

LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN FUNCIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE DRENES SUBTERRÁNEOS EN TABASCO

NITROGEN LEACHING AS A FUNCTION OF SUBSURFACE DRAIN SPACING AT TABASCO

David Cristóbal-Acevedo¹, Oscar L. Palacios-Vélez², Iouri Nikolskii-Gavrilov², Francisco Gavi-Reyes³,

David J. Palma-López⁴, Eugenio Carrillo-Ávila⁴ y Juan J. Peña-Cabriales⁵

¹Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (davide@taurus1.chapingo.mx). ²Especialidad en Hidrociencias y ³Especialidad en Edafología. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. ⁴Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco. ⁵Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Irapuato. Apartado Postal 629. 36500. Irapuato, Guanajuato.

RESUMEN

En los suelos de las zonas tropicales húmedas, cuando los sistemas de drenaje subterráneo remueven los excesos de agua, aceleran la lixiviación de N-NO_3^- y N-NH_4^+ de los campos de cultivo, contribuyendo a la contaminación de aquellos cuerpos de agua que reciben las descargas del drenaje. Con el objetivo de cuantificar las descargas de N-NO_3^- y N-NH_4^+ y determinar el efecto de diferentes espaciamientos de drenaje sobre estas descargas, se midieron los principales componentes del balance de este elemento en parcelas cultivadas con sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Muench) y tres espaciamientos de drenaje subterráneo: 10, 20 y 40 m, en el Campo Experimental El Trapecio del Campus Tabasco, del Colegio de Postgraduados. Se seleccionó el sorgo porque es un cultivo importante bien adaptado a la región y presenta menos problemas de plagas y enfermedades que otros cultivos. Se hicieron observaciones durante dos ciclos de cultivo; uno, de riego, del 16 de marzo al 1 de julio de 1999, y otro, de temporal, del 3 de julio al 15 de octubre del mismo año. Se midieron de manera directa las entradas por fertilización, riego, lluvia, y las salidas por descarga de drenes, escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo, percolación profunda y absorción por la planta. Para determinar la cantidad de N derivado del fertilizante absorbido por el sorgo se usó la técnica del isótopo ^{15}N . Los resultados muestran que para el ciclo de riego las descargas de N-NO_3^- y N-NH_4^+ por los drenes subsuperficiales espaciados a 10, 20 y 40 m fueron de 7.0, 2.17 y 2.54 kg ha^{-1} , mientras que para el ciclo de temporal los valores fueron 7.29, 4.26 y 3.91 kg ha^{-1} . Las concentraciones de N-NO_3^- en el agua de drenaje y del manto freático nunca fueron superiores a 10 ml L^{-1} , la concentración máxima para consumo humano, por lo que puede concluirse, cautelosamente, que hasta el presente la contaminación de los cuerpos de agua que reciben los efluentes del drenaje es reducida. El N del fertilizante absorbido por el cultivo fue 20 % del aplicado (24 kg ha^{-1}) en el ciclo con riego, y 34 % (40.8 kg ha^{-1}) en el ciclo con temporal. El resto (96 y 79.2 kg ha^{-1}) se perdió o pasó a formar parte de

ABSTRACT

In the soils of the humid tropics, when subsurface drainage removes excess water, it accelerates N-NO_3^- and N-NH_4^+ leaching from farmland. This process contributes to the pollution of those bodies of water that receive the discharge from the drainage. To quantify the discharges of N-NO_3^- and N-NH_4^+ and to determine the effect of different drain spacing on these discharges, the principal components of the nitrogen balance were measured in plots cultivated with sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Muench) and three subsurface drainage spacing distances: 10, 20, and 40 m, in El Trapecio Experimental Station at the Tabasco Campus of the Colegio de Postgraduados. Sorghum was selected because it is an important crop that is well adapted to the region and has fewer problems with pests and diseases than others. Observations were made during two crop cycles: one, with irrigation, from March 16 to July 1, 1999, and the other, rainfed, from July 3 to October 15 of the same year. Inputs from fertilization, irrigation, and rain were measured directly, as well as the discharge from drains, surface runoff, subsurface runoff, deep percolation, and absorption by the plant. To determine the amount of N derived from fertilizer absorbed by the sorghum, the ^{15}N isotope technique was used. The results show that for the irrigation cycle, the discharges of N-NO_3^- and N-NH_4^+ from the subsurface drainage spaced at 10, 20 and 40 m were 7.0, 2.17, and 2.54 kg ha^{-1} , while for the rainfed cycle, the values were 7.29, 4.26, and 3.91 kg ha^{-1} . The concentrations of N-NO_3^- in the drained water and the water table were never above 10 ml L^{-1} , the maximum allowed concentration for human consumption. Thus, it can be cautiously concluded that, up to the present, pollution of the bodies of water that receive the effluents from drainage is low. The N from the fertilizer absorbed by the crop was 20% of the applied amount (24 kg ha^{-1}) in the irrigation cycle, and 34% (40.8 kg ha^{-1}) during the rainfed cycle. The rest (96 and 79 kg ha^{-1}) was lost or became part of the soil reserves. The mean yields of grain were 6 622 kg ha^{-1} in the irrigation cycle and 3 216 kg ha^{-1} in the rainfed cycle.

Recibido: Diciembre, 2000. Aprobado: Abril, 2002.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 36: 291-304. 2002.

Key words: Chontalpa, nitrate pollution, drainage discharge, ^{15}N isotope, sorghum.

las reservas del suelo. Los rendimientos medios de grano fueron 6622 kg ha⁻¹ en el ciclo con riego y 3216 kg ha⁻¹ en el ciclo con temporal.

Palabras clave: Chontalpa, contaminación por nitratos, descarga de drenaje, isótopo ¹⁵N, sorgo.

INTRODUCCIÓN

La Chontalpa, en Tabasco, México, es una zona con un alto potencial para la producción de cultivos durante todo el año debido a que no hay heladas. Este potencial no se aprovecha por: las condiciones de alta humedad causadas por las precipitaciones excesivas que se observan de junio a octubre; la temporada de lluvias de menor intensidad, llamadas localmente nortes, que se presentan de noviembre a enero; y la escasez de agua en la época de sequía, de febrero a mayo. Para resolver el problema de la escasez se han diseñado esquemas de riego con agua extraída de pozos profundos, en tanto que para atenuar problemas de exceso de humedad en el suelo se han instalado sistemas de drenaje superficial y subterráneo. La Comisión Nacional del Agua (CNA), por medio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y el Colegio de Postgraduados (CP), adelantándose a la implementación generalizada de los sistemas de drenaje en la región, establecieron un módulo de estudio con la finalidad de obtener experiencia en el diseño, construcción e instalación de este tipo de sistemas, donde se ha estudiado la producción de distintos cultivos en función de los espaciamientos de drenaje (Najera *et al.*, 1998).

Históricamente el estudio de los sistemas de drenaje subsuperficial no se relacionaba con la calidad de las aguas efluentes; sin embargo, éstos afectan el transporte de químicos y su destino en los campos agrícolas (Fausey *et al.*, 1995; Jebellie y Prasher, 1995; Skaggs *et al.*, 1995). En los países más desarrollados, los sistemas de drenaje subterráneo son estudiados principalmente por su contribución a la contaminación de las aguas, pues algunos de los agroquímicos que se lixivian más allá de la zona de raíces, llegan al agua de drenaje que descarga en las corrientes y cuerpos de agua locales (Ritter *et al.*, 1995). Los nitratos pueden producir enfermedades, como la metahemoglobinemia y cáncer gástrico, desórdenes de salud tales como el linfoma no de Hodgkin, incremento en la mortalidad infantil, defectos en el sistema nervioso central e hipertensión (Keeney y Follet, 1991; Fletcher, 1991; O' Riordan y Bentham, 1993). Por lo anterior, la Organización Mundial de la Salud (WHO) estableció en 1971 la concentración de 10 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ o 44.5 mg L⁻¹ de NO₃⁻ como límite máximo en el agua para consumo humano (Follet, 1989). Skaags *et al.* (1995) señalaron que los sistemas de

INTRODUCTION

La Chontalpa, Tabasco, México, is an area with a great potential for year-round crop production because there are no frosts. This potential is not fully taken advantage of for several reasons: the high moisture conditions caused by excessive rainfall from June to October; the less intensive rainy season, locally called nortes, from November to January; and the lack of water during the dry season from February to May. To solve the problem of the lack of rainfall, irrigation schemes have been designed with water extracted from deep wells, while, to attenuate the problem of water excess in the soil, systems of surface and subsurface drainage have been installed. The Comisión Nacional del Agua (CNA), through the Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) and the Colegio de Postgraduados (CP), taking steps toward a generalized implementation of drainage systems in the region, established an experimental module to gain experience in the design, construction, and installation of this type of systems, where production of various crops has been studied in function of drain spacing (Najera *et al.*, 1998).

