

ALGUNOS USOS DE LA INDUCCION ELECTROMAGNETICA EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS SALINOS

Some Uses of Electromagnetic Induction for the Study of Saline Soils.

Jean-Olivier Job¹, Miguel Rivera González², José Luis González Barrios³

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo principal dar a conocer las posibilidades del uso de la técnica geofísica de inducción electromagnética (IEM) recientemente adaptada al estudio de la salinidad de los suelos. En esta publicación se explican los principios básicos de la técnica y sus usos principales tales como la evaluación global de la salinidad, su distribución espacial y temporal y su dinámica en el perfil del suelo (lixiviación o capilaridad). A través de una ecuación es posible calcular la salinidad promedio entre cero y dos metros de profundidad de los suelos de la Comarca Lagunera. En el campo experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario n°10 (ITA), se estudió la dinámica de las sales de un lote de suelos salinos-sódicos. Otro ejemplo fue el monitoreo de la distribución espacial de la salinidad en una huerta de nogal.

Palabras clave: Conductividad electromagnética, suelos salinos.

SUMMARY

This paper describes some uses of the electromagnetic induction (EMI) in assessing soil salinity. The basic principle and the main uses of this technique, as for example the distribution of salts inside the soil profile, and the lateral variation of soil salinity are described. An equation of calibration makes it possible to evaluate the integrated soil salinity between zero and 1,2 m. The spatial distribution of salts has been studied in the experimental station of the

¹ Instituto Francés de Investigación Científica por el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM).

² CENID-RASPA, INIFAP.

³ CENID-RASPA, INIFAP.

Aceptado: Julio de 1998.

Instituto Tecnológico Agropecuario (ITA n°10) on soils treated with acid amendment. Another example of salt distribution is given in an orchard of walnut.

Index words: Electromagnetic conductivity, saline soils.

INTRODUCCION

Clásicamente, la determinación de la salinidad de los suelos se hace analizando muestras tomadas en una red regular, o por familia de suelo. Este procedimiento tiene algunas desventajas, entre otros que la variabilidad de la distribución de las sales es demasiado grande, como lo demostraron Job *et al.* (1987). Además, cuando no se puede ver la salinidad en la superficie del suelo, una estrategia de muestreo visual no se puede desarrollar. Por estas razones, se justifica el desarrollo de medidas globales como la resistividad eléctrica con cuatro electrodos (Rhoades y Ingvalson, 1971) y más recientemente, la inducción electromagnética (IEM).

La IEM es una técnica geofísica adecuada a la arqueología por Tabbagh (1974), y al estudio de los suelos por De Jong *et al.* (1979) y Cameron *et al.* (1981). La primera utilización fue la cartografía de la salinidad de suelos por Baden y Baker (1982), del manto freático por Stewart (1982), seguida por la estimación de la variabilidad espacial de la salinidad en suelos bajo riego en combinación con la geoestadística por Boivin *et al.* en 1988. Al mismo tiempo se intentaba estimar la salinidad global del suelo a través de varias ecuaciones de calibración (Corwin y Rhoades, 1981; Díaz y Herrero, 1992). Un equipo para la medición de la salinidad entre cero y 100 cm de profundidad ha sido recientemente diseñado por Job *et al.* (1995). El equipo utilizado en nuestro estudio es el modelo EM-38 de dos bobinas paralelas distantes de un metro que opera a una frecuencia de 14.7 Khz (Figura 1).

