

USO DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA

Jean-Olivier JOB¹
 José L. GONZÁLEZ BARRIOS²
 Miguel RIVERA GONZÁLEZ³

INTRODUCCION

El estudio de los suelos salinos de la Comarca Lagunera, proyecto de colaboración entre *CENID-RASPA* y *ORSTOM*, empezó en enero 1996. Este proyecto incluye tres investigadores de la primera institución y uno de la segunda, el cual comprende cuatro etapas:

- a) Estudio de la distribución espacial de los suelos salinos bajo riego (1996),
- b) Adaptación de la metodología CEM a los suelos poco salinos (1996-1997),
- c) Determinación del efecto de la salinidad sobre dos cultivos de la Comarca Lagunera: nogal pecanero (*Carya illinoensis*, Koch) y alfalfa (*Medicago sativa*), (1997-1998),
 Definición de una estrategia de cultivo de alfalfa en suelos salinos.

Este ponencia describe parte de los resultados obtenidos durante los apartados a y b. Su propósito es de enseñar algunos usos de la conductividad electromagnética en la determinación de la salinidad de los suelos salinos, más precisamente:

- La salinidad primaria en el paisaje de la Comarca Lagunera,
- La salinidad secundaria en un módulo de riego,
- La salinidad global de los suelos de una finca, con ejemplo de una huerta de Nogal (Huerta El Chupón, Municipio de Matamoros),
- La dinámica de las sales en una parcela,
- El efecto del contenido de agua en el suelo sobre la valor de la conductividad electromagnética.

Materiales:

El terreno de experimentación es la Comarca Lagunera (Figura Y); es una cuenca endorréica de los ríos Nazas y Aguanaval. Antes de que las aguas de los dos ríos hubieran sido regularizadas con presas se terminaban en las dos lagunas de Mayrán y Viesca. Aquí, las aguas se evaporaron y dejaron sales en la superficie de los suelos. Eso es la salinidad primaria.

Con el desarrollo de la agricultura de riego se ha utilizado aguas de bombeo de calidad variable que han producido en algunas partes una salinidad secundaria (González, 1992) de los suelos. El Distrito de Riego, No. 17, está ubicado inmediatamente río arriba de las dos lagunas.

¹ Dr. Investigador del Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM).

² Dr. Investigador del *CENID-RASPA*, INIFAP.

³ M.C., Investigador del *CENID-RASPA*, INIFAP.

