

PÉRDIDAS DE NITRATOS Y SALINIZACIÓN DEL SUELO POR RIEGO POR GOTEO CON NITRÓGENO

Loss of Nitrates and Salt Accumulation in Soil by Drip Irrigation with Nitrogen

B. Zamudio-González^{1‡}, E. Mendoza-Nicolás², G. Alcántar-González³,
J. D. Etchevers-Barra³ y A. Vázquez-Alarcón²

RESUMEN

Existen modelos de predicción del movimiento de los nitratos en frentes de humedecimiento de suelos homogéneos o flujo preferencial en suelos estructurados; sin embargo, se desconoce la dinámica del lixiviado de los NO_3^- aplicados en riego por goteo asociados al lavado de K^+ , Na^+ y cambios del pH, la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) para distintas fuentes nitrogenadas. En laboratorio fueron instaladas columnas con suelo y subsuelo procedentes del estado de Sonora, México. Se evaluó la infiltración y drenaje para lavar sales mediante riego por inundación con agua alcalina (A), agua con yeso agrícola y ácido sulfúrico (aguayeso, Am). Se cuantificaron los nitratos y cambios de CE, pH, K^+ , Na^+ y RAS de 12 lixiviados de fertirriegos simulados por goteo con 310 mg L^{-1} de NO_3^- , en láminas de 4 mm. Se utilizaron siete fuentes comerciales de N. Las conclusiones fueron: a) en el suelo se infiltró más rápido con Am contra A; pero con respecto el lavado de sales, NO_3^- , K^+ y Na^+ fueron iguales; b) el subsuelo lixivió 10 veces más NO_3^- contra el suelo; c) los fertilizantes con base en NO_3^- presentaron curvas con un sólo pico de lixiviación de nitratos asociado al frente de humedecimiento desde el tercer fertirriego y curvas con dos a tres picos moderados de concentración de nitratos con fuentes amoniacales; d) con Am los valores de pH fueron menos alcalinos con $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ en el suelo y con KNO_3 y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ en el subsuelo; e) fue mayor la CE en subsuelo con

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y Am; f) el K^+ es más lixiviable en suelo al añadirle al aguayeso con fertirriego de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; g) la resalinización (CE) y sodificación (RAS) aumentó con NaNO_3 con agua alcalina (A); h) se asociaron altas concentraciones de nitratos en los frentes de humedecimiento en subsuelo, no así en suelo por riego por goteo.

Palabras clave: *fertilizantes nitrogenados, mejoradores del suelo, movimiento de agua, drenaje.*

SUMMARY

There are prediction models about the nitrates movement in the humidity fronts of homogenous soils or preferred flow in structured soils, but it is unknown the dynamics of leaching of the NO_3^- applied in drip irrigation associated with the washing of K^+ , Na^+ and changes of pH, electrical conductivity (EC) and sodium adsorption relationship (SAR) for different nitrogen sources. Soil columns were established with soil and subsoil from Sonora, Mexico. The infiltration and drainage required to wash out the salts with irrigation by flooding with alkaline water (A) and water with agronomic gypsum and sulfuric acid (Am) was evaluated. The nitrates and changes of EC, pH, K^+ , Na^+ and SAR from 12 leachates were measured equally to simulate fertirrigation by drip with 310 mg L^{-1} of NO_3^- in 4 mm water layers. Seven commercial sources of N were used. The conclusions were: a) the infiltration in soil was higher with Am than with A, but the wash out of salts, NO_3^- , K^+ and Na^+ were similar, b) subsoil leached 10 times more NO_3^- than soil, c) fertilizers with NO_3^- showed only one peak of nitrates leached associated with humidity front since third fertirrigation, and the fertilizers with ammoniac sources showed two and three peaks of nitrates since the third fertirrigation, d) with Am pH values were less alkaline with $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ in soil and with KNO_3 and $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ in subsoil, e) the EC in subsoil was higher with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and Am, f) the K^+ is more leachable in soil

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Boulevard Adolfo López Mateos km 4.5 carretera Toluca-Zitácuaro. 51350 Zinacantepec, estado de México, México.

[‡] Autor responsable (bzamudiog@yahoo.com.mx)

² Universidad Autónoma Chapingo-Departamento de Suelos. 56230 Chapingo, estado de México.

³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

when adding gypsum water, $Mg(NO_3)_2$ and $(NH_4)_2SO_4$, g) the salts (EC) and sodium (SAR) were increased with $NaNO_3$ with alkaline water (A), h) there were associations with high nitrate concentrations in humidity fronts in the subsoil but not in soil by drip irrigation.

Index words: *nitrogen fertilizers, soil amendments, water movement, drainage.*

INTRODUCCIÓN

La fertilización nitrogenada de los cultivos agrícolas en zonas áridas es creciente por la reducción de los contenidos de materia orgánica y la baja eficiencia de su aplicación que rara vez sobrepasa un 50% (Barber, 1984, Benjamin *et al.*, 1998). La estrategia de ahorrar agua de riego y fertilizantes en zonas áridas se ha orientado en suministrar éstos de acuerdo a la demanda de los cultivos al humedecer bulbos de suelo reducidos donde se concentran las raíces por medio de sistemas de riego presurizados entre los cuales se destaca el riego por goteo. Sin embargo, esta estrategia de ahorro de insumos, obligada para obtener alta productividad y rentabilidad de cultivos de hortalizas y frutales, ha derivado en problemas de acumulación de sales en sólo uno o dos ciclos con colapsos de la producción de cosechas (Matthews *et al.*, 2000). La gravedad del escenario descrito se agudiza y se hace evidente en los distritos de riego del norte de Sonora, al cambiar el patrón de cultivos tolerantes a sales y condiciones físicas adversas de los suelos como son trigo, cebada, algodón y sorgo entre otros; a cultivos sensibles como vid, cítricos, nogal y chile (Zamudio *et al.*, 2004).

