

Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas*

Groundwater flow and concentration of salts in agricultural soils

Pablo Miguel Coras Merino^{1§}, Ronald Ontiveros Capurata¹ y Lamine Diakite Diakite¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Carretera México Texcoco, km 38.5 s/n. C. P. 56230. Chapingo. Estado de México. Tel. 595-9521649.

[§]Autor para correspondencia: mpcoras@correo.chapingo.mx.

Resumen

En periodos de lluvias 223.8 ha en San Martín Nezahualcóyotl, Estado de México, presentan problemas de exceso de humedad y altas concentraciones de sales solubles en los estratos del suelo y aguas freáticas, que varían a lo largo del año con el movimiento descendente y ascendente del nivel freático que provoca bajos rendimientos de los cultivos. En éste trabajo se elaboraron planos de isobatas, para ubicar las áreas de exceso de humedad, isohypsas muestran las direcciones y movimiento de los flujos subterráneos e isosalinidad en los perfiles del suelo. Se determinó la oscilación del nivel freático mediante el análisis de 27 muestras de suelo y agua por año durante el periodo de 2006 a 2011. Se encontró que las lluvias de agosto (33 mm) y septiembre (100.5 mm) son las causantes del ascenso del nivel freático y excesos de agua en el suelo en 0.58 ha a 0.65 ha por milímetro de precipitación en 223.8 ha. A niveles freáticos mayores a 1.51 m de profundidad los suelos presentaron baja salinidad y sodicidad (72.36 ha). A niveles freáticos menores a 1.5 mm y aguas freáticas de mediana a alta en sales, se encontraron, suelos salinos y/o sódicos cubriendo 59 ha. (26%) de la superficie total.

Palabras clave: precipitación, salinidad, mantos freáticos.

Abstract

In rainy periods 223.8 ha in San Martín Nezahualcóyotl, Mexico State, have problems with excess moisture and high concentrations of soluble salts in the soil layers and groundwater, which vary throughout the year with fluctuations of the water table resulting in low crop yields. Isobaths planes were developed in this work, to locate areas of excessive moisture, isohypsas show the directions and movement of groundwater flows and isosalinity in soil profiles. Water table oscillation was determined by analyzing 27 samples of soil and water per year over the period 2006-2011. It was found that rains in August (33 mm) and September (100.5 mm) cause the rise of the water table and excess water in the soil at 0.58 ha to 0.65 ha per mm of rainfall in 223.8 ha. In water tables over 1.51 m deep, soils had low salinity and sodicity (72.36 ha). In water tables less than 1.5 mm deep and groundwater medium to high in salts, saline soils and / or sodic soils were found, covering 59 ha (26 %) of the total area.

Keywords: rainfall, salinity, water table.

* Recibido: agosto de 2013
Aceptado: enero de 2014

Introducción

Los estudios de fluctuación de los niveles freáticos subterráneos son de mucha importancia ya que el movimiento de los mantos freáticos es la principal causa de los problemas de salinidad y drenaje. En México se estima que existen aproximadamente 1.1 millones de hectáreas afectadas por salinidad y drenaje inapropiado a diferentes grados (SEMARNAT, 2008).

La región del ex-Lago de Texcoco, San Martín Nezahualcóyotl, Montecillos y San Luis Huexotla en el Estado de México se caracterizan principalmente por presentar problemas de salinidad en zonas donde anteriormente existían cultivos agrícolas, desde hace algunos años se han realizado diferentes estudios en esta zona con el fin de recuperar los suelos para la agricultura e incrementar la productividad, éstas investigaciones han sido encaminadas hacia varias temáticas principalmente a evaluar los cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Cruickshank, 1995), combinación de láminas de lavado y soluciones ácidas (Arana *et al.*, 2000) y el uso de vegetación tolerante a salinidad para recuperación de los suelos (Anaya, 2004).

Los estudios realizados en las zonas aledañas al área propuesta cubren parte del problema. La mayor parte de ellos están dirigidos a recuperar las áreas afectadas o a la búsqueda de especies altamente tolerantes. Sin embargo, es necesaria una clasificación de los suelos según el grado de salinidad, identificando el tipo de sales y sodio y su localización en un plano de isosalinidad para planear una recuperación integral y evitar que una vez recuperado el suelo, pudiera hacerse renuente el proceso de su ensaltramiento.

Las causas principales de la salinización de los suelos agrícolas en los distritos de riego son: filtración en la red de canales de tierra, manejo deficiente del riego, conservación deficiente de la red de drenaje, uso de aguas de mala calidad para riego y fluctuación de los mantos freáticos someros (Pizarro, 1985 y Grassi, 1981).

Según el USSL (1954) existen tres categorías de suelos afectados por el alto contenido de sales, en el Cuadro 1 se presentan los límites químicos generalmente aceptables para la clasificación de este tipo de suelos, en función de la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH.

Introduction

Studies on water table fluctuation are very important as the groundwater flow is the main cause of salinity and drainage problems. In Mexico it is estimated that there are approximately 1.1 million hectares affected by salinity and improper drainage to different degrees (SEMARNAT, 2008).

The region of the former Lake Texcoco, San Martín Nezahualcóyotl, Montecillos and San Luis Huexotla in the State of Mexico is mainly characterized by salinity problems in areas where previously there were agricultural crops, in recent years there have been various studies in this area in order to recover the land for agriculture and increase productivity, these investigations have focused on various subjects mainly assessing changes in the physical and chemical properties of soils (Cruickshank, 1995), combination of irrigation layers and acidic solutions (Arana *et al.*, 2000) and the use of salt tolerant vegetation for soil recovery (Anaya, 2004).

Studies in areas adjacent to the proposed area cover part of the problem. Most of them are aimed at recovering the affected areas or seeking highly tolerant species. However, classification of soils is necessary depending on the degree of salinity, identifying the type of salts and sodium and its location in a plane of isosalinity to plan a full recovery and prevent the recalcitrant salinization of recovered soils.

The main causes of salinization of agricultural soils in the irrigation districts are: filtration in the network of land channels, poor irrigation management, poor maintenance of the drainage network, use of poor quality water for irrigation and fluctuating shallow water tables (Pizarro, 1985 and Grassi, 1981).

According to USSL (1954) there are three categories of soils affected by high salt content, Table 1 shows generally acceptable chemical limits for the classification of these soils, in terms of electrical conductivity (EC), the exchangeable sodium percentage (ESP) and pH.

Cuadro 1. Tipos de suelos por contenido de sales.
Table 1. Soil types by salt content.

