

# DISPONIBILIDAD Y MOVIMIENTO VERTICAL DE POTASIO EN FLUVISOLES CON RIEGO POR GOTEJO SIMULADO

## Availability and Vertical Movement of Potassium in Fluvisols with Simulated Drip Irrigation

B. Zamudio-González<sup>1‡</sup>, A. Vázquez-Alarcón<sup>2</sup>, J. A. Salazar-Hernández<sup>2</sup> y G. Alcántar-González<sup>3</sup>

### RESUMEN

El estudio se realizó en columnas de suelo y subsuelo, ambos arenosos aluviales. Se usó un diseño factorial completo con tres variables: fuentes potásicas ( $\text{KNO}_3$ , Multi-NPK,  $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), dos medios porosos (suelo y subsuelo) y dos calidades de agua [agua alcalina (A), con  $0.522 \text{ dS m}^{-1}$  y  $\text{pH} = 8.2$ , y agua con mejoradores (Am), con  $0.800 \text{ dS m}^{-1}$  y  $\text{pH} = 5.5$ ]. A las muestras de drenados con agua y lixiviados del fertirriego se les midió pH, conductividad eléctrica (CE) y concentración de potasio (K). De igual forma, se realizaron esas mediciones en los medios porosos, a cada 5 cm de profundidad, al término de los procesos de drenaje y lixiviación. Los valores de pH disminuyeron en los tratamientos de agua con mejoradores, en subsuelos, y al avanzar el proceso de lixiviación. Los valores de la CE fueron menores solamente con agua alcalina en subsuelos. No hubo cambios de los valores de CE en el proceso de lixiviación. El suelo liberó 3.73 veces más K con el riego con agua alcalina, con respecto al subsuelo. Al añadir ácido sulfúrico y yeso micronizado al agua de riego, la disponibilidad de K aplicado como  $\text{KCl}$  y  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$  disminuyó. El subsuelo con  $\text{CaCO}_3$  presentó retención de K, de 50 a 75%, de las fuentes potásicas en los primeros 0.1 m. La fuente con mayor movilidad y disponibilidad de K en el perfil fue con  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , ya que mostró los valores más altos de concentración a 0.35 y 0.55 m en suelo y subsuelo, respectivamente.

**Palabras clave:** lixiviación, fijación de potasio, suelos calcáreos, mejoradores de agua.

### SUMMARY

The experiment was laid out in laboratory columns with alluvial soil and subsoil with a high proportion of sand. Using a complete factorial design with three replications, five potassium sources were tested ( $\text{KNO}_3$ , Multi-NPK,  $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), two porous media (S = soil and Sb = subsoil with  $\text{CaCO}_3$ ), and two water qualities (A = alkaline water with  $0.522 \text{ dS m}^{-1}$  and  $\text{pH} 8.2$ , and Am = water with amendments of  $0.800 \text{ dS m}^{-1}$  and  $\text{pH} 5.5$ ). Data on pH, CE values and concentration of potassium (K) were recorded at 5 cm intervals and at the end of drainage and leaching processes. pH values slightly decreased with amendments as the drainage leaching processes advanced. CE values were lower only with alkaline water in subsoil. There were no changes in CE values in the leaching process. The soils released 3.73 times more K when irrigated with alkaline water than the subsoil. When sulfuric acid and micronized gypsum were added to irrigation water, the availability of K as  $\text{KCl}$  and  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$  decreased. The subsoil with  $\text{CaCO}_3$  retained 50 to 75% of the K from its sources in the first 0.1 m. The source that had greater mobility and availability of K in the profiles was  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , with higher concentration values at 0.35 and 0.55 m in soil and subsoil, respectively.

**Index words:** leaching, potassium fixation, calcareous soils, water amendments.

### INTRODUCCIÓN

Los agricultores del estado de Sonora seleccionan suelos de textura ligera para producir cosechas hortofrutícolas con precocidad. Estos suelos son de origen aluvial, muy lavados, pobres en materia orgánica, con más de 60% de arena gruesa y gravilla, y reciben fertirriego con sistemas presurizados. En estas condiciones, las raíces de las plantas se desarrollan intensamente en un bulbo de humedecimiento restringido. Estos suelos de textura ligera tienen bajo contenido de potasio (K) y cuando las raíces crecen en un espacio de

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Vial. Adolfo López Mateos km 4.5 carr. Toluca- Zitácuaro. 1350, Zinacantepec, Estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (bzamudiog@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup> Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Estado de México.

<sup>3</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

suelo reducido, el aporte natural, tanto en capacidad como en intensidad de K, disminuye de manera drástica. El K debe suministrarse en las etapas de maduración y de rápido crecimiento de frutos, para favorecer su calidad, en términos de concentración de azúcares, tamaño, resistencia, color y vida en anaquel, entre otros. En el noroeste de México, el K se aplica a través del riego, con cintas de exudación o mangueras por goteo, sin base técnica de su aprovechamiento.

