

CONCENTRACIONES DE NITRÓGENO EN UN SUELO CON DIFERENTES ESPACIAMIENTOS DE DRENAJE SUBTERRÁNEO EN LA CHONTALPA, TABASCO

Nitrogen concentrations in a soil with different subsuperficial drainage spacing in the Chontalpa, Tabasco

D Cristóbal-Acevedo ✉, MA Estrada-Botello, JD Mendoza-Palacios

(DCA) Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México Texcoco. cristobalacevdo@yahoo.com.mx

(MAEB) (JDMP) División Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Artículo recibido: 10 de marzo de 2008, **aceptado:** 23 de marzo de 2009

RESUMEN. Los sistemas de drenaje subsuperficial son necesarios para la producción de cultivos en los suelos de las zonas tropicales. Sin embargo, estos sistemas han tenido impacto sobre las concentraciones y el estado del nitrógeno (N) en el suelo. Con el objetivo de evaluar la influencia de los espaciamientos de drenaje subterráneo (EDS) de 10, 20 y 40 m y los tipos de cultivo (TC) de riego y temporal, sobre las concentraciones de nitrato (N-NO_3^-), amonio (N-NH_4^+), nitrato más amonio ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) y nitrógeno total (Nt) en el suelo, se realizó un experimento en parcelas con sorgo. Las concentraciones de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y Nt se estimaron en 15, 30, 60, 90, y 120 cm de profundidad en intervalos de tiempo de 15 días en cada EDS y TC. Se cuantificó la cantidad de agua de riego, se midió diariamente la precipitación, la humedad gravimétrica (HG) a 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad y la profundidad del nivel freático (NF). Los datos fueron analizados mediante un diseño de tratamientos factorial 3×2 . El primer factor fue el EDS con los niveles de 10, 20 y 40 m de espaciamiento entre drenes y el segundo factor fue el TC con dos niveles uno de riego y otro de temporal. Los EDS no tuvieron efecto sobre el promedio de las concentraciones de N-NO_3^- , N-NH_4^+ , y $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ y Nt en las cinco profundidades medidas. La forma de N predominante en los EDS y TC fue N-NH_4^+ . Los TC incidieron sobre el Nt, ya que su mayor concentración se registró en el TC con temporal.

Palabras clave: Nitratos, amonio, nivel freático, humedad del suelo, drenaje.

ABSTRACT. Subsurface drainage systems are needed for crop production in soils in tropical areas. However, these systems have had an impact on the concentration and the state of nitrogen (N) in the soil. An experiment was carried out in sorghum plots in order to evaluate the effect of the subsurface drainage spacing (EDS) at 10, 20 and 40 m and crop types (TC) with irrigation and rainfall, on the concentration of nitrate (N-NO_3^-), ammonium (N-NH_4^+), nitrate plus ammonium ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) and total nitrogen (Nt) in the soil. The concentrations of N-NO_3^- , N-NH_4^+ and Nt were estimated at depths of 15, 30, 60, 90 and 120 cm, at time intervals of 15 days in each EDS and TC. The amount of irrigation water, daily precipitation, gravimetric humidity (GH) at depths of 30, 60, 90 and 120 cm, and depth of the water table (NI) were quantified. Data were analysed with a 3×2 factorial treatment design. The first factor was EDS with spacing levels of 10, 20 and 40 m between drains and the second factor was the TC with two levels, one of irrigation and the other of rainfall. The EDS had no effect on the mean concentrations of N-NO_3^- , N-NH_4^+ , ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) and Nt at the five depths. N-NH_4^+ was the predominant form of N in EDS and TC. The TC impacted on the Nt, as its highest concentration was recorded in the TC with rainfall.

Key words: Nitrates, ammonium, water table, soil moisture, drainage.

INTRODUCCIÓN

En las zonas tropicales existen condiciones óptimas para la producción agrícola, debido a que

los suelos son fértiles y no se tienen problemas de heladas durante todo el año. Sin embargo, uno de los problemas a enfrentar es el exceso de humedad, por lo que es necesario el drenaje agrícola. Si

bien los sistemas de drenaje resuelven el problema de excesos de humedad, también pueden tener impacto sobre las formas y cantidades de nitrógeno en el suelo al incidir sobre la aireación, procesos de oxido-reducción y los flujos por lixiviación y desnitrificación (Liwang *et al.* 1999). Los suelos pueden fluctuar entre condiciones de oxidación y de reducción dependiendo del manejo del agua tales como anegación o drenaje, donde altos niveles de agua establecen condiciones de reducción (Shiratori *et al.* 2007). Uno de los procesos de salida del N del suelo es la desnitrificación, proceso por el cual el nitrato es convertido a nitrógeno gaseoso por los microorganismos del suelo cuando el oxígeno del suelo está bajo o ausente (El *et al.* 2002a). La ausencia de oxígeno se ha relacionado a la profundidad del nivel freático (Riley & Matson 2000). Las pérdidas de N del suelo por desnitrificación han registrado una fuerte dependencia con el contenido de agua en el suelo como lo mostraron Dobbie & Smith (2003), Nelson & Richard (1996) y Dobbie & Smith (2006). También, las lluvias pesadas o la aplicación de fertilizantes han provocado rápidos y grandes cambios en las tasas de emisión de N_2O (Dobbie *et al.* 1999; Dobbie & Smith 2001; 2003). Cuando cuantificaron la desnitrificación, Colbourn & Harper (1987) encontraron que el drenaje la limitó hasta en un 65 % en comparación con el suelo no drenado.