Suelo	CE (dS/m)	(%) de sodio intercambiable (PSI)	pH
Salino	>4	<15	<8.5
Salino-sódico	>4	>15	8.5
Sódico	<4	>15	8.5 a 10

En los suelos alcalinos los cationes más abundantes son el calcio, magnesio, potasio y sodio mientras que en los suelos ácidos lo son el aluminio y el hierro; normalmente en suelos con buena fertilidad, Bohn *et al.* (2001) indican que el orden de la concentración debe de ser de $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^{+1} > \text{Na}^{+1}$, si este orden se altera se pueden presentar problemas para la producción agrícola.

Los aniones más abundantes en la solución suelo son el Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} y NO_3^- ; la distribución depende del tipo de suelos o de otros factores como el pH, por ejemplo en condiciones normales la cantidad de aniones sigue la siguiente reacción $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^{-2}$; sin embargo, si el valor de pH es > 8.5 entonces la distribución sería $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{-2}) > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^{-3}$ (Bohn *et al.*, 2001).

Cuando la concentración de sales solubles en el suelo es alta, ocurren modificaciones en las propiedades físicas de los suelos, estas dependen del tipo de suelo y de sales que se encuentran en solución, por citar un ejemplo, sales como los carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio ocasionan agregación y formación de agregados con las partículas finas del suelo (Rhoades, 1990), este proceso se conoce como floculación y permite el mejoramiento de algunas características del suelo para que sean favorables para las plantas, entre estas, mejorar la aireación del suelo y con ello la penetración y crecimiento de raíces; sin embargo, pese a lo positivo de este proceso, esto no implica necesariamente que la adición de sales de cierto tipo sean benéficas para mejorar las características de cualquier suelo, cabe recordar que niveles de salinidad altos pueden ocasionar también toxicidad a las plantas (Horneck *et al.*, 2007).

Si las sales disueltas en el agua contienen altas concentraciones de sodio el proceso puede ser aún más perjudicial que las no sódicas, según lo señalado por Rhoades (1990) los efectos más comunes incluyen la dispersión de partículas y formación de placas impermeables. La dispersión de las partículas ocurre cuando los puentes que unen a las arcillas son reemplazados por iones de sodio que son de mayor tamaño, con esta separación las partículas de arcilla se expanden y se hinchan generando como resultado una desagregación; cuando este proceso ocurre de manera repetitiva alternado con periodos secos y húmedos, el suelo finalmente se convierte en un conglomerado sin estructura que se asemeja a un bloque de cemento con baja infiltración, baja conductividad hidráulica y formación de costras superficiales, en estas condiciones la productividad del suelo se ve seriamente reducida (Ayers and Westcott, 1985; Warrence *et al.*, 2002).

In alkaline soils the most abundant cations are calcium, magnesium, potassium and sodium, while in acidic soils are aluminum and iron, usually in soils with good fertility, Bohn *et al.* (2001) indicate that the order of concentration must be $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^{+1} > \text{Na}^{+1}$, if this order becomes disrupted it may cause problems for agricultural production.

The most abundant anions in the soil solution are Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} and NO_3^- , the distribution depends on the type of soil or other factors such as pH, for example in normal conditions the quantity of anions follows this reaction $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^{-2}$, however, if the pH is > 8.5 the distribution would be $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{-2}) > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^{-3}$ (Bohn *et al.*, 2001).

High soluble salts concentration in the soil lead to changes in the physical properties of soils, these depend on the type of soil and salts in solution, to give an example, salts such as carbonates and sulfates of calcium and magnesium cause aggregation and formation of aggregates of fine particles of soil (Rhoades, 1990), this process is known as flocculation and allows the improvement of some soil characteristics that are favorable for plants, among these, improved soil aeration and thus the penetration and root growth, but despite the positive in this process, this does not necessarily imply that the addition of certain salts are beneficial to improve the characteristics of any soil, since salinity can also lead to higher toxicity for plants (Hornbeck *et al.*, 2007).

If the salts dissolved in water contain high concentrations of sodium the process can be even more damaging than non-sodic salts, as reported by Rhoades (1990), the most common effects include particle dispersion and formation of impermeable plates. Particle dispersion occurs when the bonds linking clays are replaced by sodium ions that are larger in size, with this separation clay particles expand and swell generating disaggregation, when this process is repetitive alternating with dry and wet periods, the soil eventually becomes a conglomerate without structure resembling a cement block with low infiltration, low hydraulic conductivity and formation of surface crusts, in these conditions soil productivity is severely reduced (Ayers and Westcott, 1985; Warrence *et al.*, 2002).

In saline soils where the large amount of dissolved salts in the root zone restricts the growth of plants, there are two dominating types of cations, saline soils containing sodium mainly as sodium chloride and sodium sulfate and saline soils with calcium and magnesium mostly in the form of calcium and magnesium sulfates and calcium and

En suelos salinos donde la cantidad elevada de sales disueltas en la zona radicular restringe el desarrollo de las plantas, existen dos tipos dominantes de cationes, los suelos salinos que contienen sodio principalmente en forma de cloruro de sodio y sulfato de sodio y suelos salinos con calcio y magnesio principalmente en forma de sulfatos de calcio y magnesio y cloruros de calcio y magnesio. Por otro lado en suelos sódicos la predominancia del sodio y el pH elevado puede dar lugar a la precipitación del calcio y magnesio como carbonatos y la pérdida de estructura, así mismo los suelos salino sódicos presenta altas cantidades de sales solubles (CE mayor a 4 ds/m) pero el pH no sobrepasa el valor de 8.5 por lo tanto las partículas están floculadas aunque el crecimiento de las plantas se ve seriamente reducido, en estos suelos no es recomendable el lavado de sales ya que el calcio podría ser removido y ser remplazado por el sodio dando características de suelo sódico (Pizarro, 1985).

En los problemas de drenaje subterráneo se debe tener en cuenta la profundidad mínima a la cual se debe ubicar el nivel freático para que no cause disminución en la producción de los cultivos y se genere una salinización del suelo, por lo que los esquemas de riego para el suministro de agua a los cultivos y control de la salinidad del suelo deben ser adecuados para un descenso de los niveles freáticos someros a fin de incrementar la producción. Una vez que se logra el descenso de los niveles a umbrales adecuados, la operación del drenaje necesita ser optimizada de acuerdo con la dinámica de las variaciones espacio-temporales (Hornbuckle *et al.*, 2007; Rana *et al.*, 2008; Ritzema *et al.*, 2008).