Para resolver en la agricultura el problema de pérdida de nitratos por lixiviación y otros fenómenos de flujo de solutos en el agua de riego, se han propuesto soluciones matemáticas como: uso de modelos físicos al dar valores discretos a la ecuación general de flujo de agua en el suelo (Wang *et al.*, 1997); al asumir condiciones casi estacionarias de aplicaciones frecuentes, continuas y ligeras de agua (Celia *et al.*, 1990); al simular el flujo de agua en sistemas de riego por goteo al aplicar el modelo de Warrick (1974) para flujos constantes o ciclos intermitentes con goteros superficiales y enterrados 0.30 m según Coelho y Or (1997). Lo anterior permite apreciar la complejidad para predecir el movimiento del agua en el suelo bajo riego con goteo en un ciclo de producción y para predecir el movimiento de solutos

de los fertilizantes aplicados en el agua de riego. Sin embargo, los modelos de predicción de flujo de agua y solutos son, en el mejor de los casos, exitosos para las condiciones de manejo donde fueron desarrollados. Los modelos físicos requieren de variables de entrada que sólo algunos cuantos laboratorios pueden medir. Por ello han sido más adoptados los modelos empíricos o de balance de masas en capas de suelo como los desarrollados por Burns (1974) y Addiscott y Cox (1976). En estos modelos empíricos solo se requiere conocer la humedad volumétrica del suelo y la precipitación o riego neto al descontar la evaporación (Scotter *et al.*, 1993). La aplicabilidad de los modelos de predicción de solutos considera límites de fenómenos a corto y mediano plazo para predecir el lixiviado de nitratos en condiciones de suelos y aguas representativas con interés agronómico (Shirmohammadi *et al.*, 1998; Randal *et al.*, 2000; Sauer *et al.*, 2002). Por tales razones, se planteó como objetivo asociar las pérdidas de nitratos y la re-salinización de dos medios porosos cultivados con vid procedentes del semi-desierto del estado de Sonora México; con los procesos de infiltración, drenaje y doce fertirriegos por goteo simulados con agua alcalina y con mejoradores con la disolución de 310 mg L^{-1} de nitratos de siete fuentes nitrogenadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los medios porosos fueron muestras de suelo (S) colectados a profundidad de 0-0.60 m y subsuelo (Sb) de 0.60-1.20 m de la región productora de uva de mesa y melón en la localidad de Pesqueira en municipio de Hermosillo, Sonora. Son suelos representativos de 40% de los campos agrícolas del Distrito de Riego de la Costa de Hermosillo y 95% de las áreas del Distrito de la Costa de Caborca. Sus características físicas y químicas de los medios porosos fueron: saturación de humedad del 21 y 19% para suelo y subsuelo respectivamente; pH en extracto suelo-agua 1:2 de 8.50 para suelo y 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 la arena fue ligeramente más gruesa por un porcentaje mayor de gravilla; capacidad de intercambio catiónico de 17.80 en suelo y $19.95 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ en subsuelo; cationes en el suelo mg kg^{-1} de 1158 para Ca, 322 de Mg, 176 de Na y 320 de K y valores similares

para subsuelo en un orden de $\pm 5\%$; pero en el subsuelo con un alta reacción de efervescencia al aplicar HCl 10%.

Las características del agua de riego utilizada para los lavados de sales y para la aplicación de las siete fuentes de N, fueron: pH = 7.16, CE = 0.522 dS m⁻¹, y las siguientes cantidades, en me L⁻¹, de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻; 1.56, 0.84, 2.40, 3.36, 0.78 y 0.70, respectivamente. A esta agua se le representa con la letra (A). En esta agua se neutralizó el 50% de los bicarbonatos utilizando H₂SO₄ y se balanceó con yeso agrícola micronizado a < 200 mallas (96.18% pureza y 22.48% de Ca²⁺) a razón de 2 me L⁻¹ de Ca por me L⁻¹ de Na. Esta agua tratada con mejoradores se denominará en lo subsecuente como Am.

El diseño de los tratamientos de lixiviación de N fue un factorial completo para 2 tipos de agua \times 2 tipos de suelo \times 8 fuentes de N (7 fuentes de N y testigo sin fertilizante) con 3 repeticiones en arreglo de bloques al azar. De las 96 columnas, 48 fueron empacadas con suelo y 48 con subsuelo. Cada columna recibió 1000 g de los medios porosos secados al aire y tamizados a < 2 mm. El empacado de las columnas de vidrio de 10 cm² de área (radio = 1.784 cm) y profundidad (Z) de 0.60 m fueron empacadas al verter constantemente 600 cm³ de volumen de los medios porosos a través de un embudo con doble tamiz y agitación continua. Las columnas fueron fijadas en posición vertical. Se verificó el coeficiente de variación del empacado o densidad aparente de los medios porosos (criterio aceptable menor de 2%).

Se evaluó el proceso de infiltración y drenaje en grupos de 24 columnas para las combinaciones de suelo-agua, suelo-agua con mejoradores, subsuelo-agua y subsuelo-agua con mejoradores. En el proceso de drenaje para desalinizar los suelos y subsuelos con A y Am, se aplicaron 4 riegos (ri = 1 al 4) por inundación de 0.05, 0.10, 0.10, 0.10 m de lámina. La carga hidráulica fue descendente conforme infiltraron las láminas. Éstas ri se asocian a fracciones de lavado del volumen poroso (fi) del suelo de 0.14, 0.45, 0.46 y 0.48; y del subsuelo 0.19, 0.45, 0.46 y 0.48, respectivamente; estas fracciones son el total de lámina de agua necesaria para saturar los poros de ambos materiales (para suelo fue de 21 cm y en subsuelo de 19 cm). Se interpretan estos valores como un tercio aproximado de Z, que en este caso es de 0.60 m del empacado con los medios porosos en las columnas. Al final de los procesos de infiltración

y lavado, las columnas se envolvieron con papel aluminio para evitar posible proliferación de algas.

Se cuantificó la lixiviación de nitratos de las siguientes fuentes comerciales con N: KNO₃, Ca(NO₃)₂, NaNO₃ natural chileno, Mg(NO₃)₂·6H₂O, NH₄NO₃, CO(NH₂)₂ y (NH₄)₂SO₄. Estos fertilizantes se disolvieron en agua alcalina (A) y agua con mejoradores (Am) en una concentración equivalente de 310 mg L⁻¹ de NO₃ (5 me L⁻¹), y se aplicaron a las columnas con los dos medios porosos en 12 láminas de 4 mm cada una en fertirriego por goteo simulado con duración de 8 h y en intervalos de 72 h. A cada fertirriego en las columnas de los medios porosos saturados correspondió un lixiviado equivalente en volumen, al despreñar la evaporación bajo las condiciones controladas de laboratorio. Estos lixiviados se analizaron dentro de las siguientes 24 horas para evitar transformaciones del N y se les midió pH y CE con un potenciómetro de doble función Corning M90, y las concentraciones de NO₃⁻, K⁺ y Na⁺ se determinaron por electrometría con ionómetros marca Cardy-Horiba.