Otro de los procesos de salida del N es la lixiviación y este proceso se ha relacionado con las cantidades de agua infiltrada y desalojada por los sistemas de drenaje (Skaags *et al.* 1995). Los estudios han mostrado que a menor espaciamento de drenaje se ha presentado mayor lixiviación (Cristóbal *et al.* 2002; El *et al.* 2002b; Wikramanayake *et al.* 2003). También los tipos de drenaje han intervenido (Estrada *et al.* 2007). Los sistemas de drenaje, los contenidos de agua y su flujo en el suelo, determinan en gran medida la salida de N por los procesos de lixiviación y desnitrificación que son dos procesos inversos y complementarios (Kirk & Nye 1991). La relación entre lixiviación y desnitrificación se presenta debido a que el nivel freático influye sobre el proceso de desnitrificación y a su vez, impacta sobre la cantidad de nitratos que pueden ser lixiviados

(El *et al.* 2002 b). Además, los sistemas de drenaje afectan el estado del nitrógeno en el suelo. En el estudio de la relación NF y concentraciones de $N-NO_3^-$, Madramootoo *et al.* (1993) realizaron un experimento con profundidades controladas diferentes del nivel freático (NF) y no detectaron diferencias significativas en el contenido de nitrato con las tres profundidades más superficiales. Wikramanayake *et al.* (2003) observaron que el incremento en el espaciamento de drenes o la disminución de la profundidad redujo las pérdidas de $(N-NO_3^-)$ y la mineralización neta, mientras que la desnitrificación y las pérdidas por escurrimiento superficial se incrementaron. También Singh *et al.* (2007) mencionaron que el drenaje subsuperficial mejoró la fertilidad del suelo, ya que promovió el almacenamiento de amonio en el complejo arcilloso. Aunque la mayoría de los trabajos han afirmado que el drenaje ha tenido efecto sobre los flujos y el estado del N en el suelo, también se han registrado estudios donde otros factores resultaron más importantes. Así, Simmelsgaard (1998) en un estudio para predecir la lixiviación de nitratos consideró los factores de porcentaje de arcilla, N aplicado, drenaje y tipo de cultivo y estimó que el factor más importante fue el tipo de cultivo. Jia *et al.* (2006) notaron que el manejo y el plan de riego fueron más determinantes en la cantidad de N que salió del suelo que los sistemas de drenaje.

Debido a que los sistemas de drenaje subterráneo (SDS) son importantes para obtener mayor productividad agrícola en las zonas tropicales, donde también es necesario mantener una adecuada concentración de N en sus suelos, ya que los SDS pueden impactar las concentraciones de N. el objetivo de este estudio fue determinar si las concentraciones de nitrógeno en el suelo en sus formas de nitrato ($N-NO_3^-$), amonio ($N-NH_4^+$), y nitrógeno total (Nt) eran afectadas por los EDS de 10, 20 y 40 m. También, se propuso determinar las dinámicas del nivel freático (NF) y la humedad gravimétrica (HG) dadas por los EDS en un suelo de la Chontalpa, en el estado de Tabasco, bajo condiciones de riego y temporal.

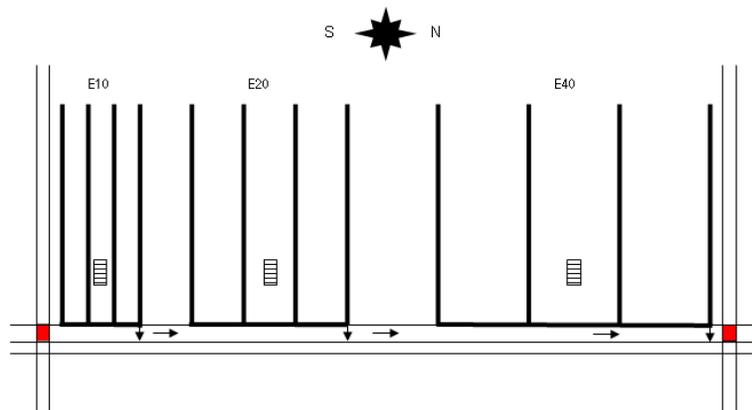


Figura 1. Localización de los espaciamientos de drenaje y las áreas de muestreo y medición en cada uno de los espaciamientos de drenaje subterráneo en el lote D-5. (E10 = espaciamiento de 10 m, E20 = espaciamiento de 20 m, E40 = espaciamiento de 40 m). = área de muestreo, = drenes subterráneos, = flujo en dren principal, = puente, = camino.

Figure 1. Location of the subsurface drainage spacing and the sampling areas, and measurement in each subsurface drainage spacing in the lot D-5. (E10 = 10 m spacing, E20 = 20 m spacing, E40 = 40 m spacing). = sampling area, = subsurface drains, = flow in main drain, = bridge, = road.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio y establecimiento del cultivo

El trabajo se realizó en el campo experimental El trapecio del campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, ubicado a 21 km de la Ciudad de Cárdenas, ($17^{\circ} 49' 03''$ N y $93^{\circ} 23' 03''$ O). El experimento se llevó a cabo en el lote D-5 donde se tiene drenaje subterráneo entubado con espaciamientos de 10, 20 y 40 m en un área aproximada de 7.5 ha, con dos pendientes, la principal en dirección sur-norte y la otra en dirección oeste-este, ambas menores del 1% (Figura 1). El suelo es un Vertisol (Trujillo & Palma 1988). El clima, según la clasificación de Koppen modificada por García (1988), es Am (f) w" (i) g, clasificado como cálido húmedo tropical lluvioso, con medias anuales de temperatura de 26.5°C , precipitación de 2163 mm y evaporación de 1234 mm. Los drenes parcelarios se localizaron a una profundidad de 1.2 m, los cuales fueron de tubería corrugada y ranurada de PVC, con drenes interceptores de 3" de diámetro y drenes colectores de un diámetro de 4" recubiertos de una malla plástica tipo calcetín para evitar el paso de partículas finas. En todos los casos se contó con cuatro líneas de drenes interceptores de 200 m de longitud.