Por otra parte, se reconoce que la concentración de K en el medio de la rizosfera de suelos arenosos disminuye con rapidez, debido a la baja capacidad de amortiguamiento de estos suelos y por ello se debe suministrar K por fertilización (Beegle y Baker, 1987; Uribe y Cox, 1988). En suelos de textura franco arenosa, el K se convierte en factor limitante del crecimiento vegetal, debido al descenso en la cantidad de K intercambiable (Andersson *et al.*, 2007). Este fenómeno es más intenso en bulbos restringidos de humedecimiento, con alta proliferación de raíces. También se sabe que el K se mueve preferentemente hacia las raíces en 95% por difusión y en 5% por flujo de masas o convección (Jungk y Claassen, 1997); además, existen diferencias entre las fuentes fertilizantes convencionales de KCl y  $K_2SO_4$ , los cuales son menos susceptibles a pérdidas por lixiviación, en relación con los pirofosfatos de K y Ca (Engelstad, 1985). La movilidad de K en el perfil se asocia a procesos de drenaje, evaporación y extracción por los cultivos; el proceso de difusión sucede a través del espacio poroso y alcanza, en suelos de textura media, una tasa de  $10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$  (Barber, 1995).

El transporte vertical de K en el suelo por influjo de riego o lluvia es complejo, si se considera su combinación con sales disueltas de Na, Ca y Mg, y éste se ha modelado por medio de tres ecuaciones de intercambio y transporte de iones entre capas de suelo por flujo de masas, difusión iónica y dispersión hidrodinámica (Al-Sibai *et al.*, 1997). Por otra parte, Ogwada y Sparks (1986) acreditan los estudios de movimiento de sales en columnas porque simulan el transporte en condiciones de campo, ya que durante el flujo hay desplazamiento, sustitución y remoción de elementos adsorbidos. En contradicción, otros autores consideran que el movimiento de K es más complejo de medir e indican que debe incorporarse el concepto de competencia por sitios de intercambio para varios cationes, con relación a espacios fluidos "móviles e inmóviles" en el suelo (Mansell *et al.*, 1986). Otra alternativa para valorar el transporte de solutos en columnas de suelo, es a través del cálculo de

isotermas asociadas a procesos de convección-dispersión y así estimar las fases de retardación de cationes en columnas de suelo no perturbado (Jardine *et al.*, 1988).

Kool *et al.* (1989) estiman, simultáneamente, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los coeficientes de selectividad del intercambio de cationes en experimentos de desplazamiento de solutos en columnas y consideran necesario asumir un "equilibrio local de intercambio con ausencia del proceso de difusión hacia espacios de flujo móvil e inmóvil en el suelo". Moog *et al.* (1998) establecen las condiciones de la cinética del intercambio de Ca/K en montmorillonita y vermiculita, como medios intercambiables, y concluyen que existe un equilibrio de las sustancias catiónicas en los sitios de intercambio, de acuerdo con el coeficiente de equilibrio de la ecuación de Gapón. Este equilibrio es rápido para arcillas como vermiculita y lento para arcillas como montmorillonita. Se juzgó pertinente, dada la práctica empírica del uso de K en el riego por goteo en el estado de Sonora, plantearse el objetivo de evaluar la disponibilidad y el movimiento vertical del K a través de la aplicación de cinco fuentes fertilizantes potásicas en riego por goteo con dos calidades de agua, en suelos arenosos fluviales agrícolas cultivados con uva de mesa en el noroeste de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Medios Porosos; Colecta de Suelo, Características y Empacado en Columnas

Se colectó suelo (S), de 0 a 0.60 m, y subsuelo (Sb), de 0.60 a 1.20 m, en la región de Pesqueira, Hermosillo, Sonora, México. Se homogeneizaron 100 kg de cada tipo de medio poroso al aire y se tamizaron en una malla de 1 mm. Las características físicas y químicas de los medios porosos utilizados en los experimentos en columnas fueron: humedad de saturación de 21 y 19%, para suelo y subsuelo, respectivamente; pH en extracto suelo:agua, relación 1:2 de 8.50, para suelo, y de 7.26, para subsuelo; materia orgánica, de 0.90% en suelo y 0.40% en subsuelo; textura del suelo con 21.96% de arcilla, 15.72% de limo y 62.32% de arena y para el subsuelo con prácticamente los mismos valores pero la fracción de arena poco más gruesa, por un porcentaje mayor de gravilla; CIC de  $17.80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  en suelo y  $19.95 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  en subsuelo; los cationes intercambiables en el suelo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de 1158 para Ca, 322 para Mg, 176 para Na y 320 para K. El subsuelo presentó valores

similares, pero con efervescencia al aplicar HCl 10%. De acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo (FAO-ISRIC-SICS, 1999), los suelos se clasifican como Fluvisol yérmico y Fluvisol calcárico, con profundidades mayores de 1.50 m.

En condiciones de laboratorio, se instalaron 72 columnas (36 de suelos y 36 de subsuelos) para ensayos de lavado de sales y lixiviación de K. Cada columna se empacó con 1 kg de medio poroso en tubos de vidrio de 10 cm<sup>2</sup> de sección transversal y 1 m de longitud. Las columnas de los medios porosos se empacaron a 0.60 m de profundidad (Z). La densidad aparente fue de 1.65 g cm<sup>-3</sup>. En la parte inferior se colocaron 0.1 m de tezontle lavado, como filtro inerte, y en la parte libre superior se instaló un sistema para impactar el goteo a 0.1 m de la superficie de los suelos. Los drenados y lixiviados se succionaron de los recipientes con jeringas, para evitar movimiento de las columnas durante los ensayos.