Fonds Documentaire IRD



010022289

Fonds Documentaire IRD

Cote : B*22289 Ex:1

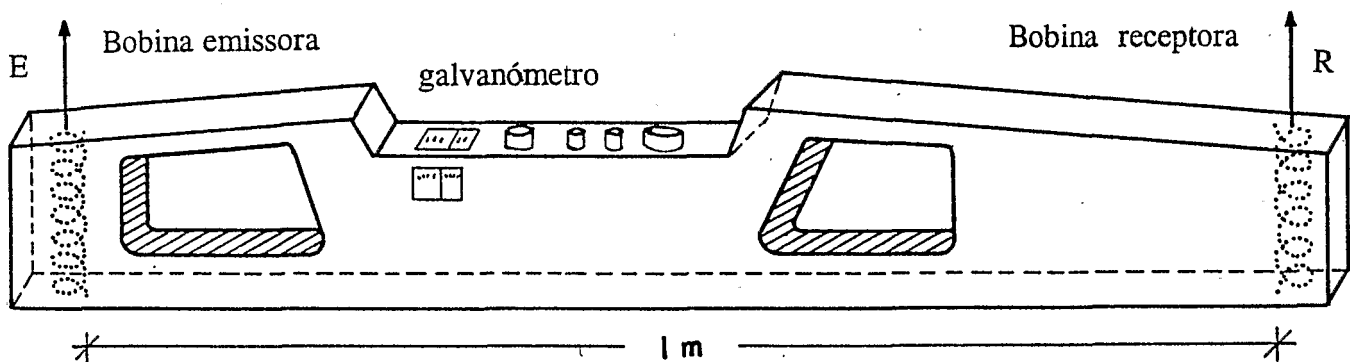


Figura 1. Equipo EM-38 (McNeill) utilizado para las mediciones en este trabajo.

La conductividad medida es una conductividad aparente global del suelo (C_{ea}). La medición hecha en un punto dado representa un valor integrada a un volumen de suelo de algunos metros cúbicos. En teoría, si la conductividad del suelo está uniformemente distribuida, cada estrato de suelo aporta una contribución diferente al campo secundario captado por el receptor (Figura 2).

En posición horizontal, 81 % de la medición proviene de los primeros 1.2 m de suelo (McNeill, 1980). En posición vertical hay que muestrear hasta 2.5 m para obtener un porcentaje semejante. Una buena calibración, que permite la comparación de los valores $C_{Ea(v,\theta)}$ y $C_{Ea(h,\theta)}$ consiste en muestrear el suelo hasta 2.0 m. En regiones áridas bajo régimen natural las sales se concentran en la superficie de los suelos, debido al efecto conjunto del ascenso capilar y de la evaporación. Bajo riego, al contrario, las sales son drenadas abajo del perfil. En estos dos extremos, todas las situaciones intermedias pueden existir. Para la medición de la salinidad del suelo en un punto del paisaje, hay que poner el equipo en el suelo y orientar los grandes ejes de los solenoides perpendiculares a la superficie del suelo, anotar la medición: $C_{Ea(v,\theta)}$, y luego paralelos a la superficie del suelo, anotar: $C_{Ea(h,\theta)}$. El índice θ significa que por una salinidad del suelo constante, las medidas $C_{Ea(v,\theta)}$ y/o $C_{Ea(h,\theta)}$ dependen del contenido en agua θ del suelo. La calibración consiste en encontrar las regresiones lineales siguientes:

$$C_{Es(v,z)} = a * C_{Ea(v,\theta)} + b * \theta \quad (1a)$$

y:

$$C_{Es(h,z')} = a' * C_{Ea(h,\theta)} + b' * \theta \quad (1b)$$

$C_{Es(v,z)}$ es la salinidad promedio del suelo hasta la profundidad z , estimada a partir de los valores de $C_{Ea(v,\theta)}$. De la misma manera, $C_{Es(h,z')}$ es la salinidad global promedio del suelo entre 0 y z' cm de profundidad estimada a partir de valores $C_{Ea(h,\theta)}$. Estas relaciones son deducidas de los valores de los extractos de saturación obtenidos hasta z y z' unidades de profundidad en un punto, cada 0.2 m por ejemplo, comparados con los de $C_{Ea(v,\theta)}$ y de $C_{Ea(h,\theta)}$ para al menos veinte puntos de medida. El efecto de la humedad θ del suelo puede escribirse:

$$C_{Ea(v,\theta_1)} = C_{Ea(v,\theta_2)} + c * (\theta_2 - \theta_1) \quad (2a)$$

y

$$C_{Ea(h,\theta_1)} = C_{Ea(h,\theta_2)} + c' * (\theta_2 - \theta_1) \quad (2b)$$