En los estudios de freatimetría es necesario instalar una red de pozos de observación para obtener una representación de fluctuación media del nivel freático en su área de influencia, De Ridder (1978) indica que la presentación de las lecturas del nivel freático con respecto al tiempo se denominan hidrogramas de pozos de observación, los cuales son importantes para evaluar las condiciones del agua subsuperficial y proporciona información referida a: a) la velocidad de ascenso y descenso del nivel del agua; b) la profundidad de la capa de agua por debajo de la superficie del terreno, lo cual revela períodos del año crítico; c) en combinación con los componentes del balance del agua (precipitación, riego, bombeo de pozos, evaporación, etc.), ayuda a comprender la causa de las variaciones de la capa de agua; d) hidrogramas que cubren varios años, indican la tendencia del comportamiento del agua subsuperficial. La distribución de una red de observación debe estar planificada en base, en una adecuada información topográfica, geológica, hidrológica y de suelos.

magnesium chlorides. On the other hand, in sodic soils the predominance of sodium and high pH can lead to calcium and magnesium precipitation as carbonates and loss of structure, likewise saline sodic soils show high amounts of soluble salts (EC above 4 ds/m) but the pH does not exceed 8.5, thus the particles are flocculated, although plant growth is greatly reduced, salt leaching is not recommended in these soils since calcium may be removed and replaced by sodium resulting in sodic soil characteristics (Pizarro, 1985).

In underground drainage problems, it must be taken into account the minimum depth at which the water table must be located to prevent a decrease in crop production and the generation of soil salinization, so the irrigation schemes for water supply to crops and control of soil salinity should be suitable for a decline of shallow water tables in order to increase production. Once the levels are lowered to appropriate thresholds, the drainage operation needs to be optimized according to the dynamics of the space-time variations (Hornbuckle *et al.*, 2007; Rana *et al.*, 2008; Ritzema *et al.*, 2008).

Groundwater studies require the installation of a monitoring wells network, to obtain a representation of average water table fluctuation in its area of influence, De Ridder (1978) indicates that the representation of water table readings over time are called monitoring wells hydrographs, which are important for assessing subsurface water conditions and provide information concerning: a) the rate of rise and fall of the water level; b) the depth of the water table below the ground surface, which reveals critical periods of year; c) in combination with the water balance components (precipitation, irrigation, pumping wells, evaporation, etc.) helps to understand the cause of variations in the water layer; and d) hydrographs over several years, indicate the trend of subsurface water behaviour. The distribution of a monitoring network should be planned based on a suitable topographical, geological, hydrological and soil information.

In this respect De Ridder (1978) indicates that the wells should be located considering the following aspects: a) along and perpendicular to the flow lines of subsurface water; b) at sites where changes in the water layer slope can be expected; c) in areas where significant changes in the elevation of the water layer are likely to occur; d) on river banks and along their perpendicular lines, to determine the curvature of the water charge near these waterways; and e) in areas where surface water charges can be expected in the future (*e.g.* in areas with a relatively high intensity of irrigation, or in areas of filtration).

Al respecto De Ridder (1978) indica que los pozos deben ubicarse de considerando los siguientes aspectos: a) a lo largo y perpendicularmente a las líneas del flujo del agua subsuperficial; b) en los emplazamientos donde puedan esperarse cambios en la pendiente de la capa de agua; c) en zonas donde es probable que sucedan cambios significativos en la elevación de la capa de agua; d) en las márgenes de los ríos y a lo largo de líneas perpendiculares a ellos, para determinar la curvatura de la carga freática cerca de estos cursos de agua; y e) en zonas donde existan cargas freáticas superficiales o puedan esperarse en el futuro (por ejemplo en zonas con una intensidad de riego relativamente alta, o en zonas de filtración).

Según De Ridder (1978) y Dieleman y Trafford (1978), una vez establecida una red de pozos de observación, las medidas de nivel freático deben realizar durante algunos años, incluyendo secos y húmedos. La comparación de los hidrogramas de los pozos de observación permite distinguir diferentes grupos que muestran una respuesta similar al modelo de recarga y descarga de la zona.

Es así que un pozo ubicado en un área de recarga muy localizada, no representa la situación promedio de una fracción de campo y sus datos no deben usarse, salvo para investigaciones especiales. Para obtener una mejor representación del gradiente hidráulico, sobre una línea normal al canal, se instalan pozos con espaciamiento decreciente a medida que nos aproximamos al mismo.

La zona de recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Balek, 1988). Es importante prestar atención en la estimación de las zonas de descarga y recarga de los acuíferos, ya que es necesario determinar la cantidad de agua que llega a ellos, su calidad y procedencia (Isaar y Passchier, 1990).

Según De Ridder (1978) el espaciamiento de los puntos de observación puede aumentarse cuando se apartan de las líneas de carga o descarga, de esta manera las distancias de los pozos a partir del canal, podrían ser: 500 m, 250 m, 100 m, 50 m, 0 m. Para la elaboración de los planos de isohypsas e isobatas es necesario contar con la fluctuación del nivel freático en el período de lluvias del área de estudio, (Grassi, 1981; Pizarro, 1985; Coras, 1999). De ésta manera el presente estudio

According to De Ridder (1978) and Dieleman and Trafford (1978), once a network of monitoring wells is established, water table measurements should be performed over a few years, including dry and wet ones. Comparison of hydrographs of monitoring wells allows to distinguish different groups showing a similar response to the recharge and discharge pattern of the zone.

Thus, a well located in a much localized recharge area, does not represent the average position of a parcel of land and its data should not be used except for special investigations. For a better representation of the hydraulic gradient on a line normal to the channel, decreasing spacing wells are installed as we approach the channel.

The recharge zone can be defined as the entry of water into the saturated zone where it begins to become part of the underground reserves, this entry can occur in two ways, by a downward movement of water due to the gravity forces, and after a horizontal movement of the flow due to different hydraulic conditions of the layers that constitute the soil profile (Balek, 1988). Attention must be paid to the estimation of discharge and recharge areas of aquifers, as it is necessary to determine the amount of water that reaches them, their quality and origin (Isaar and Passchier, 1990).

According to De Ridder (1978) spacing of monitoring points can be increased when they depart from the charge or discharge lines, thus the distances of wells from the canal, could be: 500 m, 250 m, 100 m, 50 m, 0 m. For the preparation of isohypse and isobaths planes, water table fluctuation is required for the rainy season in the study area (Grassi, 1981; Pizarro, 1985; Coras, 1999). In this way, the present study aims to determine the equipotential lines and directional movement of groundwater flows to locate the areas of recharge and discharge of groundwater from records of water table depths in space and time and develop planes of isosalinity and agronomic chemical quality of groundwater to quantify by layers the surfaces affected by salts and sodium.

Materials and methods

The common land of San Martín Nezahualcóyotl in the municipality of Texcoco, State of Mexico, located in the Valley of Mexico, occupies the Southern part of the

pretende determinar las líneas equipotenciales y direccionales de movimiento de los flujos subterráneos para localizar las áreas de recarga y descarga de los mantos acuíferos a partir del registro de las profundidades del nivel freático en tiempo y espacio y elaborar planos de isosalinidad y calidad química agronómica de los mantos freáticos para cuantificar por estratos las superficies afectadas por sales y sodio.