En cada EDS hubo una estructura de control con la que se reguló la descarga al colector abierto por medio de compuertas deslizantes (Figura 2).

En el área de estudio se estableció el cultivo de sorgo para grano variedad Esmeralda en un TC bajo riego y otro bajo temporal, los cuales fueron los tratamientos de tipo de cultivo (TC). En cada TC la dosis de fertilización N-P-K fue de 120-80-60 kg ha^{-1} , y se utilizaron como fuentes $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$, con 21% de N, $[(\text{PO}_4)_2 \text{H}_4 \text{Ca}]$ con 46% de P₂O₅ y KCl con 60% de K₂O, respectivamente. El N y el K fueron aplicados 50% a la siembra y 50% al término del desarrollo vegetativo, mientras que el fósforo se aplicó en una sola vez. En el TC bajo riego se dieron tres riegos y después de la cosecha se inició el segundo TC con la "soca" del sorgo, aplicando un manejo similar que en el caso del TC con riego.

Zonas de muestreo de N y ubicación de los dispositivos de medición

Al centro de cada espaciamiento de drenaje se ubicó la zona de muestreo con una anchura de 5 m y una longitud de 7.2 m, en la que se extrajeron las muestras de suelo para las determinaciones de las diferentes formas de N y la HG. También se instaló un pozo de observación para la medición de niveles

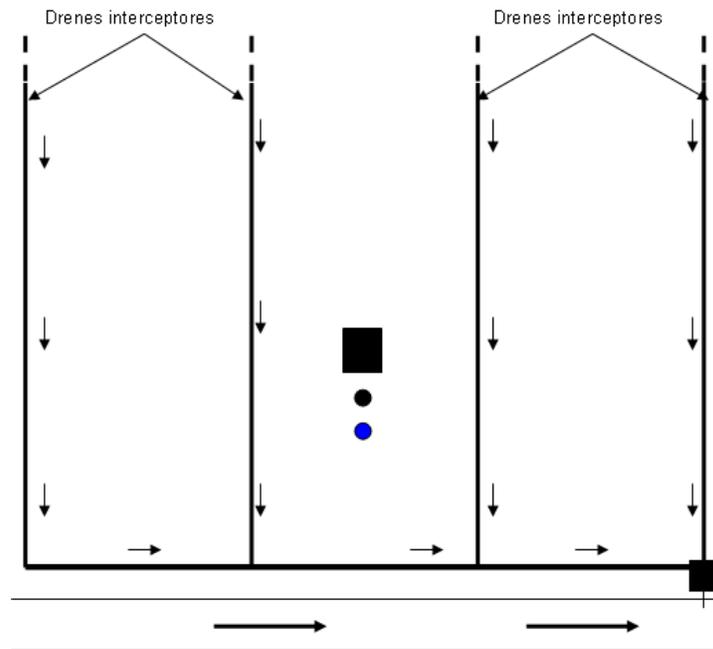


Figura 2. Localización de la zona de muestreo y dispositivos de medición en uno de los espaciamentos de drenaje subterráneo en el lote D-5. ● = pluviómetro, ● = pozo de nivel freático, ■ = zona de muestreo, ■ = estructura de control.

Figure 2. Location of the sampling area and measurement devices in one of the subsurface drainage spacing in the lot D-5. ● = pluviometer, ● = water table well, ■ = sampling area, ■ = control structure.

freáticos (NF) y un pluviómetro para cuantificar la cantidad de precipitación (Figura 2).

Diseño de muestreo y métodos para la determinación de las variables

En las zonas de muestreo en cada uno de los EDS de 10, 20 y 40 m, se trazó una cuadrícula de 5 m X 7 m con puntos equidistantes a 1 m. En la cuadrícula se obtuvieron 48 puntos posibles de muestreo que fueron aleatorizados para obtener las muestras de forma completamente al azar. Las muestras de suelo se obtuvieron con una barrena a las profundidades de 15, 30, 60, 90 y 120 cm cada 15 días, durante nueve meses y medio a partir de la siembra en el mes de marzo de 1999. En el TC con riego se extrajeron ocho muestras en cada una de las cinco profundidades, lo que sumó un total de 40 muestras. El muestreo inició en el mes de marzo y finalizó en el mes de junio. En cambio, en el TC con temporal se incrementó a 11 el número de muestras en cada una de las cinco profundidades, que dieron un total de 55 muestras. Este muestreo inició en el mes de julio y

finalizó en el mes de diciembre. La concentración de Nt se obtuvo por el método de semimicro-Kjeldhal modificado para incluir nitratos, de acuerdo al procedimiento de rutina del laboratorio de suelos del Colegio de Posgraduados (Etchevers 1988). La extracción de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ del suelo se realizó con KCl 2N y sus concentraciones fueron obtenidas por los métodos de nitración del ácido salicílico (Robarge et al. 1983) y Nessler (Jackso 1964), respectivamente. Con los datos de las concentraciones de $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^- + N-NH_4^+$ y Nt a las cinco profundidades por fecha en cada EDS, se calculó un promedio para cada fecha. Cada valor promedio de las cinco profundidades representó la variación de la variable a la profundidad 15 - 120 cm y fue considerado como una repetición. Con estas ocho repeticiones para el TC con riego y 11 repeticiones para el TC con temporal se realizó el ANOVA 3 x 2. El primer factor fue el EDS con los niveles de 10, 20 y 40 m de espaciamento y el segundo factor los TC con dos niveles uno de riego y otro de temporal. Este análisis tuvo como objetivo determinar

estadísticamente el efecto de los EDS y los TC sobre las variables concentración de N-NO_3^- , N-NH_4^+ , $(\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+)$ y Nt. Las medias de los tratamientos donde se tuvo influencia estadística fueron comparadas con la prueba de Tukey. Las pruebas estadísticas se realizaron mediante el programa SAS (Anónimo 1995).