Estas ecuaciones implican que para una misma salinidad global, las medidas $C_{Ea(v,\theta_1)}$ y $C_{Ea(v,\theta_2)}$, por ejemplo, a dos estados de humedad θ_1 y θ_2 del suelo, son diferentes. Los valores de $c * (\theta_2 - \theta_1)$ y $c' * (\theta_2 - \theta_1)$ son pequeños comparados con $C_{Ea(v,\theta)}$ y $C_{Ea(h,\theta)}$. Entonces, la salinidad integrada del suelo entre 0 cm y z cm podría ser deducida de una medida de IEM en cualquier punto de una parcela de suelo con una estimación de θ para toda la parcela. Es evidente que para estudiar la distribución espacial de la salinidad es necesario intervenir en un momento en que la humedad del suelo es más o menos homogénea, por ejemplo tres o cuatro días después del último riego. En la literatura citada se encuentran valores de (a) comprendidos entre 0.05 y 0.09 (Cameron *et al.*, 1981; Wollenkaupt *et al.*, 1986; Díaz y Herrero, 1992) para la estimación del extracto de saturación. El coeficiente b representa la conductividad eléctrica

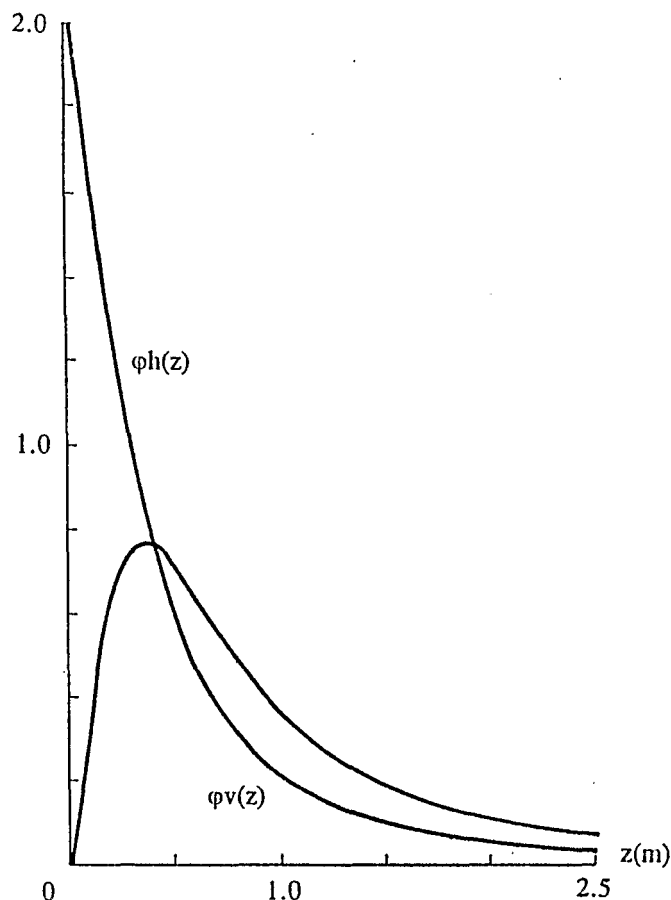


Figura 2. Contribución relativa de un estrato de suelo ubicado a una profundidad normalizada z (z =profundidad s^{-1}) al campo secundario con el eje de los solenoides vertical: $\phi_v(z)$, y horizontal: $\phi_h(z)$.

global aparente del material que constituye el suelo, su valor fluctúa entre 0.02 y 0.13 dSm^{-1} . El coeficiente c representa el efecto de la humedad, su valor fluctúa de 0.3 a 0.7, si $0.1 < \theta < 0.3$.