Materiales y métodos

El ejido de San Martín Nezahualcóyotl pertenece al municipio de Texcoco, Estado de México; se encuentra dentro del Valle de México y ocupa la parte Sur de la Mesa Central de la República Mexicana en una planicie cuya altitud es de 2 265 msnm; queda comprendida dentro de las coordenadas geográficas: 19° 28' y 19° 30' latitud norte y 98° 53' y 98° 55' longitud oeste. La temperatura media anual es de 15.3 °C mientras que la precipitación media anual alcanza 644.8 mm y la evaporación media 1 743 mm (IMTA, 2009).

Unared de puntos de observación espaciados aproximadamente a 500 m ubicados en los perímetros de las parcelas en total 27 pozos para observar el nivel freático, suministra datos sobre la elevación y variación de la capa freática, los cuales fueron utilizados para determinar la configuración de la capa freática, la dirección del movimiento del agua subsuperficial y el emplazamiento de las zonas de recarga y descarga

Las medidas del nivel de agua se tomaron con un sonador mecánico, consistente en una pequeña pieza de tubo de acero o cobre que se cierra en su extremo superior y se conecta a una cinta de acero calibrada o una cadena. Cuando se baja el sonador produce un sonido característico al chocar con el agua. La profundidad del nivel del agua puede leerse directamente de la cinta de acero o medirse después a lo largo de la cadena (De Ridder, 1978).

La frecuencia del nivel estático de la profundidad del agua fue de una vez por mes para obtener las isobatas (y de la superficie potenciométrica isohypsas) de la zona en estudio, una comparación de los hidrogramas mensuales en los diferentes años permitió distinguir diferentes grupos de pozos y piezómetros, cada pozo o piezómetro que pertenece a un cierto grupo, muestran una respuesta similar al modelo de recarga y descarga de la zona, por una respuesta similar se entiende que el nivel del agua en estos pozos y piezómetros

central plateau of Mexico whose altitude is 2 265 masl; falls within geographical coordinates: 19° 28' and 19° 30' North and 98° 53' and 98° 55' West. The average annual temperature is 15.3 °C while the average annual rainfall is 644.8 mm and the average evaporation 1 743 mm (IMTA, 2009).

A network of monitoring points spaced at approximately 500 m, located on the perimeters of the plots, in total 27 wells, to monitor the water table, provides data on elevation and variation in the water table, which were used to determine the configuration of the water table, the direction of subsurface water flow and the location of recharge and discharge areas.

Water levels were measured using a mechanical sounder, consisting of a small steel or copper tube closed at its upper end and connected to a calibrated steel tape or chain. When lowered, it produces a characteristic plopping sound upon hitting the water. The depth to the water level can be read directly from the steel tape or then measured along the chain (De Ridder, 1978).

The static level of the water depth was measured once a month to obtain the isobaths (and from the potentiometric surface the isohypsas) of the study area, a comparison of monthly hydrographs in different years allowed to distinguish different groups of wells and piezometers, each well or piezometer belonging to a certain group, showed a similar response to the recharge and discharge pattern of the area, a similar response is understood as the water level in these wells and piezometers begins to rise at the same time, reaches its maximum value at the same time, and after the onset of the recession, reaches its minimum value at the same time.

Likewise, the data processing was performed as proposed by De Ridder's methodology (1978) which comprises, data compilation in spatial models, plotting water levels over time (well hydrographs) and showing water level and water quality data on maps.

The readings for each monitoring point were introduced in a record of water level, for each observation the following information is recorded: date, depth of observed water level below the reference point (reading), calculated depth below the surface of the ground (only for water tables) and calculated water level rise.

empieza a elevarse al mismo tiempo, alcanza su máximo valor al mismo tiempo y después del inicio de la recesión, alcanza su valor mínimo al mismo tiempo.

Asimismo se realizó el procesamiento de los datos según la metodología propuesta por De Ridder (1978) el cual comprende, la compilación de los datos en modelos espaciales, representación de los niveles de agua con respecto al tiempo (hidrogramas de pozos) y presentación de los datos del nivel de agua y calidad del agua en forma de mapas.

Las lecturas de cada punto de observación se introdujeron en un modelo de registro del nivel de agua, para cada observación se registra la siguiente información: fecha, profundidad observada del nivel del agua por debajo del punto de referencia (lectura), profundidad calculada por debajo de la superficie del terreno (únicamente para nivel freáticos) y elevación calculada del nivel del agua.

Finalmente se construyó un hidrograma para cada pozo de observación en la que se representan las lecturas del nivel del agua con respecto al tiempo y permitieron el análisis de la velocidad de ascenso o descenso del nivel de agua, la profundidad de la capa de agua por debajo de la superficie del terreno que puede revelar períodos del año en los que se presentan capas de agua críticas y las tendencias a largo plazo en el comportamiento del agua subsuperficial; es decir, ascenso o descenso general de la capa de agua (recarga o agotamiento del acuífero).

Para la clasificación de los suelos se utilizaron como la salinidad efectiva y salinidad potencial propuesta por Doneen (1961), y la cantidad de sales solubles determinado a partir de la siguiente relación propuesta por el USSL (1954).

$$SS = CE * 640$$

Donde: CE es la conductividad eléctrica expresada en dS/m, asimismo el efecto probable de sodio sobre las características físicas del suelo fue determinado a partir de la relación de adsorción de sodio (RAS) (USSL, 1954), carbonato de sodio residual, cantidad de sodio posible (Eaton, 1950 y Wilcox, 1958) y toxicidad por boro y Cloruros. Se elaboraron los planos de Isobatas, Isohypsas e Isosalinidad, para las profundidades 0-30 cm, 30-60 cm, 90-120 cm y 120-150 cm y la clasificación freática de acuerdo a su contenido de sales y sodio.

Finally, a hydrograph was constructed for each monitoring well, plotting the water level readings over time, which allowed the analysis of the rate of water level rise or fall, the depth of the water table below the ground surface that may reveal periods of the year when water tables are critical and long-term trends in the behavior of subsurface water, *i.e.*, overall raising or lowering the water table (recharge or depletion of aquifer).

For soil classification, effective salinity and potential salinity were used as proposed by Doneen (1961), and the amount of soluble salts (TDS, total dissolved salts in mg/L) as determined from the following equation given by the USSL (1954).

$$TDS = EC * 640$$

Where: EC is the electrical conductivity expressed in dS / m, also the likely effect of sodium on the physical characteristics of the soil was determined from the sodium adsorption ratio (SAR) (USSL, 1954), residual sodium carbonate, soluble-sodium percentage "possible" (Eaton, 1950 and Wilcox, 1958) and boron and chlorides toxicity. Isobaths, isosalinity and isohypsas planes were constructed for the depths 0-30 cm, 30-60 cm, 90-120 cm and 120-150 cm and groundwater was classified according to salts and sodium contents.

