

# Yeso agrícola y azufre para la remediación de un suelo salino-sódico del Valle Alto de Cochabamba

Demis Andrade Foronda<sup>1</sup>; Claire De Froidmont<sup>2</sup>; Gilles Colinet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctorante AI/ARES-UMSS; <sup>2</sup> Gembloux Agro BioTech / Universidad de Lieja (Bélgica)

*E mail:* dn.andrade@doct.uliege.be

**Resumen.** Los suelos salino-sódicos tienen una cantidad excesiva de sales solubles y del ion sodio, respectivamente, afectando negativamente las propiedades del suelo y la fisiología de la planta. La adición de enmiendas químicas además del lavado para desplazar el sodio y sales solubles, son prácticas convencionales para remediar estos suelos. Se evaluaron dos enmiendas químicas (yeso agrícola y azufre) con dos niveles (50% y 100%) según el requerimiento calculado, para recuperar un suelo salino-sódico del Valle Alto de Cochabamba en función al pH, conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI), a través de un experimento en macetas bajo condiciones de lixiviación. Las enmiendas químicas más el lavado, mejoraron las condiciones sódicas y salinas del suelo inicial (pH 9.6, EC 22,7 dS.m<sup>-1</sup>, ESP 69.7%). El yeso agrícola fue más efectivo que el azufre para desplazar el Na<sup>+</sup>, reduciendo el PSI en 34.4%. Las enmiendas redujeron levemente el pH. El lavado, así como las enmiendas, disminuyeron la CE en más del 50%. Tres lavados fueron suficientes para remediar la salinidad y sodicidad del suelo. No obstante las reducciones en los valores de CE, pH y PSI fueron significativas; no alcanzaron los umbrales definidos en la clasificación del *US Salinity Lab*.

**Palabras clave:** Degradación y remediación de suelos; PSI; Enmiendas químicas; Sodicidad

**Summary: Agricultural gypsum and sulphur for saline-sodic soil remediation from the high valley of Cochabamba.** Saline-sodic soils have an excessive amount of soluble salts and sodium ion, respectively, thus negatively affecting the soil properties and physiology of the plant. The addition of chemical amendments and the leaching to displace sodium and soluble salts are conventional practices to remediate these soils. Two chemical amendments (agricultural gypsum and sulphur) with two levels (50% and 100%) according to the calculated requirement, to recover a saline-sodic soil from the High Valley of Cochabamba, based on pH, electrical conductivity (EC) and exchangeable sodium percentage (ESP), through a pot experiment under leaching conditions. The chemical amendments plus the leaching improved the Na<sup>+</sup> and saline conditions of the initial soil (pH 9.6, EC 22.7 dS.m<sup>-1</sup>, ESP 69.7%). Agricultural gypsum was more effective than Sulphur in displacing Na<sup>+</sup>, reducing PSI by 34.4%. The amendments slightly reduced the pH. The leaching, as well the amendments, decreased EC more than 50%. Three lixiviations were enough to remediate soil salinity and sodicity. However the reductions in EC, pH, and ESP values where significant did not reach the thresholds defined by the "US Salinity Lab" salt-term classification.

**Keywords:** Soil degradation and remediation; ESP; Chemical amendments; Sodicity

## Introducción

Los suelos afectados por sales tienen una cantidad excesiva de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ).

La pérdida de la estructura del suelo, el deterioro de las propiedades hidráulicas, y el desequilibrio en la nutrición de las plantas, son algunas de las consecuencias del exceso de sales en el suelo (Richards *et al.*, 1954).