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar los coeficientes a , b y c para los suelos de la Comarca Lagunera (norte-centro de México). La meta final es proponer un procedimiento general para determinar la salinidad global y la localización de las sales dentro del perfil de cualquier parcela de suelos salinos en esta región.

MATERIALES Y METODOS

En un primer experimento, se realizó la calibración en suelos que pertenecen al grupo de aluviones salinos de los ríos Nazas y Aguanaval en la parte baja de sus

cauces, ubicada en la Comarca Lagunera. Los resultados se compararon con otras 90 muestras obtenidas de una base de datos realizada por uno de los autores en suelos de Senegal, Túnez y Siria (Cuadro 1) de similar textura que los suelos de la Comarca Lagunera, para tener una base de comparación y ver si los resultados de la Comarca podrían ser generalizados.

En un segundo experimento, la distribución espacial de la salinidad se estudió en dos situaciones agronómicas donde es un problema importante. La primera se encontró en una pequeña propiedad de nombre el Chupón (municipio de Nazareno, Coahuila, 103°40' O, 25°40' N), dentro de la Comarca Lagunera. Una superficie de 8 hectáreas de nogal pecanero (*Carya illinoensis* Koch) en producción, con una edad de plantación de 15 años. Se utilizaron 1.5 hectáreas dentro de la huerta (Figura 3) donde los árboles tienen un crecimiento irregular por lo cual la causa debe ser investigada. El criterio de los elementos de estudio fue el tamaño y rendimiento de los árboles, apoyado por un estudio realizado por Medina y González (Medina *et al.*, 1995), donde el tamaño del árbol es cuantificado 1 ó 2 en forma visual. El número 1 representa el árbol con un crecimiento deficiente y el número 2 representa un crecimiento y un rendimiento normal sin evidencia de falta de nutrimentos.

Si el crecimiento de las raíces de los árboles está impedido por la mala calidad física o química del suelo, los árboles crecen pequeños y producen menos frutos. De ahí la importancia de conocer la distribución espacial de la salinidad para establecer los árboles en suelos sanos.

El segundo estudio se hizo en el campo experimental del Instituto Tecnológico Agropecuario no. 10, (municipio de Torreón, Coahuila, 103°52' O, 25°55' N), con una superficie total de 100 hectáreas. La mayor parte de sus suelos son salino-sódicos y sódicos con un pH alcalino de 7.9 a 8.6. La salinidad de los suelos se ubica entre 2 y 25 dSm^{-1} , el porcentaje de sodio fluctúa en un rango de 5 a 73 y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) va de 21 a 43 me/100g. Cincuenta hectáreas fueron recuperadas aplicando ácido-sulfúrico y estiércol, y luego fueron usadas como parcelas experimentales. La distribución espacial de la salinidad fue estudiada en la parcela no. 17, parcialmente recuperada con ácido sulfúrico en 1994.

Cuadro 1. Características de los suelos usados en la calibración de la conductividad aparente global por suelos aluviales.

País	Río	Clima	CaCO ₃	Yeso	CE _{sat}	> 50 μ
			----- % -----		dSm ⁻¹	%
México	Nazas	tropical semi-árido (200 mm)	5-15	0-5	4-80	20-60
Siria	Eufrates	mediterráneo semi-árido (150 mm)	18-20	20-35	5-25	20-40
Senegal	Senegal	tropical semi-árido (400 mm)	10-15	0-5	2-30	15-30
Túnez	varios	mediterráneo árido (100-150 mm)	18-22	10-40	2-100	35-60

En todos los experimentos, la conductividad eléctrica de los estratos fue estandarizada a 25 °C. La temperatura del suelo entre 0.3 y 2.0 m fue siempre dentro del rango 19-22 °C. La temperatura de la

superficie, entre 0 y 0.3 m fluctuaba más, entre 15 y 25 °C.

