocurriendo un proceso de acidificación del suelo. Por otro lado, los bicarbonatos causantes de la alcalinidad se combinan con el  $\text{Ca}^{2+}$  del yeso formando compuestos de baja solubilidad y contribuyendo también en la reducción del pH (Rodrigues da Silveira *et al.*, 2008).

TABLA III  
CAMBIOS EN PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE LOS SITIOS SELECCIONADOS DESPUÉS DE CUATRO MESES DE LA APLICACIÓN DE YESO AGRÍCOLA

Sitio (cultivo)	Yeso $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$	pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) rel. 1:2	CE $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	DA $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	CIC $\text{cmol} (+)\cdot\text{kg}^{-1}$	PSI %
San Joaquín (calabacita)	0	8,48 a	1,34 c	1,42 a	15,32 c	18,7 a
	2	8,42 a	1,40 b	1,39 a	15,96 c	14,2 b
	4	8,18 b	1,42 b	1,39 a	18,59 b	9,8 c
	8	8,19 b	1,57 a	1,40 a	21,82 a	8,7 c
Vizcaíno (repollo)	0	9,26 a	2,13 b	1,46 a	3,12 b	36,3 a
	2	8,84 b	2,18 b	1,46 a	4,07 a	28,7 b
	4	8,63 c	2,24 a	1,44 a	3,91 a	17,5 c
	8	8,61 c	2,21 a	1,45 a	4,33 a	10,2 d
Mulegé (lechuga, betabel)	0	8,51 a	1,22 c	1,42 a	8,78 c	13,7 a
	2	8,36 b	1,21 c	1,40 a	7,33 c	11,4 a
	4	8,33 b	1,35 b	1,39 a	9,65 b	8,5 b
	8	7,94 c	1,44 a	1,41 a	11,26 a	6,7 b
Sto. Domingo (naranja)	0	9,11 a	0,87 c	1,39 a	8,92 b	38,2 a
	2	8,97 ab	1,14 b	1,38 a	9,74 a	33,7 b
	4	8,89 b	1,12 b	1,38 a	10,43 a	22,4 c
	8	8,77 c	1,27 a	1,37 a	11,46 a	17,9 d
El Carrizal (pepino)	0	8,77 a	0,93 c	1,41 a	14,64 c	12,4 a
	2	8,63 b	0,98 bc	1,39 a	16,83 b	8,7 b
	4	8,57 b	1,03 b	1,40 a	15,77 bc	6,4 c
	8	8,43 c	1,42 a	1,39 a	19,30 a	5,8 c

CE: conductividad eléctrica, DA: densidad aparente, CIC: capacidad de intercambio catiónico, PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

La reducción del PSI en la zona donde se aplicó yeso puede atribuirse a que el  $\text{Na}^+$  desplazado forma  $\text{NaOH}$  al reaccionar con el agua de riego, el que posteriormente se combina con  $\text{CO}_2$  libre en el suelo para formar carbonato de sodio que es lavado a horizontes inferiores (Amstrong y Tanton, 1992; Gharaibeh *et al.*, 2009). Debido a que durante la formación de  $\text{NaOH}$  se libera  $\text{H}^+$ , se presenta en el medio un proceso de acidificación que ocasiona la disminución del pH (Gupta *et al.*, 1985).

La CE del suelo se incrementó con la aplicación de yeso en todos los terrenos. En las parcelas donde se aplicó  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  el incremento fue de 4 a 52% con respecto a las parcelas que no recibieron yeso. El incremento en CE fue más evidente en los terrenos con salinidades más bajas (Valle de Santo Domingo y El Carrizal). Al evaluar la aplicación de yeso en un suelo salinosódico, Holanda *et al.* (1998) también observaron un aumento en la CE del suelo. Este incremento se considera un