La salinidad del suelo se mide a través de la conductividad eléctrica (CE). La sodicidad se evalúa mediante la relación de adsorción de sodio (RAS) y/o el porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

El PSI se utiliza para determinar la dosis de yeso necesaria para remediar el exceso de  $\text{Na}^+$ . En cuanto a la RAS, se utiliza para caracterizar la presencia de sodio en el agua de riego y en la solución del suelo (Horneck *et al.*, 2007). La dispersión del suelo se correlaciona positivamente con el PSI cuando este excede el 15%. El sodio tiene un tamaño iónico en agua mucho mayor que el calcio y el magnesio, lo que explica dicha dispersión (Van Olphen, 1964, Weil & Brady, 2017). Quirk y Schofield (1955), confirmaron que un suelo saturado de sodio conlleva una disminución marcada de su conductividad hidráulica, principalmente debido a que las partículas dispersas ocupan los poros del suelo. Los suelos sódicos también se caracterizan por el pH alto, generalmente superior a 8.5 (Gupta *et al.*, 1984).

Según la clasificación de suelos afectados por sales del *US Salinity Lab* - NRCS, los suelos sódicos tienen un contenido de  $\text{Na}^+$  intercambiable superior al 15%, una RAS superior a 13 y una  $\text{CE}_e$  inferior a 4  $\text{dS m}^{-1}$ ; y con los suelos salino-sódicos, la RAS, el PSI y la  $\text{CE}_e$  son superiores a dichos umbrales.

Para mejorar los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos, técnicas convencionales como la aplicación de enmiendas y la lixiviación son usadas para eliminar el exceso de sales solubles. Un paso previo para remediar suelos sódicos, es la aplicación de una fuente externa de  $\text{Ca}^{2+}$  para reemplazar el  $\text{Na}^+$  presente en el complejo de intercambio de la rizósfera. El yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) así como el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) son muy utilizados por el costo relativamente bajo y disponibilidad (Qadir *et al.*, 2001). Cuando se aplica el azufre a un suelo sódico, se oxida por actividad microbológica formando ácido sulfúrico, para luego disolver la calcita en el suelo, generando el  $\text{Ca}^{2+}$  necesario para eliminar el  $\text{Na}^+$  intercambiable. El ácido sulfúrico también puede reaccionar directamente con el carbonato de sodio en el suelo.

El objetivo fue evaluar con fines de remediación, el efecto de la aplicación de enmiendas químicas (yeso agrícola y azufre), sobre el PSI, CE y pH de un suelo salino-sódico del Valle Alto, en macetas con lixiviación.

## Materiales y métodos

El suelo objetivo fue colectado de la localidad de Santa Ana, Municipio de Punata del Valle Alto de Cochabamba ( $17^\circ 32'38.6''$  de latitud Sur y  $65^\circ 51'41.9''$  de longitud Oeste) a una profundidad de 20 cm.

El experimento se desarrolló en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS).

Los parámetros físico-químicos del suelo fueron:

DA =  $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , CIC =  $5.1 \text{ cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$ , textura franco limosa (arcilla 19.3%, limo 54.9% y arena 25.8%), CE =  $22.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , PSI= 69.7 % y pH= 9.6. En cuanto al agua de riego: CE =  $2.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , pH = 8.1 y concentración de  $\text{Na}^+$  =  $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

La pureza del yeso como  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fue 91.7%, con 18.5% como  $\text{Ca}^{2+}$ , y el azufre con 97.5% de S elemental. El requerimiento de yeso (RY) para reducir el PSI a 15%, se calculó en base a la ecuación de Hoffman, 2007 enunciada en Lebron *et al.*, 2002.

El requerimiento de azufre (RA) se calculó a partir del RY multiplicado por el factor de 5.38, acorde con Richards *et al.* (1954).

El suelo fue previamente seco, homogeneizado y tamizado a 4 mm. Las enmiendas químicas se dosificaron al 50% y 100% del requerimiento calculado (RY y RA). Las macetas de 2.5 litros de volumen fueron perforadas y canalizadas en la base para coleccionar los lixiviados en un contenedor (Figura 1).

En cada maceta se acomodaron 2 kg de suelo con la dosificación de las enmiendas además del control, simulando la DA de suelo disturbado, sobre una capa de 2 cm con grava de 4 a 6 mm en el fondo de la maceta, para facilitar el filtrado.