RESULTADOS

Ecuaciones de Calibración

La calibración del equipo de medición se realizó a través de una regresión múltiple de dos variables, la conductividad aparente global: CE_{a(v,θ)} o CE_{a(h,θ)} y el contenido de humedad (con base en peso seco 105 °C) promedio del suelo entre 0 y 120 cm: θ₍₀₋₁₂₀₎ obtenidos en dieciséis perfiles de suelos en la Comarca Lagunera con los resultados siguientes:

$$CEs_{(120,θ)} = 10 * CEa_{(v,θ)} - 0.121 * θ_{(0-120)} - 2.3$$

con: $r = 0.90$ (3a)

y

$$CEs_{(120,θ)} = 10 * CEa_{(h,θ)} - 0.250 * θ_{(0-120)} + 2.4$$

con: $r = 0.90$ (3b)

Estas ecuaciones se pueden comparar con resultados obtenidos en Túnez y Senegal:

$$CEs_{(120,θ)} = 7.7 * CEa_{(v,θ)} - 0.150 * θ_{(0-120)}$$

con: $r = 0.93$ (4a)

y

$$CEs_{(120,θ)} = 6.6 * CEa_{(h,θ)} + 0.057 * θ_{(0-120)}$$

con: $r = 0.95$ (4b)

Estos últimos valores han sido obtenidos con $2 < CEs_{(120,θ)} < 30$, y $0.1 < θ < 0.3$, con un coeficiente de correlación $r = 0.95$ con 90 muestras de diferentes suelos de textura mediana de México, Túnez y Senegal (Figura 4 ; Cuadro 1).

Una calibración que represente bien la realidad física de la muestra es una que tiene un coeficiente de θ₍₀₋₁₂₀₎ negativo y una constante cerca de cero. En la Ecuación 4b el coeficiente positivo 0.0057 es un artefacto del cálculo de regresión.

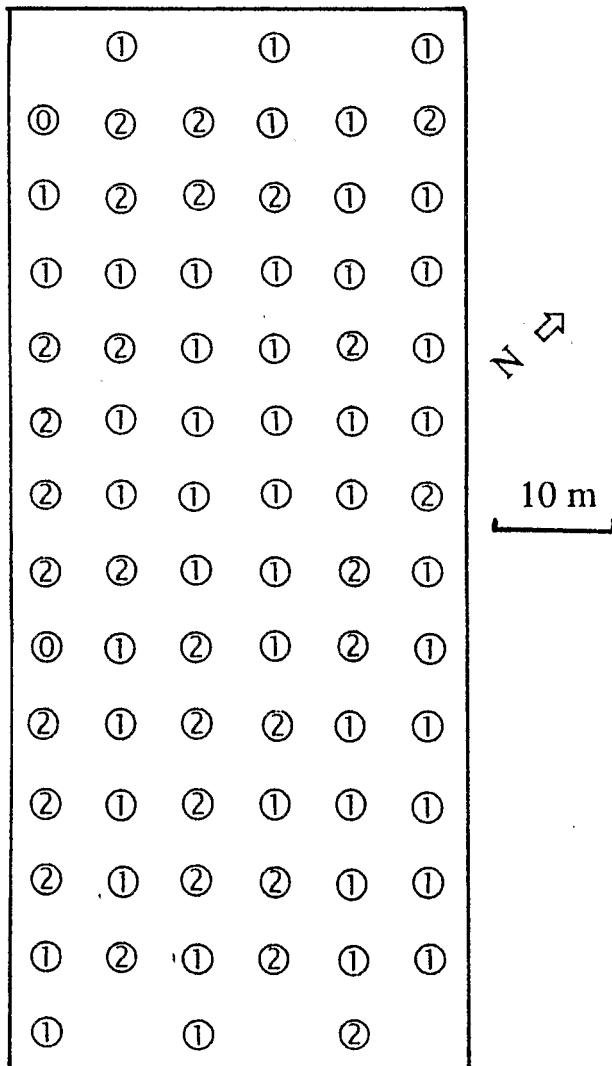


Figura 3. Huerto de nogales del Chupón (Coahuila): ubicación de los árboles de tamaño reducido (1) y normal (2). Los árboles replantados se anotan con (0).