resultado normal, ya que el yeso es una fuente de sales que ingresan a la solución del suelo. Sin embargo, el aumento de salinidad ocurre solamente al inicio. Con el transcurso del tiempo, el desplazamiento de  $\text{Na}^+$  por el  $\text{Ca}^{2+}$  que sucede en el complejo de intercambio mejora la conductividad hidráulica e infiltración del agua de riego, y por lo tanto una mayor facilidad para el lavado de sales conduce a la reducción de la CE del suelo. En el presente estudio la profundidad de muestreo fue 0-30cm, y en esta zona fue donde se registraron los incrementos en CE. Se considera que el periodo de tratamiento fue corto para detectar un proceso de lavado hacia capas más profundas, como lo demostraron Raza *et al.* (2001), quienes reportaron que las aplicaciones de yeso redujeron la CE en 49% a 0-30cm de profundidad, y en 15% a 30-60cm, pero en la capa de 60-90cm la CE aumentó en 20%.

Aunque en este estudio en ningún sitio experimental se encontraron diferencias esta-

dísticas significativas en la densidad aparente (DA) por las aplicaciones de yeso (Tabla III), otros reportes indican reducciones significativas de la DA por efecto del yeso (Lebron *et al.*, 2002; Murtaza *et al.*, 2006). Un aumento en la DA significa mayor peso de suelo por unidad de volumen; por lo tanto, cuando una mayor cantidad de suelo es confinado en el mismo volumen, el terreno se vuelve más compacto e inconveniente para la agricultura. Debido a que un suelo compacto tiene menos espacio poroso, la infiltración del agua y crecimiento de las raíces se reduce (Murtaza *et al.*, 2006).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumentó significativamente al aplicar

yeso agrícola en todos los sitios evaluados y este cambio fue más acentuado en los terrenos con mayor cantidad de materia orgánica (Tablas I y III). Hamza y Anderson (2003) también reportaron un incremento significativo en la CIC por efecto de aplicaciones de yeso, aumento que fue mayor en suelos arcillosos que arenosos. El yeso agrícola es una buena fuente para promover el incremento de la CIC y un elevado y rápido movimiento del  $\text{Ca}^{2+}$  hacia capas inferiores del perfil del suelo, pero las dosis deben ser recomendadas cuidadosamente para prevenir el lavado excesivo de  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , principalmente en suelos con baja CIC (Ernani *et al.*, 2006). Las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  en el complejo de intercambio de un suelo considerado normal y balanceado para el desarrollo adecuado de la mayoría de los cultivos son de 60-80%, 10-20%, 2-6% y 0-3%, respectivamente (Bohn *et al.*, 2001). En la Figura 1 se presenta la distribución de los principales cationes en el complejo de in-

tercambio de los suelos tratados con diferentes dosis de yeso agrícola. El  $\text{Ca}^{2+}$  se incrementó conforme se aumentaron las cantidades de yeso en todos los sitios, pasando de 40-60% en parcelas sin aplicación de yeso a 70-78% en aquellas en que se aplicó  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . En el Valle de San Joaquín y en el Valle El Carrizal, la cantidad de  $\text{K}^+$  hallado en el complejo de intercambio fue 6 y 4% mayor, respectivamente, en las parcelas tratadas con  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso respecto a las que no recibieron yeso. La cantidad de  $\text{K}^+$  intercambiable en los suelos de las parcelas que recibieron yeso agrícola fue de 9-11% en el Valle de San Joaquín y de 11,6-12% en el Valle El Carrizal.

La concentración de  $\text{K}^+$  intercambiable se modifica por la adición de yeso, fertilizantes cálcicos o aguas de riego ricas en  $\text{Ca}^{2+}$  (Bajwa y Jponas, 1989; Rodrigues da Silveira, 2008). El  $\text{K}^+$  es un nutriente propicio a sufrir desplazamiento y lixiviación a causa del exceso de  $\text{Ca}^{2+}$  provocado por la incorporación del yeso al suelo (Peregrina, 2005). Sin embargo, en este estudio la concentración de  $\text{K}^+$  intercambiable se incrementó significativamente con la aplicación de dosis altas de yeso en los sitios del Valle de San Joaquín y del Valle El Carrizal (Figura 1). En estos sitios también se encontró que las dosis altas de yeso ocasiona-