To determine the areas affected by excess water in the critical month, surfaces over and under one meter deep were obtained from the isobaths planes and related to the recorded rainfall, finding affected hectares per mm of rainfall.

Results and discussion

Figures 1 and 2 correspond to the isobaths of August (2004) and September (2006), and Figure 3 shows the isobath of 2011 as an area - time graphic observing the weeks of September, considered critical among the eight planes analyzed. The isobaths planes allow seasonal delimitation of shallow water table areas.

In 2004, water tables less than 1 m deep were located in the Southwest and Northeast covering 19.25 ha and 1 to 1.5 m in the North, Center and South (111.32 ha) and greater than 1.5 m in the Northeast and Southeast (93.28 ha).

Para determinar las superficies afectadas por exceso de agua en el mes crítico, se obtuvo de los planos de isobatas las superficies menores y mayores a un metro de profundidad del nivel freático y se relaciono con las precipitaciones registradas, encontrándose hectáreas por milímetros de precipitación afectadas.

Resultados y discusiones

Las Figuras 1 y 2 corresponden a las isobatas de agosto (2004) y septiembre (2006), y la Figura 3 presenta la isobata de 2011 en su forma de grafica-área-tiempo observándose las semanas del mes de septiembre, considerados los críticos de ocho planos analizados. Los planos de isobatas permiten delimitar de manera estacional las áreas con mantos freáticos someros.

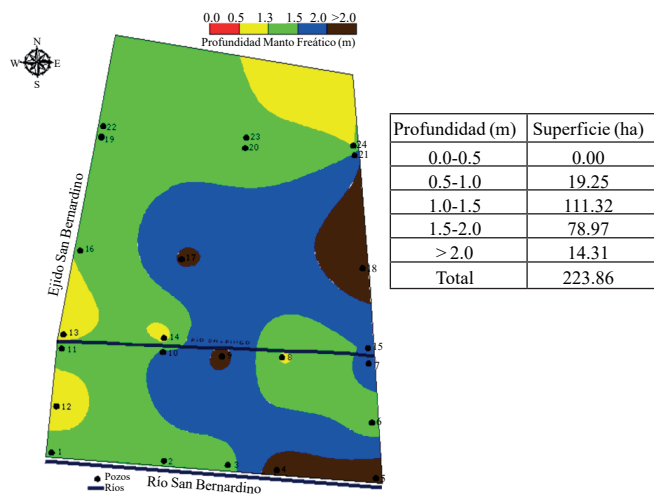


Figura 1. Planos de isobatas-agosto de 2004.
Figure 1. Isobaths planes-August 2004.

En 2004 las profundidades del nivel freático menores a 1 m, se localizaron en el suroeste y noreste cubriendo 19.25 ha y de 1 a 1.5 m en el norte, centro y sur (111.32 ha) y los mayores a 1.5 m en el noreste y sureste (93.28 ha).

En 2006 niveles freáticos menores a 1 m de profundidad correspondieron al área del pozo 1 (suroeste) con 2.84 ha y de 1-1.5 m pozos 11, 12 y 13 (Suroeste) y pozos 20, 23 y 24 (norte y noreste) y pozos 3 y 4 (Sur) 55.38 ha y de 1.5-2 m cubrieron gran parte del área en estudio (139.80 ha).

En 2011 las profundidades del nivel freático menores a 1m., se localizaron en el sureste, pozos 1, 2, 3, 12, 13, sureste pozos 6, 7 y 15 y noreste pozos 24 26 cubriendo 65.73 ha. De

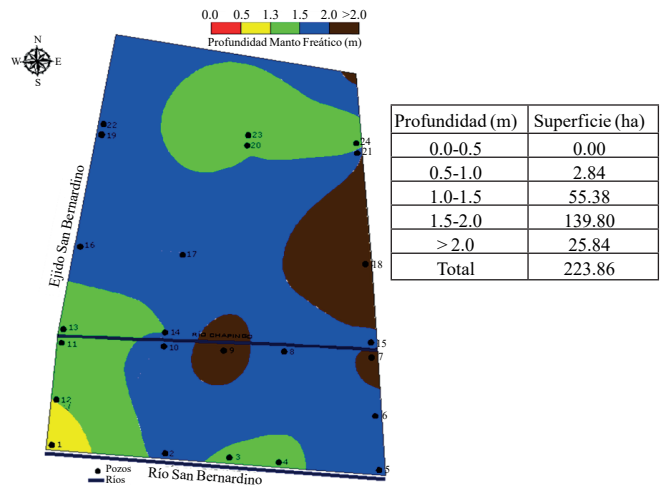


Figura 2. Plano de isobatas-septiembre de 2006.
Figure 2. Isobaths plane - September 2006.

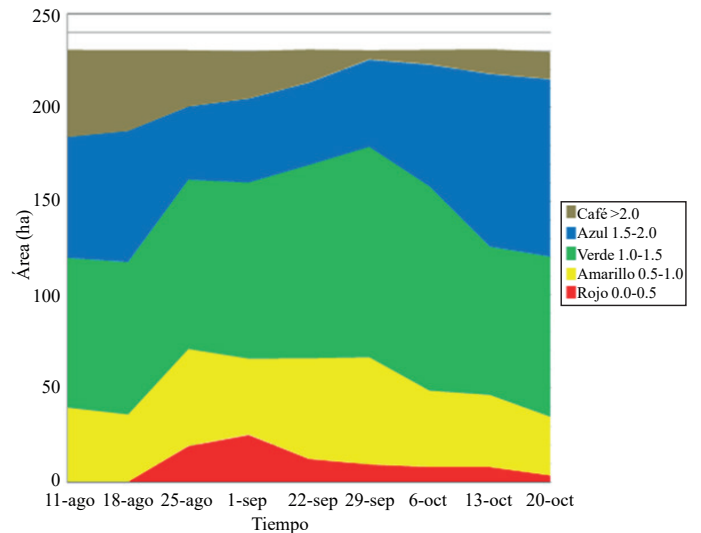


Figura 3. Isobatas gráfica área-tiempo 2011.
Figure 3. Isobaths area-time graphic 2011.

In 2006, water tables under 1 m deep corresponded to the area of well 1 (Southwest) with 2.84 ha and 1-1.5 m to wells 11, 12 and 13 (West), wells 20, 23 and 24 (North and Northeast) and wells 3 and 4 (South) with 55.38 ha and 1.5-2 m covered much of the study area (139.80 ha).

In 2011, water tables less than 1 m deep, were located Southeast, wells 1, 2, 3, 12, 13, Southeast wells 6, 7, 15 and Northeast wells 24 and 26 covering 65.73 ha. From 1-1.5 m deep wells 4, 5, 9, 14, 17, 16, 20, 21, 23 and 27 represent 104.81 ha, and larger than 2 m in the Northwest wells 18, 19, 22, 25 with an area of 62.47 ha.