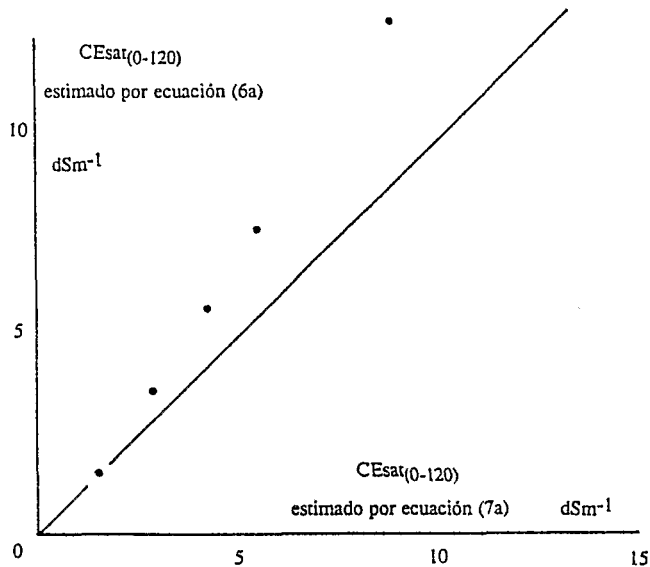


Figura 4. Estimación de la salinidad promedio de suelos de textura media mediante las Ecuaciones 3a y 4a.

Existe una desviación sistemática que justifica el uso de una ecuación de calibración especial para los suelos de la Comarca Lagunera. Esta desviación puede ser debida a la naturaleza de las arcillas, o a la naturaleza de las sales.

Ubicación de las Sales en el Perfil.

Con el mismo grupo de resultados, una regresión entre $CEa_{(v,\theta)}/CEa_{(h,\theta)}$ y $CEs_{(60-120)}/CEs_{(0-60)}$ se obtuvo la relación siguiente:

$$CEs_{(60-120)}/CEs_{(0-60)} = 0.87 * CEa_{(v,\theta)}/CEa_{(h,\theta)} \quad (5)$$

con : $r = 0.84$ y : $n = 18$

De esta ecuación, se deduce que para los suelos de la Comarca Lagunera, un valor de $CEa_{(v,\theta)}/CEa_{(h,\theta)} > 1.15$ significa que hay más sales entre 60 y 120 que entre 0-60, indicando una lixiviación parcial de las sales.

Localización de las Sales en una Parcela

En la huerta de nogal del Chupón (Figura 3), se efectuó un recorrido con el conductímetro electromagnético, tomando lecturas en modo vertical y horizontal. Un promedio de cinco lecturas tomadas en cada árbol en el área de su copa. Resultaron 56 valores