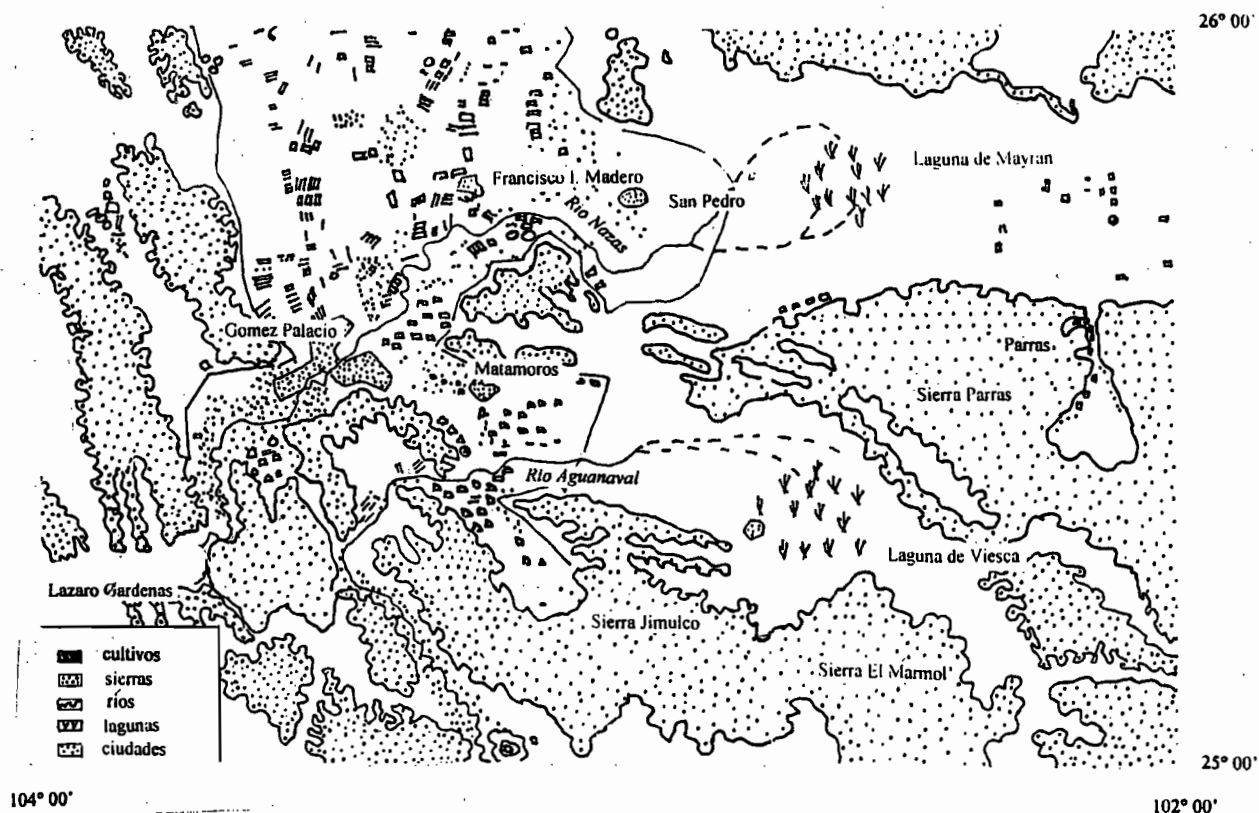


Figura 1. La Comarca Lagunera: los cauces de los ríos Nazas y Aguanaval, las lagunas de Mayrán y Viesca y las zonas de cultivos irrigados.

Métodos.

Distribución espacial de las sales:

Para dar una idea precisa de la salinidad de los suelos en toda la Comarca Lagunera hay que considerar las cuatro escalas donde se manifiestan sus efectos: el paisaje natural, el módulo de riego, la finca, la parcela y el perfil de suelo puntual. Para hacerlo, no es factible muestrear suelos y analizarlos en laboratorio.

Las superficies son demasiado grandes: 220 Mha de Lagunas y suelos salinos, 250 Mha de suelos potencialmente cultivables, 90 Mha irrigados como promedio en los diez últimos años.

Además, como no se ve la salinidad en la superficie del suelo no se puede desarrollar una estrategia de muestreo visual. Así, el número de muestras necesario para conocer la distribución real de las sales es grande, y representa, un tiempo y un costo importante.

Por estas razones se desarrollan medidas globales como la resistividad eléctrica con cuatro electrodos utilizado por Rhoades y Ingvalson (1971), y más recientemente, la conductividad electromagnética (De Jong *et al.*, 1979; Corwin y Rhoades, 1981; Job *et al.*, 1987). Este último método permite realizar un gran número de determinaciones en corto tiempo y a bajo costo usando un

conductivímetro electromagnético como el que fue utilizado en este estudio. Se intentaba desde un principio estimar la salinidad global del suelo a través de varias ecuaciones de calibración (Corwin y Rhoades, 1984; Job *et al.*, 1987; Diaz y Herrero, 1992). La primera utilización para la estimación de la variabilidad espacial de la salinidad en suelos bajo riego, en combinación con la geoestadística, fue hecha por Boivin *et al.*, (1988 y 1989).

Principio de la CEM.

Los equipos utilizados para las mediciones de la conductividad electromagnética de los suelos están compuestos por dos solenoides de distancia vertical variable de menos de uno a cuatro metros según el equipo. El primero envía al suelo un campo magnético constante que produce corrientes que se propagan más fácilmente cuando el medio es buen conductor. Esas corrientes crean un campo magnético secundario proporcional a la superficie de las líneas de corriente, por lo tanto, a la conductividad electromagnética del suelo. Ese campo es captado por un solenoide receptor que lo transforma en respuesta galvanométrica.

Teoría.

Se utilizan equipos construidos de tal manera que la(s) distancia(s) entre los solenoides sea pequeña comparándola con la distancia a la cual la amplitud de la onda disminuye de $1/e$, (e es la base de los logaritmos neperianos). En estas condiciones, llamadas "de bajo valor de inducción", el campo magnético secundario (H_s), captado por el solenoide receptor, es proporcional a la salinidad del suelo, y puede escribirse (McNeill, 1980):

$$H_s = H_p \cdot (i\pi f \mu_0 \sigma_a s^2) / 2 \quad (1)$$

donde:

H_p = campo magnético primario (unidad indiferente),

f = frecuencia (Hz),

μ_0 = permeabilidad en el vacío,

s = distancia entre los solenoides (m),

$i^2 = -1$,

σ_a = conductividad aparente global del suelo (mSm^{-1}).

La conductividad medida σ_a es una conductividad aparente global del suelo. La medición hecha en un punto dado representa una conductividad integrada a un volumen de suelo de algunos metros cúbicos.

La representación mostrada aquí es la del modelo EM-38 de dos bobinas paralelas distantes de un metro estimuladas por una corriente de 14.7 KHz (Figura 2).