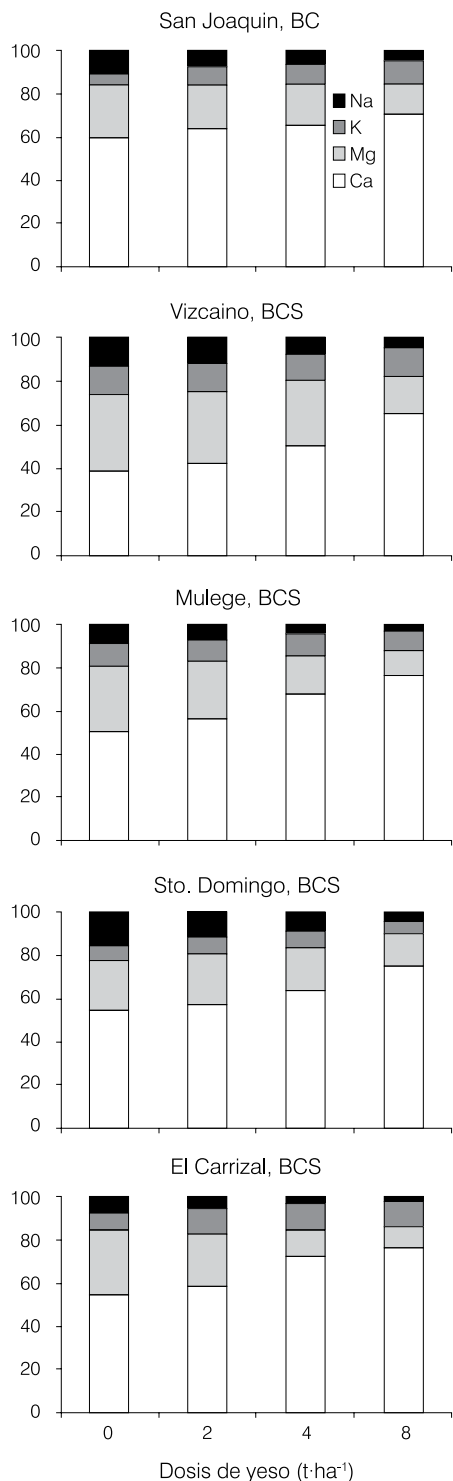


Figura 1. Distribución de cationes intercambiables en suelos del noroeste de México tratados con diferentes dosis de yeso agrícola.

ron un incremento significativo de la CIC (Tabla III). Muhammad y Khattak (2011) indican que si la CIC se incrementa paralelamente a las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  en el suelo, la concentración de  $\text{K}^+$  intercambiable no se reduce.

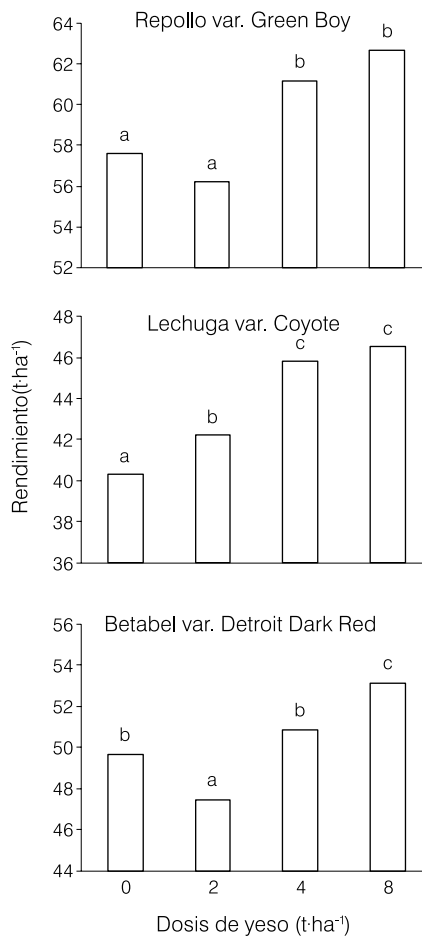


Figura 2. Efecto de la aplicación de yeso agrícola en el rendimiento de hortalizas cultivadas en suelos del noroeste de México.