Determinación de los componentes hídricos

La precipitación se midió en forma diaria mediante un pluviómetro instalado en la parcela con espaciamiento de drenaje de 20 m. Las láminas de riego aplicadas fueron obtenidas con el gasto de 60 L s^{-1} del pozo profundo, el tiempo de riego y el área de cada espaciamiento de drenaje. La profundidad del nivel freático se midió también en forma diaria mediante pozos de observación en cada uno de los EDS mientras que los contenidos de HG a las profundidades de 30, 60, 90 y 120 cm se obtuvieron diariamente con el método gravimétrico. Para determinar si los EDS y los TC tuvieron influencia sobre la HG se calcularon promedios mensuales para cada profundidad. La medición de las variables hídricas, como riego, precipitación, HG y profundidad de NF, se realizó únicamente para poder verificar si existían diferencias en el funcionamiento de los diferentes espaciamentos del sistema de drenaje subterráneo.

RESULTADOS

Los EDS, los TC y su interacción (EDS*TC) no influyeron en ninguna de las variables de N a excepción de TC para la variable Nt, en la que fue estadísticamente mayor la concentración en el cultivo bajo temporal (Tabla 1). Las concentraciones medias de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ en los suelos con EDS de 10 y 20 m fueron semejantes (ANOVA; $p < 0.05$) y el suelo con espaciamiento de 40 m fue el que presentó concentraciones mayores (ANOVA; $p < 0.05$). Las concentraciones medias de N-NH_4^+ fueron mayores que las de N-NO_3^- en los suelos de los tres EDS (ANOVA; $p < 0.05$). Las concentraciones de Nt no fueron las esperadas, con un contenido de Nt significativamente mayor para el suelo del EDS de 40 m, al cual debería seguir el suelo del EDS de 20 m y por último el suelo del

EDS de 10 m. En el caso de la variable N-NH_4^+ se observó que aunque estadísticamente los EDS tampoco tuvieron efecto, el efecto de los EDS si fue el esperado; es decir, la concentración de N-NH_4^+ fue mayor en el suelo del EDS de 40 m seguida por el de 20 m y al final el de 10 m con una menor concentración. La mayor concentración de N-NO_3^- y $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ en el suelo se obtuvo en el cultivo con temporal, para N-NH_4^+ las concentraciones en el suelo fueron semejantes en los dos TC.

Los EDS solamente afectaron significativamente a la variable HG a la profundidad de 30 cm con un mayor contenido de HG para el EDS de 40 m seguido de 20 m y con un menor contenido de HG el de 10 m (Tabla 2). El resultado anterior fue debido a que a mayor espaciamiento de drenaje subterráneo se provocó una salida más lenta del agua y por lo tanto los contenidos de HG fueron mayores. Para las profundidades de 60 y 90 cm los valores de HG no siguieron algún patrón en relación a los EDS. Para la profundidad de 120 cm, los valores de HG fueron los esperados, con mayor contenido de humedad para el EDS de 40 m seguido del de 20 m y con un menor contenido el de 10 m. En el caso del efecto de los TC sobre la HG, el mayor contenido de HG en el TC se detectó en temporal y el efecto fue significativo solamente para las profundidades de 30, 60 y 90 cm.

Variación de los niveles freáticos y humedad gravimétrica en los tipos de cultivo con riego y temporal

Para los dos TC los NF respondieron de manera casi inmediata a las variaciones de las entradas y salidas de agua (Figura 3). En cualquier sistema sí las entradas son mayores que las salidas se tendrá un ascenso del NF y sí son menores se tendrá un descenso del NF. En relación con el NF en el TC con riego los EDS no tuvieron influencia sobre el mismo, debido a que estuvo la mayor parte del tiempo por debajo de la línea de los drenes. La influencia de los riegos en la dinámica de los EDS y la influencia casi nula de las lluvias ligeras sobre el mismo. El efecto de la aplicación del riego sobre la dinámica de los NF de los tres espaciamentos resultó notorio en la grafica (Figura 3). La variación del

Tabla 1. Análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) y valores medios, para el efecto de los espaciamientos de drenaje subterráneo (EDS) y tipos de cultivo (TC) con riego (CR) y con temporal (CT) sobre las variables concentración (mg kg^{-1}) de nitrato (N-NO_3^-), amonio (N-NH_4^+), ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) y nitrógeno total (Nt) en el suelo. Medias con la misma letra sobre el renglón no son estadísticamente diferentes para la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). E10 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 10 m; E20 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 20 m, E40 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 40 m. CR = cultivo de sorgo con riego y CT = cultivo de sorgo con temporal.