Historically, the study of subsurface drainage systems was not related to the quality of water effluents. However, these affect the transport of chemicals and their destination in farmlands (Fausey *et al.*, 1995; Jebellie and Prasher, 1995; Skaggs *et al.*, 1995). In developed countries, subsurface drainage systems are studied mainly to determine their contribution to water pollution, since some agrochemicals, which are leached beyond the root zone, reach the drainage water that is discharged in rivers and other local bodies of water (Ritter *et al.*, 1995). The leached nitrates can produce illnesses, such as metahemoglobinemia, stomach cancer, disorders such as non-Hodgkin disease, defects in the nervous system and hypertension, and increased infant mortality (Keeney and Follet, 1991; Fletcher, 1991; O' Riordan and Bentham, 1993). For this reason, the World Health Organization (WHO) established, in 1971, that the concentration of N-NO₃⁻ should not exceed 10 mg L⁻¹ and that of NO₃⁻ should not exceed 44.5 mg L⁻¹ (Follet, 1989). Skaggs *et al.* (1995) stated that subsurface drainage systems increase losses of some pollutants such as N. It has been reported that 13.8 kg N ha⁻¹ are lost yearly from fields with surface drainage (Thomas *et al.*, 1987) and 31.1 kg N ha⁻¹ from fields with subsurface drainage (Evans *et al.*, 1989). Kladvivko *et al.*, (1991) evaluated the effect of spacing between drains on the quality of drained water and concluded that the amount of water, nutrients and pesticides that was moved out of the drained area was greater with a spacing of 6 m than with 12 or 24 meters. However, although subsurface drainage increases the discharge of N, Bengtson *et al.* (1995) reported that

drenaje subsuperficial incrementan las pérdidas de algunos contaminantes como el N. Se ha reportado pérdidas anuales de 13.8 kg N ha⁻¹ en campos con drenaje superficial (Thomas *et al.*, 1987) y 31.1 kg N ha⁻¹ en campos con drenaje subsuperficial (Evans *et al.*, 1989). Kladvko *et al.* (1991) evaluaron el efecto del espaciamiento entre drenes en la calidad del agua de drenaje y concluyeron que la cantidad de agua, nutrientes y pesticidas que se movían fuera del área drenada era mayor con un espaciamiento de 6 m que con 12 o 24 metros. Sin embargo, a pesar de que el drenaje subterráneo incrementa la descarga de N, Bengtson *et al.* (1995) señalaron que el drenaje subsuperficial redujo en 17 % las pérdidas de N con respecto al drenaje superficial. La existencia de sistemas de drenaje y precipitaciones excesivas no son los únicos factores a considerar para pronosticar problemas de altas descargas de N. Legg y Meisinger (1982) incluyen otros dos requisitos fundamentales para que ocurran pérdidas de N por lixiviación: una concentración alta de nitratos en el perfil del suelo y movimiento intenso de agua a través del mismo. Existen situaciones donde la primera condición no ocurre, por ejemplo en los suelos inundados. De acuerdo con la dinámica del N en el suelo los procesos que pueden atenuar su salida del sistema son la desnitrificación, inmovilización, fijación física y la volatilización; y los procesos que pueden incrementar la salida son la fertilización y la mineralización. Follet (1989) afirmó que el drenaje artificial tiene efectos positivos y negativos en la contaminación de aguas por N-NO₃⁻; el lado positivo es que al salir el agua de la parcela existe un menor potencial de contaminación de los acuíferos por percolación profunda, pero al disminuir la humedad, la desnitrificación decrece y se incrementa la cantidad de N-NO₃⁻ disponible para la lixiviación. Por lo mencionado anteriormente, el objetivo de este estudio fue cuantificar las descargas N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ en campos drenados con un cultivo de sorgo y tres diferentes espaciamientos de drenaje subterráneo en una zona tropical húmeda. La hipótesis fue que las descargas de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ dependen de los espaciamientos de drenaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área experimental

El trabajo se realizó en la parte oriental del lote D-5 del módulo de drenaje del campo experimental El Trapecio, perteneciente al Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, localizado en el km 21 de la carretera H. Cárdenas Tabasco-Coatzacoalcos Veracruz, en los 17° 49' 03" N y 93° 23' 03" O. Aquí hay tres parcelas con espaciamientos de drenaje subterráneo de 10, 20 y 40 m. El área tiene dos series de suelos que conforman la capa arable: una, Typic Troporthent franco-mezclado isohipertérmico-no ácido; otra, Acuantic Cromouderts

subsurface drainage reduced N losses by 17% relative to surface drainage. The existence of drainage systems and excessive precipitation are not the only factors to consider in the prediction of problems of high discharges of N. Legg and Meisinger (1982) included another two fundamental requirements for losses of N to occur by leaching: a high concentration of nitrates in the soil profile and intense movement of water across it. There are situations in which the first condition does not occur, for example in flooded soils. According to the dynamics of N in the soil, the processes that can attenuate its exit from the system are de-nitrification, immobilization, physical fixation, and volatilization, while the processes that can increase its exit are fertilization and mineralization. Follet (1989) stated that artificial drainage has both positive and negative effects on N-NO₃⁻ water pollution. On the positive side, when water leaves the field there is less risk of polluting aquifers by deep percolation, but when moisture decreases, de-nitrification also decreases, and the amount of N-NO₃⁻ available for leaching is increased. For the above reasons, this study was conducted to quantify discharges of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ in drained sorghum fields with three different subsurface drain spacing distances in a humid tropical zone. The hypothesis was that discharges of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ depend on drain spacing.

MATERIALS AND METHODS

Description of the experimental area

The experiment was conducted in the eastern part of lot D-5 of the drainage module of the El Trapecio experimental station, of the Tabasco Campus of the Colegio de Postgraduados, located at km 21 on the H Cárdenas Tabasco-Coatzacoalcos Veracruz highway, at 17° 49' 03" N and 93° 23' 03" W. Here, there are three plots with subsurface drains spaced at 10, 20, and 40 m. The area has two series of soils that comprise the arable layer: mixed-loam isohyperthermal-nonacid Typic Troporthent and fine-motmorillonitic-isohyperthermal Acuantic Cromouderts (Trujillo and Palma, 1988). According to the Köppen classification, modified by García (1988), the climate is Am(f)w'(I)g, that is, hot humid rainy tropical, with mean annual values for temperature, precipitation, and evaporation of 26.5 °C, 2162 mm and 1234 mm, respectively.

Establishment of the crop

A crop of grain sorghum, variety Esmeralda, was established in the cycle with irrigation, using re-sprouting (soca) for the rainfed cycle. Sorghum was selected because it is an important crop for the region; it grows well and has a low incidence of pests and diseases. In each cycle the dosage of N, P₂O₅, K₂O fertilization was 120, 80 and 60 kg ha⁻¹, using as sources ammonium sulfate, triple

fino-motmorillonítico-isohipertérmico (Trujillo y Palma, 1988). Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988) el clima es Am (f) w" (i') g esto es, cálido húmedo tropical lluvioso, con valores medios anuales de temperatura, precipitación y evaporación de 26.5 °C, 2163 mm y 1234 mm, respectivamente.

Establecimiento del cultivo

Se estableció un cultivo de sorgo para grano, variedad Esmeralda en el ciclo con riego, utilizando la soca (retoño) para el ciclo con temporal. Se seleccionó sorgo por ser un cultivo regional importante que se desarrolla bien y presenta menos incidencia de plagas y enfermedades. En cada ciclo la dosis de fertilización N, P₂O₅, K₂O fue 120, 80 y 60 kg ha⁻¹, utilizando como fuentes sulfato de amonio, superfosfato triple y cloruro de potasio, respectivamente. Se aplicó 50% a la siembra y 50% al término del desarrollo vegetativo (45 días) de Ny K; el P se aplicó en una sola vez al inicio del ciclo. Se dieron tres riegos con láminas totales de 79.3 cm, 53.8 cm y 83.5 cm para los espaciamientos de 10, 20 y 40 m. Se cosechó con segadora el 1 de julio, el día dos se cortaron los residuos de la cosecha, iniciando el día tres el ciclo con temporal y soca del sorgo. La dosis de fertilización aplicada y la oportunidad fueron las mismas que en el caso del ciclo con riego. La cosecha del segundo ciclo se realizó el 15 de octubre de 1999, volviéndose a pasar la segadora e iniciándose la fase de resoca (segundo retoño), en la que no se aplicó fertilizante y se midió la concentración de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ sólo en el agua del manto freático. El estudio finalizó el 14 de diciembre de 1999 habiéndose aplicado en total 240, 160 y 120 Kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, y K₂O.