Se determinó el volumen de agua para el lavado a través del volumen de poro



**Figura 1.** Maceta adaptada para la recolección de lixiviado

(VP), utilizando la fórmula enunciada por Kahlon *et al.* (2013) y Ahmad *et al.* (2015). Se aplicó un volumen inicial de agua de 490 ml (3/4 VP) para saturar el suelo, luego se aplicaron cinco lixiviados en cinco semanas, cada uno con 660 ml de agua (1 VP) hasta que la CE fue constante; se colectaron los lixiviados y se tomaron muestras de suelo.

El pH se determinó por el método de KCl 1N (ISO 1039), la CE a partir de una dilución suelo:agua (1:5) convertida a CE de extracto de pasta ( $\text{CE}_e$ ) con un factor obtenido por Sonmez *et al.* (2008), la CE y el pH se midieron con el dispositivo Oakton PCD650®; la CIC con el método modificado de la ISO 23470. El  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  intercambiables, a partir del método Metson a pH 7 y análisis por espectroscopia de adsorción atómica con el equipo SpectrAA Varian 220®.

Los análisis se realizaron en la Unidad de Suelos de Gembloux ABT (Bélgica) y en

el Laboratorio de Suelos y Aguas de la FCAyP-UMSS. La RAS y el PSI se calcularon con las fórmulas empleadas por Richards *et al.* (1954) y Hazelton & Murphy (2007), respectivamente:

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{(C_{Ca^{+2}} + C_{Mg^{+2}})/2}}$$

$$PSI = \left( \frac{C_{Na^+}}{C_{Ca^{+2}} + C_{Mg^{+2}} + C_{Na^+} + C_{K^+}} \right) 100$$

donde  $C$  es la concentración del catión en  $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$  (RAS) y  $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$  (PSI).

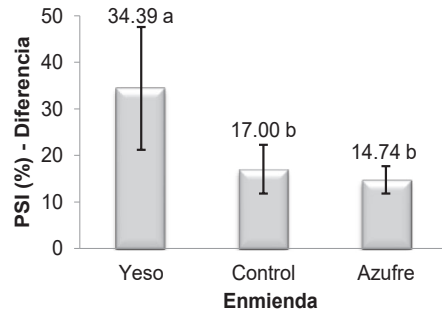
El diseño experimental fue completamente al azar (DCA), los tratamientos fueron las enmiendas: yeso y azufre con dos niveles (50% y 100%) en base al requerimiento (RY y RA), además del control; empleando cinco repeticiones. Los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 3.5.1 (*R Core Team 2019*) y RStudio, versión 1.1.463.

## Resultados y discusión

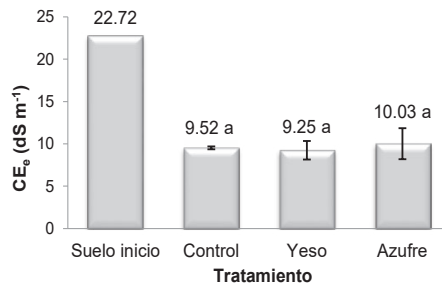
### Suelo

No se presentaron diferencias significativas para la interacción enmienda \* dosis, por tanto no se consideró la dosis en las comparaciones. En términos de reducción del PSI existen diferencias significativas, resultando mejor el yeso agrícola con respecto al azufre y al control, ya que redujo el PSI inicial en más del 30%, (Figura 2).

La  $CE_c$  del suelo disminuyó en más del 50% de su valor inicial tanto con yeso, azufre como con el solo lavado, sin diferencias significativas (Figura 3), probablemente debido al efecto del lavado por sí solo para lixiviar las sales solubles y el  $Na^+$  que precipita formando  $Na_2SO_4$  (Legros, 2007, Abdel-Fattah, 2012).