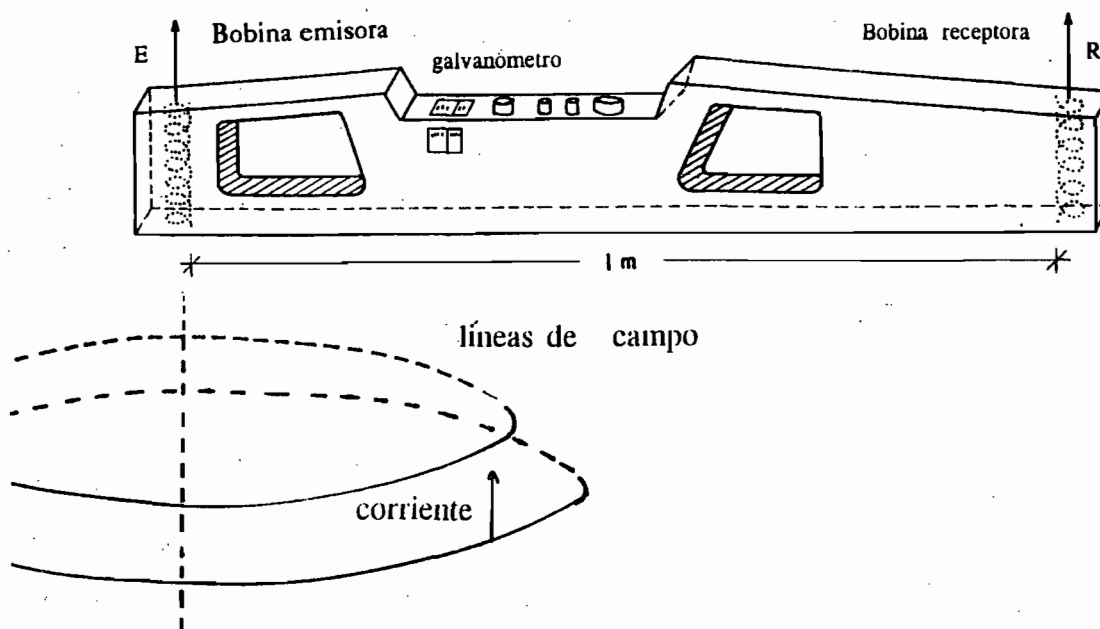


Figura 2. Equipo EM-38 utilizado para las mediciones en este trabajo (Mc Neill, 1980).

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 3).

Si $\phi_v(z)$ y $\phi_h(z)$ son las contribuciones respectivas a la medición CE_v y CE_h de una capa elemental dz de suelo situada a una profundidad normalizada z , la teoría muestra que en un medio homogéneo:

$$\phi_v(z) = 4z/(4z^2+1)^{3/2} \quad (2a) \quad \text{y:} \quad \phi_h(z) = 2 - 4z/(4z^2+1)^{1/2} \quad (2b)$$

Al integrar en el semi-espacio $z-\infty$ se obtienen:

$$R_h(z) = 1/(4z^2+1)^{1/2} \quad (3a) \quad \text{y:} \quad R_h(z) = (4z^2+1)^{1/2} - 2z \quad (3b)$$