Dispositivos de medición de variables hídricas y zonas de muestreo de suelo

En el espacio comprendido entre los dos drenes interceptores centrales de cada espaciamiento experimental se construyeron, instalaron o adaptaron los siguientes dispositivos: pozo de 4 m de profundidad para toma de muestras de agua freática; piezómetro de 4 m de profundidad para toma de muestras de agua del acuífero; parcela de 25 m² delimitada por un bordo de 30 cm de altura cubierto con plástico grueso, con salida en una esquina para medición del escurrimiento superficial y un pluviómetro para determinar la cantidad de precipitación y tomar muestras de agua; un lisímetro de pesada, de 25x25x50 cm, para determinar la evapotranspiración real; y un garrafón de 3 L para tomar muestras de agua en la salida de descarga de los drenes. En el centro de dos líneas de drenaje consecutivas en cada espaciamiento de drenaje, se ubicó la zona de muestreo de suelos con una anchura de 5 m y una longitud de nueve surcos (7.2 m), en la cual se extrajeron todas las muestras de suelo para determinar N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺.

Balance de nitrógeno

Aunque el objetivo principal del trabajo fue obtener la magnitud de las descargas de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ en función de los espaciamientos entre drenes subterráneos; para obtener una primera descripción de la dinámica del N en el sistema, se hizo un balance aproximado de este

superphosphate, and potassium chloride, respectively. At planting 50% of N and K was applied and the other 50% at the end of vegetative growth (45 days); P was applied in a single dose at the beginning of the cycle. The crop was irrigated three times with total laminas of 79.3 cm, 53.8 cm and 83.5 cm for the spacing distances of 10, 20, and 40 m. Harvest was done with a harvester on July 1; on the second day of July the harvest residues were cut, and on the third the rainfed re-sprouting cycle began. The dosage of fertilization and the opportunity were the same as in the case of the cycle with irrigation. The second cycle was harvested on October 15, 1999, with the harvester, and the second re-sprout phase (resoca) began. In this phase fertilizer was not applied and the concentration of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ was measured only in the water of the aquifer. The study ended on December 14, 1999, having applied a total of 240, 160, and 120 kg ha⁻¹ of N, P₂O₅, and K₂O.

Devices for the measurement of water variables and soil sampling zones

In the space between the two central interceptor drains of each experimental spacing distances, the following devices were constructed, installed, or adapted: a 4-meter-deep well for sampling water from the aquifer, 4-meter-deep piezometer for sampling water from the aquifer, a 25 m² plot delimited by a 30 cm high ridge covered with thick plastic film with an opening at one corner where surface runoff was measured, and a pluviometer to measure rainfall and to sample water, a 25x25x50 cm micro-lysimeter to determine real evapotranspiration, and a 3-liter bottle to sample water from the drain discharge. In the center of the consecutive drain lines in each spacing distance a site was located to sample soils; the site was 5 m wide and nine rows (7.2 m) long. All of the soil samples were extracted from this site to determine N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺.

Nitrogen balance

Although the principal objective of this work was to determine the magnitude of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ discharges in function of the distance between subsurface drains, to obtain a preliminary description of the dynamics of N in the system, an approximation of the N balance was done. The balance is based on the application of the principle of conservation of mass, for both the water and N content variables. The equation of conservation of mass for any system establishes that the inputs minus the outputs at a given time are equal to the change of storage in that time. Given that most of the components of the N balance move in solution, it was necessary to determine the components of the water balance. Also, to measure the absorption of nitrogen derived from the fertilizer by the plants, the ¹⁵N isotope technique (Zapata, 1990) was used. The working procedure consisted of the following activities for each of the three subsurface drainage spacing distances: determination of the magnitude of the water variables (direct measures and application of the water balance equations); installation of microplots for the application of ¹⁵N, determination of N concentrations in the soil, water and plant samples (sampling and application of determination techniques in the laboratory), calculation of the

elemento. El balance está basado en la aplicación del principio de la conservación de la masa, tanto para las variables hídricas como para las variables de contenido de N. La ecuación de la conservación de la masa para cualquier sistema establece que las entradas menos las salidas en un tiempo dado, son iguales al cambio del almacenamiento en dicho tiempo. Dado que la mayoría de los componentes del balance de N se mueven en solución, fue necesario determinar los componentes del balance hídrico. Por otro lado, para medir la absorción de nitrógeno derivado del fertilizante por las plantas, se utilizó la técnica isotópica del ^{15}N (Zapata, 1990). El procedimiento de trabajo consistió de las siguientes actividades en cada uno de los tres espaciamientos de drenaje subterráneo: obtención de la magnitud de las variables hídricas (mediciones directas y aplicación de las ecuaciones de balance hídrico); instalación de microparcels para la aplicación de ^{15}N , determinación de las concentraciones de N en las muestras de suelo agua y planta, (muestreos y aplicación de técnicas de determinación en laboratorio), cálculo de la magnitud de los componentes del balance de N medidos directamente (N del fertilizante, N del agua de riego, N de la precipitación, N del escurrimiento superficial, N absorbido por la planta, N lixiviado, N en la descarga de drenes, N descargado de manera subterránea al colector principal abierto, N de percolación profunda y cambio de almacenamiento de N en la zona no saturada), aplicación de las ecuaciones de balance para obtener la magnitud de los componentes no medidos directamente (cambio de almacenamiento de N en la zona saturada y N intercambiable). A continuación se explican los principales aspectos de esta metodología.

Balance hídrico

Se determinaron los principales componentes de este balance: las láminas de riego se calcularon utilizando los datos de tiempo de riego y los caudales utilizados; la precipitación se midió diariamente en un pluviómetro; el escurrimiento superficial se calculó utilizando el área de parcelas de escurrimiento especialmente adaptadas y el volumen captado en cada tina conectada a la parcela; la descarga de drenaje fue obtenida mediante aforos en los tubos de descarga. La infiltración, la evapotranspiración real, la percolación, el ascenso capilar, el flujo subterráneo, la percolación profunda y la alimentación desde el acuífero, fueron obtenidas de manera indirecta a partir de las ecuaciones de balance hídrico (Mendoza *et al.*, 1998).

Determinación de la cantidad de N del fertilizante absorbida por el cultivo (uso de ^{15}N)

Para determinar la cantidad de N del fertilizante absorbida por el cultivo; entre las dos líneas consecutivas centrales de cada espaciamiento de drenaje se establecieron tres microparcels de 4 m de longitud, en el sentido de los surcos, de 3.2 m de anchura (cuatro surcos con distancia de 0.8 m entre surco y surco). Cada microparcela fue dividida en cuatro submicroparcels de 2 m de longitud por 1.6 m de anchura. Dos de éstas fueron tratadas con ^{15}N utilizando sulfato de amonio en polvo como fuente y dos con ^{14}N (sulfato de amonio en polvo grado reactivo) en las mismas etapas. Las dosis de ^{15}N y de ^{14}N que fueron las mismas del área general, fueron aplicadas en forma

magnitud de los componentes medidos directamente (N in fertilizer, N in irrigation water, N in rainfall, N in surface runoff, N absorbed by plants, leached N, N in drain discharge, N discharged underground into the main open collector, N in deep percolation, and N in the non-saturated zone), application of the balance equations to obtain the magnitude of the components not directly measured (N storage change in the saturated zone and exchangeable N). In the following sections the main aspects of this methodology are explained.

Water balance

The following main components of water balance were determined: irrigation laminas using data on application time and flow, rainfall measured directly with a pluviometer, surface runoff calculated using the area of the specially adapted runoff plots and the volume captured in each tub connected to the plot, the drain discharge was obtained with gauges in the discharge tubes. Infiltration, real evapotranspiration, percolation, capillary ascent, underground flow, deep percolation, and water fed from the aquifer were obtained indirectly from the water balance equations (Mendoza *et al.*, 1998).

Determination of N from fertilizer absorbed by the crop (use of ^{15}N)

To determine the quantity of N from the fertilizer absorbed by the crop, between the two central consecutive lines of each drain spacing distances, three microplots 4 m long were established, in the direction the rows run with a width of 3.2 m (four rows 0.8 m apart). Each microplot was divided into four sub-microplots, 2 m long by 1.6 m wide. Two of these were treated with ^{15}N using powdered ammonium sulfate as the source, and two were treated with ^{14}N (reactive grade powdered ammonium sulfate), both during the same stages. The dosages of ^{15}N and ^{14}N , which were the same for the general area, were applied locally to the soil in a line laid out five cm from the row of plants, spread as homogeneously as possible. The area of the microplots was managed in a way similar to the general crop area in the two cycles.