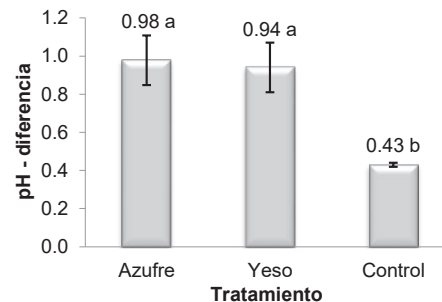


**Figura 2.** Efecto de la aplicación de yeso y azufre sobre el PSI del suelo (inicial - final)



**Figura 3.** Efecto de la aplicación de yeso y azufre sobre la  $CE_c$  del suelo

La reducción del pH del suelo fue mayor para el yeso agrícola y el azufre en igual magnitud (Figura 4). La reducción del PSI con el yeso, fue proporcional a la del pH, coincidiendo con lo evaluado en suelos sódico-calcáreos, por Gupta *et al.* (1981) y Abrol *et al.* (1980).



**Figura 4.** Efecto de la aplicación de yeso y azufre sobre el pH del suelo

En general, el yeso agrícola tuvo un efecto significativamente mayor para mejorar los parámetros de salinidad del suelo, esto coincide con resultados obtenidos por Qadir *et al.* (1996), Ahmad *et al.* (2015), Tavares *et al.* (2011) y Manzano *et al.* (2014). Es probable que la baja efectividad de los tratamientos con azufre, se deba al bajo contenido de materia orgánica del suelo, dado que el azufre necesita reaccionar con los microorganismos del suelo para formar ácido sulfúrico, con una cantidad mínima de biomasa y oxígeno, además de la necesidad de un mayor tiempo de incubación; en ese sentido Hanson *et al.* (2006) afirman que el efecto del azufre es más lento en comparación con la aplicación directa de ácido sulfúrico; por tanto se presume que un mayor tiempo de incubación mejoraría el efecto remediador del azufre.

Al margen de la ausencia de interacción, se advirtió que la dosis al 100% fue más efectiva que la dosis al 50% con ambas enmiendas, para reducir el PSI y el pH; no obstante, es probable que una dosis intermedia (75%) genere un efecto relevante, a considerar en futuras evaluaciones.

### **Lixiviados**

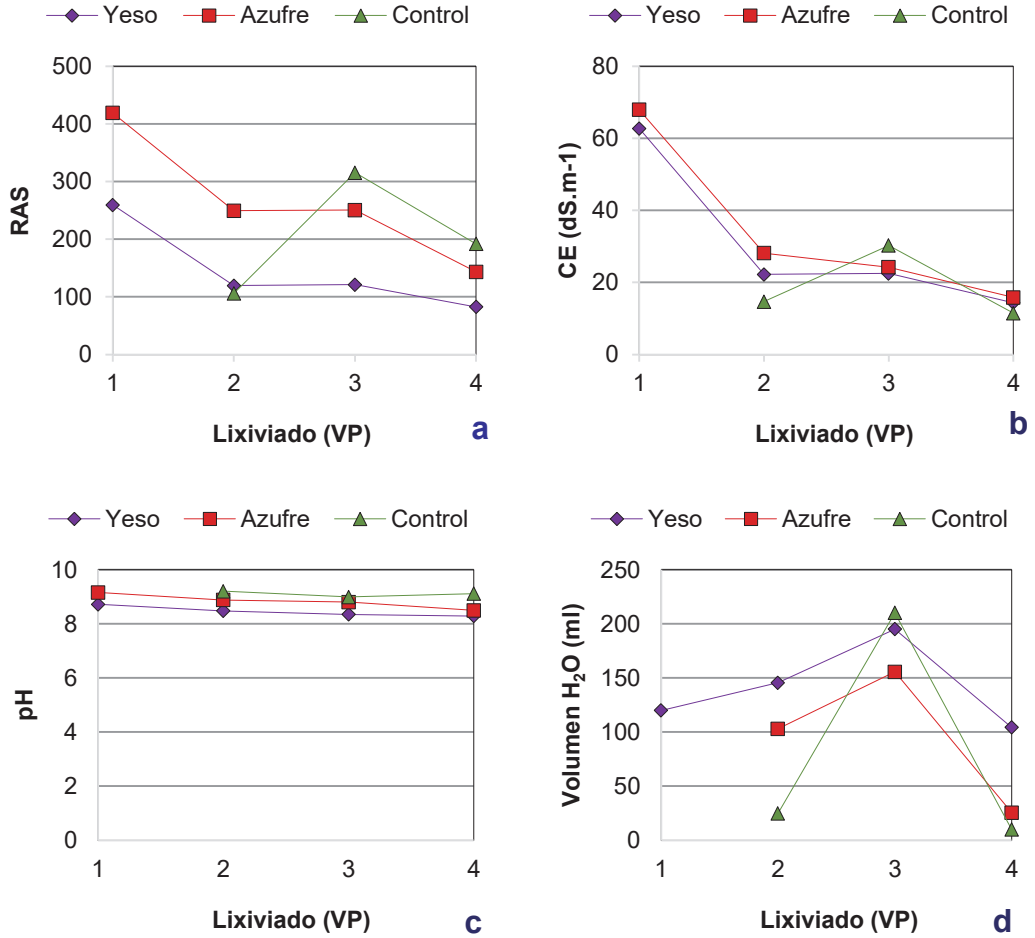
La RAS y la CE del lixiviado, tuvieron una disminución similar en términos de  $\text{Na}^+$  y sales solubles, respectivamente, con mayor intensidad del primer al segundo lavado. Por otra parte, el pH tuvo variaciones mínimas, probablemente debido a los carbonatos en el suelo. En términos de volumen de lixiviado, se observó un máximo para el tercer lavado, posiblemente por el efecto agregante del  $\text{Ca}^{2+}$  sobre la estructura y conductividad hidráulica del suelo, no obstante con una reducción considerable para el cuarto lavado, es probable debido a la desagregación