Se midió la re-salinización de los medios porosos a causa de la fertirrigación con goteo de Ca(NO₃)₂ y NaNO₃ en las combinaciones de suelo y subsuelo con A y Am contra un testigo sin fertilizar. Se partieron las columnas de vidrio, se seccionaron en tramos de 0.10 m. A la mitad longitudinal de cada tramo se le determinó el contenido de humedad en estufa. A la otra mitad de la muestra de medio poroso se utilizó para los análisis de la concentración de NO₃⁻, K, Na y CE. Antes de realizar los análisis químicos cada muestra húmeda, se conservó en bolsas de polietileno a 4 °C para evitar pérdidas por volatilización de N.

Los valores de humedad por gravimetría fueron usados en dos procedimientos. El primero, para calcular los gramos de agua de-ionizada que se debieron añadir a las muestras de suelo húmedo y así cumplir la relación de dos partes de agua por una de suelo seco y proceder a la filtración. Y la segunda, para expresar los contenidos de NO₃⁻, K⁺, Na⁺ y CE, a una humedad por gravimetría normalizada a 0.25 g g⁻¹, a partir de los extractos de la relación de 2:1.

Las medias de los efectos simples e interacciones por tipo de agua y fuente de N en los medios porosos fueron verificados con un análisis de varianza utilizando el programa SAS versión 6.12 (1999) y comparadas con la prueba de Tukey al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo de Humedecimiento y Lavado de Sales de los Medios Porosos

La duración de infiltración en columnas de suelos de una lámina de agua de 0.20 m, tratada con Am, fue de 7.25 h, valor inferior a la duración de 10.50 h de la misma lámina de agua pero sin tratar (A) en los mismos suelos. En las columnas empacadas con subsuelos no hubo diferencia en infiltración. Estos resultados justifican la práctica de los viticultores de adicionar ácido sulfúrico y yeso micronizado en el riego de fondo de humedecimiento de los perfiles al inicio del ciclo asociado a la poda de guías para favorecer una rápida y vigorosa brotación de los viñedos.

Después de humedecer los medios porosos contenidos en las columnas (riego simulado de fondo de humedad en terrenos de vid), se procedió a lavar la sal de origen en campo asociada a los fertirriegos del año anterior y a la práctica de invierno de abonado orgánico del viticultor. Para ello se emplearon en suelo fracciones de drenaje de (Cuadro 1, fi acumulada) de 0.14, 0.59, 1.05 y 1.53; y en subsuelo (Cuadro 2) de 0.19, 0.64, 1.10 y 1.58. Los valores de pH aumentaron en suelo y subsuelo al momento de aplicar la tercera fracción de lavado hasta 9 unidades y después bajaron discretamente, condición propicia para la precipitación de P, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn según Alarcón (2004); en tanto el lavado del exceso de sales en suelo se logró con la tercera fracción fi = 1.05 y en subsuelo bastó con la segunda fracción fi = 0.64 en acuerdo a conceptos publicados por Ayers y Westcott (1987) y Tanji (1990). Los nitratos y sodio guardaron la misma tendencia anterior para suelo

y subsuelo; ya que por arriba de 1000 mg kg⁻¹ de nitratos se promovió el crecimiento vegetativo excesivo en detrimento a la fructificación (Williams, 1991); y concentraciones absolutas mayores de 5 me L⁻¹ de Na o más de 100 mg kg⁻¹ causan quemaduras y desórdenes nutricionales (Jones *et al.*, 1991). Los valores de K se mantuvieron altos en suelo (más de 100 mg kg⁻¹), aún después de aplicar las 4 fracciones de lavado. En contraste, en subsuelo la concentración de K lavado con agua sola o con mejoradores se encontró en concentración menor a 100 mg kg⁻¹ a partir de la segunda fracción de drenaje (Zamudio *et al.*, 2007).

Los resultados anteriores implican contradicciones prácticas y teóricas. En la práctica, los viticultores del norte de México incorporan estiércol en poscosecha durante el otoño-invierno en la parte superior del bulbo de humedecimiento del suelo, lo cual provoca alta concentración de sales y nitratos (Randall *et al.*, 2000). Estas sales necesariamente deberán desplazarse en el siguiente ciclo de producción con el riego de fondo de humedecimiento. En lo teórico, las cantidades de nitratos y potasio lixiviadas, son valores económicos perdidos y se tendrá la necesidad de restituirlos en el programa de fertirriego. Además, se intensifica la contaminación de los mantos acuíferos que abastecen de agua potable por bombeo profundo del orden de 100 a 150 m pero aguas arriba donde viven los habitantes de la ciudad capital de Hermosillo, Sonora (Zamudio *et al.*, 2004). La solución en los componentes anotados debe orientarse en acoplar la demanda nutrimental de los cultivos con la oferta en el programa de fertirrigación con el control de valores extremos permisibles en el medio de la rizosfera y un uso más eficiente de los fertilizantes en el entorno (Johnson *et al.*, 1997; Bruulsema *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Comparación de medias de pH, sales lavadas, NO₃⁻, K⁺ y Na⁺ en cuatro drenados en suelo con agua sola (A) y agua con yeso agrícola y ácido sulfúrico (Am).

fi acumulada	pH		Sales		NO ₃ ⁻		K ⁺		Na ⁺	
	A	Am	A	Am	A	Am	A	Am	A	Am
	dS m ⁻¹				----- mg kg ⁻¹ -----					
0.14	8.5 b	8.6 b	14.1 a	14.6 a	8141 a	6933 a	228 a	323 a	351 a	437 a
0.59	8.6 b	8.6 b	4.78 b	5.66 b	1475 b	1620 b	189 b	225 b	196 b	227 b
1.05	9.0 a	9.0 a	1.55 b	1.77 c	317 c	247 c	142 c	135 c	91 c	94 c
1.53	8.9 a	8.9 a	1.16 b	1.41 c	180 c	169 c	102 d	103 d	69 d	66 d
Promedio	8.8	8.8	5.4	1.86	2528	2242	165	197	177	206
Coefficiente de variación	1.25	1.28	15.1	18	17.6	41.4	8.9	17	10.5	17.5

Medias con letras diferentes, en una misma columna, no son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.5\%$). fi = fracción de drenaje. Indicar que relevancia (o que significa) tiene r² en este análisis.