For the period 2004-2006 the areas with water tables under 1 m deep decreased by 16.9 ha, from 1-1.5 m decreased by 55.94 ha and those over 2 m increased by 72.36 ha.

1-1.5 m de profundidad pozos 4, 5, 9, 14, 17, 16, 20, 21, 23 y 27 representan 104.81 ha, y mayores a 2 m en el noroeste pozos 18, 19, 22, 25 con una superficie de 62.47 ha.

Para el periodo de 2004 a 2006 las áreas con niveles freáticos menores a 1 m de profundidad disminuyeron en 16.9 ha, de 1-1.5 m en 55.94 ha y mayores a 2 m se incrementaron en 72.36 ha.

Para el periodo de 2006 a 2011 las áreas con niveles freáticos menores a 1 m de profundidad se incrementaron en 62.89 ha, de 1-1.5 m en 49.43 ha y mayor a 2 m disminuyeron en 13.33 ha. Estas diferencias encontradas en los tres años considerando los meses críticos analizados, se pueden atribuir principalmente a la precipitación y evaporación. En agosto de 2004 la precipitación fue de 33 mm, y la evaporación 34 mm, en septiembre de 2006, 9 mm de precipitación y 28 mm de evaporación y en septiembre 2011, 100.5 mm de precipitación y 93.1 mm de evaporación. Al comparar los datos climáticos con los niveles freáticos se observa que en periodos de precipitación predomina un ascenso del nivel freático e incremento de las superficies afectadas por exceso que representan entre 0.58 a 0.65 ha, por milímetro de precipitación, por otra parte la evaporación influye en el abatimiento del nivel freático aproximadamente en 0.55 a 0.70 ha, por milímetro de evaporación.

Según las Figuras 1, 2 y 4 el movimiento del flujo subterráneo, en la parcela de Guadalupe inicia en los pozos 11 y 12 (noroeste) y pozos 6 y 7 (noreste) considerándose estos como áreas de recarga (R), el agua fluye de estos puntos hacia los pozos 2 y 3 (sur) y pozos 4 y 5 (suroeste) denominados como área de descarga (D). El río Chapingo en el noreste y noroeste se comporta como un afluente (A) contribuyendo de agua el manto freático, por lo tanto se puede atribuir otros causantes de la presencia de niveles freáticos someros y el mismo río en el noreste se comporta como afluente que intercepta el flujo del agua proveniente de las parcelas favoreciendo en forma natural el abatimiento del nivel freático.

En el sureste y suroeste del río San Bernardino, por estar revestido no permite una descarga natural del agua subterránea ocasionando elevación del nivel freático. De acuerdo a los análisis químicos del agua freática (Figura 4) en las áreas de recarga (R) la calidad química del agua varía de altos valores de salinidad y bajo en sodio (C_3S_1) a media en sales y baja en sodio (C_2S_1); asimismo, en estas áreas los suelos fueron clasificados como salinos, con problemas de sales principalmente en los estratos 0-30, 30-60 cm y 60-

For the period 2006 to 2011 areas with water tables under 1 m deep increased by 62.89 ha, areas from 1-1.5 m decreased by 49.43 ha and those over 2 m decreased by 13.33 ha. These differences found in the three years considering the critical months analyzed, can be attributed mainly to precipitation and evaporation. In August 2004, the rainfall was 33 mm, and evaporation was 34 mm, in September 2006, 9 mm of rainfall and 28 mm of evaporation, and in September 2011, 100.5 mm of rainfall and 93.1 mm of evaporation. Comparing climate data with water tables shows that over precipitation periods, groundwater level rises and areas affected by excess also increase representing from 0.58 to 0.65 ha per mm of precipitation, conversely, evaporation influences the depletion of water table in about 0.55 to 0.70 ha, per millimeter of evaporation.

According to Figures 1, 2 and 4 the movement of groundwater flow in the Guadalupe plot starts in wells 11 and 12 (Northwest) and wells 6 and 7 (Northeast) considered such as recharge areas (R), water flows from these points toward wells 2 and 3 (South) and wells 4 and 5 (Southwest) referred to as discharge area (D). The Chapingo River in the Northeast and Northwest behaves as a tributary (A) providing water to the water table, thus other causes can be attributed to the presence of shallow groundwater levels and the river itself in Northeast behaves as tributary intercepting the water flow from the plots naturally favoring the fall of the water table.

Southeast and Southwest San Bernardino River are lined thus not allowing natural groundwater discharge, causing water table elevation. Chemical analysis of groundwater (Figure 4) in the recharge areas (R) show that water chemical quality varies from high salinity, low sodium (C_3S_1) to mid-salt, low sodium (C_2S_1), also in these areas soils were classified as saline, with salt problems mainly in layers 0-30, 30-60 cm and 60-90 cm. On the other hand, in the discharge areas (D) salt problems were found in the 0-30, 30-60 and 60-90 layers, according USSL (1954) these correspond to soils ranging from medium to strongly saline (EC from 5.80 to 6 $ds\ m^{-1}$ at 25 °C and pH 7.3 to 8) and strongly sodic (ESP of 24.80 to 35.26).

In plots 1 and 2 Cieneguilla and Sauce, recharge areas (R) and tributary (A) of the aquifer are located along the Chapingo river comprising wells 13, 14 and 15 (Southeast and Southwest) and wells 21, 22, 23 and 24 (Northeast) and discharge areas (D) wells 25 (North) 19, 22 and 16 (Northwest), groundwater flows from recharge to

90 cm. Por otro lado en las áreas de descarga (D) se encontró problemas de salinidad en los estratos 0-30, 30-60 y 60-90, según USSL (1954) estos corresponden a suelos que oscilan entre mediana a fuertemente salinos (CE de 5.80 a 6 dsm⁻¹ a 25 °C y pH 7.3 a 8) y fuertemente sódicos (PSI de 24.80 a 35.26).

En las parcelas 1 y 2 Cieneguilla y Sauce, las zonas de recargas (R) y afluyente (A) del acuífero se ubican a lo largo del río Chapingo conformado por los pozos 13, 14 y 15 (sureste y suroeste) y pozos 21, 22, 23 y 24 (Noreste) y las áreas de descarga (D) pozos 25 (norte) 19, 22 y 16 (noroeste), los movimientos de agua del manto freático se realizan de las áreas de recarga a las áreas de descarga. En las áreas de descarga pozo 17 y 16 se encontró en los estratos 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm, suelos clasificados como sódicos a extremadamente sódicos (PSI= 40.14) y aguas freáticas menores a un metro de profundidad clasificados en muy alta y excesivas en sales y sodio (C₄S₄). En el noroeste pozos 22 y 19 se encontró suelos sódicos y medianamente sódicos (PSI, 4.13%) y en el pozo 18 suelos salinos siendo su calidad química del agua del manto freático, medianamente salino y bajo en sodio (C₂S₁).