del suelo superficial y al crecimiento de algas. La evolución de la RAS para el yeso denota valores inferiores con respecto al azufre, esto pudo deberse al calcio añadido del yeso, que según fórmula, reduce el valor de la RAS (Figura 5).

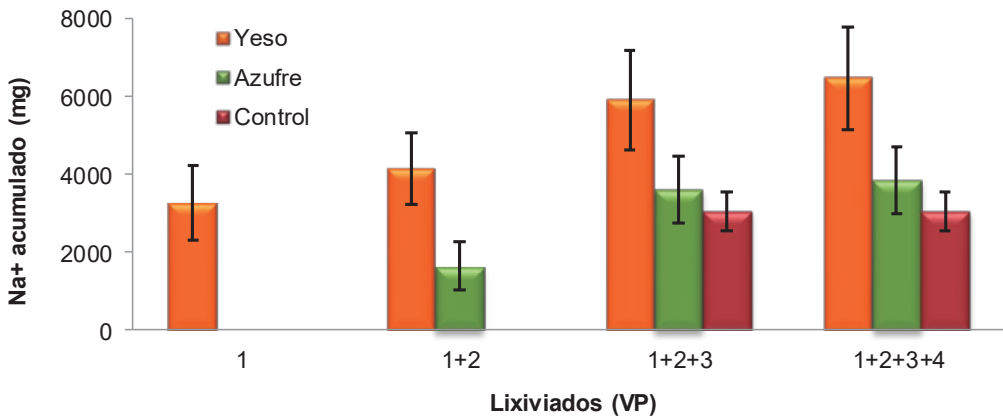
Los resultados de la evolución en el lixiviado tienen algunas similitudes con lo obtenido por Ahmad *et al.* (2015) y Ahmed *et al.* (2016) en cuanto a los parámetros de salinidad e iones en el lixiviado. Hasta la segunda lixiviación, las sales solubles y el sodio se redujeron considerablemente, por tanto se puede considerar que un tercer lavado es virtualmente innecesario en términos de ahorro de agua.