La reacción de intercambio dominante en los suelos tratados con yeso en este estudio fue el desplazamiento de  $\text{Mg}^{2+}$  de los sitios de intercambio por el  $\text{Ca}^{2+}$ . Greene y Wilson (1984) encontraron resultados similares y reportaron que esta reacción es más acentuada en los primeros 10cm del perfil del suelo. Otros autores también han reportado la reducción del  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable debido a las aplicaciones de yeso (Courtney *et al.*, 2009). Sin embargo, esta reacción de intercambio puede ser aprovechada para reducir el  $\text{Mg}^{2+}$  en aquellos suelos afectados en sus propiedades físicas por exceso de este catión (Vyshpolsky *et al.*, 2008). Esto indica que para la decisión de usar yeso agrícola a fin de mejorar los suelos, aparte del costo y disponibilidad del producto, también es indispensable considerar los requeri-

mientos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  de los cultivos.

*Respuesta de los cultivos a la aplicación de yeso agrícola*

Se evaluaron los cambios fisicoquímicos en el suelo de parcelas sembradas con seis cultivos, pero solo se cuantificó el impacto del yeso en el rendimiento de repollo, lechuga y betabel (Figura 2). De manera general, estos cultivos respondieron positivamente a las aplicaciones de yeso y sus rendimientos fueron significativamente superiores cuando el suelo recibió aplicación de este insumo. El efecto del yeso fue más significativo en las parcelas que recibieron 4 y  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . El repollo incrementó su rendimiento con respecto al control ( $0\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en 6,3% y 8,9% en las parcelas tratadas con 4 y  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso, respectivamente. El cultivo de lechuga fue el que mejor respondió y sus rendimientos se incrementaron en 13,6%

y 15,4% en las parcelas que recibieron 4 y  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso, respectivamente. En betabel se encontró la menor respuesta y solo cuando se aplicaron  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso se registró un incremento significativo del 7% con respecto al control.

El incremento en rendimiento de las hortalizas evaluadas, aunque fue estadísticamente significativo, puede ser de poca importancia económica, pero considerando algunos principios fundamentales de la agricultura sustentable, tales como el mantenimiento de la salud del suelo y el sostenimiento de sistemas y ciclos ecológicos (Gliessman, 1998), la aplicación de yeso en estos ecosistemas adquiere vital importancia. Además, el incremento de S y  $\text{Ca}^{2+}$  en los tejidos vegetales también eleva la calidad nutricional de frutas y hortalizas.

En la Tabla IV se presenta la influencia del yeso agrícola

en el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en el follaje y algunas relaciones catiónicas determinadas en el mismo. Las plantas que se desarrollan en terrenos con cantidades adecuadas de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  generalmente presentan en el follaje concentraciones 0,1-1,5% de S y de 0,1-5% de  $\text{Ca}^{2+}$  (Marschner, 2005). En este estudio se incluyeron diferentes cultivos que contrastan en sus requerimientos de S y  $\text{Ca}^{2+}$ , registrándose concentraciones de S- $\text{SO}_4^{2-}$  que variaron de 0,20 a 0,69%, mientras que para  $\text{Ca}^{2+}$  fueron de 1,15-3,71%. Con excepción del pepino, el contenido de S- $\text{SO}_4^{2-}$  aumentó significativamente con las aplicaciones de 4 y  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso en las otras especies hortícolas, mientras que en naranjo no se encontraron diferencias significativas. El S se encuentra disponible para las plantas como  $\text{SO}_4^{2-}$  en el suelo a través de las raíces y en forma gaseosa como  $\text{SO}_2$  absorbido por las hojas desde la atmósfera. El aporte de yeso es una práctica de bajo costo y natural para suministrar S a los suelos para mejorar rendimiento y calidad de las cosechas. El S es un nutriente esencial en el funcionamiento catalítico o electroquímico de biomoléculas en las células (Saito, 2004) y forma parte de aminoácidos (cisteína, cistina, metionina), oligopéptidos, vitaminas y cofactores (vitamina B, tiamina, biotina).