### Agua de Riego: Tipos de Agua y Sistema de Aplicación

Se evaluaron dos tipos de agua: una alcalina (A), de pozo profundo del predio "La Cuesta de Hermosillo", Sonora, y una tratada con mejoradores (Am), a la cual se le aplicó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> grado reactivo y yeso "Sonora", con 96.18% de pureza (22.48% Ca) micronizado, que criba a 99.9% por la malla 200. El agua de pozo presentó un pH de 7.16, CE de 0.522 dS m<sup>-1</sup> y los siguientes iones (me L<sup>-1</sup>): Ca, 1.56; Mg, 0.84; Na, 2.40; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 3.36; Cl, 0.78; y SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 0.70.

La cantidad de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> añadida fue 1.68 me L<sup>-1</sup> (para neutralizar 50% de los me L<sup>-1</sup> de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y 3.24 me L<sup>-1</sup> de yeso agrícola para aportar calcio y tener una relación Ca<sup>2+</sup>:Na<sup>+</sup> de 2:1. El agua con mejoradores (Am) tuvo un pH de 5.5 y una CE de 0.857 dS m<sup>-1</sup>.

Los medios porosos se saturaron con 0.25 m de lámina de agua, para reproducir un riego por inundación. De la combinación de tratamientos de dos medios porosos y dos tipos de agua, se tuvieron los siguientes tratamientos: suelo regado con agua alcalina (SA), suelo regado con agua con mejoradores (Sam), subsuelo regado con agua alcalina (SbA) y subsuelo regado con agua con mejoradores (SbAm). En cada tratamiento se evaluó el desplazamiento de sales con cuatro sobrerriegos, equivalentes a 20% de volumen poroso (0.05 cm de lámina); en este caso, al lixiviado que se obtenga se le denominará "drenado". Finalmente, se suministraron siete

fertirriegos con las cinco fuentes de K, en ambos medios porosos, con los dos tipos de agua, por goteo en láminas subsecuentes de 0.04 m; en este caso, a la solución que percola a través de la columna de suelo se le llamará "lixiviado".

### Diseño de Tratamientos, Variables Medidas y Análisis

Se prepararon soluciones con la concentración de 150 mg L<sup>-1</sup> de K en ambos tipos de agua (A y Am); para ello, se usaron las siguientes fuentes potásicas: KNO<sub>3</sub>, KCl y K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Multi-K (12-2-44) y la forma de fertilizante líquido de tiosulfato de potasio K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0-0-25-17 S). El diseño experimental fue un factorial completo con tres variables y tres repeticiones: dos medios porosos (S y Sb), dos tipos de agua de riego (A y Am) y cinco fuentes de potasio y un testigo sin fertilizante. Cada repetición consistió de una columna. Los siete fertirriegos con lámina de agua de 0.04 m se aplicaron a intervalos de 3 días. El suministro de cada riego por goteo duró de 6 a 8 h, para evitar anegamiento en la superficie del suelo.

Los valores de pH y CE se obtuvieron en cuatro drenados del proceso de lavado de sales en las combinaciones SA, SAm, SbA y SbAm, así como en los siete lixiviados de los fertirriegos con K. Las mediciones se realizaron con un potenciómetro y conductímetro de doble función (Corning'90). El K<sup>+</sup> soluble de las fracciones de los lixiviados se cuantificó con el medidor de iones específico Cardy-Horiba, con un intervalo de 1 a 9900 mg L<sup>-1</sup>. La distribución de K en los medios porosos se midió a intervalos de 0.05 m de profundidad; para ello, se extrajo con acetato de amonio 1 N, pH 7.0 y una relación suelo:solución de 5:33. En la solución obtenida, se midió el K por espectrofotometría de emisión. El análisis estadístico se hizo con el programa SAS Versión 6.12 (SAS Institute, 1989) y se separaron las medias, para cada efecto de tratamientos, con la prueba de Tukey a 5%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Valores de pH, CE y K en Procesos de Lavado de Sales y Fertirriego con K

El valor promedio del pH de cuatro drenados en el lavado de sales con agua con mejoradores (Am) fue 8.36 y resultó ser el más bajo respecto al riego con agua

alcalina (A), cuyo pH fue 8.51. El valor medio del pH de siete fertirriegos de K en agua con mejoradores (Am) fue 8.42, mientras que en el tratamiento de fertirriego de K con agua alcalina (A) el pH fue 8.46. Lo anterior se relaciona con el ácido sulfúrico añadido para neutralizar 50% de los bicarbonatos presentes en el agua de riego y con la baja capacidad de amortiguamiento del pH que tienen los suelos.