Table 1. Variance analysis ($\alpha = 0.05$) and mean values, for the effect of the subsurface drainage spacing (EDS) and crop types (TC) with irrigation (CR) and rainfall (CT), on the variables: concentration (mg kg^{-1}) of nitrate (N-NO_3^-), ammonium (N-NH_4^+), ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) and total nitrogen (Nt) in the soil. Means with same letter in a line are not statistically different for Tukey's test ($\alpha = 0.05$). E10 = subsurface drainage spacing of 10 m, E20 = subsurface drainage spacing of 20 m, E40 = subsurface drainage spacing of 40 m. CR = sorghum crop with irrigation and CT = sorghum crop with rainfall.

Variable	F.V.	Pr > F	Medias de EDS			Medias de TC	
			E10	E20	E40	CR	CT
N-NO ₃ ⁻	EDS	0.12	15.984 ^a	14.968 ^a	22.979 ^a		
	TC	0.2				15.413 ^a	19.842 ^a
	EDS*TC	0.11					
N-NH ₄ ⁺	EDS	0.95	18.326 ^a	19.900 ^a	25.432 ^a		
	TC	0.33				21.375 ^a	21.106 ^a
	EDS*TC	0.49					
N-NO ₃ ⁻ + N- NH ₄ ⁺	EDS	0.13	34.300 ^a	33.384 ^a	47.968 ^a		
	TC	0.39				35.237 ^a	40.961 ^a
	EDS*TC	0.22					
Nt	EDS	0.62	701.370 a	762.110 ^a	687.890 ^a		
	TC	0				541.130 ^a	845.120 ^b
	EDS*TC	0.33					

NF para el TC con riego se midió desde el primero hasta el centésimo octavo día (Figura 3). En el primero riego, las magnitudes de los espaciamientos de 10 y 20 m fueron diferentes al de 40 m, debido a que dos primeros niveles freáticos fueron medidos cuando se estuvo regando y el tercero se cuantificó casi al final del riego. En cambio, en los dos riegos siguientes, las lecturas de nivel freático se efectuaron al momento de equilibrio, cuando éste no variaba demasiado como producto de la descarga a través de los drenes subterráneos, por lo que las magnitudes del NF en los tres espaciamientos fueron similares. Además, los pocos eventos de precipitación que se presentaron en el TC con riego no afectaron el nivel freático en los tres EDS. Este resultado se debe a que la cantidad de agua precipitada posiblemente no fue suficiente para elevar el NF por arriba de la línea de drenaje ubicada a 120 cm. También, la variación del NF en la mayor parte del período estuvo relacionada con el agua aplicada durante el riego en

cada uno de los espaciamientos de drenaje y con la estratificación por debajo de la profundidad de los drenes. La variación del NF no difirió mucho en los tres espaciamientos (Figura 3), pues existe un paralelismo entre las líneas de ascenso y descenso en el tiempo. El NF en el espaciamiento de 40 m se mantuvo siempre por debajo de los niveles freáticos en los espaciamientos de 10 y 20 m, lo que puede estar relacionado con una menor aportación de agua por subalimentación por el acuífero semiconfinado. Este aspecto, se explica en función de que el espaciamiento de 40 m estuvo ubicado en un área donde el estrato arcilloso superficial que confina al estrato arenoso del acuífero fue más grueso, por lo que el acuífero estuvo a una mayor profundidad.

La variación de los NF en el TC con temporal en el tiempo, desde el día 109 hasta el día 273 (Figura 3), fluctuó en respuesta a la magnitud y continuidad de las precipitaciones para los tres EDS. En el TC con temporal, de manera contraria al TC con

Tabla 2. Análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) y valores medios, para el efecto de los espaciamientos de drenaje subterráneo (EDS) y tipos de cultivo (TC) con riego (CR) y con temporal (TC) sobre la variable contenido gravimétrico de humedad (HG) del suelo en porcentaje, a las profundidades de 30, 60, 90 y 120 cm. Medias con la misma letra sobre el renglón no son estadísticamente diferente para la prueba de Tukey. ($\alpha = 0.05$). E10 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 10 m, E20 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 20 m, E40 = espaciamiento de drenaje subterráneo de 40 m, CR = cultivo de sorgo con riego y CT = cultivo de sorgo con temporal.

Table 2. Variance analysis ($\alpha = 0.05$) and mean values, for the effect of the subsurface drainage spacing (EDS) and crop types (CT) with irrigation (CR) and rainfall (TC) on the variable: percentage of gravimetric moisture content (GM) in the soil, at depths of 30, 60, 90 and 120 cm. Means with the same letter in a line are not statistically different for Tukey's test ($\alpha = 0.05$). E10 = subsurface drainage spacing of 10 m, E20 = subsurface drainage spacing of 20 m, E40 = subsurface drainage spacing of 40 m, CR = sorghum crop with irrigation and TC = sorghum crop with rainfall.

Variable	F.V.	Pr > F	Medias de EDS			Medias de TC	
			E10	E20	E40	CR	TC
HG 30	EDS	0	25.7420 ^b	26.6620 ^b	29.0980 ^a		
	TC	0.02				26.0667 ^b	27.9011 ^a
	EDS*TC	0.43					
HG 60	EDS	0.21	28.0650 ^a	29.6400 ^a	29.2810 ^a		
	TC	0				27.5383 ^b	29.9667 ^a
	EDS*TC	0.56					
HG 90	EDS	0.80	29.352 ^a	28.888 ^a	28.638 ^a		
	TC	0.02				27.6575 ^b	29.8272 ^a
	EDS*TC	0.40					
HG 120	EDS	0.23	29.6290 ^a	30.1930 ^a	31.1810 ^a		
	TC	0.17				29.7033 ^b	30.7550 ^a
	EDS*TC	0.06					

riego, el NF estuvo por arriba de la línea de drenaje la mayor parte del tiempo, debido a las precipitaciones continuas (Figura 3). Además en el ciclo bajo riego, el espaciamiento de 40 m presentó niveles freáticos más profundos que los espaciamientos de 10 y 20 m en la mayor parte del tiempo. En el TC con temporal se cumplió que los niveles freáticos, que son una manifestación directa del resultado del balance hídrico en el sitio, tuvieron influencia marcada con el régimen de lluvias, lo que propició que en el espaciamiento de 10 m, la profundidad media del nivel freático fuera de 96.23 cm, en el de 20 m de 88.38 cm y en el 40 m de 72.22 cm. Estos niveles freáticos corroboraron el funcionamiento de los drenes y la influencia del espaciamiento sobre esta variable (Figura 3).