En este estudio las plantas de repollo registraron los contenidos más altos de S- $\text{SO}_4^{2-}$  en todos los tratamientos. Los cultivos incluidos en la familia de las crucíferas, como el repollo, tienen una alta afinidad para transportar  $\text{SO}_4^{2-}$  (Buchner *et al.*, 2004) y demandan grandes cantidades de S para producir altos rendimientos y calidad en los productos (Falk *et al.*, 2007). La aplicación de  $\text{SO}_4^{2-}$  al suelo no solo incrementa significativamente los rendimientos de diversas hor-

TABLA IV  
CONTENIDO DE AZUFRE EN FORMA DE SULFATOS, CALCIO Y RELACIONES IÓNICAS EN EL FOLLAJE DE PLANTAS CULTIVADAS EN PARCELAS CON DIFERENTES DOSIS DE YESO AGRÍCOLA

Cultivo	Yeso $\text{tha}^{-1}$	% en MS		Relaciones iónicas			
		S- $\text{SO}_4$	Ca	Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup>
Calabacita	0	0,22 a	1,64 a	0,14 a	0,25 b	1,74 c	0,41 c
	2	0,21 a	1,68 a	0,17 a	0,29 b	1,71 c	0,39 c
	4	0,26 b	2,37 b	0,14 a	0,19 a	1,34 b	0,22 b
	8	0,31 b	2,91 c	0,14 a	0,16 a	1,12 a	0,14 a
Repollo	0	0,55 a	1,89 a	0,25 b	0,21 b	0,86 bc	0,27 c
	2	0,58 b	2,58 b	0,23 ab	0,16 ab	0,70 a	0,18 b
	4	0,65 c	2,73 b	0,16 a	0,15 a	0,93 c	0,17 b
	8	0,69 d	3,11 c	0,17 a	0,14 a	0,79 b	0,12 a
Lechuga	0	0,34 a	2,13 a	0,16 b	0,25 b	1,54 c	0,40 c
	2	0,38 b	2,87 b	0,13 ab	0,19 a	1,46 b	0,28 b
	4	0,42 b	3,15 c	0,10 a	0,14 a	1,42 b	0,18 a
	8	0,41 b	3,22 c	0,10 a	0,14 a	1,36 a	0,14 a
Betabel	0	0,28 a	2,37 a	0,22 b	0,33 b	1,49 b	0,37 c
	2	0,25 a	2,42 a	0,15 a	0,27 b	1,76 c	0,22 b
	4	0,34 b	3,16 b	0,14 a	0,20 a	1,41 b	0,21 ab
	8	0,32 b	3,45 c	0,13 a	0,16 a	1,21 a	0,15 a
Naranja	0	0,20 a	1,15 a	0,22 a	0,43 c	1,90 c	0,56 b
	2	0,21 a	1,51 b	0,19 a	0,34 b	1,83 c	0,37 a
	4	0,20 a	1,62 b	0,17 a	0,30 ab	1,73 b	0,36 a
	8	0,21 a	1,89 c	0,19 a	0,27 a	1,46 a	0,32 a
Pepino	0	0,22 a	2,21 a	0,30 c	0,38 c	1,26 d	0,22 c
	2	0,28 b	2,79 b	0,24 b	0,28 b	1,16 c	0,13 b
	4	0,23 a	3,56 c	0,28 bc	0,23 b	0,81 a	0,10 ab
	8	0,25 ab	3,71 d	0,16 a	0,15 a	0,99 b	0,08 a