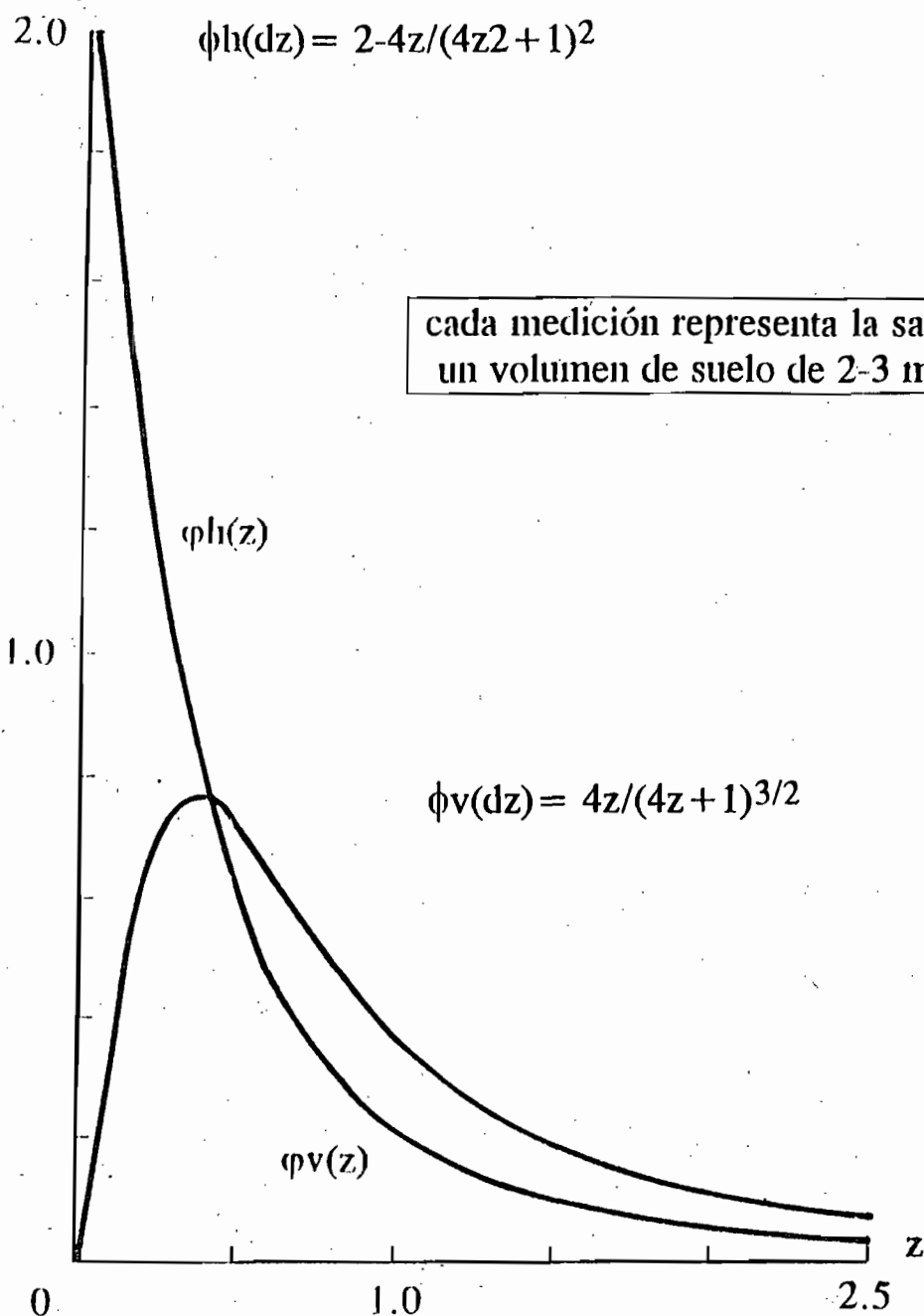


Figura 3. Contribución relativa de un estrato de suelo ubicado a una profundidad normalizada z (z =profundidades) al campo secundario: con el eje de los solenoides vertical: $\phi_v(z)$, y horizontal: $\phi_h(z)$.

Los valores de $1-R_v(z)$ y $1-R_h(z)$, que representan las contribuciones de las capas de suelos 0-z a la medida final CE_v y CE_h respectivamente, son dadas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Contribución en porcentaje de una capa de suelo situada entre 0 y z a la lectura del CEM en modo vertical: $CEm_{(v,\theta)}$ y en modo horizontal: $CEm_{(h,\theta)}$, para el equipo EM-38 de Geonics.

Prof.z ⇨	0-20	0-40	0-60	0-80	0-100	0-120	0-200	0-300	0-∞
$CEm_{(v,\theta)}$	8	23	36	48	56	62	76	84	100
$CEm_{(h,\theta)}$	33	53	65	73	77	81	88	92	100

Calibración.

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, anotando la medición: $CEm_{(v,\theta)}$, y luego paralelos a la superficie del suelo, $CEm_{(h,\theta)}$.

El índice θ significa que a salinidad del suelo constante, las medidas $CEm_{(v,\theta)}$ y/o $CEm_{(h,\theta)}$ dependen del contenido en agua del suelo. La calibración consiste en encontrar las regresiones lineales siguientes:

$$CEs_{(v,z)} = a \cdot CEm_{(v,\theta)} + b \cdot \theta \quad (4a)$$

$$CEs_{(h,z')} = a' \cdot CEm_{(h,\theta)} + b' \cdot \theta \quad (4b)$$

$CEs_{(v,z)}$ es la salinidad promedio de los extractos de saturación del suelo desde la superficie hasta la profundidad z, estimada a partir de los valores de $CEm_{(v,\theta)}$. De la misma manera, $CEs_{(h,z')}$ es la salinidad global promedio del suelo entre 0 y z' cm de profundidad estimada a partir de valores $CEm_{(h,\theta)}$.

Estas relaciones son deducidas de los valores de los extractos de saturación obtenidos hasta z y z' unidades de profundidad en un punto, cada 20 cm por ejemplo, comparados a los de $CEm_{(v,\theta)}$ y de $CEm_{(h,\theta)}$ para al menos veinte puntos de medida.

Ademas, el efecto de la humedad del suelo θ puede escribirse en primera aproximación:

$$CEm_{(v,\theta_1)} = CEm_{(v,\theta_2)} + c \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (5a)$$

Una ecuación similar se aplica para $CEm_{(h,\theta_1)}$

Estas ecuaciones quieren decir que para una misma salinidad global, las medidas $CEm_{(h,\theta_1)}$ y $CEm_{(h,\theta_2)}$, a dos estados de humedad θ_1 y θ_2 del suelo, son diferentes, por lo tanto, igualmente para las medidas en modo vertical. Entonces, la salinidad integrada del suelo entre 0 y z cm podría ser deducida

de una simple medida de CEM en cualquier punto de una parcela con una estimación de θ para toda la parcela.

También la calibración puede ser más fina, aprovechando la diferencia de la forma del campo magnético en modo horizontal y en modo vertical (Figura 2). En forma horizontal, el 81 por ciento de la medición proviene de los primeros 120 cm de suelo (Cuadro 1). En forma vertical hay que muestrear hasta 250 cm para obtener un porcentaje semejante. Por lo tanto, si se calibra la respuesta del equipo para relacionar a las muestras de cero a 120 cm sera conveniente utilizar la medición $CEM_{(h,\theta)}$ la correlación con la salinidad real del suelo. Un termino medio, que permite la comparación de los valores $Cem_{(v,\theta)}$ y $Cem_{(h,\theta)}$ consiste en muestrear el suelo hasta 200 cm.

Estimación de la salinidad en el perfil del suelo.

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. Estas son características de una situación agropedológica. Es por lo tanto importante poder diferenciar los perfiles salinos para representar la dinámica de las sales. Se puede hacer utilizando las propiedades específicas de los campos magnéticos horizontal y vertical. En cada caso la geometría de las líneas de corriente es diferente y la respuesta comparada de los valores de CEV y CEH permite estimar con rapidez el perfil salino.