Cuadro 2. Comparación de medias de pH, CE, NO₃⁻, K⁺ y Na⁺ en cuatro drenados en subsuelo con agua sola (A) y agua con yeso agrícola y ácido sulfúrico (Am).

fi acumulada	pH		Sales		NO ₃ ⁻		K ⁺		Na ⁺	
	A	Am	A	Am	A	Am	A	Am	A	Am
	dS m ⁻¹				----- mg kg ⁻¹ -----					
0.19	8.1 c	8.1 c	11.1 a	9.9 a	5837 a	5200 a	87 a	94 a	267 a	267 a
0.64	8.7 b	8.7 b	1.53 b	1.6 b	319 b	288 b	26 b	29 b	73 b	79 b
1.1	8.9 a	8.9 a	0.79 c	1.09 c	56 b	139 b	20 bc	20 c	55 c	68 bc
1.58	8.7 b	8.7 b	0.67 c	0.97 c	32 b	78 b	14 c	17 c	46 c	56 c
Promedio	8.6	8.6	3.51	3.39	1561	1426	37	40	110	117
Coefficiente de variación	0.67	1.12	26	17.8	55.5	43.4	23	22	19.6	14.8

Medias con letras diferentes, en una misma columna, no son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.5\%$). fi = fracción de drenaje.

Fertirriego con Siete Fuentes con Nitrógeno

Se simuló en condiciones de laboratorio la aplicación de 12 fertirriegos por goteo con agua alcalina (A) y agua con mejoradores (Am) con 7 fuentes de N comparados contra testigos sin fertilizar.

En suelo, los testigos regados sin fertilizante con A y Am el contenido de nitrato, en cada uno de los 12 lixiviados para cada uno de los fertirriegos fueron en promedio menores a 100 mg L⁻¹ (< 2 me L⁻¹ de nitratos). En subsuelo, los testigos regados con A y Am, el contenido de nitratos inició con 100 mg L⁻¹, luego presentó un pico del tercer al quinto riego para terminar

hasta las curvas de concentración estabilizadas alrededor de 100 mg L⁻¹, similares a los testigos de suelo (Figura 1).

El abasto de N en el suelo debe ser continuo y suficiente para mantener una concentración del orden de 2 a 3% de N en los tejidos de pecíolos de vid (Jones *et al.*, 1991; Williams, 1991). Por falta de abasto de N en raíces, la planta de vid deberá de movilizar aminoácidos de reserva en el siguiente ciclo de crecimiento anual.

El nitrato lixiviado medido durante los 12 fertirriegos con las fuentes de fertilizantes con nitrato como KNO₃, NaNO₃, Ca(NO₃)₂, Mg(NO₃)₂ fueron similares. El fenómeno anterior se repitió con CO(NH₂)₂; que se

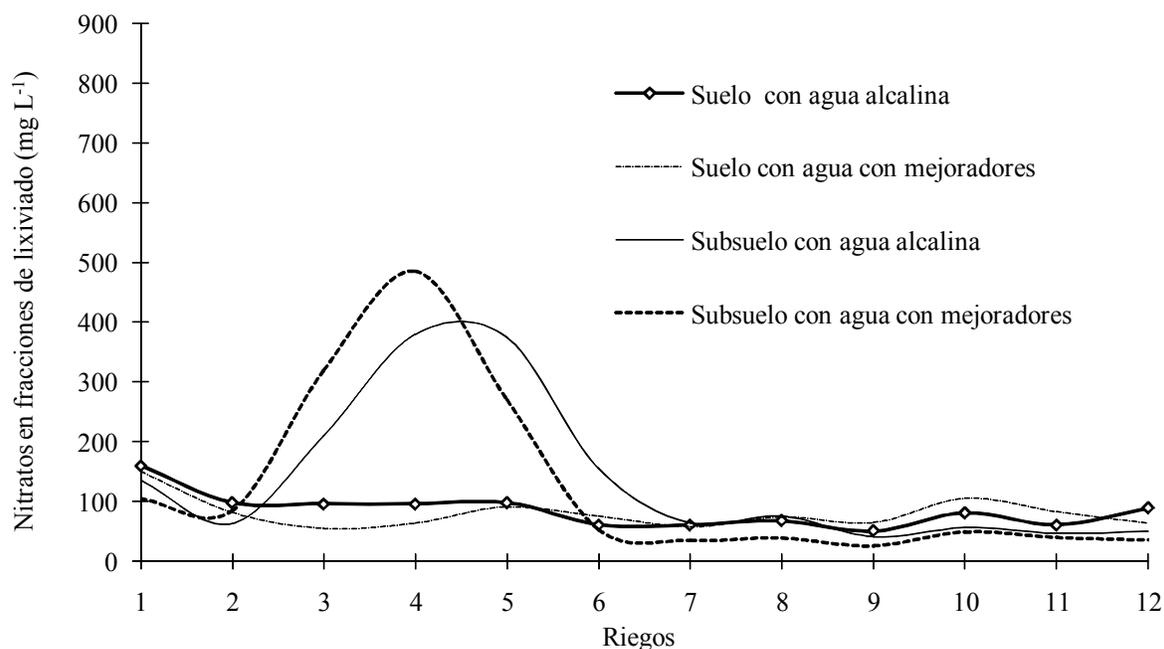
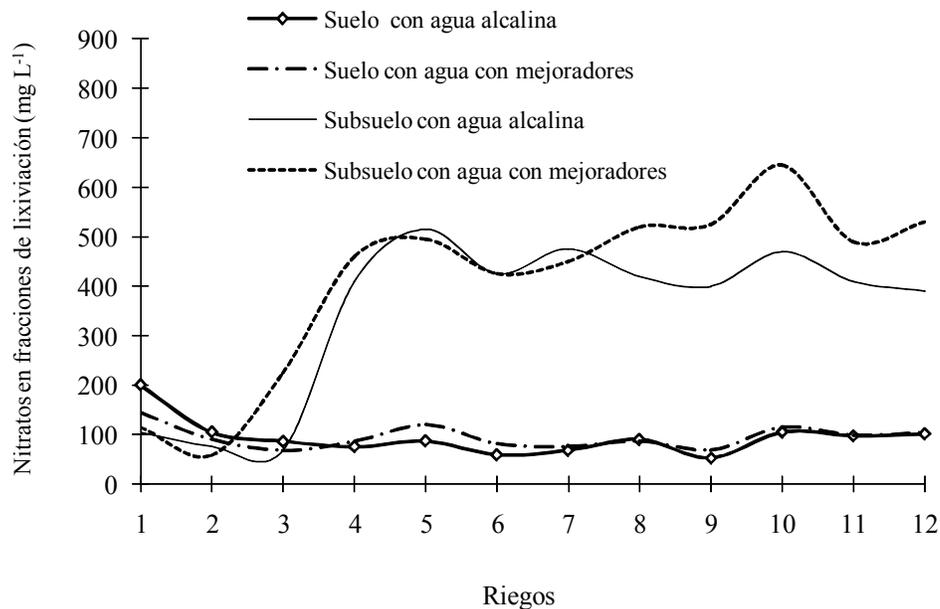