En el área de investigación a la profundidad de 0-90 cm, se estimó en 2004 suelos sin problemas de sales 148.71 ha (66%), suelos sódicos 60.08ha (26.8%) y salino sódicos 15.07 ha (6.73%), en 2006 suelos sin problemas de sales: 170.14 ha (76%) siendo mayor en 2 146 ha al 2004, suelos salinos 22.5 ha y sódicos 25.84 ha; menor en 34.34 ha; 2004 y salino sódicos 5.31ha, menor en 9.76 ha a 2004.

En 2011, suelos sin problemas de sales 104.95 ha (62.96%), menor en 29.19 ha, para 2006 suelos salinos 490.75 ha (22.3%), mayor en 270.17 ha a 2006; sódicos 24.87 ha menor en 0.97 ha a 2006 y salinos-sódico 8.29 ha, mayor en 2.98 ha comparada en 2006.

Considerando la calidad química de las aguas del manto freático, según el manual 60 del Laboratorio de Salinidad del USDA (USSL, 1954), se encontró que las áreas de descargas presentan aguas muy altas en sales y sodio (C₄S₄) encontrándose los niveles freáticos a menor de un metro de profundidad (Figuras 2, 4 y 5) y aguas medianas en sales y baja en sodio (C₂S₁) en áreas de recarga para alturas mayores de un metro de profundidad. De acuerdo con la solución descrita por Boulding (1994) y Arar *et al.* (1972) la relación entre la profundidad del nivel freático y la tasa de flujo ascendente diario y las texturas (arcillosa) predominante en los suelos de las áreas estudiadas, se estimó que cuando

discharge areas. In discharge areas, in wells 17 and 16, sodic soils, classified as extremely sodic (ESP= 40.14) and groundwater under a meter deep, ranked very high and excessive in salt and sodium (C₄S₄) were found in the 0-30, 30-60, 60-90 and 90-120 cm layers. In Northwest, wells 22 and 19, sodic and moderately sodic soils were found (ESP, 4.13%), and in well 18, saline soils were found, being the chemical quality of the aquifer water, moderately saline and low in sodium (C₂S₁).

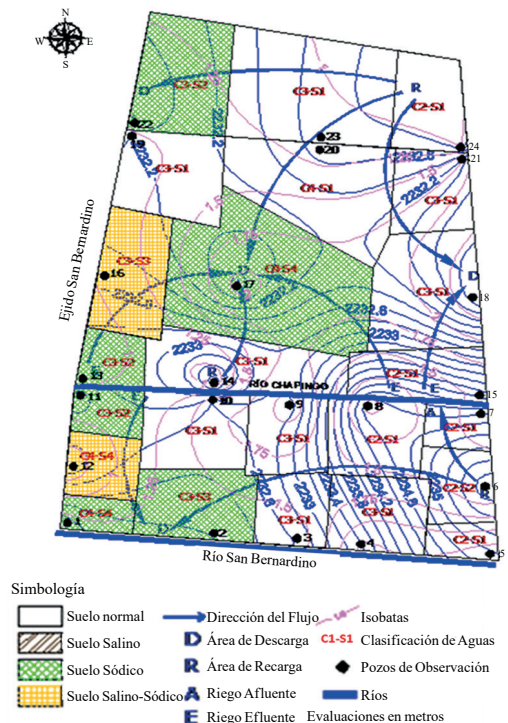


Figura 4. Integración de planos isobatas, isohypsas, isosalinidad y clasificación de aguas freáticas 2004.

Figure 4. Plane integration of isobaths, isohypsas, isosalinity and groundwater classification 2004.

In the research area at the depth of 0-90 cm, estimations in 2004 showed soils without salt problems covering 148.71 ha (66%), sodic soils 60.08 ha (26.8%) and saline sodic 15.07 ha (6.73%), in 2006 soils without salt problems: 170.14 ha (76%) exceeding those of 2004 by 2 146 ha, saline soils 22.5 ha and sodic 25.84 ha; less than in 2004 by 34.34 ha; and saline sodic 5.31 ha, 9.76 ha less compared to 2004.

In 2011, soils without salt problems 104.95 ha (62.96%), 29.19 ha less than 2006, saline soils 490.75 ha (22.3%), 270.17 ha more than 2006; sodic 24.87 less than 2006 by 0.97 ha, and saline - sodic 8.29 ha, increasing by 2.98 ha compared to 2006.

el nivel freático fluctúa entre 0.5 y 1 m puede alcanzar en promedio un ascenso capilar diario de alrededor de 4 mm día⁻¹ y de 2 a 3 mm día⁻¹ para profundidades de niveles freáticos los niveles mayores a 1 m.

Al relacionar las distribuciones de sales y sodio en los estratos del suelo, la profundidad del nivel freático y la calidad química del manto freático. En las áreas de recarga se encontró niveles bajos de salinidad y sodicidad en el perfil del suelo (0-90 cm) esto coincide con aguas freáticas de concentraciones mediana de sales y baja en sodio y profundidades del nivel freático mayores a un metro. En las áreas de descargas donde las profundidades del nivel freático fluctúan entre 0.5 a 1 m, las concentraciones de sales y sodio son mayores en el perfil de suelo (suelos sódicos, salino-sódico) y la calidad química de agua freático (muy alto y alto en sales y sodio). Se determinó que el causante del ascenso de nivel freático son las precipitaciones como ocurrió en 2006 (9 mm) y 2011 (100.5 mm) y del descenso de la evaporación (28 mm y 93.1 mm respectivamente) y transpiración. En épocas de lluvias las sales solubles se mueven de las áreas de recarga a la descarga como se aprecia en los planos de isohypsas.

Conclusiones

En los meses críticos agosto y septiembre, las lluvias provocaron el ascenso del nivel freático y exceso de agua en el suelo en 0.58 ha a 0.65 ha por milímetro de precipitación según la relación de los planos isobatas y las precipitaciones registradas, la evaporación favoreció el ascenso de sales a la superficie por capilaridad.

A niveles freáticos menores a 1.50 m de profundidad y aguas freáticas de mediana a alta, en sales (CE 0.25 -2.2 ds/m) y sodio (12 a 20 RAS), se localizaron suelos, salinos y sódicos (CE mayor a 4 ds/m; PSI mayor a 15 y pH 8.5) en 59.18 ha (26% de la superficie total).