La integral (3b) es más grande entre los límites 0 y 80 cm que entre 80 y 120 cm (Cuadro 1). Dicho de otra manera: en modo horizontal las capas superficiales dan una respuesta relativa más grande que las capas profundas. Al contrario, el valor de la integral (3a) es sensiblemente idéntico para las dos regiones arriba y abajo de 80 cm. Esto significa que en forma vertical las capas superficiales de 0-80 cm (si $e=1$) tienen la misma respuesta relativa que el resto del espacio medio. Esta propiedad puede ser utilizada para conocer la localización de las sales en el perfil.

RESULTADOS

Ecuaciones de calibración.

Con un preliminar a cualquier estudio, la calibración del equipo de medición se realizó a través de una regresión entre la salinidad del suelo de 0 a 200 cm de profundidad, medida como conductividad de los estratos de saturación y la conductividad electromagnética $Cem_{(v,\theta)}$ o $Cem_{(h,\theta)}$

y el contenido de humedad (en base de peso seco 105°C) promedio del suelo entre 0 y 120 cm: $\theta_{(0-120)}$ obtenidos en dieciséis perfiles de suelos en la Comarca Lagunera, con los resultados siguientes:

$$CEs_{(0-200)} = 0.047 * CVH_{(0-200)} - 0.25 \quad n=26 \quad r=0.764 \quad (6)$$

$$1 \text{ dSm}^{-1} < CEs_{(0-200)} < 6 \text{ dSm}^{-1}$$

Esta ecuación es válida para un rango de salinidad bastante bajo.

Efecto de la humedad

El efecto del contenido de agua en el suelo fue seguido en tres suelos de la Comarca Lagunera, desde la capacidad del campo hasta el punto de marchitez permanente (Figura 4).

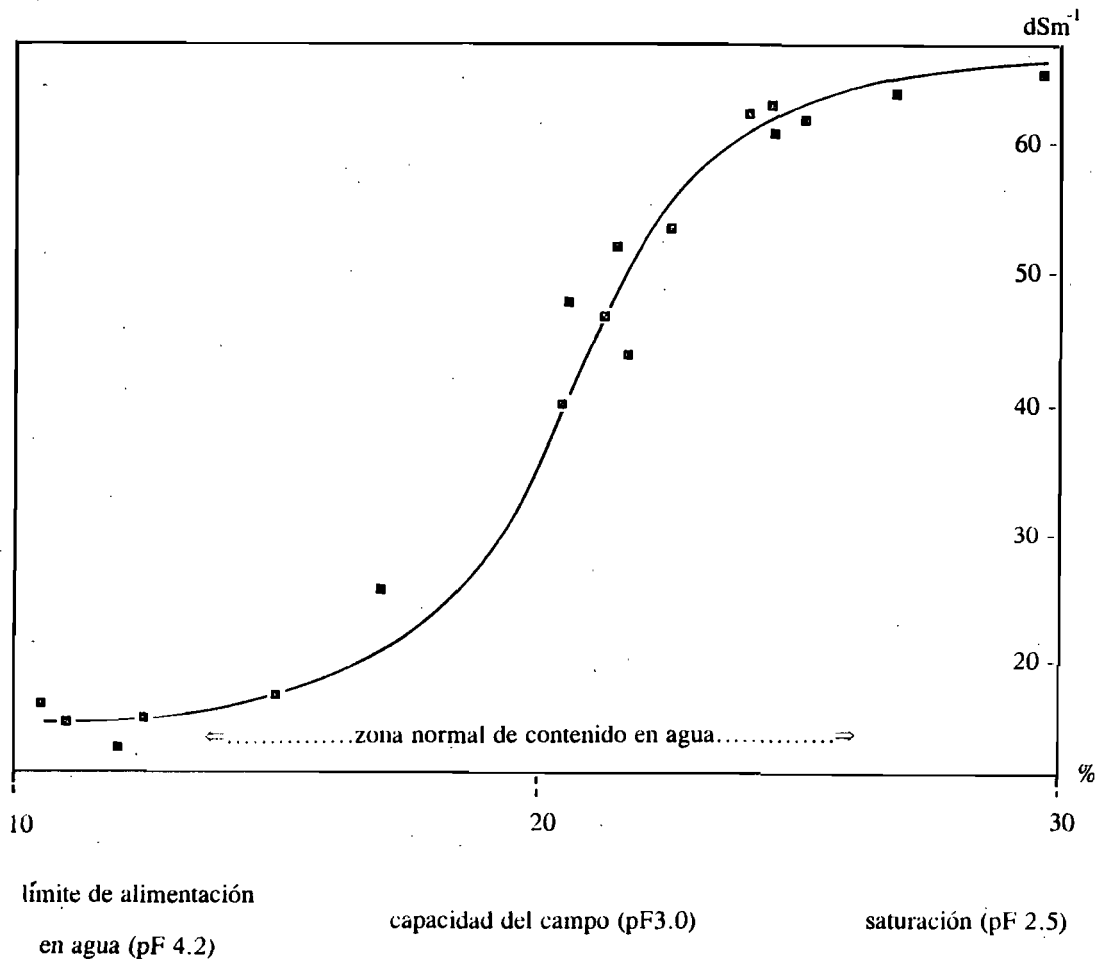


Figura 4. Efecto del contenido en agua ($\theta\%$ en base de peso) sobre el valor de la conductividad electromagnética (mSm^{-1}) de un suelo de textura franca con 34 por ciento de arena (Gabino Vázquez).