Figura 1. Concentración de nitrato en las 12 fracciones de lixiviación en suelo y subsuelo en testigos sin fertilizar con riego con agua alcalina y agua con mejoradores.



Figuras 2. Concentración de nitrato lixiviado de suelo y subsuelo al aplicar KNO₃ con riego por goteo con agua alcalina y con mejoradores.

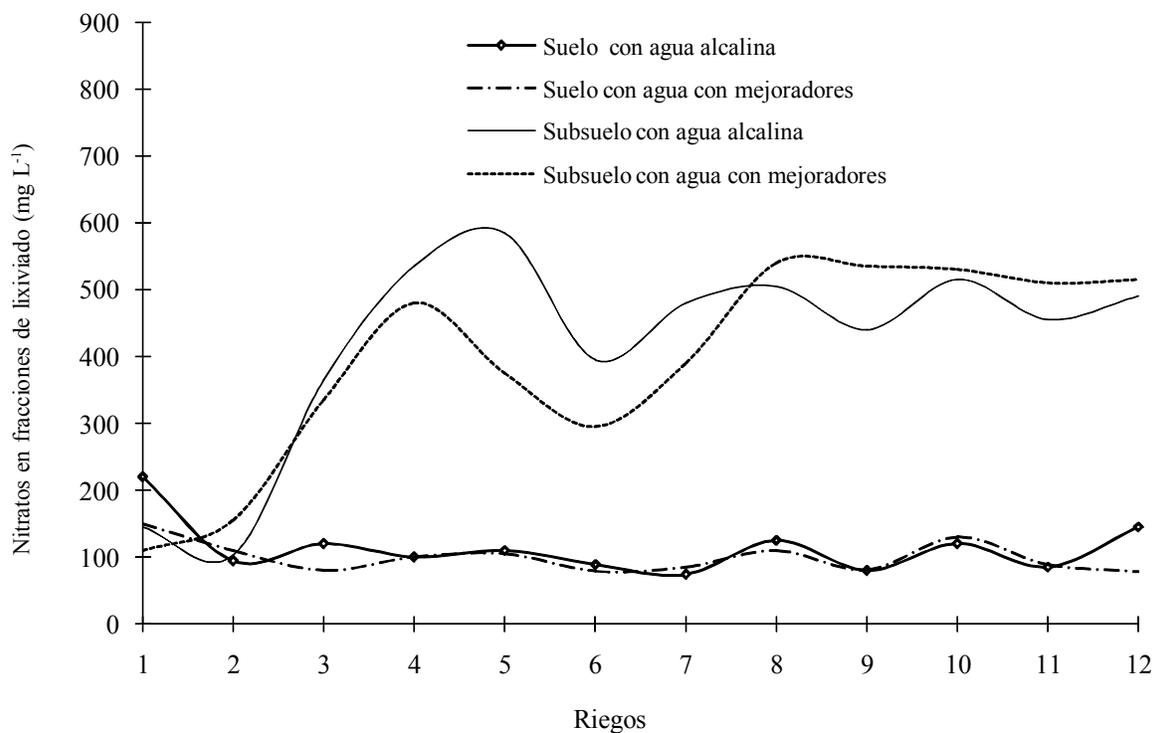


Figura 3. Concentración de nitrato lixiviado de suelo y subsuelo al aplicar CO(NH₂)₂ en riego por goteo con agua alcalina y con mejoradores.

hidrolizó y nitrificó tan pronto, por lo cual su medición fue similar a las fuentes con nitrato. En las Figuras 2 y 3 se presentan las curvas de los nitratos medidos correspondientes a KNO_3 y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

En suelo, las concentraciones de nitratos de las 12 fracciones de lixiviación con el fertirriego de KNO_3 y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ con A y Am, invariablemente se midieron del orden de 100 mg L^{-1} de NO_3^- ; tal como se encontró en los testigos de suelo sin fertilizar. En cambio en subsuelo, bastaron dos fertirriegos para detectar el aumento de nitratos en los lixiviados, ya que después del tercero hasta el 12 fertirriego con A y Am, las concentraciones de nitratos fueron del orden de 500 mg L^{-1} . El añadir mejoradores al agua de riego favoreció un mayor desplazamiento de nitratos en subsuelo en las fracciones de lixiviación 8 a 12, tanto para de KNO_3 y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Cada fertirriego fue dado con la concentración de 310 mg L^{-1} de NO_3^- en 0.04 m de lámina de agua de riego. Se deduce que el suelo con una menor tasa de conductividad hidráulica retiene el nitrato aplicado; en cambio, en el subsuelo el desplazamiento del nitrato se observó con los frentes de humedecimiento de acuerdo a los modelos de Burns (1974) y Addiscott (1977). Las fluctuaciones de nitratos en los lixiviados se explican por el fertirriego intermitente cada 72 horas y su acentuación en la urea por la transformación a nitratos.