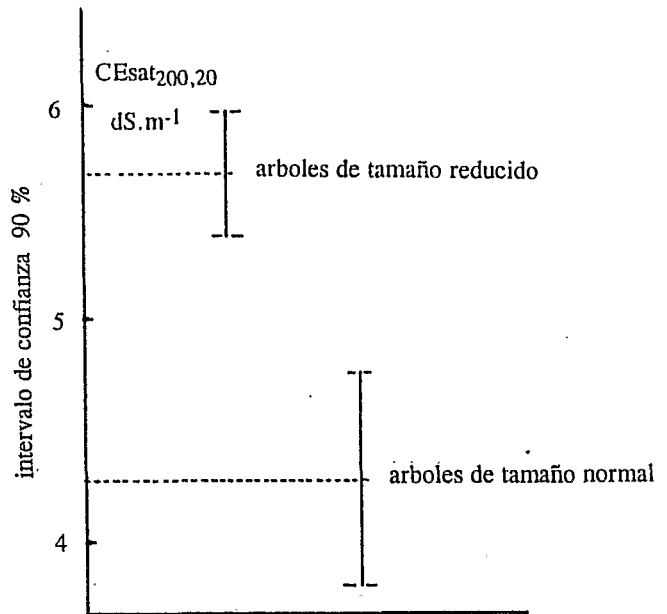


Figura 5. Intervalo de confianza a partir del promedio. (a): población de los árboles pequeños, (b): población de los árboles de crecimiento normal.

para los árboles de tamaño reducido y 20 para los árboles de tamaño normal.

Posteriormente, una análisis de varianza indicó que la salinidad es un factor de diferenciación del tamaño de los árboles (Figura 5) a un nivel de confianza de 90 %.

Para ver si las sales en el suelo proceden del riego o de condiciones adversas del suelo, un estudio de la ubicación de las sales en el perfil fue hecho. Medina *et al.* (1995) establecieron que la máxima densidad de raíces en la huerta se ubica entre 35 y 70 cm de profundidad; por lo anterior, esta capa de suelo es más sensible a la presencia de sales. Usando los valores de $CEa_{(v,\theta)}$ y de $CEa_{(h,\theta)}$ y la Ecuación 5 se calculó la distribución de las sales en la parte de mal crecimiento de los árboles ya estudiada. El mapa de los isovalores de $CEs_{(60-120)}/CEs_{(0-60)}$ fue obtenido con Geostat paquete de geoestadística hecho por Boivin (1990).

Distribución Espacial de las Sales

La distribución espacial de las sales en la parcela no. 17 del campo experimental del ITA se estudió utilizando la ecuación de calibración:

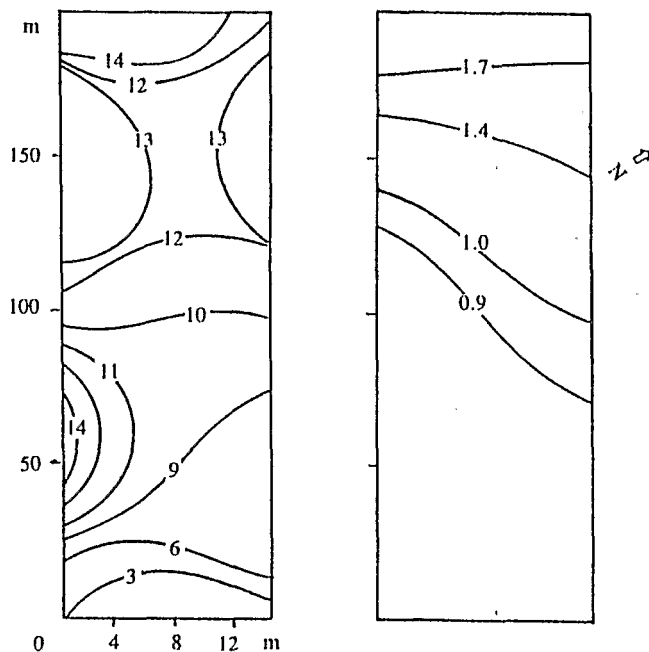


Figura 6. a) Valores de isosalinidad del suelo de la superficie hasta 200 cm de profundidad, en dSm^{-1} del extracto de saturación estimado por IEM. b) Valores de la salinidad de la capa de suelo ubicada entre 60 y 120 cm entre la salinidad de la capa 0 a 60 cm.

$$CEs(0-200) = 0.0097 * (CEa(v,\theta) + CEH(h,\theta)) / 2 - 1.90$$

con : $n=16$ $y : r = 0.917$ (6)

la cual fue obtenida con los mismos valores de las Ecuaciones 4a y 4b, pero representando una mejor evaluación de la cantidad de sales hasta 200 cm. En el mapa de $CEs(0-200)$, hecho con 76 valores, se ve una disminución constante de la salinidad en la parcela del sureste al noroeste (Figura 6a).