Determinations of nitrogen in soil, water, and plants

The total N content in stems and leaves was obtained by the semi-micro Kjeldhal method modified to include nitrates, following routine procedures at the soils laboratory of the Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1988). N-NO_3^- and N-NH_4^+ extraction from the soil was done with $\text{KCl } 2\text{N}$; N-NO_3^- and N-NH_4^+ contents in water were obtained by the method of salicylic acid nitration (Robarge *et al.*, 1983) and that of Nessler (Jackson, 1964), respectively. The quantity of ^{15}N in plant material was determined using the wet extraction procedure. Determinations for each sample were done in triplicate using internal patterns with an emission spectrometer NOI-6 ePC FAN in the environmental microbiology laboratory of the Centro de Investigaciones Avanzadas of the Instituto Politécnico Nacional, Irapuato unit, which is recognized for quality control by the International Organ for Atomic Energy (IOAE).

localizada en el suelo en una línea trazada a 5 cm de la hilera de plantas tratando de que la dosis para los 2 m se repartiera de manera homogénea. Al área destinada a las microparcels se le dio un manejo similar que al área general de cultivo en los dos ciclos.

Determinaciones de nitrógeno en suelo, agua y planta

El contenido de N total en los tallos y hojas de la planta se obtuvo por el método semimicro-Kjeldhal modificado para incluir nitratos, de acuerdo con el procedimiento de rutina del laboratorio de Suelos del Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1988). La extracción de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ del suelo se realizó con KCl 2N, los contenidos de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ en agua fueron obtenidos por los métodos de nitración del ácido salicílico (Robarge *et al.*, 1983) y Nessler (Jackson, 1964), respectivamente, y la cantidad de ^{15}N en el material vegetal fue obtenida utilizando la vía húmeda para la extracción. Las determinaciones para cada muestra se realizaron por triplicado utilizando patrones internos con un espectrómetro de emisión NOI-6 ePC FAN en el laboratorio de microbiología ambiental del Centro de Investigaciones Avanzadas del IPN, unidad Irapuato, que cuenta con el reconocimiento del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el control de calidad.

Cálculo de la magnitud de los componentes

Para calcular la cantidad de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ en solución de las diferentes entradas y salidas se utilizó el valor de las concentraciones obtenido en las muestras de agua, y los volúmenes de flujo determinados en el balance hídrico. La cantidad de nitrógeno absorbido por el cultivo se obtuvo a partir de la concentración de N en tallos y hojas y la biomasa vegetal. La cantidad de N del fertilizante absorbido por el cultivo se obtuvo a partir de las cantidades de ^{15}N en tallos y hojas. El cambio de almacenamiento de N en el suelo en la zona no saturada se obtuvo a partir de los datos del contenido promedio de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ en la zona no saturada, determinados en las muestras tomadas al inicio y al final de los periodos de balance (ciclo con riego y ciclo con temporal).

Aplicación de las ecuaciones de balance

Una vez conocidos los valores de los componentes del balance de N medidos directamente, se procedió a aplicar las ecuaciones de balance para obtener el valor de algunos componentes no medidos. Para la zona no saturada, cuyas profundidades medias fueron 175.4, 179.13 y 191.05 cm en el ciclo con riego y 96.23, 88.38 y 72.22 cm en el ciclo con temporal, para los espaciamientos de 10, 20 y 40 m, respectivamente, la ecuación de balance (todos los componentes están en $kg\ ha^{-1}$), es

$$Nfe + Nri + Npr - (Npl + Nes + Nr) + Nint = \Delta N\ Znsa \quad (1)$$

donde $Nfe = N$ que entra por fertilización; $Nri = N$ que entra con el agua de riego; $Npr = N$ que entra con la precipitación; $Npl = N$ que sale por

Calculation of the magnitude of the components

To calculate the quantity of $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$ in the solution of the different inputs and outputs, the value of the concentrations obtained in the water samples, and the flow volumes determined in the water balance were used. The quantity of nitrogen absorbed by the crop was obtained from the concentration of N in stems and leaves and in the plant biomass. The quantity of N from the fertilizer absorbed by the crop was obtained from the quantities of ^{15}N in stems and leaves. N storage change in the soil in the non-saturated zone was obtained from the data on the average contents of $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$ in the non-saturated zone, determined in the samples taken at the beginning and end of the balance periods (cycle with irrigation and rainfed cycle).

Application of balance equations

Once the values of the directly measured N balance components were known, balance equations were applied to obtain the value of some unmeasured components. For the non-saturated zone, whose mean depths were 175.4, 179.13, and 191.05 cm in the cycle with irrigation and 96.23, 88.38, and 72.22 cm in the rainfed cycle, for the spacing distances of 10, 20, and 40 m, respectively, the balance equation (all components are expressed in $kg\ ha^{-1}$) is

$$Nfe + Nri + Npr - (Npl + Nes + Nr) + Nint = \Delta N\ Znsa \quad (1)$$

where $Nfe = N$ input from fertilization; $Nri = N$ input from irrigation water; $Npr = N$ input from precipitation, $Npl = N$ output from absorption by the crop, $Nes = N$ output from surface runoff, $Nr = N$ leached from the non-saturated to the saturated zone, $Nint =$ exchangeable N ($Nint = Nmin - Ndes - Ninm - Nvo$), $Nmin =$ mineralized N, $Ndes =$ denitrified N, $Ninm =$ immobilized N, $Nvo =$ volatilized N, and $\Delta N\ Znsa =$ change of storage in the non-saturated zone.

The balance equation for the saturated zone is

$$Nr - (Ndr + Ncol + Np) = \Delta N\ Zsa \quad (2)$$

where $Ndr = N$ output from drainage, $Ncol = N$ output from underground flow to main collector, $Np = N$ output from deep percolation, and $\Delta N\ Zsa =$ change of storage in the saturated zone.

Finally, the general balance equation is the sum of the above equations

$$Nfe + Nri + Npr - (Npl + Nes + Ndr + Ncol + Np) + Nint = \Delta N\ (Znsa + Zsa) \quad (3)$$

Change of storage in the saturated zone was obtained from equation (2), while $Nint$ was obtained from equation (3).

absorción del cultivo; N_{es} = N que sale por escurrimiento superficial; N_r = N que se lixivia de la zona no-saturada a la saturada; N_{int} = N intercambiable ($N_{int} = N_{min} - N_{des} - N_{imm} - N_{vo}$); N_{min} = N mineralizado; N_{des} = N desnitrificado; N_{imm} = N inmovilizado; N_{vo} = N volatilizado y ΔN_{Zsa} = cambio de almacenamiento en la zona no saturada.

La ecuación de balance para la zona saturada es:

$$N_r - (N_{dr} + N_{col} + N_p) = \Delta N_{Zsa} \quad (2)$$

donde N_{dr} = N que sale por drenaje; N_{col} = N que sale por flujo subterráneo al colector principal; N_p = N que sale por percolación profunda; y ΔN_{Zsa} = cambio de almacenamiento en la zona saturada.

Finalmente, la ecuación del balance general es la suma de las anteriores:

$$N_{fe} + N_{ri} + N_{pr} - (N_{pl} + N_{es} + N_{dr} + N_{col} + N_p) + N_{int} = \Delta N (Z_{nsa} + Z_{sa}) \quad (3)$$

El cambio de almacenamiento en la zona saturada se obtuvo a partir de la ecuación (2), mientras que el N_{int} se obtuvo a partir de la ecuación (3).

Concentraciones medias de nitrógeno en las aguas muestreadas y comportamiento en el tiempo

Con los datos de las concentraciones de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ de las muestras de agua de riego, lluvia, escurrimiento superficial, descarga de drenes, descarga subterránea al colector principal y percolación, tomadas diariamente en los dos ciclos de cultivo, se obtuvo el valor medio así como el comportamiento de estas variables en función del tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance hídrico

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del balance hídrico para los dos ciclos de cultivo y los tres espaciamientos de drenaje. Estos resultados muestran los flujos de agua y son la base para calcular los flujos de $N-NO_3^-$ y $N-NH_4^+$ disueltos en el agua.

En el ciclo con riego, las láminas de agua aplicadas en las parcelas con distinto espaciamiento de drenaje no fueron iguales debido a problemas con la microtopografía, afectando esto la cantidad de agua descargada por los drenes, pero aún así, la descarga de agua de los drenes (columna 10) fue mayor cuanto menor fue el espaciamiento entre los drenes. En este mismo ciclo hubo pocos eventos de precipitación, lo que se refleja en la magnitud de esta variable y, por consecuencia, en el escurrimiento superficial. En el ciclo con temporal la relación entrada de agua

Mean concentrations of nitrogen in sampled water and its behavior over time

With the data on the $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$ concentrations in the water samples from irrigation, rain, subsurface discharge to the main collector, and percolation taken daily during the two crop cycles, the mean value was obtained as well as their behavior over time.

RESULTS AND DISCUSSION

Water balance

Table 1 presents the results of the water balance for the two crop cycles and the three spacing distances between drains. These results show the flows of water, which are the basis to calculate the flows of dissolved $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$.