En contraste a los trazos suavizados y sostenidos de las concentraciones de nitratos de los fertirriegos con KNO_3 en subsuelo; se presentan las gráficas con curvas fluctuantes con el fertirriego con NH_4NO_3 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Figuras 4 y 5). Con estas dos fuentes con amonio, se identifican dos picos en las fracciones 4 y 10. Este efecto de pico únicamente fue medido en urea, en la fracción del fertirriego 5. El radical $-\text{NH}_2$ de la urea con respecto al NH_4^+ de los otros fertilizantes se oxidaron a nitratos en menor tiempo (Tisdale *et al.*, 1993) y no presentaron este fenómeno de doble fluctuación de la concentración de nitratos (Addiscott y Cox 1976). De nueva cuenta, se observó consistentemente con NH_4NO_3 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en el suelo, las fracciones de lixiviación tuvieron del orden de 100 mg kg^{-1} de nitratos, presuntamente porque el amonio se mantuvo retenido.

La discusión de balance de masas se profundiza al considerar que cada columna con un peso de 1000 g de los medios porosos recibió al final el volumen de 0.480 L de 12 fertirriegos (0.04 m de lámina de solución es $4 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}^2$ de área cilíndrica de las columnas de vidrio son 40 cm^3 por fertirriego con 310 mg L^{-1} de nitrato). Esto es; si un L de fertirriego tiene 310 mg de nitrato, 0.480 L^{-1} contiene 148.8 mg de nitrato, mismos que representan la entrada de nitratos en cada uno de los 1000 g de los medios porosos de cada columna. Ahora bien, el testigo regado sin nitratos tanto con A y Am

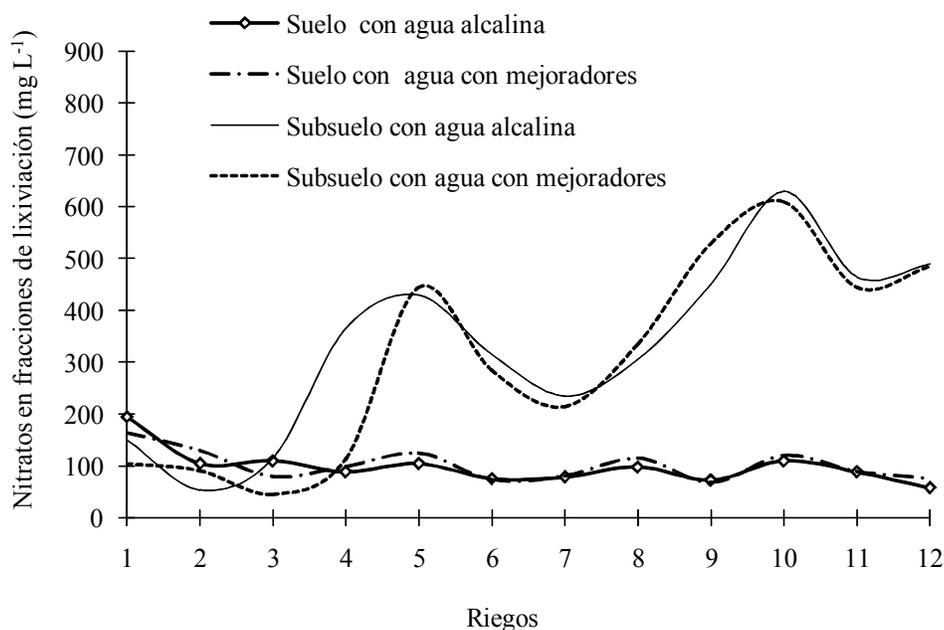


Figura. 4. Concentración de nitrato lixiviado de suelo y subsuelo al aplicar NH_4NO_3 en riego por goteo con agua alcalina y con mejoradores.

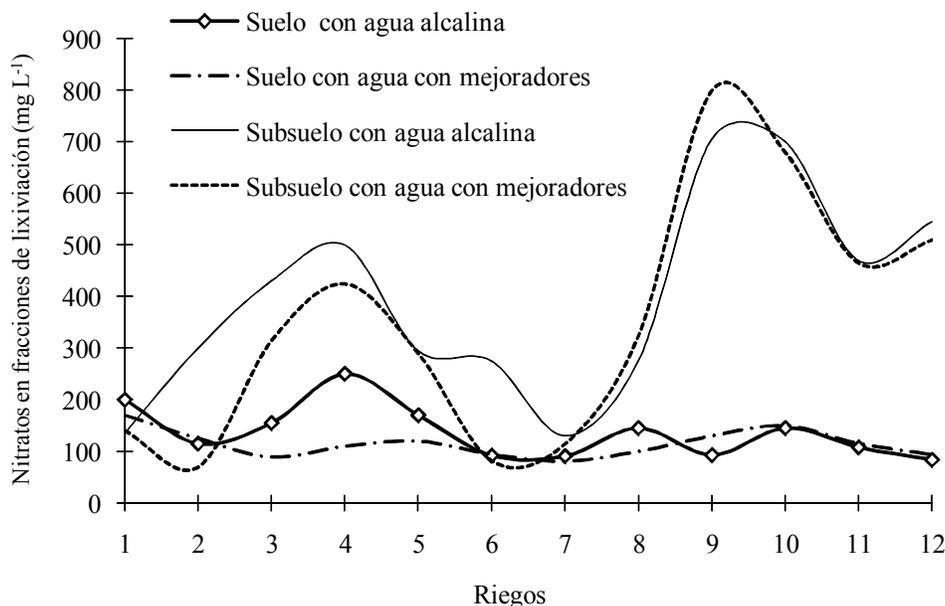


Figura 5. Concentración de nitrato lixiviado de suelo y subsuelo al aplicar $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en riego por goteo con agua alcalina y con mejoradores.