En cuanto a la comparación entre medios porosos, el valor promedio de pH de suelo fue significativamente más alcalino en los drenados (8.58) y en los lixiviados (8.61), en comparación con el subsuelo que, con menor capacidad reactiva y presencia de solutos, presentaron valores de pH de 8.29 y 8.28, respectivamente. La suma de las láminas de riego de los procesos de infiltración para saturar las columnas, lavar sales y los fertirriegos con K fue de  $\approx 0.70$  m, equivalente a un volumen poroso de  $f \approx 3.33$ . La ligera disminución de la alcalinidad por añadir mejoradores al agua de riego se puede explicar por la neutralización de 50% de los bicarbonatos ( $1.68 \text{ me L}^{-1}$ ) con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y porque estos medios porosos tienen poca materia orgánica y alto contenido de arena gruesa con gravilla (CIC promedio de  $18.88 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ). Los cambios de pH del suelo asociados al tratamiento de agua con mejoradores se consideran momentáneos. Para lograr mayor estabilidad y mayor abatimiento del pH del suelo se requieren aplicaciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dirigidas al suelo asperjado o en el agua durante el riego con dosis de  $50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$   $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Miyamoto y Stroehlein, 1986).

La CE del agua alcalina con mejoradores aumentó en  $0.278 \text{ dS m}^{-1}$ , si a este valor se le resta la diferencia de CE registrada entre los drenados con agua alcalina ( $1.44 \text{ dS m}^{-1}$ ) y los drenados con agua con mejoradores ( $1.91 \text{ dS m}^{-1}$ ), entonces se puede afirmar que el agua con mejoradores desplazó sales con un valor de  $0.19 \text{ dS m}^{-1}$ . La magnitud de la CE por añadir mejoradores al agua alcalina aumentó en  $0.278 \text{ dS m}^{-1}$ . De manera análoga, para el proceso de los lixiviados, los valores de CE con A =  $1.11 \text{ dS m}^{-1}$  vs. la CE de Am =  $1.34 \text{ dS m}^{-1}$ , al restar el valor de la CE del yeso y el ácido sulfúrico quedó sólo una diferencia de  $0.048 \text{ dS m}^{-1}$ .

Los valores de pH de cuatro drenados en el lavado de sales fueron iguales, con un promedio de 8.44, mientras que los valores bajaron con siete fertirriegos, en el lixiviado sexto el pH fue 8.37 y en el séptimo fue 8.39. Sin embargo, el último valor de 8.39 se asocia con la precipitación de nutrimentos como P, Fe, Zn, Cu y Mn (Akinremi y Cho, 1991). Por otra parte, la concentración

de sales solubles se abatió conforme avanzaron los procesos de lavado y lixiviación; este comportamiento se confirma con los valores de CE:  $2.51 \text{ dS m}^{-1}$  en el primer drenado (de cuatro) y  $1.12 \text{ dS m}^{-1}$  del quinto lixiviado (de siete). En los lixiviados seis y siete aumentaron los valores de la CE de 1.25 a  $1.32 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente, por estar asociados con la pérdida del  $\text{K}^+$ .

El valor promedio de pH del conjunto de siete lixiviados del fertirriego con KCl y  $\text{K}_2\text{SO}_4$  fue de 8.43, estadísticamente menor que el testigo sin fertilizantes, con pH de 8.47. Todas las fuentes de K (excepto  $\text{KNO}_3$ ) aumentaron las sales solubles en los lixiviados (Cuadro 1).

El promedio de K en lixiviados, por efecto de fertirriego con K y con agua alcalina (A), fue de 56.6 mg, mientras que el valor de K en agua con mejoradores (Am) fue de 51.7 mg. Lo anterior implica que el Ca del yeso micronizado, ya soluble, se movió en el suelo en forma descendente por los riegos e interactuó con el K y redujo su desplazamiento a lo largo de la columna; por consecuencia, su valor disminuyó en los lixiviados (Armstrong y Tanton, 1992; Jafarzadeh y Burnham, 1992). Lo anterior se corrobora con Jobbágy y Jackson (2001), quienes, con base en el análisis de más de 20 000 datos de perfiles, concluyeron que la distribución del K en el suelo disminuye con la profundidad, en particular en Mollisoles y Ultisoles.

El suelo presentó concentraciones 7.73 veces mayores de  $\text{K}^+$  soluble en los lixiviados ( $95.8 \text{ mg L}^{-1}$ ), en comparación con los de los subsuelos ( $12.4 \text{ mg L}^{-1}$ ). Esto se explica debido a que el suelo está sujeto a la fertilización y a su mayor CIC asociada con una mayor proporción de partículas de textura fina (Dhillon *et al.*, 1989), así como con coloides orgánicos (Ogwada y Sparks, 1986; Stehouwer *et al.*, 1993) y contenido de

**Cuadro 1. Valores de pH, conductividad eléctrica y potasio por fuentes de potasio en lixiviados de columnas.**

Fuentes	pH	CE	K
		$\text{dS m}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$
Testigo	8.47 a	1.12 c	50.7 b
$\text{KNO}_3$	8.44 ab	1.19 bc	51.1 b
Multi-K	8.45 ab	1.24 ab	55.1 ab
KCl	8.43 b	1.28 ab	55.7 ab
$\text{K}_2\text{SO}_4$	8.43 b	1.29 a	54.8 ab
$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$	8.45 ab	1.23 ab	57.3 a

Valores con letras iguales no tienen diferencia significativa (Tukey, 5%). CE = conductividad eléctrica.

micas en los suelos (Mengel *et al.*, 1998). El hecho relevante de los altos valores de K soluble en los lixiviados del suelo implica, por una parte, la alta liberación de K nativo para las raíces de las plantas (Heckman y Kamprath, 1992) y, por la otra, el movimiento con el flujo de masas en el riego, ya sea de K nativo de la fertilización con abonos orgánicos y productos comerciales (Moog *et al.*, 1998).