En el TC con temporal solamente se estimó efecto significativo de los EDS sobre la variable HG a la profundidad de 30 cm (ANOVA; $p < 0.05$). El mayor contenido de humedad se obtuvo en el EDS

de 40 m, al cual siguió el de 20 m y después con menor contenido el de 10 m. En las profundidades de 30 cm y 60 cm hubo un menor contenido de HG para la profundidad de 30 cm y un mayor contenido de HG para la profundidad de 60 cm. Este resultado posiblemente fue debido a la continuidad de los eventos de lluvia que permitieron esta regularidad marcada por los EDS a las profundidades de 30 y 60 cm. Para las profundidades 60 cm y 90 cm la variación fue irregular. En el caso de las profundidades de 90 cm y 120 cm se presentó nuevamente la regularidad para los EDS en el contenido de HG de acuerdo a las profundidades, pero fueron mayores a 120 cm. (Tabla 2). En el caso de las profundidades, se esperaba que a mayor profundidad mayor contenido de humedad, pero cuando ocurren lluvias de pequeña magnitud, es posible que lo anterior se invierta como fue el caso, en las profundidades de 60 y 90 cm en los EDS de 20 m y 40 m. (Tabla 2).

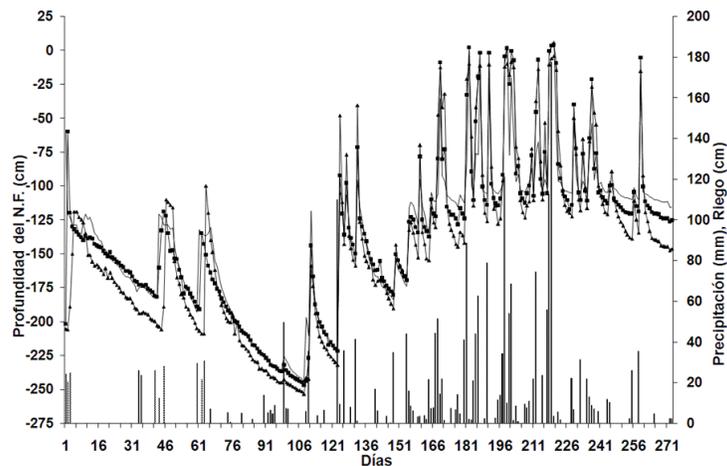


Figura 3. Profundidad de los niveles freáticos (NF) en función del tiempo y del riego, en los espaciamientos de drenaje subterráneo de 10, 20 y 40 m. (EDS - 10, EDS - 20 y EDS - 40), en un ciclo de cultivo de sorgo bajo condiciones de riego y temporal, en la Chontalpa, Tabasco. —●— = precipitación (mm), —■— = riego (cm), —○— = nivel freático en el espaciamiento de drenaje subterráneo de 10 m, —■— = nivel freático en el espaciamiento de drenaje subterráneo de 20 m, —▲— = nivel freático en el espaciamiento de drenaje subterráneo de 40 m.
Figure 3. Depth of water table (NT) as a function of time and irrigation, in the subsurface drainage spacings at 10, 20 and 40 m. (EDS - 10, EDS - 20 and EDS - 40), in a sorghum crop cycle under irrigation and rainfall conditions, in the Chontalpa, Tabasco. —●— = rainfall (mm), —■— = irrigation (cm), —○— = water table in the 10 m subsurface drainage spacing, —■— = water table in the 20 m subsurface drainage spacing, —▲— = water table in the 40 m subsurface drainage spacing.

DISCUSIÓN

Concentraciones de nitrógeno en el suelo

En el TC con riego las concentraciones de $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-+N-NH_4^+$ y Nt no fueron afectadas por los EDS debido a que el NF la mayor parte del tiempo estuvo por debajo de la línea de drenes (Figura 3). Lo anterior concordó con lo reportado por Madramootoo *et al.* (1993), lo cual se atribuyó a que las condiciones de humedad en el perfil del suelo fueron homogéneas (Tabla 2). La mayor parte del tiempo esta homogeneidad se presentó al llevarse el suelo de los tres EDS a condiciones de saturación en el momento del riego y a una rápida salida del agua en un intervalo corto de tiempo (Figura 3). En el perfil del suelo de 0 - 120 cm de profundidad en los tres EDS presentaron concentraciones mayores de $N-NH_4^+$ que de $N-NO_3^-$. Este resultado puede ser explicado por los altos contenidos de arcilla que tienden a fijar el $N-NH_4^+$ y rechazar al $N-NO_3^-$, aunado a los procesos de lixiviación por los riegos pesados y desnitrificación por los procesos de secado y rehumedecimiento drástico (Dobbie *et al.* 1999, Dobbie & Smith 2001; 2003,) que impactaron