(suelo y subsuelo); la entrada de este nutrimento es cero; deduciéndose que la suma de nitratos lixiviados proceden de la mineralización de los medios porosos una vez que fueron expuestos a lavado en el drenaje. En este sentido, el promedio de nitrato lixiviado en doce riegos sin fertilizante en suelos con los tratamientos testigo con A y Am fue de 40 mg y en los subsuelos de 64 mg (Cuadro 3). Este procedimiento de cálculo se realizó para cada una de las 7 fuentes de N del diseño; en los cuales sí se dieron entradas de 148.8 mg de nitrato en las columnas. Para deducir el nitrato neto lixiviado, procedente de la fuente nitrogenada de cada tratamiento, a cada tratamiento de las fuentes nitrogenadas se le descontó el valor de los testigos respectivos de cada medio poroso. De este modo, se encontró que la pérdida, o lavado, de nitrato aplicado en promedio de las siete fuentes nitrogenadas en las columnas con subsuelo fue del orden de 73.1% y en suelo de 7.0%. Esto es, más de 10 veces se perdió nitrato en el medio poroso del subsuelo respecto al suelo. Contrario a lo esperado, la urea en el subsuelo presentó la mayor lixiviación de nitrato; 89.4%. Al final del proceso de fertirriego, con mayor precisión en los fertirriegos 8 al 12; el uso de mejoradores en el agua (agrícola micronizado y H_2SO_4) causó una mayor pérdida de nitratos lixiviados tanto en suelo como subsuelo, presuntamente por una mayor conductividad hidráulica. Es constante la necesidad de revisar y mejorar las prácticas en los sistemas de producción agrícola

moderna para maximizar la productividad y la eficiencia del uso de fertilizantes de acuerdo a Fixen (2009).

Re-salinización de los Medios Porosos

La re-salinización de las columnas empacadas con suelo y subsuelo después de aplicar 12 fertirriegos con 310 mg L^{-1} de nitrato con las fuentes de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y NaNO_3 , fue medida con CE, Na^+ y relación de adsorción de sodio RAS, Cuadro 4. La prueba de separación de las medias fue hecha con 12 repeticiones al integrar datos

Cuadro 3. Cálculo por balance de masas del nitrato lixiviado por fuente de nitrógeno aplicado en fertirriego con y sin mejoradores al sustraer el valor del testigo respectivo en el suelo y subsuelo.

Fuente de N	Suelo		Subsuelo	
	mg L ⁻¹	%	mg L ⁻¹	%
Testigo	40	-	64	-
KNO_3	45	3.4	182	79.3
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	47	4.7	168	69.9
NaNO_3	45	3.4	166	68.5
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	54	9.4	164	67.2
NH_4NO_3	49	6.0	154	60.5
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	53	8.7	197	89.4
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	60	13.4	179	77.3
Promedio	49	7.0	159	73.1

Cuadro 4. Conductividad eléctrica (CE), Na⁺ y relación de adsorción de sodio (RAS) en suelo y subsuelo después de aplicar 12 fertirriegos con 310 mg kg⁻¹ de nitratos con base en Ca(NO₃)₂ y NaNO₃.

Fuente de N	CE		Na ⁺		RAS	
	Suelo	Subsuelo	Suelo	Subsuelo	Suelo	Subsuelo
	----- dS m ⁻¹ -----		----- mg kg ⁻¹ -----			
Testigo	3.1 b	2.2 b	239 a	218 b	1.32 a	1.18 a
Ca(NO ₃) ₂	4.0 a	3.0 a	245 a	222 b	0.99 b	0.89 b
NaNO ₃	4.2 a	3.1 a	259 a	268 a	1.04 b	1.18 a
Promedio	3.71	2.75	248	236	1.12	1.08

Valores con letras iguales en una misma columna, no tienen diferencia significativa con la prueba de Tukey al 5%.

de los tratamientos de las columnas regadas tanto con A como con Am. Con relación a la CE el valor promedio con suelo fue de 3.71 con un CV de 24.5% y en los subsuelo de 2.75 con un CV de 16.1%. Los fertirriegos con ambas fuentes nitrogenadas aumentaron la salinidad en el suelo; 4.0 dS m⁻¹ con Ca(NO₃)₂ y 4.2 dS m⁻¹ con NaNO₃ en comparación a los testigos sin fertilizar cuyo valor fue 3.1. Análogamente, el contenido de Na aumentó en el subsuelo fertilizado con NaNO₃ con un valor a 268 mg kg⁻¹ comparado al testigo sin fertilizar con 218 mg kg⁻¹. En suelo sin fertilizar o testigo, la RAS fue mayor con respecto los tratamientos fertilizados. En subsuelo, la aplicación con Ca(NO₃)₂ permitió reducir la RAS en comparación al testigo y el tratamiento con NaNO₃.

Aún cuando en el suelo los valores promedio de CE, Na⁺ y RAS fueron mayores contra el subsuelo; no hubo diferencia estadística de estas variables en las seis profundidades. En cambio en el subsuelo, el contenido de Na⁺ y la RAS fueron significativamente mayores a la profundidad de 0.20 a 0.30 m, con valores de 368 mg L⁻¹ y 1.58 RAS, respectivamente (Cuadro 5).

El aumento de los índices RAS con el uso de NaNO₃ en medios porosos ubicados en zonas desérticas de texturas ligeras con baja capacidad de amortiguamiento representa un alto riesgo al aumentar la concentración de Na⁺ en el bulbo de humedecimiento por goteo donde crecen densamente las raíces de vid. Este cultivo es muy sensible a este elemento químico (Jones *et al.*, 1991). Una previsión, para mantener baja la RAS en los suelos y subsuelos de estos ecosistemas frágiles del desierto, es adicionar mejoradores en el agua de riego como yeso micronizado y ácido sulfúrico; este último compuesto sólo se recomienda cuando exista presencia de carbonato de calcio en los medios edáficos (Miyamoto y Stroehlein, 1986; Ayers y Westcott, 1987; Tanji, 1990).

CONCLUSIONES

En columnas empacadas en laboratorio con suelo y subsuelo procedentes del semi-desierto del estado de Sonora México, expuestas a procesos de infiltración, drenaje o lavado de sales y doce fertirriegos por goteo

Cuadro 5. Conductividad eléctrica (CE), concentración de Na⁺ (mg) y relación de adsorción de sodio (RAS) para seis profundidades en suelo y subsuelo después de aplicar 12 fertirriegos con 310 mg L⁻¹ de nitratos con base en NaNO₃.