talizas sino que una adecuada fertilización azufrada también se asocia a una serie de factores que determinan la calidad de frutas y hortalizas, y elevan su valor comercial. La fertilización con S o  $\text{SO}_4^{2-}$  incrementa la vitamina C y el contenido de azúcares en el jugo de naranja y reduce la concentración de nitratos en muchas hortalizas de hoja (Elwan y Abd El-Hamed, 2011). Por otro lado, la deficiencia de S en las plantas ocasiona menor resistencia a las plagas y al estrés medioambiental (Hawkesford y De Kok, 2006). Wickenhauser *et al.* (2005) indican que un mecanismo de defensa de diversas plantas contra patógenos es la liberación de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Los glucosinolatos son metabolitos vegetales ricos en S que se encuentran principalmente en plantas del orden *Brassicales* (canola, repollo, brócoli, coliflor y rábano, entre otros) que las defienden contra el ataque de plagas y patógenos (Falk *et al.*, 2007). Los sulforafanos son compuestos ricos en S

presentes principalmente en crucíferas considerados potentes inductores de la detoxificación de sustancias carcinogénicas (Zhang y Callaway, 2002).

El  $\text{Ca}^{2+}$  en el follaje de todos los cultivos estudiados aumentó significativamente cuando recibieron 4 y  $8\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de yeso. Las plantas calcícolas como repollo, betabel, lechuga, calabacita y pepino se caracterizan por una alta concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en las hojas, como ocurrió en este estudio, la cual es estimulada por el incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  en el medio de cultivo (Dayod *et al.*, 2010). Las plantas calcífugas que se han transferido a medios calcáreos, como el naranjo, contienen bajas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ , desarrollando comúnmente deficiencia de este nutriente, P y Fe (Lee, 1999). Con las aplicaciones de yeso agrícola se mejoran las condiciones fisicoquímicas de los suelos y se previene la aparición de desórdenes nutricionales relacionados con la deficiencia de Ca, las cuales

producen importantes pérdidas económicas en la horticultura. La necrosis apical o marginal que se presenta en hortalizas de hoja, como lechuga, el 'corazón negro' en apio, o la pudrición basal de frutos de tomate, chile y sandía, son algunos ejemplos de los problemas que ocasiona la falta de Ca en los tejidos vegetales y que resultan en pérdidas económicas, incremento en los costos de producción y cierre de mercados internacionales para los horticultores.

## Conclusiones

La sodicidad es un fenómeno en expansión en los suelos del noroeste de México y las aplicaciones de yeso contribuyen efectivamente a reducir este problema. Con la aplicación de yeso no solo se desplaza al  $\text{Na}^+$  del complejo de intercambio, sino que también se incrementa

la CIC mejorando así la nutrición de los cultivos. El rendimiento de repollo, lechuga y betabel se incrementa significativamente cuando el suelo recibe yeso, principalmente porque se reduce la alcalinidad y mejora directamente la disponibilidad de Ca, S y K. La relación Na/Ca en las plantas se reduce significativamente con el yeso, y esto ayuda a mitigar la toxicidad por Na en los tejidos vegetales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Mario Benson Rosas en los análisis químicos de muestras de suelo y planta. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto CONACYT 140641.

## REFERENCIAS

- Abdurrahman H, Fatih B, Fatih M, Mustafa Y (2004) Reclamation of saline-sodic soils with gypsum and MSW compost. *J. Compost Sci. Util.* 12: 175-179.
- Armstrong ASB, Tanton TWT (1992) Gypsum applications to aggre-