Además, la distribución de los valores de: $CEs(60-120)/CEs(0-60)$ dibujada en la Figura 6b en la parte de la parcela experimental con valores superiores a uno, indica una localización de los sales en la parte baja del perfil el cuál tiene mayor salinidad. En esta parte, el drenaje de las sales no ha sido suficiente.

CONCLUSIONES

1. Se muestra en los dos ejemplos algunos resultados de una campaña de muestreo de la salinidad de los suelos con inducción electromagnética. Dos tipos de ecuaciones fueron desarrollados. Las primeras para estimar la salinidad global del suelo entre 0 y 2 metros.

Otras que permiten estimar la ubicación de las sales dentro el perfil de suelo.

2. En la parcela del Chupón, una análisis de varianza de la salinidad del suelo alrededor de 76 árboles, permitió demostrar que la salinidad del suelo es un factor importante que limita el crecimiento de los árboles, aunque no es el único.

3. En la parcela experimental de 3000 m^2 del ITA, 89 muestras de salinidad han permitido demostrar que una parte de ella no ha sido drenada.

En estos dos últimos casos, el uso de la inducción electromagnética permite definir la distribución espacial de las sales del suelo y tomar las decisiones más convenientes para resolver esta situación con un drenaje apropiado de las aguas de riego.

LITERATURA CITADA

- Baden, G.W. y G.C. Baker. 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Austr. J. Soil Res.* 20: 107-118.
- Boivin, P. 1990. Geostat-PC, un logiciel interactif pour calcul statistique. Logorstom, 67 p., 1 diskette.
- Boivin, P., D. Brunet y J.O. Job. 1988. Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. *Cah. ORSTOM. sér. Pédol.* XXIV: 39-48.
- Boivin, P., M. Hachicha, J.O. Job y J.Y. Loyer. 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols. *Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du Sol* 25: 69-73.
- Cameron, D.R., E. De Jong, D.W.L. Read y M. Oosterveld. 1981. Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques. *Can. J. Soil Sci.* 61: 67-71.
- Corwin, D.L. y J.D. Rhoades. 1981. Determining soil electrical conductivity using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 45: 255-260.
- De Jong, E., A.K. Ballantyne, D.R. Cameron y D.W.L. Read. 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810-812.
- Diaz, L. y J. Herrero. 1992. Salinity estimates in irrigated soils using electromagnetic induction. *Soil Sci.* 154: 151-157.
- Job, J.O., J.Y. Loyer y M. Ailoul. 1987. Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM., sér. Pédol.* XXIII: 123-131.
- Job, J.O., A. Tabbagh y M. Hachicha. 1995. Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué. *Can. J. Soil Sci.* 75: 463-469.
- McNeill, J.D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. *Tecn. note TN-5, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.*
- Medina, C., G. Gonzales, R. Faz, M. Ramirez, A. Samaniego, T. Herrera y J. Santamaria. 1995. Diagnóstico integral para identificar las causas de la alternancia de producción del

- nogal pecanero, en la Comarca Lagunera. Informe de Investigación. Campo de Investigación de la Laguna. INIFAP, México.
- Rhoades, J.D. y R.D. Ingvalson. 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 54-60.
- Stewart, M.T. 1982. Evaluation of electromagnetic methods for rapid measurement of salt-water interfaces in Coastal Aquifers. *Ground Water* 20: 538-545.
- Tabbagh, A. 1974. Définition des caractéristiques d'un appareil électromagnétique classique à la prospection archéologique. *Propezioni Archeologichi* 9: 21-23.
- Wollenkaupt, N.C., J.L. Richardson, J.E. Foss y E.C. Doll. 1986. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above-ground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.* 66: 315-321.