Se registró la mayor cantidad de  $\text{Na}^+$  acumulado en los lixiviados para los tratamientos con yeso. Del tercer al cuarto lavado, el incremento en  $\text{Na}^+$  no es considerable en comparación con los primeros lavados, en ese sentido, en términos económicos, hasta tres lavados con yeso, son suficientes para remediar el suelo (Figura 6).

En términos generales, el yeso agrícola fue más efectivo que el azufre para remediar la sodicidad del suelo; sin embargo, con ninguna enmienda se alcanzó el umbral de 15% definido en la clasificación de referencia, lo que probablemente se deba a un tiempo insuficiente de incubación y a la lixiviación excesiva del  $\text{Ca}^{2+}$  con los primeros lavados, además del alto PSI del suelo inicial. En términos de salinidad, la lixiviación por sí sola resultó más efectiva, lo que coincide con Chaganti, *et al.* (2015), Manzano *et al.* (2014) y Hernández (2011), quienes afirman que la reducción de la salinidad y sodicidad del suelo se debe en gran medida al lavado con solo agua al margen de las enmiendas.



**Figura 5.** Evolución de la RAS (a), CE (b), pH (c) y volumen de agua (d) para cada lixiviado y tipo de enmienda + control



**Figura 6.** Na<sup>+</sup> acumulado (mg) en los lixiviados para cada tratamiento



## Conclusiones

- Las enmiendas químicas más el lavado, fueron efectivas para mejorar las condiciones sódicas y salinas del suelo. Sin embargo, las reducciones en los valores de CE, pH y PSI, no alcanzaron los umbrales objetivo de la clasificación de referencia.
- El yeso agrícola resultó más efectivo que el azufre para desplazar el sodio, al reducir en 34.4% el PSI. Las enmiendas redujeron el pH levemente. La disminución de la CE con solo lavado fue considerable (>50%) en igual magnitud que con enmiendas.
- Se observó una suficiencia de hasta tres lavados para reducir la salinidad y sodicidad del suelo.
- Para evaluaciones posteriores se recomienda incrementar el tiempo de incubación para el azufre, considerar dosis intermedias de las enmiendas, así como la textura y contenido de materia orgánica en el suelo.

### Agradecimiento

*Al Programa AI ARES Bélgica - UMSS, a Gembloux ABT (Universidad de Lieja), al Laboratorio de Suelos (FCyP-UMSS) y a CISTEL (FCyP-UMSS)*

## Referencias citadas

Abdel-Fattah M. 2012. Role of gypsum and compost in reclaiming saline-sodic soils. *Journal of Agricultural and Veterinary Science*, 1(3), p. 30-38. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.9790/2380-0133038> Consultado en diciembre de 2018.

Abrol I., Chhabra R., Gupta R. 1980. A fresh look at the diagnostic criteria for sodic soils. **In:** Int. Symp. on Salt Affected Soils. Central Soil Salinity Research Ins-

titute, Karnal. February 18-21, 1980. p. 142-147.

Ahmad S., Ghafoor A., Akhtar M., Khan M. 2015. Implication of Gypsum Rates to Optimize Hydraulic Conductivity for Variable-Texture Saline-Sodic Soils Reclamation. *Land Degradation and Development*, 27(3), p. 550-560.

Ahmed K., Qadir G., Jami A., Saqib, A., Nawaz M., Kamal M., Haq E. 2016. Strategies for Soil Amelioration Using Sulphur in Salt Affected Soils. *Cercetari Agromonice in Moldova*, 49(3). p. 142-147. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/cerce-2016-0021> Consultado en octubre de 2018.

Chaganti V., Crohn D., Šimůnek J. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*. 158, p. 255-265. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016> Consultado en octubre de 2018.

Gupta R., Bhumbra D., Abrol I. 1984. Effect of sodicity, pH, organic matter, and calcium carbonate on the dispersion behavior of soils. *Soil Science*, 137 (4).

Gupta R., Chhabra R., Abrol I. 1981. The relationship between pH and exchangeable sodium in a sodic soil. *Soil Science*, 131 (4).