In the cycle with irrigation, the laminas of water applied in the plots with different drainage spacing were not equal because of problems with the microtopography, which affected the amount of water discharged through the drains. Even so, the smaller the distance between drains, the greater was the discharge of water from the drains (column 10). In this same cycle, there were few precipitation events, which was reflected in the magnitude of this variable and, in consequence, of the surface runoff. In the rainfed cycle, the relationship between water of the aquifer and the aquifer output to the saturated zone for the three spacing distances resulted in water exiting the system. For the relationship between capillary ascent and deep percolation, there was a net flow from the non-saturated to the saturated zone, denoted by the negative sign. In the rainfed cycle, there were more events of precipitation and, therefore, the magnitude of runoff was larger. In the case of the relationship between input of water from the aquifer and output of water from the aquifer to the saturated zones in the distances of 10 and 40 m, there was water entering, while with the distance of 20-meter water exited. For the relationship between capillary ascent and deep percolation there was a net flow from the non-saturated to the saturated zone, as in the cycle with irrigation. The discharges through subsurface drainage were significantly greater in the rainfed cycle than in the cycle with irrigation.

Nitrogen balance

The results of N balance for the two crop cycles and three spacing distances are presented in Table 2.

The main components of entry and exit of N in the two cycles were the contributions from fertilizers and consumption by plants, respectively. The N contributions were high for the irrigation water and low for rainwater. However, the amount of N from irrigation water (N_{ri})

Cuadro 1. Componentes de los balances hídricos para el ciclo con riego y con temporal, en parcelas cultivadas con sorgo y con tres espaciamientos (E) de drenaje: 10, 20 y 40 m.**Table 1. Components of the water balances for the cycle with irrigation and the rainfed cycle in plots cultivated with sorghum and with three spacing distances (E) between drains: 10, 20, and 40 m.**

Esp.	Entradas [†]			Salidas [‡]						
	Ri	Pr	Ri+Pr	Lsa	I	Etr	(ev-sv)	(G-R)	Qdr	qcol
	(cm)			(cm)						
Ciclo de cultivo con riego										
E10	79.3	17.1	96.4	0.1	96.4	64.6	-32.4	-41.5	9.4	
E20	53.8	17.1	70.9	0.2	70.9	57.8	-8.6	-14.1	5.8	
E40	83.5	17.1	100.6	0.2	100.6	70.3	-23.4	-27.7	4.9	
Ciclo de cultivo con temporal										
E10		141.2	141.2	39.3	101.9	63.4	20.0	-39.2	54.0	3.9
E20		141.2	141.2	26.2	115.1	60.0	-6.4	-55.5	39.3	6.9
E40		141.2	141.2	47.9	93.4	58.3	13.2	34.8	36.8	8.2

[†] Entradas = (Ri - Riego; Pr - Precipitación).

[‡] Salidas = (Lsa - escurrimiento superficial; I - infiltración; Etr - evapotranspiración real; (ev - sv) - percolación profunda hacia el acuífero o alimentación del mismo; (G - R) - ascenso capilar o percolación hacia el manto freático; qdr - gasto de los drenes entubados y qcol - descarga subterránea hacia el colector abierto).

del acuífero y salida de agua del acuífero a la zona saturada en los tres espaciamientos se presentó una salida de agua; para la relación ascenso capilar percolación profunda se presentó un flujo neto de la zona no saturada a la saturada, denotado por el signo negativo. En el ciclo con temporal hubo más eventos de precipitación y, por tanto, la magnitud del escurrimiento fue mayor. En el caso de la relación entrada de agua del acuífero y salida de agua del acuífero a la zona saturada en los espaciamientos de 10 y 40 m se presentó una entrada de agua y en el espaciamiento de 20 m una salida; para la relación ascenso capilar percolación profunda se presentó un flujo neto de la zona no saturada a la saturada a la igual que en el ciclo con riego. Las descargas por el drenaje subterráneo fueron significativamente mayores en el ciclo con temporal en comparación del ciclo con riego.

Balance de nitrógeno

En el Cuadro 2 están los resultados del balance de N para los dos ciclos de cultivo y los tres espaciamientos de drenaje estudiados.

Los principales componentes de entrada y salida de N en ambos ciclos fueron las aportaciones por fertilización y el consumo por las plantas, respectivamente. Las aportaciones de N fueron altas para el agua de riego y bajas para el agua de lluvia. Sin embargo, la cantidad del agua de riego (Nri) estuvo dentro del intervalo reportado por Meisinger y Randall (1991), de 10 a 145 kg ha⁻¹. Igualmente, las aportaciones de N con el agua de lluvia (Npr) coincidieron con lo reportado por Follet (1989): 0.47 y 0.46 mg L⁻¹ en un sitio y 0.27 y 1.02 mg L⁻¹ en otro, de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻, respectivamente. Respecto al

was within the range reported by Meisinger and Randall (1991), from 10 to 145 kg ha⁻¹. Likewise, the contributions of N from rainwater (Npr) coincided with Follet (1989), who reported 0.47 and 0.46 mg L⁻¹ in one site and 0.27 and 1.02 mg L⁻¹ in the other, of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺, respectively. N in surface runoff also coincided with values reported by Leep and Meisinger (1982), in terms of this amount being generally low.

Regarding discharges of N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ through the drains, it is important to highlight two aspects. On the one side, the discharges were relatively low, lower than expected, especially if they are compared to the magnitude of other components of the balance, such as the contributions from fertilizer and the outputs absorbed by the crop. On the other hand, these discharges did behave as expected; that is, the greater the discharge of drainage water, with smaller spacing, the greater the discharge of N, with a more notable difference between the 10 and 40 m spacing distances. Bolton *et al.*, (1979) reported annual losses of 8.9 and 14 kg ha⁻¹ through the drainage system from a clay soil with a single crop and rotation. Bottcher *et al.* (1981) found annual losses of 8.66 kg ha⁻¹ through subsurface drainage. The spacing distance of 20 m diverged from the expected tendencies in the behavior of some of the components of the N balance, as was the case of N in irrigation water (Nri), N in the deep percolation water (Np) in the cycle with irrigation, N in runoff water (Nes), and N in the deep percolation water (Np) in the rainfed cycle. This behavior was possibly due to the fact that in the plot with this spacing distance, the differences due to hydraulic functioning of the drains, compared with the plots with spacing distances of 10 and 40 m were less dominant

Cuadro 2. Componentes del balance de N para el ciclo de riego y para el ciclo con temporal en los espaciamientos (E) de drenaje de 10, 20 y 40 m.**Table 2. Components of the N balance for the cycle with irrigation and the rainfed cycle in the drain spacing distances (E) of 10, 20, and 40 m.**

Esp.	Entradas [†]				Salidas [‡]					
	Nfe	Nri	Npr	Total	Npl	Nes	Ndr	Ncol	Np	Total
	kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹					
	Ciclo de cultivo con riego									
E10	120.00	20.01	2.54	142.55	117.71	0.02	7.00		10.69	135.42
E20	120.00	15.40	2.54	137.94	114.34	0.03	2.17		3.90	120.44
E40	120.00	20.77	2.54	143.31	77.51	0.02	2.54		5.95	86.02
	Ciclo de cultivo con temporal									
E10	120.00		7.01	127.01	91.54	4.65	7.29	0.28	-2.26	101.50
E20	120.00		7.01	127.01	104.70	2.78	4.26	0.53	0.29	112.56
E40	120.00		7.01	127.01	140.00	6.24	3.91	0.60	-1.07	149.68

Entradas[†] = (Nfe - N aplicado con el fertilizante; Nri - N aportado por el agua de riego; Npr - N aportado por la lluvia). Salidas[‡] (Npl - N absorbido por el cultivo; Nes - N removido por el escurrimiento superficial; Ndr - N removido por el drenaje subterráneo; Ncol - N removido por colector abierto; Np - N perdido por percolación hacia el acuífero. Los valores negativos de este último componente significan que existió una entrada desde el acuífero).

N en el escurrimiento superficial, hubo concordancia con lo señalado por Leeg y Meisinger (1982), en cuanto a que esta cantidad es generalmente baja.

Respecto a las descargas de $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ por los drenes, es importante destacar dos aspectos. Por un lado, éstas fueron relativamente bajas, menores a las esperadas, sobre todo si se comparan con la magnitud de otros componentes del balance, como las aportaciones por fertilizante y las salidas con el cultivo. Por otro lado, estas descargas tuvieron el comportamiento esperado; es decir, entre más alta fue la descarga de agua de drenaje, dada por un espaciamiento menor, mayor fue la descarga de N, siendo la diferencia más notable entre los espaciamientos de 10 y 40 m. Bolton *et al.* (1970) reportaron pérdidas anuales por el sistema de drenaje de 8.9 y 14 kg ha⁻¹ en un suelo arcilloso con monocultivo y rotación. Bottcher *et al.* (1981) obtuvieron pérdidas anuales de 8.66 kg ha⁻¹ por el drenaje subterráneo. El espaciamiento de 20 m se alejó de las tendencias esperadas en el comportamiento de algunas componentes del balance de N, como fue el caso del N con el agua de riego (Nri), N en el agua de percolación profunda (Np) en el ciclo con riego, N en el agua de escurrimiento (Nes) y N en el agua de percolación profunda (Np) en el ciclo con temporal. Este comportamiento posiblemente se debió a que en la parcela con este espaciamiento las diferencias debidas al funcionamiento hidráulico de los drenes, en comparación con las parcelas con espaciamientos de 10 y 40 m, fueron menos dominantes que las diferencias por tipo de suelo, microrelieve superficial, estratificación y manejo del cultivo. Por tanto, los flujos de agua fueron afectados mayormente por estos factores y los efectos por diferencia en los espaciamientos del drenaje no alcanzaron a manifestarse, situación

than the differences due to soil type, surface micro-relief, stratification, and crop management. Therefore, the flows of water were largely affected by these factors, and the effects of the difference in drain spacing were not strong enough to become evident. In contrast, the larger difference between the 10 and 40 m spacing did allow the effects to show.