De los siete lixiviados en promedio, al considerar tanto agua alcalina como agua con mejoradores, la concentración de K soluble disminuyó de 73.1, en el primer lixiviado, a 38.6 mg L<sup>-1</sup>, en el quinto lixiviado. Después aumentó la concentración de K en el sexto y séptimo lixiviados. La menor concentración de K en los primeros volúmenes del lixiviado se asocia con pérdidas del K nativo de la matriz de los medios porosos. El aumento de K, al final del proceso de lixiviación, se asocia con pérdidas de K añadido en las fuentes potásicas que difieren en solubilidad (Engelstad, 1985).

El K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentó la más alta concentración promedio de K soluble (mg L<sup>-1</sup>) en los siete lixiviados, con 57.3, le siguieron Multi-K, KCl y K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. El K soluble lixiviado con KNO<sub>3</sub> fue similar al testigo sin fertilizar (Cuadro 1). Esta variable permite deducir que existe una variada movilidad y disponibilidad de K por efecto de las fuentes en las columnas de ambos medios porosos, lo cual concuerda con lo observado por Engelstad (1985).

## Distribución de K en Suelo

El K extraído (mg) por profundidad y fuentes de K se presenta para las columnas de suelo regadas con A y Am (Cuadro 2).

La suma de K total en la columna testigo del suelo con agua (SA) fue de 207.7 mg y con KNO<sub>3</sub> fue de 272.5 mg (Cuadro 2). La diferencia de 64.8 mg de K proviene de los 42 mg del tratamiento y del K "desadsorbido o liberado por el medio poroso", cuyo valor es de 22.8 mg de K. De igual forma, se calculó el K desadsorbido para Multi-K, KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cuyos valores fueron 8.1, 16.2, 31.5 y 111.4 mg de K, respectivamente. De forma análoga, se procedió para las columnas de suelo con Am (Cuadro 2) y los cálculos de K desadsorbido para KNO<sub>3</sub>, Multi-K, KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fueron 26.5, 35.5, 28.2, 41.1 y 17.3 mg, respectivamente. Así, para A vs. Am en suelo se puede contrastar el K en columnas asociado con los tratamientos, con cada fertilizante, así como el K desadsorbido al descontar el K añadido con los fertilizantes (42 mg) (Cuadro 3).

Los promedios máximos de K total (mg), asociado con el tratamiento y desadsorbido se obtuvieron en los suelos con la aplicación de K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Cuadros 2, 3 y 4). Sin embargo, el añadir H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y yeso al agua de riego al tratamiento con la fuente de K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> redujo los valores en 25.4, 61.3 y 84.9% de K total, K de tratamientos y

**Cuadro 2. Potasio extraído con acetato de amonio 1 N en cada 5 cm de las columnas de suelo regadas con agua alcalina (A) y con agua con mejoradores (Am) en relación con cinco fuentes potásicas.**

Profundidad cm	Potasio											
	Testigo A	Testigo Am	KNO <sub>3</sub> A	KNO <sub>3</sub> Am	Multi-K A	Multi-K Am	KCl A	KCl Am	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> A	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Am	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> A	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Am
	mg											
0-5	10.16	7.30	25.18	28.83	27.61	29.00	28.83	28.31	31.44	27.96	28.66	19.28
5-10	12.50	10.32	17.37	18.41	17.02	18.41	20.14	19.45	19.10	21.01	29.52	15.98
10-15	14.33	13.87	21.53	21.88	19.10	20.32	19.97	22.06	23.45	17.71	21.36	15.45
15-20	17.89	16.10	23.79	22.75	19.62	21.53	20.49	21.88	22.92	23.10	26.92	18.06
20-25	18.93	22.89	21.88	23.79	18.76	23.10	21.01	23.62	20.84	27.09	33.69	26.05
25-30	17.63	20.78	21.01	21.36	21.36	25.36	21.01	24.83	23.62	23.62	28.83	25.53
30-35	19.54	20.42	25.18	24.14	27.44	25.36	22.40	23.45	23.10	25.18	46.72	27.09
35-40	19.19	18.68	22.23	22.75	23.10	25.70	23.45	23.79	24.31	26.05	23.62	26.57
40-45	21.45	20.23	24.31	25.18	22.40	24.31	22.23	23.79	23.62	25.36	25.18	23.27
45-50	18.23	19.78	24.31	23.97	22.58	26.40	22.58	25.70	19.10	25.70	29.00	21.19
50-55	19.19	22.62	23.97	21.19	20.84	25.01	21.88	20.67	23.97	25.70	26.05	24.31
55-60	18.58	17.10	21.71	24.31	17.89	23.10	21.88	22.75	25.70	24.66	41.51	26.57
Suma	207.70	210.10	272.50	278.60	257.80	287.60	265.9	280.30	281.20	293.10	361.10	269.40
Pro-medio	17.30	17.50	22.70	23.20	21.50	24.00	22.20	23.40	23.40	24.40	30.10	22.50