Se ve que dentro de la zona normal de contenido en agua de los suelos irrigados hay un incremento de tres puntos del valor de CEV por cada unidad porcentual incrementada en θ .

Mapa de salinidad de las zonas naturales.

En un primer experimento, la distribución espacial de la salinidad se estudió en la Laguna de Mayrán, con una cuadrícula de 500 metros (Figura 5). Se ve que la salinidad varía de manera continua.

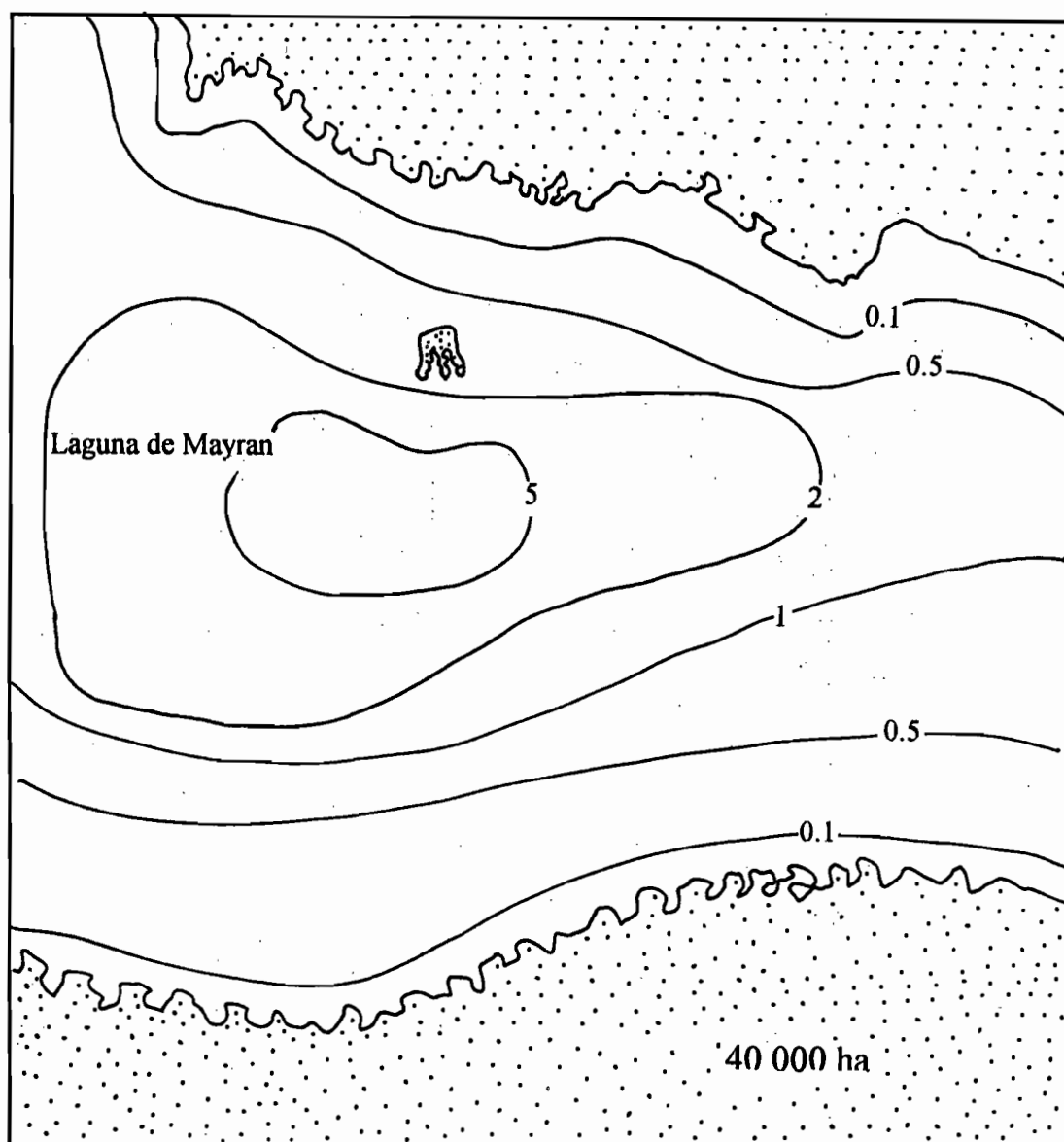


Figura 5 - Mapa de salinidad en dSm^{-1} de la parte central de la Laguna de Mayrán (40 Mha). Valores de salinidad global del suelo entre 0 y 200 cm.

Determinación de la salinidad en zonas de cultivo irrigado.

Se estudió la salinidad de catorce huertas de nogal pecanero de la Comarca Lagunera, irrigadas con agua de bombeo. Entre otros factores, como la compactación de los suelos, la salinidad tiene un efecto sobre la producción de nueces. En un módulo de riego, compuesto de suelos de la misma natura, se puede ver la diferencia de salinidad debida a un riego con una calidad y un manejo de agua diferente (Figura 6).