Hanson B., Grattan S., Fulton A. 2006. *Agricultural Salinity and Drainage*. Division of Agriculture and Natural Resources Publication 3375. University of California Irrigation Program University of California, Davis. p. 180. *En línea*. Disponible en: <https://hos.ifas.ufl.edu/media/hosifasufledu/documents/IST30688---24.pdf> Consultado en enero de 2019.

Hazelton P., Murphy B. 2007. *Interpreting Soil Test Results: What do all the numbers mean?* CSIRO. Collingwood, Australia.

Hernández J. 2011. *Bio Recuperación de los Suelos Salinos con el Uso de Materiales Orgánicos*. Tesis Doctoral. ETSI Agrónomos - Universidad Politécnica de Madrid. España. 143 p.

Hoffman G., Shannon M. 2007. Salinity. *Microirrigation for Crop Production - Design, Operation and Management*, 13, p. 131-160. *En línea*. Disponible en:

- [https://doi.org/10.1016/S0167-4137\(07\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4137(07)80007-2)  
Consultado en diciembre de 2019.
- Horneck D., Ellsworth J., Hopkins B., Sullivan D., Stevens R. 2007. Managing Salt - affected Soils for Crop Production. A Pacific Northwest Extension Publication. Oregon State University, University of Idaho, Washington State University. US. 24 p.
- Kahlon U., Murtaza G., Murtaza B., Hussain A. 2013. Differential response of soil texture for leaching of salts receiving different pore volumes of water in saline-sodic soil column. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 50 (2), p. 191-198. *En línea*. Disponible en: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:45012549](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:45012549)  
Consultado en octubre de 2018.
- Lebron I., Suarez D., Yoshida T. 2002. Gypsum Effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils Under Reclamation. Soil Science Society of America Journal, 66(1), p. 92-98. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9200>  
Consultado en noviembre de 2018.
- Legros J. 2007. Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaire romandes. PPUR presses polytechniques. Lausanne, Suiza. 574 p.
- Manzano J., Rivera P., Briones F., Tovar C. 2014. Rehabilitación de suelos salino-sódicos: Estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. Terra Latinoamericana, vol. 32, núm. 3, p. 211-219. A.C. Chapingo, México. *En línea*. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792014000300211](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000300211)  
Consultado en agosto de 2018.
- Qadir M., Qureshi R., Ahmad N. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. Geoderma, 74(3-4), p. 207-217. *En línea*. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00061-4)  
Consultado en diciembre de 2018.
- Qadir M., Schubert S., Ghafoor A., Murtaza G. 2001. Amelioration strategies for sodic soils: A review. Land Degradation and Development. 12(4), p. 357-386. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ldr.458>  
Consultado en septiembre de 2018.
- Quirk J., Schofield R. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability'. J. Soil Sci., 6(2), p. 163-178. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00841.x>  
Consultado en noviembre de 2018.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. *En línea*. Disponible en: <https://www.R-project.org/>  
Consultado en julio de 2018.
- Richards L., Allison L., Bernstein C., Bower J., Brown M., Fireman J., Richards W. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils. United States Salinity Laboratory Staff. Agricultural Research Service. Washington, DC - US. 169 p.
- Tavares A., Barros M., Rolim M., Silva E. 2011. Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v. 16, n. 3, p. 247-252, 2012. Campina Grande, PB, Brasil. UAEA/UFCG. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000300002>  
Consultado en diciembre de 2018.
- Van Olphen H. 1964. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. 2nd. ed. John Wiley & Sons: New York. J. Pharm. Sci., 53:2. p. 230. *En línea*. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jps.2600530238>  
Consultado en diciembre de 2018.
- Weil R., Brady N. 2017. The Nature and Properties of Soils. D. Fox (Eds.) 15th. edition. Pearson Education. USA. 1071 p.

Trabajo recibido el 16 de marzo de 2020 - Trabajo aceptado el 1 de abril de 2020