Los planos de isohypsas muestran el movimiento del flujo subterráneo de las áreas de recarga a las de descarga, encontrándose suelos sin problemas de sales en las áreas de recarga y suelos salinos, salinos-sódicos y sódicos en áreas de descarga, en los terrenos ejidales de San Martín Nezahualcóyotl.

Considering the chemical quality of water in the water table, according to the manual 60 of USDA Salinity Laboratory (USSL, 1954), discharge areas contain water very high in salts and sodium (C₄S₄), finding water tables less than one meter deep (Figures 2, 4 and 5) and water medium in salt, low in sodium (C₂S₁) in recharge areas with heights greater than one meter deep. According to the solution described by Boulding (1994) and Arar *et al.* (1972), the relationship between the depth of the water table and the daily upward flow rate and textures (clay) prevalent in soils of the studied areas, it was estimated that water tables fluctuating between 0.5 and 1 m, can reach on average a daily capillary rise of about 4 mm day⁻¹ and 2-3 mm day⁻¹ for water tables deeper than 1 m.

By relating the distributions of salts and sodium in soil layers, depth of water table and the chemical quality of groundwater, in recharge areas, low salinity and sodicity levels in the soil profile (0-90 cm) were found this is consistent with groundwater medium in salts and low in sodium and water table depths greater than one meter. Discharge areas with water table depths from 0.5 to 1 m, show higher concentrations of salts and sodium in the soil profile (sodic soils, saline- sodic) and in the chemical quality of groundwater (very high and high in salts and sodium). It was determined that the causes of water table rise are precipitation as in 2006 (9 mm) and 2011 (100.5 mm) and the decrease in evaporation (28 mm and 93.1 mm respectively) and transpiration. In the rainy season, soluble salts move from recharge to discharge areas as shown in the isohypsas planes.

Conclusions

In the critical months August and September, rains caused the rise of the water table and excess water in the soil at 0.58 ha to 0.65 ha per mm of precipitation according to the relationships of the isobaths planes and recorded precipitation evaporation favored the rise of salts to the surface by capillarity.

In water tables less than 1.50 m deep and groundwater medium to high in salts (EC 0.25 -2.2 ds/m) and sodium (12-20 SAR), saline and sodic soils were located (EC greater than 4 ds/m, ESP higher than 15 and pH 8.5) on 59.18 ha (26% of the total area).

Literatura citada

- Anaya, M. 2004. Reporte técnico. Proyecto: siembra aérea de *Kochia scoparia* en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas-Comisión Nacional de Agua. México D. F., México. 29 p.
- Arana, O.; Arteaga, R.; Reyes, A. y Sánchez, M. 2000. Uso de ácidos y aguas residuales en la recuperación de suelos del Ex-Lago de Texcoco. Memoria. Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola. X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, Chihuahua, México. 45 p.
- Arar, A.; Doorenbol, J. e Thomas, R. G. 1972. L'irrigation et el drainage dans leurs reports avec la salinite et la saturación des sols par L'eau. Irrigation et Drainage, FAO. Roma, Italia. 7:98-125 pp.
- Ayers, R. S and Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper. 29. FAO. Roma, Italia. 8-12 p.
- Balek, J. 1988. Groundwater recharge concepts. *In*: estimation of natural groundwater recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series. 3-9 p.
- Bohn, H.; McNeal, B. and O'Connor, G. 2001. Soil chemistry. John Wiley and Sons Hoboken. New Jersey, USA. 218 p.
- Boulding, J. 1994. Description and sampling of contaminated soils: a field guide. Lewis Publishers in an imprint. CRC Press. 2th. Boca Raton. Florida. USA. 3-12 p.
- Coras, M. P. 1999. Problemas de drenaje y salinidad: identificación y localización. II Curso Internacional de Drenaje Agrícola. Vol. 2. DepartamentodeIrrigación. Chapingo, Estado de México. 111-151 p.
- Cruickshank, G. G. 1995. Proyecto Lago de Texcoco, rescate hidroecológico. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México D. F.,
- De Ridder, N. A. 1978. Estudios del agua subsuperficial. *In*: principios y aplicaciones del drenaje. international institute for land reclamation and improvement. Wageningen, The Netherlands. 3:170-181.
- Dieleman, P. J y B. D. Trafford. 1978. Ensayos de drenaje. Estudios FAO. Riego y Drenaje 28. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 24-35 p.
- Doneen, L. D. 1961. The influence of crop and soil on percolating waters. *In*: proceedings-biennial conference on groundwater recharge. Schiff, L. (Ed.). Agric. Res. Serv. USA. 156-163 pp.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69(2):123-134.
- Grassi, C. J. 1981. Manual de drenaje agrícola. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 165 p.
- Horneck, D. S.; Ellsworth, J. W.; Hopkins, B. G.; Sullivan, D. M. and Stevens, R. G. 2007. Managing salt-affected soils for crop production. PNW 601-E. Oregon State University, University of Idaho, Washington State University. USA. 12-15 p.
- Isohypsas planes show groundwater flow from recharge to discharge areas, finding soils without salt problems in the recharge areas and saline, saline - sodic and sodic soils in discharge areas in the common lands of San Martín Nezahualcóyotl.

End of the English version



- Hornbuckle, J. W.; Christen, E. W. and Faulkner, R. D. 2007. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. Holanda. Agricultural Water Management. 89(3):208-216.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. ERIC III - extractor rápido de información climatológica V. II. Jiutepec, Morelos, México.
- Issar, A. and Passhler, R. 1990. Regional hydrogeological concepts. *In*: groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover, Ed. R. and van Acken, Gmb, H. 20-98 p.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española. 2^a. edición. Madrid, España. 542 p.
- Rana, T.; Khan, S. and Rahimi, M. 2008. Spatio-temporal optimization of agricultural drainage using groundwater models and genetic algorithms: an example from the Murray irrigation area, Australia. Alemania. Hydrog. J. 16(6):1145-1157.
- Ritzema, H.; Satyanarayana, T.; Raman, S. e Boonstra, J. 2008. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farmers' fields. Holanda. Agric. Water Manag. 95(3):79-189
- Rhoades, J. D. 1990. Overview: diagnosis of salinity problem and selection of central practices. *In*: Tanji, K. K. (Ed.). Agricultural salinity assessment and management. Manual 71. Am. Soc. Civil Eng. New York. 18- 41 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. Compendio de estadísticas ambientales. 2008. México D. F. In: <http://www.semarnat.gob.mx/Temas/estadística-ambientales>.
- United States Salinity Laboratory Staff (USSL) 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural Handbook No. 60. USDA. Washington, D. C.
- Wilcox, L. V. 1958. Determining the quality of irrigation water. Agriculture Information Bulletin No. 197. USDA. Washington, USA.
- Warrence N. J.; Bauder, J. W. and Pearson, K. E. 2002. Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties. (consultado julio, 2012).