- gated saline-sodic clay topsoils. *J. Soil Sci.* 43: 249-260.
- Bajwa MS, Jponas AS (1989) Effect of gypsum irrigation water on soil crop yields in a rice-wheat rotation. *Agric. Water Manag.* 16: 53-61.
- Bohn HL, McNeal BL, O'Connor GA (2001) *Soil Chemistry*. Wiley. Nueva York, EEUU. 307 pp.
- Buchner P, Stuiver CEE, Westerman S, Wirtz M, Hell R, Hawkesford MJ, De Kok LJ (2004) Regulation of sulfate uptake and expression of sulfate transporter genes in *Brassica oleracea* L. as affected by atmospheric H<sub>2</sub>S and pedospheric sulfate nutrition. *Plant Physiol.* 136: 3396-3408.
- Chaney DE, Drinkwater LE, Pettygrove GS (1992) *Organic Soil Amendments and Fertilizers*. Division of Agriculture and Natural Resources N° 21505. University of California. Oakland, CA, EEUU. 36 pp.
- Courtney R, Mullen G, Harrington T (2009) An evaluation of revegetation success on bauxite residue. *Restor. Ecol.* 17: 350-358.
- Dayod M, Tyerman SD, Leigh RA, Gilliham M (2010) Calcium storage in plants and the implications for calcium biofortification. *Protoplasma* 247: 215-231.
- Dubey SK, Mondal RC (1994) Effect of amendments and saline irrigation water on soil properties and yields of rice and wheat in a highly sodic soil. *J. Agric. Sci.* 122: 351-357.
- Elwan MWM, Abd El-Hamed KE (2011) Influence of nitrogen form, growing season and sulfur fertilization on yield and the content of nitrate and vitamin C of broccoli. *Sci. Hort.* 127: 181-187.
- Endo T, Yamamoto S, Honna T, Takashima M, Iimura K, López R, Benson M (2000) Behaviour and distribution of salts under irrigated agriculture in the middle of Baja California, México. *Jap. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 71: 18-26.
- Ernani PR, Miquelluti DJ, Fontoura SM, Kaminski J, Almeida JA (2006) Downward movement of soil cations in highly weathered soils caused by addition of gypsum. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 37: 571-586.
- Falk KL, Tokuhisa JG, Gershenzon J (2007) The effect of sulfur nutrition on plant glucosinolate content: physiology and molecular mechanisms. *Plant Biol.* 9: 573-581.
- FAO (1993) *Sistema Integrados de Nutrición de Plantas y Agricultura Sostenible*. 17ª Consulta del Programa de Fertilizantes de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Islamabad, Pakistán.
- Gharaibeh MA, Eltaif NI, Shunnar OF (2009) Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 713-719.
- Giese M, Gao YZ, Lin S, Brueck H. (2011) Nitrogen availability in a grazed semi-arid grassland is dominated by seasonal rainfall. *Plant Soil* 340: 157-167.
- Gliessman SR (1998) *Agroecology. Ecological Processes in Sustainable Agriculture*. Sleeping Bear Press. Ann Arbor, MI, EEUU. 357 pp.
- Greene RSB, Wilson IB (1984) Some physico-chemical properties of an exposed B horizon of a red-brown earth treated with gypsum. *Aust. J. Soil Res.* 22: 357-363.
- Gupta RK, Singh CP, Abrol IP (1985) Dissolution of gypsum in alkali soils. *Soil Sci.* 140: 382-386.
- Halliwell DJ, Barlow KM, Nash DM (2001) A review of the effects of wastewater sodium on soil properties and their implications for irrigation systems. *Aust. J. Soil Res.* 39: 1259-1267
- Hamza MA, Anderson WK (2003) Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54: 273-282.
- Hanay A, Buyuksonmez F, Kizilolu FM, Canbolat MY (2004) Reclamation of saline sodic soils with gypsum and MSW compost. *Compost Sci. Utiliz.* 12: 175-179.
- Hartz TK, Johnstone PR (2006) Nitrogen availability from high-nitrogencontaining organic fertilizers. *HortTechnology* 16:39-42.
- Hawkesford MJ, De Kok LJ (2006) Managing sulphur metabolism in plants. *Plant Cell Env.* 29: 382-395.
- Holanda JS, Vitti GC, Salviano AAC, Medeiros JDF, Amorim JRA (1998) Alterações nas propriedades químicas de um solo aluvial salino-sódico, decorrentes da subsolagem e do uso de condicionadores. *Ver. Brás. Ci. ênc. Solo* 22: 387-394.
- Lebron I, Suárez DL, Yoshida T (2002) Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 92-98.
- Lee JA (1999) The calcicole-calcifuge problem revisited. *Adv. Bot. Res.* 29: 1-30.