Figures 1 and 2 show outputs of N, expressed as the percentage of inputs from fertilization, irrigation and rain, for the spacing distance of 10 m for the cycle with irrigation and the rainfed cycle. Analogous figures, which are not shown, were obtained for the other spacing distances.

The outputs due to the drainage (Ndr) did not exceed 6% of the inputs, in both the cycle with irrigation and the rainfed cycle. Thus, the main loss of N occurred through other processes, such as de-nitrification, volatilization, immobilization, and physical fixation. Through the process of fixation, soils can fix appreciable quantities of $N-NH_4^+$ from ammonium fertilizers, and this ability is related to their clay content (Young and Aldag, 1982). This might be applied to the present study, in which ammonium sulfate was used as the source of nitrogen fertilizer, in the case of Vertisols with motmorillonitic clay which, according to their mineralogy, possess a higher residual negative charge than other types of clays.

Mean concentrations of nitrogen in water sample and their behavior over time

To contrast the changes in concentrations during the two crop cycles, Table 3 presents the mean concentrations of $N-NO_3^-$ and $N-NH_4^+$ in the entering and exiting water.

que sí sucedió entre los espaciamientos de 10 y 40 m por tener magnitudes más diferentes.

En las Figuras 1 y 2 se presentan las salidas de N, expresadas como porcentaje de las entradas por fertilización, riego y lluvia, para el espaciamiento de 10 m para los ciclos de riego y temporal. Figuras análogas, que no se muestran, se obtuvieron para los otros espaciamientos.

Las salidas debidas al drenaje (Ndr) no rebasaron 6% de las entradas, tanto en el ciclo de riego como en el ciclo de temporal; por tanto, la principal pérdida de N ocurrió por otras vías, como desnitrificación, volatilización, inmovilización y fijación física. Sobre este último proceso, muchos suelos pueden fijar cantidades apreciables de NH_4^+ provenientes de los fertilizantes amoniacales y dicha capacidad está relacionada con la cantidad de arcilla (Young y Aldag, 1982). Esto podría aplicarse al presente estudio en el caso de los suelos vertisoles, con arcillas motmorilloníticas que, de acuerdo con su mineralogía, poseen una mayor carga residual negativa que otros tipos de arcillas y la fuente de fertilización nitrogenada fue sulfato de amonio.

Concentraciones medias de nitrógeno en las aguas muestreadas y comportamiento en el tiempo

En el Cuadro 3 se presentan las concentraciones medias de N-NO_3^- y N-NH_4^+ en las aguas de entrada y salida,

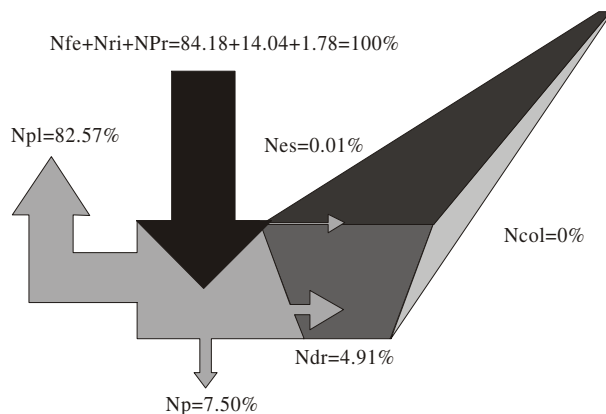


Figura 1. Representación gráfica de las salidas de N como porcentaje de las entradas en el espaciamiento de drenaje de 10 m, para el ciclo con riego. Nfe = N del fertilizante, Nri = N del riego, Npr = N de la precipitación, Npl = N absorbido por la planta, Nes = N en el escurrimiento superficial, Np = N percolado, Ndr = N descargado por los drenes y Ncol = N descargado de manera subterránea al colector abierto.

Figure 1. Graphic representation of the outputs of N as a percentage of the inputs in the 10 m drain spacing for the crop cycle with irrigation. Nfe = N from fertilizer, Nri = N from irrigation, Npr = N from rainfall, Npi = N absorbed by plants, Nes = N in surface runoff, Np = percolated N, Ndr = N discharged by drains, and Ncol = N discharged underground to open collector.

In general, the concentrations were higher in the cycle with irrigation. The concentration of N in rainwater (Npr) was within the ranges reported in the literature. Thus, for example, Follet (1989) reported mean annual concentrations of 0.27 and 0.47 mg L^{-1} for N-NH_4^+ and of 1.02 and 0.46 mg L^{-1} for N-NO_3^- in two sites in the state of Indiana.

The concentration of nitrates in subsurface drainage water (when there was discharge) is similar to that of the aquifer; thus, it was necessary to analyze its variation over time. Figure 3 shows this variation for the cycle with irrigation, while Figure 4 shows the corresponding data for the rainfed cycle. In Figure 3 the effect of irrigation can be observed in the concentration of N-NO_3^- : peaks of concentration occur right after the dates of application. However, inexplicable changes can also be observed. For example, between 03/22/99 and 04/22/99 there was an increase in the concentrations in the water from the aquifer for the spacing distances of 20 m and 40 m, and a reduction in the distance of 10 m, which has no relationship to any event of rain or irrigation.

Figure 4 shows only the variation over time in the concentration of N-NO_3^- in the water of the aquifer for the spacing distance of 10 m, which was very similar to that for the other spacing distances. The effect of dilution is clear when the precipitation was heavy and the concentration of N-NO_3^- in the soil was low, since

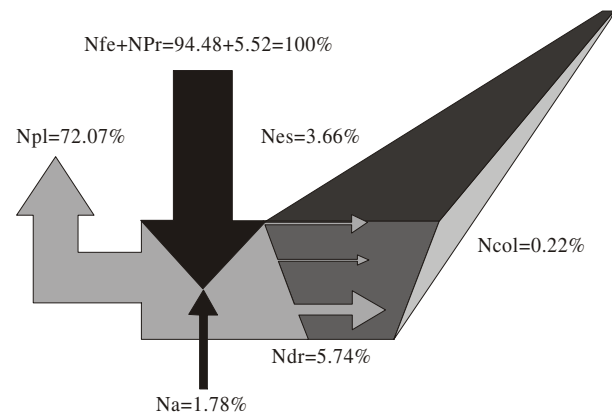


Figura 2. Representación gráfica de las salidas de N como porcentaje de las entradas en el espaciamiento de drenaje de 10 m, para el ciclo con temporal. Nfe = N del fertilizante, Nri = N del riego, Npr = N de la precipitación, Npl = N absorbido por la planta, Nes = N en el escurrimiento superficial, Np = N percolado, Ndr = N descargado por los drenes, Ncol = N descargado de manera subterránea al colector abierto.

Figure 2. Graphic representation of the outputs of N as a percentage of the inputs in the 10 m drain spacing for the rainfed crop cycle. Nfe = N from fertilizer, Nri = N from irrigation, Npr = N from rainfall, Npi = N absorbed by plants, Nes = N in surface runoff, Np = percolated N, Ndr = N discharged by drains, and Ncol = N discharged underground to open collector.

Cuadro 3. Concentraciones medias (mg L^{-1}) de N-NO_3^- , N-NH_4^+ , en el agua durante los dos ciclos de cultivo y en los espaciamientos (E) de drenaje de 10, 20 y 40 m. Nri = N en el agua de riego, Npr = N en el agua de lluvia, Nes = N en el agua de escurrimiento, Ndr = N en el agua de drenaje, Ncol = N en el agua del colector, Np = N en el agua de percolación.

Table 3. Mean concentrations (mg L^{-1}) of N-NO_3^- and N-NH_4^+ in the drainage water during the two crop cycles and the spacing distances of 10, 20, and 40 m. Nri = N in irrigation water, Npr = N in rainwater, Nes = N in water from runoff, Ndr = N in drainage water, Ncol = N in water from collector, Np = N in water from percolation.