**Cuadro 3. Comparación del K asociado a tratamiento y desadsorbido en suelos con fuentes de potasio aplicadas en agua alcalina y agua con mejoradores.**

Calidad de agua	KNO <sub>3</sub>	Multi-NPK	KCl	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
----- mg -----					
K asociado a tratamientos, al restar el K del testigo					
A	64.8	50.1	58.2	73.5	153.4
Am	68.5 †	77.5 †	70.2 †	83 †	59.3 ‡
Promedio	66.7	63.8	64.2	78.3	106 §
K desadsorbido al restar el K de fertirriego					
A	22.8	8.1	16.2	31.5	111.4
Am	26.5 †	35.5 †	28.2 †	41.0 †	17.3 ‡
Promedio	24.7	21.8	22.2	36.3	64.4 §

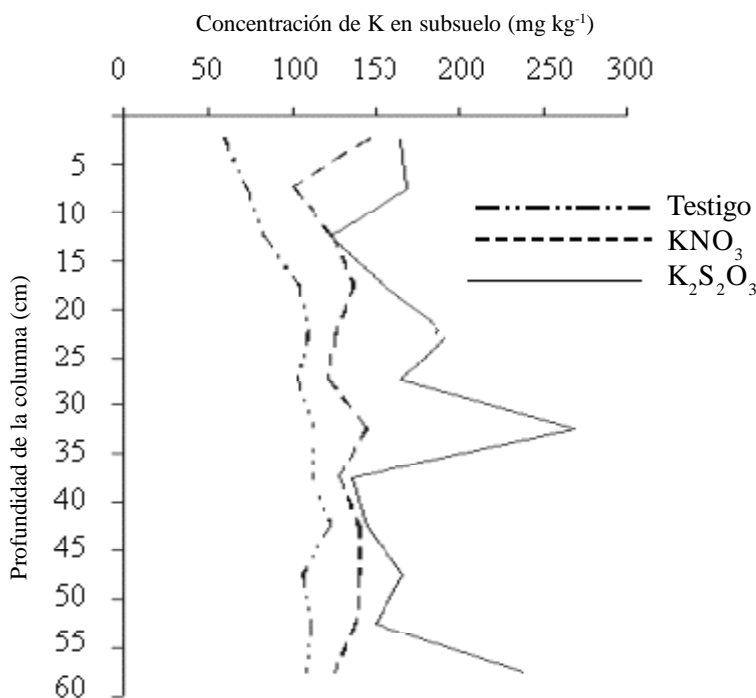
† = aumento de K por añadir mejoradores, ‡ = decremento de K por añadir mejoradores, § = máximo promedio de K.

K desadsorbido, respectivamente. Si se adopta el criterio de oferta de K a los cultivos con los tratamientos de las fuentes fertilizantes [el agregado al medio poroso y su efecto en la matriz del suelo al desadsorber K (Cuadro 3)], se observa la máxima disponibilidad de K con K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en suelos con agua salina de 153.4 mg kg<sup>-1</sup>. Le siguieron el K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Multi-NPK, regados con Am, con 83.0 y 77.5 mg kg<sup>-1</sup> de K, respectivamente.

En la Figura 1 se presentan las curvas de distribución de K (mg kg<sup>-1</sup>) en la profundidad, después de aplicar KNO<sub>3</sub> (representativa de todas las fuentes sólidas) y K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con agua alcalina. La distribución de K con KNO<sub>3</sub> presentó tres valores de mayor concentración a 5, 20 y 35 cm; en tanto con K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> estos incrementos extremos de concentración se midieron a 25, 35 y después de 55 cm, lo cual demuestra su alta movilidad en suelos regados sólo con agua alcalina.

### Distribución de K en Subsuelo

El efecto por tipo de agua de riego y las fuentes de potasio en subsuelo se incluye en el Cuadro 4. El K total promedio del testigo en subsuelo fue de 56 mg, el cual, comparado con el K total del testigo del suelo (209 mg), representa 3.73 veces más K desadsorbido en suelo que en el subsuelo, por el solo hecho de regar. Esta desorción de K por el proceso de humedecimiento y secado la reportan Poss *et al.* (1991); la mayor disponibilidad de K de los suelos enriquecidos por sedimentos de ríos la publicaron Rahmatullah *et al.* (1994) y el aumento de K por la presencia de limos y micas la señaló Mengel *et al.* (1998). La aplicación de 42 mg de K por columna en subsuelo aumentó la concentración de K total, con



**Figura 1. Distribución de K en columnas con suelo después de aplicar KNO<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en agua alcalina.**