- López-Aguilar R, Murillo-Amador B, Villavicencio-Floriani E, Real-Rosas M, López-Amador R (2003) *La Coquia: Un Forraje Alternativo para Zonas de Baja California con Problemas de Salinidad*. CIBNOR. La Paz, BCS, México. 57 pp.
- Loveday J (1976) Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. *Aust J Soil Res.* 14: 361-371.
- Majerus M (1996) *Plant Materials for Saline-Alkaline Soils*. Natural Resources Conservation Service. Technical Note N° 26. Montana NRCS-USDA. EEUU. 5 pp.
- Makoi, JHJR, Verplancke H (2010) Effect of gypsum placement on the physical chemical properties of a saline sandy loam soil. *Aust. J. Crop Sci.* 4: 556-563.
- Marschner H (2005) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2ª ed. Academic Press. 889 pp.
- Misra RK, Sivongxay A (2009) Reuse of laundry greywater as affected by its interaction with saturated soil. *J. Hydrol.* 36: 55-61.
- Muhammad D, Khattak RA (2011) Wheat yield and chemical composition as influenced by integrated use of gypsum, Pressmud and FYM in saline-sodic soil. *J. Chem. Soc. Pak.* 33: 82-89.
- Murtaza G, Ghafoor A, Qadir M (2006) Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation. *Agric. Water Manag.* 81: 98-114.
- Peregrina-Alonso F (2005) *Valoración Agronómica de Residuos Industriales Yesíferos y Calizos: Implicaciones sobre la Dinámica del Complejo de Cambio, la Disolución del Suelo y la Productividad en Paleixerulds del Oeste de España*. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid. España. 196 pp.
- Raza ZI, Rafiq, MS, Rauf A (2001) Gypsum application in slots for reclamation of saline-sodic soils. *Int. J. Agric. Biol.* 3: 281-285.
- Renjassamy P, Olsson KA (1991) Sodicity and soil structure. *Aust. J. Soil Res.* 29: 935-52
- Rhoades J (1982) Cation exchange capacity. En Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agronomy Monographs N° 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 149-157.
- Rodrigues da Silveira K, Rosas Ribeiro M, Bezerra de Oliveira L, John Heck R, Rodrigues da Silveira R (2008) Gypsum-saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soils. *Sci. Agric.* 65: 69-76.
- Rhoton FE, McChesney DS (2011) Erodibility of a sodic soil amended with flue gas desulfurization gypsum. *Soil Sci.* 176: 190-195.
- Saito K (2004) Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelly road. *Plant Physiol.* 136: 2443-2450.
- SAS (2002) *Programa Estadístico SAS para Microcomputadoras*. Versión 9.1. SAS Institute, Cary, NC, EEUU.
- Trewavas AJ (2002) Malthus foiled again and again. *Nature* 418: 668-670.
- USDA (1954) Gypsum requirement. Method 22d. En Richards LA (Ed.) *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Handbook N° 60. US Department of Agriculture. Washington, DC. pp. 104-105
- USDA-SSDS (1993) *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook N° 18. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC, EEUU. 437 pp.
- Vyshpolsky F, Qadir M, Karimov A, Mukhamedjanov K, Bekbaev U, Paroda R, Aw-Hassan A, Karajeh F (2008) Enhancing the productivity of high-magnesium soil and water resources in Central Asia through the application of phosphogypsum. *Land Degrad. Devel.* 19: 45-56.
- Walkley A, Black A (1934) An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-37.
- Watson CA, Atkinson D, Gosling P, Jackson LR, Rayns FW (2002) Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use Manag.* 18: 239-247.
- Wickenhauser P, Bloem E, Haneklaus S, Schnug E (2005) Ecological significance of H<sub>2</sub>S emissions by plants a literature review. *Landbauforsch. Volkenrode* 283: 157-161.
- Zhang Y, Callaway EC (2002) High cellular accumulation of sulphoraphane, a dietary anticarcinogen is followed by rapid transporter-mediated export as a glutathione conjugate. *Biochem J.* 364: 301-307.
- Zúñiga-Escobar O, Osorio-Saravia JC, Cuero Guependo R, Peña Ospina JA (2011) Evaluación de tecnologías para la recuperación de suelos degradados por salinidad. *Rev. Fac. Nac. Agr. Medellín* 64: 57695779.