Profundidad	CE		Na ⁺		RAS	
	Suelo	Subsuelo	Suelo	Subsuelo	Suelo	Subsuelo
m	----- dS m ⁻¹ -----		----- mg kg ⁻¹ -----			
0.00 – 0.10	3.66 a	3.37 a	284 a	231 ab	1.20 a	0.99 ab
0.11 – 0.20	3.66 a	3.36 a	240 a	339 ab	0.97 a	1.41 ab
0.21 – 0.30	4.01 a	3.49 a	244 a	368 a	0.97 a	1.58 a
0.31 – 0.40	4.43 a	2.64 a	258 a	201 b	0.97 a	0.90 b
0.41 – 0.50	4.89 a	2.73 a	276 a	222 ab	1.00 a	1.07 ab
0.51 – 0.60	3.71 a	2.72 a	253 a	203 b	1.11 a	0.98 ab
Promedio	3.71	2.75	247	235	1.12	1.08

Valores con letras iguales, en una misma columna, no tienen diferencia significativa con la prueba de Tukey al 5%.

simulados durante 36 días preparados con agua alcalina y con mejoradores en la disolución de 310 mg L⁻¹ de nitratos de siete fuentes nitrogenadas, se concluye lo siguiente:

En suelos con agua alcalina y tratada con mejoradores, se lixiviaron en promedio 7% del nitrato aplicado contra 73% del subsuelo con carbonato de calcio; todas las fuentes presentaron igual pérdida por lixiviación de nitratos; desde el tercer fertirriego las fuentes nítricas presentaron en los lixiviados un solo pico de alta concentración de nitratos asociado al frente de humedecimiento en comparación a curvas de distribución de las fuentes amoniacales con dos a tres picos de concentración de nitratos de menor concentración; los valores de pH más bajos se obtuvieron con sulfato de amonio y ácido sulfúrico pero fueron más salinos; la resalinización y más altos valores de la RAS se observaron con nitrato de sodio con agua alcalina; y valores frecuentes medidos de pH hasta de 9 en los lixiviados presuponen altas precipitaciones de fósforo, calcio, magnesio, hierro, zinc, cobre y manganeso en el medio de la rizósfera de la vid.

LITERATURA CITADA

- Addiscott, T. M. and D. Cox 1976. Winter leaching of nitrate from autumn-applied calcium nitrate, ammonium sulphate, urea and sulphur-coated urea in bare soil. *J. Agric. Sci.* 87: 381-389.
- Addiscott, T. M. and R. J. Wagenet. 1985. Concepts of solute leaching in soils: a review of modeling approaches. *J. Soil Sci.* 36: 411-424.
- Alarcón V., A. L. 2004. Diagnóstico de nutrición agrícola. Máster de nutrición vegetal de cultivos hortícolas protegidos. ETSIA. UPCT. Cartagena, España.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcott. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Riego y Drenaje No. 29. Ed. FAO, Vol. 29. Roma, Italia.
- Barber, S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Benjamin, J. G., Porter, L. K. Porter, Duke, H. R. Duke,, Ahuja, L. R. Ahuja, and G. Butters. 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1103-1108.
- Bruulsema, T. W., C. Witt, F. García, S. Li, T. N. Rao, F. Chen, and S. Ivanova. 2008. A global framework for fertilizer BMPs. *Better Crops* 92: 13-15.
- Burns, I. G. 1974. A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *J. Soil Sci.* 25: 165-178.
- Celia, M. A., E. T., Bouloutas, and R. IL. Zarba. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.* 26: 1483-1496.
- Coelho, E. F. and D. Or. 1997. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1331-1341.
- Fixen, P. E. 2009. Maximizing productivity and efficiency in contemporary agriculture. The proceedings of the international plant nutrition colloquium XVI. Department of plant sciences. UC Davis. Sacramento, CA, USA.
- Johnson, J. W., T. S. Murrell, and H. F. Reetz. 1997. Balanced fertility management: A key to nutrient use efficiency. *Better Crops* 81: 3-5.
- Jones, B. Jr., J. B. Wolf, and H. A. Mills. 1991. Plant analysis handbook: Micro-Macro Publishing. Athens, GA, USA.
- Matthews, A. M., A. M. Poortwood, A. M., A. C. Armstrong, A. C., P. B. Leeds-Harrison, P. B., G. L. Harris, G. L., J. A. Catt, J.A., and T. M. Addiscott. 2000. CRACK-NP, development of a model for predicting pollutant transport in cracking clay soils. *Soil Use Manage.* 16: 279-284.
- Miyamoto, S. and J. L. Stroehlein. 1986. Sulfuric acid effects on water infiltration and chemical properties of alkaline soils and water. *Am. Soc. Agric. Engin.* 29: 1288-1296.
- Randall, G. W., T. K. Iragavarapu T. K., and M. A. Schmitt. 2000. Nutrient losses in subsurface drainage water from dairy manure and urea applied for corn. *J. Environ. Qual.* 29: 1244-1252.
- SAS Institute. 1999. User's guide. Versión 8, SAS Institute, Cary, NC, USA
- Sauer, S., W. , Haussmann, and T. Harrach. 2002. Effective rooting depth, percolation water, and nitrate leaching in deeply developed loess soils of a water-shortage area. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 269-273.
- Shirmohammadi, A., B. Ullen, B., L. F. Bergstrom, L. F., and W. G. Knisel, 1998. Simulation of nitrogen and phosphorus leaching in a structured soil using GLEAMS and a new sub model, "PARTLE". *Am. Soc. Agric. Engin. ASAE* 4: 353-360.
- Tanji, K. K. 1990. Agricultural salinity assessment and management. ASCE Manual and Reports on Engineering . Practice No. 71. New York, NY, USA. 113-186.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson W. L., J. D. Beaton J. D., and J. L. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers. Macmillan , Publishing. New York, NY, USA.
- Wang, D., S. R. Yates, J. Simunek, and M. T. van Genuchten. 1997. Solute transport in simulated conductivity fields under different irrigations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123: 336-343.
- Warrick, A. W. 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38: 383-386.
- Williams, L. E. 1991. Vine nitrogen requirements utilization of sources from soils, fertilizers, and reserves. pp. 62-66. *In: American Society for Enology and Viticulture, ASEV (eds.). International symposium on nitrogen in grapes and wine. Seattle, WA, USA.*
- Zamudio-González, B., A. Vázquez-Alarcón, J. A. Salazar-Hernández y G. Alcántar-González. 2007. Disponibilidad y movimiento vertical de potasio en fluvisoles con riego por goteo simulado. *Terra Latinoamericana* 25: 287-295.
- Zamudio-González, B., L. López-Pérez, G. Alcántar-González, D. R. González-Eguiarte, J. A. Ruiz-Corral y J. Z. Castellanos. 2004. Delimitación de áreas salinas en el Distrito de Riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoamericana* 22: 91-97.