	Ciclo con riego						Ciclo con temporal					
	E10		E20		E40		E10		E20		E40	
	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-NH_4^+
	mg L^{-1}											
Nri	1.21	1.25	1.21	1.25	1.21	1.25						
Npr	0.56	0.93	0.59	0.93	0.56	0.93	0.41	0.34	0.41	0.34	0.41	0.34
Nes							0.89	0.66	0.83	0.66	1.12	0.62
Ndr	5.59	1.42	2.58	0.92	4.0	1.28	0.68	0.34	0.51	0.32	0.58	0.31
Ncol							0.46	0.25	0.48	0.41	0.44	0.31
Np	1.10	1.71	2.93	1.17	0.06	0.95	0.32	0.42	0.37	0.25	0.39	0.52

durante los dos ciclos de cultivo, con la finalidad de contrastar los cambios de concentración en ellos.

En general, las concentraciones fueron mayores en el ciclo con riego. La concentración de N en el agua de lluvia (Npr) estuvo dentro de los intervalos reportados en la literatura. Así, por ejemplo, Follet (1989) reportó concentraciones medias anuales de N-NH_4^+ de 0.27 y 0.47 mg L^{-1} y concentraciones de N-NO_3^- de 1.02 y 0.46 mg L^{-1} para dos sitios del Estado de Indiana.

La concentración de nitratos en las aguas del drenaje subterráneo (cuando hubo descarga) fue similar a la del manto freático, por lo se debe analizar la variación en el tiempo de esta característica. En la Figura 3 se presenta esta variación para el ciclo de riego, mientras que en la Figura 4 se presenta la correspondiente al ciclo de temporal. En la Figura 3 está el efecto de los riegos en la concentración de N-NO_3^- : los picos de concentración máxima se presentan poco después de la fecha de aplicación de los riegos; sin embargo, se observan cambios inexplicables de la concentración. Por ejemplo, entre el 22/03/99 y el 22/04/99 hubo un incremento en las concentraciones del agua freática en los espaciamientos de 20 y 40 m y una disminución en el espaciamiento de 10 m, lo que no tienen relación con ningún evento de lluvia o riego.

En la Figura 4 se presenta únicamente la variación en el tiempo de la concentración de N-NO_3^- en el agua del manto freático, para el espaciamiento de drenaje de 10 m, el cual fue muy similar al de los otros espaciamientos. Es claro el efecto de dilución cuando las precipitaciones fueron grandes y la concentración de N-NO_3^- en el suelo fue baja, por lo que no se dio el proceso de lixiviación. Esto no explica el incremento en la concentración de N-NO_3^- en el agua del manto freático, sino que después de una precipitación intensa disminuyó la concentración.

there was no leaching. Nevertheless, this does not explain the increment in the concentration of N-NO_3^- in the water from the aquifer, but obeys to the fact that after an intense rainfall occurred, it diminished drastically.

When the variation in the concentration of N-NO_3^- is analyzed in the two cycles, it is observed that it was higher in the water from the aquifer during the cycle with irrigation, since the three applications increased the concentration of N-NO_3^- in the water due to the effect of leaching. In the case of the rainfed cycle, there was also an effect of leaching, but because of the continuous rainfall and the dominance of a reduction condition (which diminished the concentration of N-NO_3^-), there was a dilution effect, which caused the concentration in the aquifer to decrease after the most intense rainfall events.

CONCLUSIONS

The spacing between subsurface drains affected the discharge of N-NO_3^- and N-NH_4^+ in the humid tropical zone of Tabasco during the dry (with irrigation) and rainy (rainfed) seasons. This discharge was greater when the spacing between drains was shorter. However, the loss of N-NO_3^- and N-NH_4^+ through drainage (10 m) was 14.3 kg ha^{-1} , a quantity that is not significant compared with the dosage of nitrogen fertilizer applied (240 kg ha^{-1} in the two cycles of sorghum cultivation). The quantity absorbed by the crop was 64.8 kg ha^{-1} , and the remaining 160.9 kg ha^{-1} was lost through other means or augmented the soil reserves. The peaks in the concentrations of nitrates observed in the water from drain discharge did not depend on the spacing between drains and did not exceed the permitted values. In the irrigated crop, the exit of N-NO_3^- and N-NH_4^+ to the

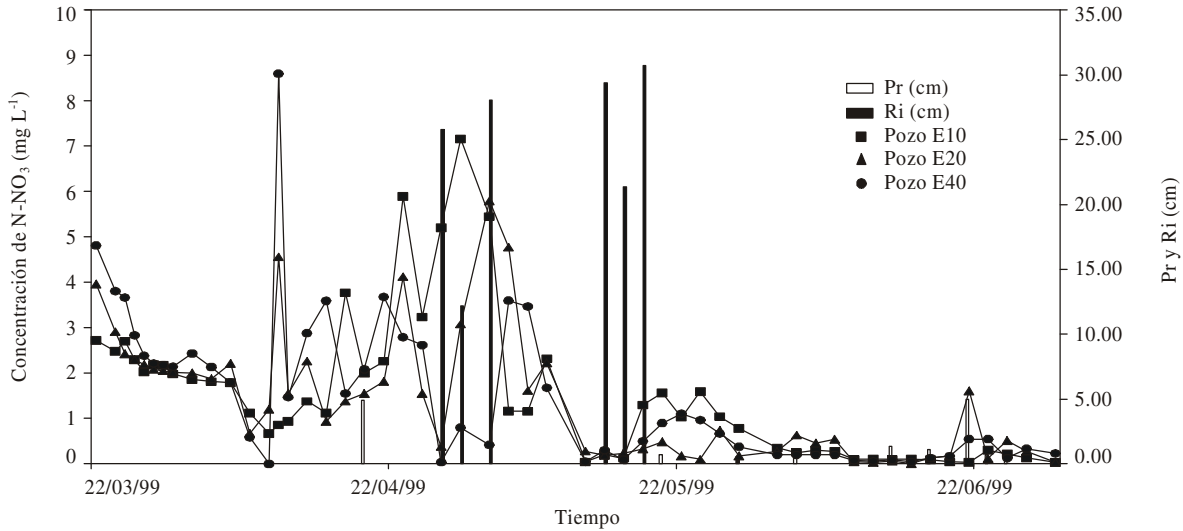


Figura 3. Comportamiento de la concentración de $N-NO_3^-$ en aguas del manto freático, en los espaciamientos de drenaje de 10, 20 y 40 m, en ciclo de cultivo con riego, del 22/03/99 al 01/07/99.

Figure 3. Behavior of $N-NO_3^-$ concentration in water in the aquifer, in the drain spacing distances of 10, 20, and 40 m, during the crop cycle with irrigation, 03/22/99 to 07/01/99.

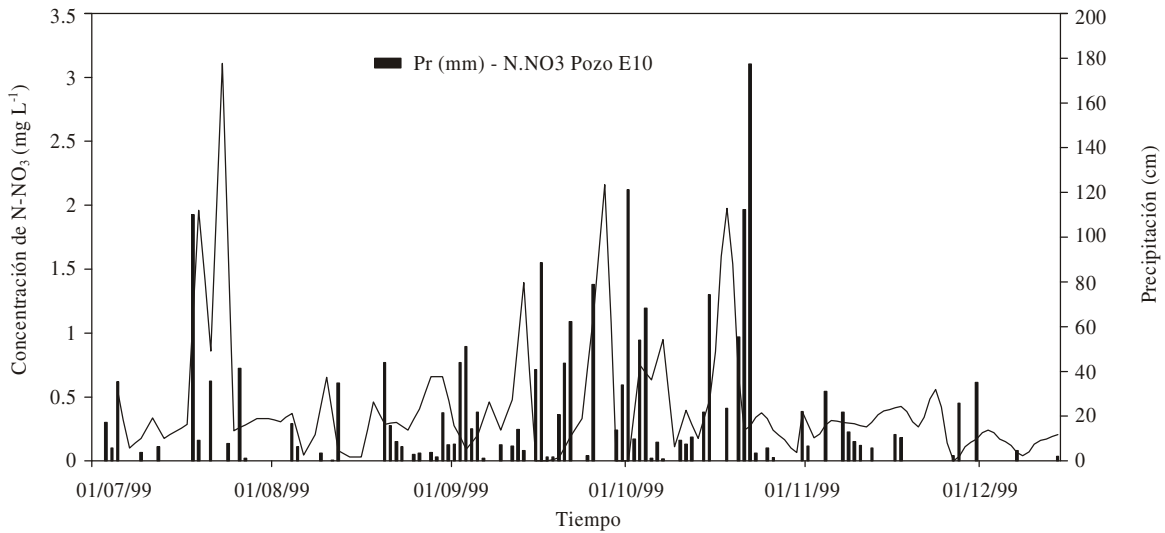


Figura 4. Comportamiento de las concentraciones de $N-NO_3^-$ en aguas del manto freático en el espaciamiento de drenaje 10 m en el ciclo de cultivo con temporal del 03/07/99 al 14/12/99.