principalmente al $N-NO_3^-$. La concentración de $N-NO_3^-$ fue mayor en el EDS de 40 m en comparación con los EDS de 10 y 20 m. Este resultado coincidió con lo registrado por El *et al.* (2002a) y Cristóbal *et al.* (2002), quienes afirmaron que la salida de N a través en los sistemas de drenaje subterráneo se da principalmente en forma de $N-NO_3^-$ y notaron que a mayor espaciamiento de drenaje las salidas fueron menores. En el TC con temporal las concentraciones de $N-NO_3^-$ fueron mayores que las del TC con riego, la forma de nitrógeno predominante fue $N-NH_4^+$ sobre $N-NO_3^-$ (Tabla 1). La predominancia de $N-NH_4^+$ resultó concordante con Singh *et al.* (2007), quienes detectaron que el drenaje subsuperficial mejoró el estatus de fertilidad del suelo, ya que promovió el almacenamiento de amonio. Además, las altas precipitaciones y condiciones de reducción incrementaron los procesos de lixiviación y desnitrificación, lo cual provocó menores concentraciones de $N-NO_3^-$. Otro factor fue que el $N-NO_3^-$ ha sido registrado inestable en las zonas reducidas ya que rápidamente disminuye vía asimilación por microorganismos, desnitrificación o lixiviación (Buresh *et al.* 1989). También, la dominancia de $N-NH_4^+$ en el suelo en los dos TC

fue debida a que la amonificación, que es la conversión del N orgánico en N-NH_4^+ , puede ocurrir tanto en condiciones anaerobias como aerobias, aunque la forma aeróbica es mucho más rápida (Vepraskas & Faulkner 2001). Aunque el sistema presentó dominancia del N-NH_4^+ sobre la forma N-NO_3^- en los dos TC, las diferencias por tipo de cultivo no fueron estadísticamente significativas para N-NH_4^+ , N-NO_3^- y $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ (Tabla 1). En el caso del Nt, su contenido significativamente mayor en temporal se explicó debido a que en el corte del cultivo de sorgo bajo riego una cierta cantidad de residuos de la cosecha fueron dejados en el terreno, lo que provocó que se tuviera una mayor cantidad de Nt. En la mayoría de las áreas tropicales, el N-NO_3^- ha mostrado fluctuaciones estacionales. Estas fluctuaciones han consistido en bajo contenido en la estación seca, incremento de corta duración en la estación de lluvias, disminución con el desarrollo del temporal y rápido decrecimiento en el resto de la estación, con un regreso a los mismos niveles que en la estación seca (Sánchez 1976). También, la variación mínima de la concentración de N-NO_3^- entre los EDS puede ser explicada por el amortiguamiento que presenta el sistema para que los excesos y deficiencias de N en sus formas N-NH_4^+ y N-NO_3^- tiendan hacia un equilibrio (Raun & Johnson 1995). Con los resultados y la discusión de esta investigación, se concluyó que las concentraciones de nitrógeno en el suelo en sus formas N-NH_4^+ , N-NO_3^- y $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ no fueron afectadas por los EDS de 10 m, 20 m y 40 m ni por los tipos de cultivo de riego y de temporal. El incremento en la intensidad de drenaje del espaciamiento de 40 m al de 20 m o al de 10 m no tuvo efectos nocivos sobre las concentraciones de N-NO_3^- y N-NH_4^+ en el suelo que son las formas en que el N es absorbido por los cultivos. La concentración de Nt fue afectada por el tipo de cultivo, ya que resultó ser significativamente mayor (ANOVA; $p < 0.05$) en el TC con temporal.

Niveles freáticos y humedad gravimétrica

Las variaciones de la HG del suelo como función de los EDS no fueron muy marcadas (ANOVA;

$p < 0.05$) debido a que en TC con riego los drenes subterráneos actuaron solamente en periodos cortos de tiempo. En el momento que se aplicó el riego se llevó rápidamente al suelo a un contenido homogéneo de HG, que fue saturación en los tres espaciamientos. También en un tiempo corto, el exceso de agua por arriba de capacidad de campo se desalojó por gravedad a través los sistemas de drenaje y por percolación profunda hasta alcanzar la línea de drenaje ubicada 1.2 m de profundidad. Una vez que los EDS terminaron su influencia actuaron otros factores en la pérdida de agua en el perfil del suelo como la cubierta vegetal, dada por el cultivo de sorgo y temperatura ambiente que debido a la cercanía entre espaciamientos de drenaje fueron homogéneas. En el caso del TC con temporal, si bien el NF estuvo por arriba de la línea de drenaje ubicada a 1.2 m de profundidad, la mayor parte del tiempo (Figura 3), esto fue para los tres EDS independientemente de la cantidad de agua desalojada que debió ser mayor para el espaciamiento menor. De los resultados obtenidos y la discusión realizada, se concluyó que la variación del contenido de HG en el suelo no fue determinada de manera significativa (ANOVA; $p < 0.05$) por los EDS, en las profundidades probadas a excepción de 30 cm, sino que intervinieron otros factores que pudieron haber sido nuevamente cubierta vegetal, temperatura ambiente y estratificación.