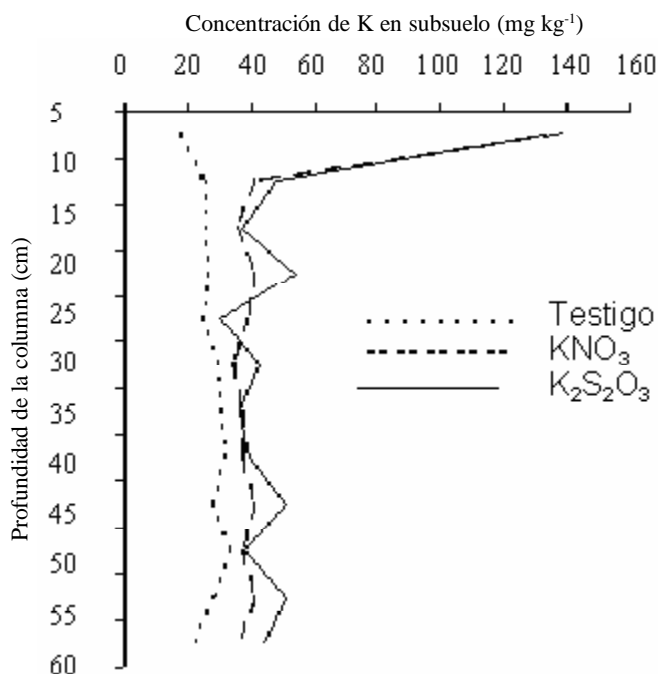
**Cuadro 4. Comparación de K total, K del tratamiento y K desadsorbido en subsuelo con fuentes de potasio aplicadas en agua alcalina y agua con mejoradores.**

Calidad de agua	Testigo	KNO <sub>3</sub>	Multi-NPK	KCl	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
----- mg -----						
K total						
A	55	90	88	97	98	105
Am	57 †	88 ‡	90 †	100 †	95 ‡	109 †
Promedio	56	89	89	98.5	96.5	106.5 §
K asociado a tratamientos al restar K del testigo						
A		35	33	42	43	50
Am		31 ‡	33 ‡	43 †	38 ‡	52 †
Promedio		33	33	42.5	40.5	51 §
K desadsorbido al restar K del fertirriego						
A		- 7	- 9	0	1	8
Am		- 11 ‡	- 9	1 †	- 4 ‡	10 †
Promedio		- 9	- 9	0.5	- 1.5	9 §

† = aumento de K por añadir mejoradores, ‡ = decremento de K por añadir mejoradores, § = máximo promedio de K.

respecto al testigo, y aumentó el K asociado a tratamientos (Cuadro 4); sin embargo, hubo una fijación promedio de 21.4% del K del KNO<sub>3</sub> y Multi-K aplicados e igual porcentaje promedio liberado del suelo al aplicar K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El movimiento vertical del K en las columnas del subsuelo con agua alcalina prácticamente fue nulo para las cinco fuentes de K (Figura 2). Más de 50% del K aplicado se retuvo en la capa superficial de

las columnas, entre 0 y 5 cm. Con los valores de K en subsuelo regado con agua con mejoradores se observó que 25% adicional del K aplicado se sumó a 50% retenido, esto se registró en la columna, entre 5 y 10 cm para todos los tratamientos, excepto con KNO<sub>3</sub>, con el cual el K aplicado siempre se mantuvo en la superficie. La interpretación de esto es compleja, ya que se reporta que el Ca del encalado reduce la disponibilidad de K en



**Figura 2. Distribución de K en columnas con subsuelo después de aplicar KNO<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en agua alcalina.**

la solución y, por consecuencia, la posibilidad de profundizar por flujo de masas (Engelstad, 1985; Jardine *et al.*, 1988; Jobbágy y Jackson, 2001), razón que contradice el leve movimiento del K en subsuelo con Am que incluye yeso micronizado (Armstrong y Tanton, 1992).

La mayor retención superficial del K en los subsuelos con  $\text{CaCO}_3$  sólo con agua se debe a la inactividad de Ca, ya que no recibió  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en el riego. El descenso en el contenido de K respecto a la profundidad la reportaron Wang *et al.* (2004), quienes encontraron que la capacidad amortiguadora de K y el K no intercambiable aumentaron con la profundidad del suelo. El hecho de que los subsuelos presenten mayores tasas de conductividad hidráulica fue contradictorio, sin embargo, la profundización del K fue superficial, aun con la fuente que presentó la mayor movilidad del  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . La explicación podría darse en términos de fijación de K por asociación con la mineralogía del subsuelo, la cual en este estudio sólo permite deducir una pobre disponibilidad de K (en las superficies planares o en los bordes de los látices de las arcillas) y una fijación del orden de 20% de K (entre los látices de las arcillas, por sustitución con otro catión). Estos conceptos están de acuerdo con los reportados por Dhillon *et al.* (1989), Stehouwer *et al.* (1993), Bal-Tal *et al.* (1995), Moog *et al.* (1998) y Miranda *et al.* (2005).