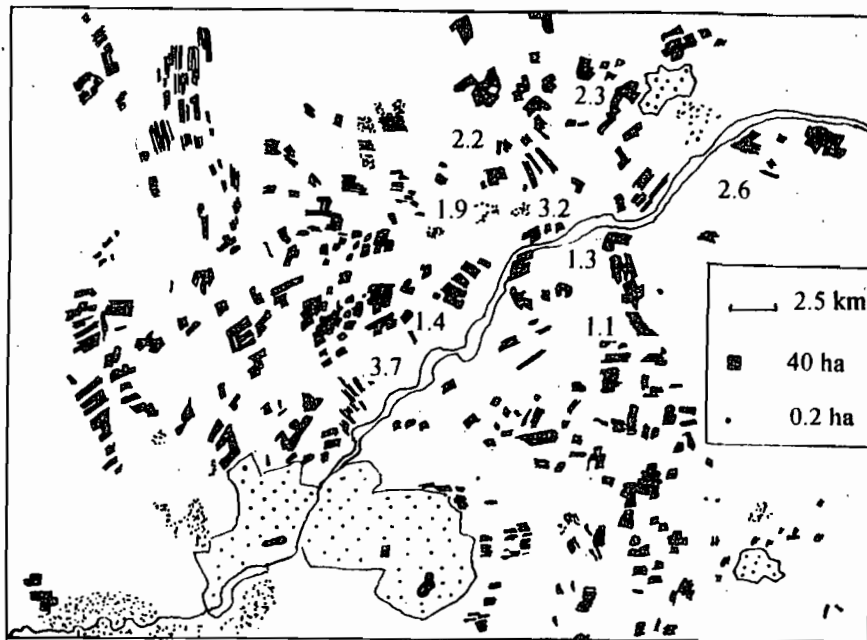
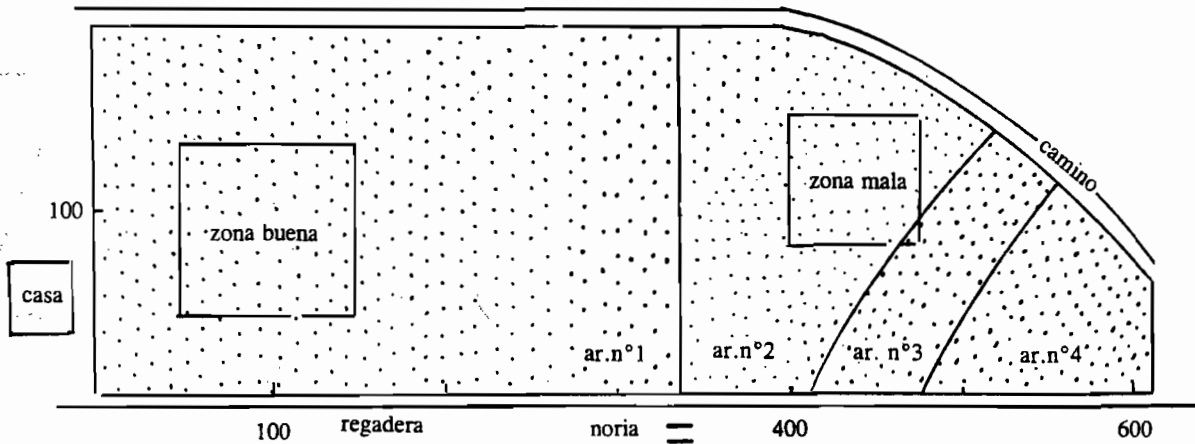


Figura 6- Salinidad de nueve huertas de nogal pecanero ubicadas cerca del río Nazas, valores en dSm⁻¹ para un área de 0.2 ha por huerta.

Determinación de la salinidad de una huerta.

Al nivel de una huerta de algunas decenas de hectáreas es posible poner en evidencia la variación de la salinidad de los suelos debido a una lixiviación diferencial de las sales según la distancia de la regadera (Figura 7).



- Plano de muestreo para estudiar la salinidad en la huerta El Chupón.