Los espaciamientos de drenaje fueron homogéneos. En el caso del TC con temporal, si bien el NF estuvo por arriba de la línea de drenaje ubicada a 1.2 m de profundidad, la mayor parte del tiempo (Figura 3), esto fue para los tres EDS independientemente de la cantidad de agua desalojada que debió ser mayor para el espaciamiento menor. De los resultados obtenidos y la discusión realizada, se concluyó que la variación del contenido de HG en el suelo no fue determinada de manera significativa (ANOVA; $p < 0.05$) por los EDS, en las profundidades probadas a excepción de 30 cm, sino que intervinieron otros factores que pudieron haber sido nuevamente cubierta vegetal, temperatura ambiente y estratificación.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1995) SAS Institute. User's Guide. SAS Institute. Cary. North Carolina. 295 pp.
- Buresh RJ, Woodhead T, Shepherd KD, Flordelis E, Cabangon RC (1989) Nitrate accumulation and loss in a mung bean-lowland rice cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 477-482.
- Colbourn P, Harper IW (1987) Denitrification in drained and undrained arable clay soil. *European Journal of Soil Science* 38 (3): 531-539.
- Cristóbal AD, Palacios VOL, Nikolskii GI, Gavi RF, Palma LDJ, Carrillo ÁE, Peña CJJ (2002) Lixiviación de nitrógeno en función del espaciamiento entre drenes subterráneos en Tabasco. *Agrociencia* 36: 291-304.
- Dobbie KE, Smith KA (2001) The effects of temperature, water filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science* 52: 667-673.
- Dobbie KE, Smith KA (2003) Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil-water filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* 9: 204-218.
- Dobbie KE, Smith KA (2006) The effect of water table depth on emissions of N₂O from a grassland soil. *Soil Use and Management* 22 (1): 22-28.
- Dobbie KE, McTaggart IP, Smith KA (1999) Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *Journal of Geophysical Research* 104: 26891-26899.
- El SA, Feyen J, Ragab R (2002a) Simulation of nitrogen balance of maize field under different drainage strategies using the drainmod-n model. *Irrigation and Drainage* 51: 61-75.
- El SA, Feyen J, Skaggs W, Berlamont J (2002b) Economics of nitrate losses from drained agricultural land. *J. Envir. Engin.* 128: 376-383.
- Estrada BMA, Nikolskii GI, Mendoza PJD, Cristóbal AD, de La Cruz LE, Brito NP, Gómez VA, Bakhlaeva EO (2007) Lixiviación de nitrógeno inorgánico en un suelo agrícola bajo diferentes tipos de drenaje en el trópico húmedo. *Universidad y Ciencia* 23 (1):1-14.
- Etchevers BJ (1988) Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo. 803 pp.
- García E (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ediciones Offset Larios, S.A. D.F. 217 pp.
- Jackso ML (1964). Análisis químico de suelos. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 662 pp.
- Jia Z, Evans RO, Smith JT (2006) Effect of controlled drainage and vegetative buffers on drainage water quality from wastewater irrigated fields. *J. Irrig. and Drain. Engin.* 132: 159-170.
- Kirk GJD, Nye PH (1991) A model of ammonia volatilization from applied urea. V. The effects of steady-state drainage and evaporation. *European Journal of Soil Science* 42 (1): 103-113.
- Liwang Ma, Lindau CW, Hongprayoon C, Burhan W, Jang BC, Patrick WH Jr, Selim HM (1999) Modeling urea, ammonium, and nitrate transport and transformations in flooded soil columns. *Soil Science* 164 (2):123-132.
- Madramootoo CA, Dodds GT, Papadopoulos A (1993) Agronomic and environmental benefits of water-table management. *J. Irrig. and Drain. Engin.* 119:1052-1065.
- Nelson SD, Richard ET (1996) The effects of soil physical properties and irrigation method on denitrification. *Soil Science* 161(4):242-249.

- Raun WR, Johnson GV (1995) Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat. *Agron. J.* 87: 827-834.
- Riley WJ, Matson PA (2000) N loss: a mechanistic model of denitrified N₂O and N₂ evolution from soil. *Soil Science* 165:237-249.
- Robarge W, Edwards PA, Johnson B (1983) Water and waster analysis for nitrate by nitrates of salicylic acid. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.* 14 (12): 1207-1215.
- Sánchez PA (1976) *Properties and Manegement of Soils in the Tropics.* John Willey and Sons. New York. 618 pp
- Shiratori Y, Hidekazu W, Yuichiro F, Haruo T, Kazuyuki I (2007) Effectiveness of a subsurface drainage system in poorly drained paddy fields on reduction of methane emissions. *Soil Science & Plant Nutrition* 53 (4):387-400.
- Simmelsgaard SE (1998) The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use and Management* 14 (1): 30-36.
- Singh M, Pabbi S, Bhattacharya AK, Singh AK (2007) Nitrite accumulation in coastal clay soil of India under inadequate subsurface drainage. *Agricultural Water Management* 91 (3): 78-85.
- Skaggs RW, Brave MA, Gilliam JW (1995) Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 24(1):1-32.
- Trujillo NA, Palma LJD (1988) *Estudio Agrológico Detallado del CEICADES-CP: Area del Trapecio km 21.* Colegio de Postgraduados. Centro de Enseñanza, Investigación y Capacitación para el Desarrollo Agropecuario, Forestal y Acuícola del sureste. Programa de Optimización y Uso del Suelo H Cárdenas. 159 pp.
- Vepraskas MJ and Faulkner (2001) Redox chemistry of hydric soils. In: Richardson JL, Vepraskas MJ (ed) *Wetland Soils. Genesis, Hydrology, Landscapes and Clasification.* Lewis Publishers, Washington D.C. 417 pp.
- Wikramanayake N, Priyadarshini WNC, Liyanage BC, Wickramaratne S (2003) Fertilizer runoff from rain-fed rice cultivation. En: Bizier P, DeBarry P (eds) *World Water and Environmental Resources Congress 2003.* Philadelphia. 234 pp.