Figure 4. Behavior of $N-NO_3^-$ concentration in water in the aquifer, in the drain spacing distance of 10 m, during the rainfed crop cycle, 07/03/99 to 12/14/99.

Al analizar la variación en la concentración de $N-NO_3^-$ en los dos ciclos, se observó que fue mayor en el agua del manto freático durante el ciclo con riego, debido al efecto de los tres riegos que incrementaron la concentración de $N-NO_3^-$ en agua por efecto de la lixiviación. En el caso del ciclo con temporal, también hubo efecto de lixiviación, pero debido a lo continuo de las lluvias y a la dominancia de una condición de reducción (lo que hizo que disminuyera la concentración de $N-NO_3^-$), existió un efecto de dilución que hizo que después de

semi-confined aquifer was greater, and with the rainfed crop, the exit to bodies of surface water was greater from the discharge from subsurface drainage. During the dry season, irrigation increased the concentration of nitrates in the water of the aquifer, and during the rainy season there was an effect of dilution due to the low concentrations of nitrates in the soil and to the intense rainfall.

Because of the conditions of temperature and moisture in the humid tropics, which causes an intense microbial activity in the soil, it is necessary that studies

eventos máximos de precipitación pluvial disminuyera la concentración en el manto freático.

CONCLUSIONES

El espaciamiento entre los drenes subterráneos influyó en la descarga del N-NO_3^- y N-NH_4^+ en la zona tropical húmeda de Tabasco durante los periodos seco (con riego) y húmedo (de temporal). Esta descarga fue mayor cuando el espaciamiento entre drenes fue menor. Sin embargo la pérdida de N-NO_3^- y N-NH_4^+ a través del drenaje con menor espaciamiento (10 m) fue 14.3 kg ha^{-1} , cantidad no significativa en comparación con la dosis del fertilizante nitrogenado aplicada (240 kg ha^{-1} en los dos ciclos de cultivo con sorgo). La cantidad absorbida por el cultivo fue 64.8 kg ha^{-1} y el resto (160.9 kg ha^{-1}) se perdió por otras vías o incrementó las reservas del suelo. Las concentraciones máximas instantáneas de nitratos observadas en las aguas de descarga de drenes no dependieron del espaciamiento entre ellos y no superaron los valores permisibles. En el cultivo con riego fue mayor la salida de N-NO_3^- y N-NH_4^+ hacia el acuífero semiconfinado, y con el cultivo con temporal fue mayor la salida hacia los cuerpos de agua superficiales por la descarga de drenaje subterráneo. En la época de sequía los riegos incrementaron la concentración de nitratos en las aguas del manto freático, y en la época de lluvias se presentó un efecto de dilución debido a bajas concentraciones de nitratos en el suelo y a las altas precipitaciones.

Debido a las condiciones de temperatura y humedad en la zona tropical húmeda, y por tanto a la alta actividad microbiológica en el suelo, es necesario que los estudios de balance de nitrógeno sean complementados por estudios microbiológicos, para acotar la incidencia de los microorganismos en el ciclo de nitrógeno. Es necesario medir de manera directa e independiente las componentes del balance de nitrógeno (mineralización, desnitrificación, inmovilización, volatilización y fijación física) para poder determinar más precisamente su magnitud.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que a través del proyecto 26099-A cofinanció este trabajo.

LITERATURA CITADA

Bengtson, L. R., C. E. Carter, J. L. Fouss, L. M. Southwick, and G. H. Willis. 1995. Agricultural drainage and water quality in Mississippi Delta. *J. Irrig. Drain. Engin.* 121(4): 292-295.

Bolton, E. F., J. W. Aylesworth, and F. R. Hore. 1970. Nutrient losses through tile drains under three cropping systems and two fertility levels on a Brookston clay soil. *Can. J. Soil Sci.* 50: 275-279.

on nitrogen balance be accompanied by microbiological studies, in order to determine the incidence of microorganisms in the nitrogen cycle. It is necessary to measure, directly and independently, the components of the nitrogen balance (mineralization, de-nitrification, immobilization, volatilization, and physical fixation) to be able to determine its magnitude more precisely.

—End of the English version—



- Bottcher, A. B., E. J. Monke, and L. F. Hugins. 1981. Nutrient and sediment loadings from a subsurface drainage system. *TRANSACTIONS of ASAE.* 24(5): 1221-1226.
- Evans, R. O., J. W. Gilliam, and R. W. Skaggs. 1989. Managing water table management systems for water quality. *In: Proc. Spec. Conf. Natl. Water Qual. Life Symp. Irrig. Drain. Div., ASCE.* Newark DE. 237 p.
- Etchevers, B. J. 1988. *Análisis Químico de Suelos y Plantas.* Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados Montecillo México. 803 p.
- Fausey, N. R., L. C. Brown, H. W. Belcher, and R. S. Kanwar. 1995. Drainage and water quality in the Great Lakes and Cornbelt states. *J. Irrig. and Drain. Engin.* 121(8): 283-288.
- Fletcher, D. A. 1991. Managing nitrogen for ground water quality and farm profitability, R. F. Follet, J. F. Power, J. J. Meisinger, J. S. Schepers, and S. J. Smith. (eds.). *Soil Science Society of America, Madison, Wis.* pp: 9-16.
- Follet, R. F. 1989. Nitrogen management and ground water protection. *Developments in Agricultural and Managed-Forest Ecology* 21. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York. Tokyo 1989. 395 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. (Para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana). 217 p.
- Jackson, M. L. 1964. *Análisis Químico de Suelos.* Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 662 p.
- Jebellie, S. J., and S. O. Prasher, 1995. Environmental benefits of water table management. Paper No. 95-2711, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph. Mich.
- Keeney, D. R., and R. F. Follet. 1991. Managing nitrogen for ground water quality and farm profitability overview and introduction. *In: Managing Nitrogen for Ground Water Quality and Farm Profitability.* Follet, R. F., D. R. Keeney, and R. M. Cruse (eds.). SSSA, Madison, WI. 357 p.
- Kladivko, E. J., G. E. Van Scoyoc, E. J. Monke, K. M. Oates, and W. Pask. 1991. Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. *J. Envir. Quality.* 20(1): 264-270.
- Legg, J. O., and J. J. Meisinger. 1982. Soil nitrogen budgets. *In: Nitrogen in Agricultural Soils.* Agronomy Monograph no. 2. Frank J. Stevenson (ed.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. pp: 503-565.
- Meisinger, J. J., and G. W. Randall. 1991. Estimation of nitrogen budgets for soil-crop systems. *In: Managing Nitrogen for Ground Water Quality and Farm Profitability.* Follet R. F., D. R. Keeney, and R. M. Cruse. (eds.). SSSA, Madison, WI. pp: 85-123.
- Mendoza, P. J. D., G. I., Nikolskii, O.L. Palacios V. 1998. Evaluación del funcionamiento hidráulico de un drenaje subterráneo en la Chontalpa, Tabasco. *Agrociencia* 32 (3): 217-223.
- Nájera, H. F., O. L. Palacios V., G. I. Nikolskii. 1998. Evaluación económica de un módulo de drenaje subsuperficial en siembras de caña de azúcar y chile jalapeño en el trópico húmedo. *Agrociencia* 32(3): 209-215.
- O' Riordan, T. and G. Bentham 1993. The politics of nitrate in the UK. *In: Nitrate Processes Patterns and Management.* Burt, T. P.,

- A. L. Heathwaite and S. T. Trudgill (eds.). John Wiley and Sons, Chichester. pp: 57-68.
- Ritter, W. F., R. P. Rudra, P. H. Milburn and S. Prasher. 1995. Drainage and water quality in Northern United States and Eastern Canada. *J. Irrig. Drain. Engin.* 121(4): 296-301.
- Robarge, W., P. A. Edwards, B. Johnson. 1983. Water and waster analysis for nitrate by nitrates of salicylic acid. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.* 14(12): 1207-1215.
- Skaggs, R. W., M. A Breve, J. W. Gilliam. 1995. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 24(1): 1-32.
- Thomas, D. L., A. Shirmohammadi, and R. Lowrance. 1987. Evaluation of subsurface and outflow water quality from a drainage-subirrigation system in the Georgia Flatwoods. Univ. Georgia, Agric. Eng. Dep. Publ. EC. pp: 3-86.
- Trujillo, N. A., J. D. Palma L. 1988. Estudio Agrológico Detallado del CEICADES-CP: Área del Trapecio Km 21. Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. 159 p.
- Young, J. L., and R. W. Aldag. 1982. Inorganic forms of nitrogen in soil. *In: Nitrogen in Agricultural Soils.* Stevenson F. J (ed.). Agronomy 22, Madison, WI. pp: 44-57.
- Zapata, F. 1990 Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas. *In: Empleo de Técnicas Nucleares en los Estudios de la Relación Suelo-Planta.* Hardarson, G. (ed.). Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena. pp: 79-171.