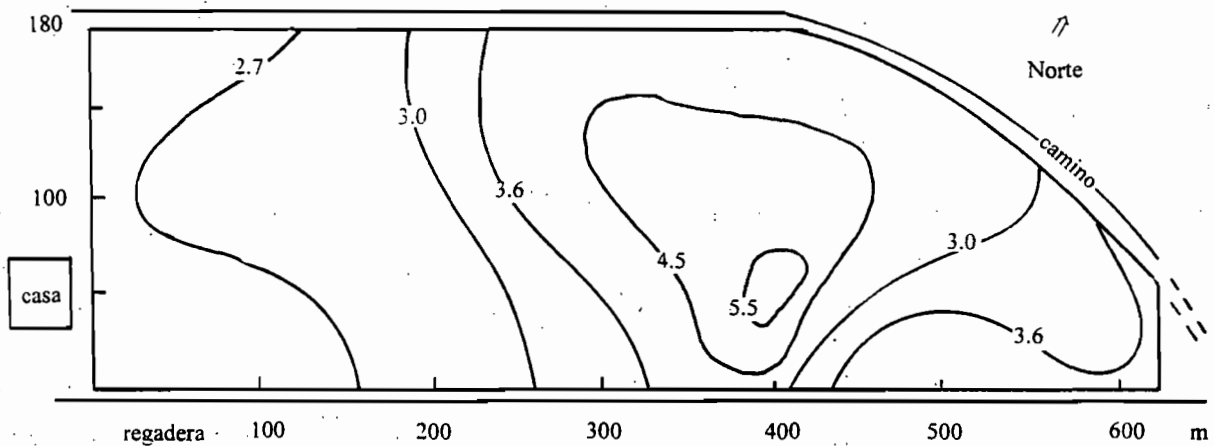


Figura 7. Variación de la salinidad de los suelos de la huerta de nogales de El Chupón.

Determinación de la salinidad de una parcela.

Este ejemplo enseña las posibilidades de seguir el efecto del riego sobre la salinización o la recuperación de los suelos salinos. La salinidad de una parcela de alfalfa fue medida con una cuadrícula de 10x10m (Figura 7).

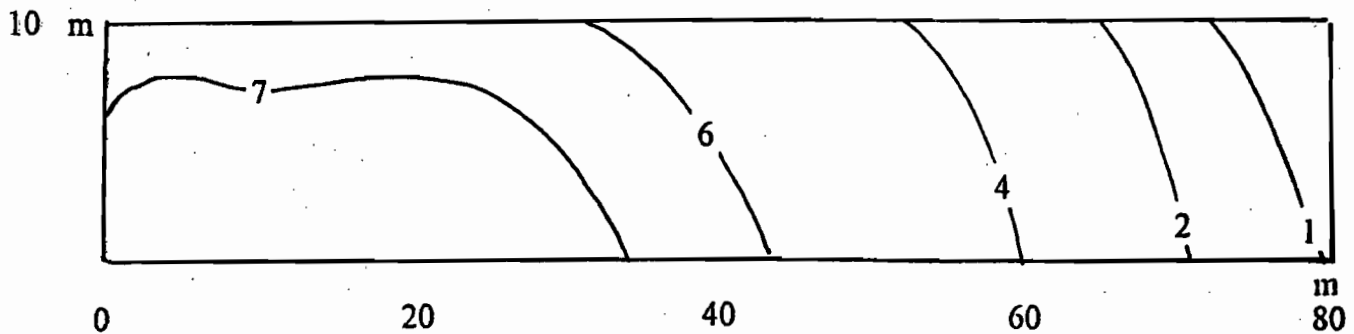


Figura 8. Salinidad global de una parcela irrigada de alfalfa de 0.08 ha.

Con la precisión que permite un gran número de medidas se puede ver que la lixiviación de las sales es más efectiva del lado de la regadera que del otro lado.

CONCLUSIONES

Para analizar la salinidad de una región tan grande como la Comarca Lagunera hay que dividirla en cuatro escalas: la primera es la del paisaje natural no modificado por el hombre; la segunda es la del predio agrícola; la tercera la de la parcela, y la última la del punto de medida; es decir, el perfil de suelo.

Cada nivel es una población (en sentido estadístico) de elementos de diferentes salinidades. Después de haber elegido un muestreo representativo de cada población se puede estudiar la salinidad global del suelo con el método de conductividad electromagnética, la cual permite hacer numerosas medidas con cualquier cuadrícula.

Un tratamiento geoestadístico es entonces recomendable para determinar las tendencias generales a la salinización o a la lixiviación de las sales.

LITERATURA CITADA

- Boivin, P.; D. Brunet; J.O. Job. 1988. Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés. Cah. ORSTOM. sér. Pédol., vol. XXIV, No. 1, p: 39-48.
- Boivin, P.; M. Hachicha; J. O. Job; J. Y. Loyer. 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols. Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du Sol. Vol. 25. No. 1, p: 69-73
- Corwin, D.L., and J.D. Rhoades. 1984. Measurement of Inverted Electrical Conductivity Profiles Using Electromagnetic Induction. Soil Sci. Soc. Amer. J., Vol. 48, p:288-291.
- Díaz, L.; J. Herrero. 1992. Salinity estimates in irrigated soils using electromagnetic induction. Soil Science, Vol. 154, No. 2, p:151-157.
- González B., J. L. 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine. Exemple de la Comarca Lagunera. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, 316 p.
- Job, J. O.; J. Y. Loyer; M. Ailoul. 1987. Utilisation de la conductivimétrie électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. Vol. XXIII No. 2, p: 123-131.
- McNeill, J.D. 1980. Electrical Conductivity of soils and rocks. Tecn. note TN-5, 15 p. Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.
- Rhoades, J. D. and R. D. Ingvalson. 1971. Determining salinity in fields soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol. 35 p: 54-60.

1
9
7
2

1
9
9
7

25 Aniversario del CENID-RASPA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION DISCIPLINARIA
EN RELACION AGUA-SUELO-PLANTA-ATMOSFERA

inifap
PRODUCE 

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRICOLAS Y PECUARIAS