## CONCLUSIONES

El suelo liberó 3.73 veces más potasio (K) que el subsuelo. Los valores del pH disminuyeron ligeramente con los tratamientos con agua mejorada, en subsuelo, y al avanzar el proceso de lixiviación. La conductividad eléctrica fue menor con agua sin mejoradores en subsuelo y no varió significativamente durante la lixiviación. El añadir ácido sulfúrico y yeso micronizado para tratar el agua de riego disminuyó la disponibilidad de potasio para las fuentes KCl y  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . El subsuelo con  $\text{CaCO}_3$  presentó 50 a 75% de retención de K para las fuentes potásicas en los primeros 0.1 m. La fuente que presentó mayor movilidad y disponibilidad fue el  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , ya que se encontró en los lixiviados y los picos de las máximas concentraciones profundizaron a 0.35 y 0.55 m en suelo y subsuelo, respectivamente. Para aumentar la eficacia del abasto de K a la vid, se recomienda practicar el fertirriego sólo con agua alcalina con tiosulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), después continuar el tratamiento de

mejoradores para atenuar el efecto negativo de sales y la presencia de sodio en estos fluvisoles de la provincia del desierto sonorense.

## LITERATURA CITADA

- Akinremi, O. O. and C. M. Cho. 1991. Phosphate transport in calcium-saturated systems. II. Experimental results in a model system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1282-1287.
- Al-Sibai, M., M. A. Adey, and D. A. Rose. 1997. Movement of solute through a porous medium under intermittent leaching. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 711-725.
- Andersson, S., M. Simonsson, L. Mattsson, A. C. Edwards, and I. Oborn. 2007. Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil Use Manage.* 23: 10-19.
- Armstrong, A. S. B. and T. W. Tanton. 1992. Gypsum applications aggregated saline-sodic clay topsoil. *Eur. J. Soil Sci.* 43: 249-260.
- Barber, S. A. 1995. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. 2nd ed. John Wiley. New York, NY, USA.
- Bar-Tal, A., M. J. Eick, S. Feigenbaum, D. L. Sparks, and S. Fishman. 1995. Determination of rate coefficients for potassium-calcium exchange on vermiculite using a stirred-flow chamber. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 760-765.
- Beegle, D. B. and D. E. Baker. 1987. Differential potassium buffer behavior of individual soils related to potassium corrective treatments. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 18: 371-385.
- Dhillon, S. P., P. S. Sidhu, and R. C. Bansal. 1989. Release of potassium from some Benchmark soils of India. *J. Soil Sci.* 40: 783-797.
- Engelstad, O. P. 1985. Fertilizer technology and use. 3rd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- FAO-ISRIC-SICS. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos-Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo. Roma, Italia.
- Heckman, J. R. and E. J. Kamprath. 1992. Potassium accumulation and corn yield related to potassium fertilizer rate and placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 141-148.
- Jafarzadeh, A. A. and C. P. Burnham. 1992. Gypsum crystals in soils. *J. Soil Sci.* 43: 409-420.
- Jardine, P. M., G. V. Wilson, and R. J. Luxmoore. 1988. Modeling the transport of inorganic ions through undisturbed soil columns from two contrasting watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1252-1259.
- Jobbágy, E. G. and R. B. Jackson. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53: 51-77.
- Jungk, A. and N. Claassen. 1997. Ion diffusion in the soil-root system. *Adv. Agron.* 61: 53-110.
- Kool, J. B., J. C. Parker, and L. W. Zelazny. 1989. On the estimation of cation exchange parameters from column displacement experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1347-1355.
- Mansell, R. S., S. A. Bloom, R. D. Rhue, and H. M. Selim. 1986. Multispecies cation leaching during continuous displacement of electrolyte solutions through soil columns. *Geoderma* 38: 61-75.



- Mengel, K., B. Z. Rahmatullah, and H. Dou. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-derived soils. *Soil Sci.* 163: 805-813.
- Miranda, J. H., S. N. Duarte, P. L. Libardi e M. V. Folegatti. 2005. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. *Eng. Agric. Jaboticaba* 25: 677-685.
- Miyamoto, S. and J. L. Stroehlein. 1986. Sulfuric acid effects on water infiltration and chemical properties of alkali soils and water. *Trans. ASAE* 29: 1288-1296.
- Moog, H. C., T. Streck, and H. K. Cammenga. 1998. Modeling Ca/K exchange kinetics on montmorillonite and vermiculite. *Soil Sci.* 163: 382-393.
- Ogwada, R. A. and D. L. Sparks. 1986. Kinetics of ion exchange on clay minerals and soil. I. Evaluation of methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1158-1162.
- Poss, R. J., Fardeau H., Saragoni, and P. Quantin. 1991. Potassium release and fixation in Ferrasols (Oxisols) from Southern Togo. *J. Soil Sci.* 42: 649-660.
- Rahmatullah, M. A. Gill, B. Z. Sheikh, and M. Salim 1994. Bioavailable potassium in river-bed sediments and release of interlayer potassium in irrigated arid soils. *Soil Use Manage.* 10: 43-46.
- SAS Institute. 1989. SAS/STAT user's guide. Version 6.12. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Stehouwer, R. C., S. J. Traina, and J. W. Johnson. 1993. Potassium adsorption and exchange selectivity within an anhydrous ammonia fertilizer band. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 346-350.
- Uribe, E. and F. R. Cox. 1988. Soil properties affecting the availability of potassium in highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 148-152.
- Wang, J. J., L. D. Harrell, and P. F. Bell. 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 654-661.