

MONITOREO DE LA SALINIDAD MEDIANTE SENSORES REMOTOS

Salinity Monitoring Using Remote Sensing

Pulido Madrigal, L.^{1‡}, J. González Meraz¹, C. L. Wiegand², J. Infante Reyes³ y J. M. Delgado³

RESUMEN

En el año de 1996 se realizó un estudio mediante la aplicación de imágenes de satélite y mediciones de campo, para identificar y cartografiar el área afectada por sales en el distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora, México. Se utilizaron imágenes de satélite Landsat TM, mismas que se calibraron con mediciones de campo, de acuerdo con la metodología de la planta indicadora. Mediante este procedimiento se obtuvo un primer mapa de salinidad que cubrió parcialmente el área del distrito de riego. El área complementaria del distrito se cartografió al realizar mediciones de la salinidad *in situ* con un sensor electromagnético EM-38, lo cual permitió desarrollar un segundo mapa parcial de salinidad. Ambos mapas se integraron lo que condujo a la obtención de un mapa del área total del distrito de riego. En el año 2001 se identificó y cartografió la salinidad del área total de este distrito utilizando únicamente el sensor electromagnético EM-38. Se efectuó una comparación de ambos mapas de salinidad, para llegar a la conclusión de que en 2001 la superficie afectada fue menor que en 1996.

Palabras clave: *mapa de salinidad, imagen de satélite, sensor electromagnético, causas del ensalitramiento.*

SUMMARY

A soil salinity survey was carried out in the Rio Mayo irrigation district (ID) in 1996, using satellite imagery along with an EM-38 electromagnetic (EM) device. Data

from Landsat TM imagery were calibrated with field data, according to the plant indicator methodology. This methodology yielded a partial salinity map of the ID, but included only those areas where indicator crops were cultivated. The remaining non-mapped areas were surveyed with an EM-38 electromagnetic device, generating a second partial salinity map. The two partial maps were integrated to obtain a complete soil salinity map of the ID. In 2001, another soil salinity survey was carried out using solely the EM device. The results of both methodologies were analyzed; the 2001 survey results showed less affected area than that conducted in 1996.

Index words: *salinity map, landsat image, electromagnetic sensor, salinity sources.*

INTRODUCCIÓN

En México las áreas de producción agrícola que presentan mayores problemas de salinidad y drenaje se localizan principalmente en los distritos de riego (DR) del norte del país. Debido a que los DR son las áreas agrícolas más productivas, la salinidad es considerada un problema serio ya que aproximadamente entre el 26 y el 30% del área está afectada por exceso de sales en diferente grado y por manto freático superficial (Fernández, 1990, IMTA, 1997). En el DR 038 Río Mayo un 20% de su superficie es afectado por salinidad y aproximadamente un 53% de su área por manto freático superficial (Pulido *et al.*, 2003a). La superficie afectada por salinidad de las aguas freáticas alcanza aproximadamente 23 560 ha, que equivalen al 22% de la superficie de riego del distrito; el agua freática tiene una concentración media de sólidos disueltos totales de más de 4000 mg L⁻¹ y se localiza en la parte de menor altitud del distrito, por abajo de la cota de los 11 m, principalmente en los módulos de riego aledaños a la costa (Pulido *et al.*, 2003a).

Debido a la dinámica de la salinización y su distribución en los terrenos, se requiere de métodos que proporcionen resultados a corto plazo y que ayuden a dar seguimiento a la efectividad de las medidas aplicadas

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

[‡] Autor responsable (lpulido@tlaloc.imta.mx)

² Investigador jubilado USDA-ARS. 2413 E. Business Hwy 83. 78596 Weslaco, Texas, USA.

³ Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del Río Mayo. Otero s/n entre Josefa Ortiz de Domínguez y Amado Nervo. 85870 Navojoa, Sonora, México.

para la rehabilitación de los suelos (Wiegand *et al.*, 1994). Tradicionalmente para realizar estudios de salinidad analizada se obtienen muestras de suelo localizadas mediante una cuadrícula de 1 ó 2 km de longitud en toda el área del distrito; esta labor representa mucho tiempo y costo, lo cual limita su actualización.

En el contexto de la respuesta de las plantas a la salinidad, ésta se refiere a concentraciones de sales solubles tan altas que afectan las propiedades coligativas de la solución en la cual las raíces están expuestas, específicamente mediante la reducción de su potencial osmótico. En un contexto agrícola, un suelo es considerado salino si la conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación excede 4 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y el porcentaje de la capacidad de intercambio catiónico del suelo ocupado por sodio es menor que 15. El valor de 4 dS m^{-1} corresponde a aproximadamente 40 meq L^{-1} de sales; sin embargo, no existe un límite bien definido entre suelos salinos y no salinos (Läuchli y Epstein, 1990).

Wiegand y Richardson (1990) y Wiegand *et al.* (1991 y 1992a,b) desarrollaron el método de análisis de componentes espectrales (SCA, por sus siglas en inglés) para ayudar a la interpretación de índices de vegetación en términos de desarrollo y rendimiento, y los procesos que ocurren dentro de la cobertura vegetal, incluyendo la intercepción de luz y la evapotranspiración. El SCA integra también un índice normalizado de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice corresponde a la dimensión fotosintética de la cobertura (cantidad de tejido fotosintéticamente activo) relacionado con el rendimiento, cuando condiciones como la salinidad limitan el desarrollo de la cobertura vegetal. El NDVI se calcula a partir de valores espectrales obtenidos en las bandas del rojo (TM3, 0.63 a $0.69 \text{ }\mu\text{m}$) e infrarrojo cercano (TM4, 0.76 a $0.90 \text{ }\mu\text{m}$), mediante la fórmula: $\text{NDVI} = (\text{TM4} - \text{TM3}) / (\text{TM4} + \text{TM3})$.

Wiegand *et al.* (1992a, 1994 y 1996) utilizaron parcelas de observación de 15, 36 y 59 hectáreas cultivadas con algodónero (*Gossipium hirsutum*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en las que obtuvieron datos de salinidad y parámetros fisiológicos en sitios de muestreo, para calibrar imágenes de satélite Spot-1 HRV, imágenes videográficas y fotografía aérea infrarroja. Las parcelas se clasificaron espectralmente y se desarrollaron modelos estadísticos a partir de los datos de campo y la información espectral, lo que condujo a la estimación de la salinidad de todos los píxeles de las parcelas estudiadas y a la obtención de mapas

de clasificación por salinidad. La información espectral de las imágenes del satélite Spot-1 se obtuvo de las bandas en las regiones del verde (500-590 nm), rojo (610-680 nm) e infrarrojo cercano (790-890 nm).

En estudios realizados para identificar la salinidad del suelo en los DR 076 Valle del Carrizo y 041 Río Yaqui Pulido *et al.* (1997, 2003a) adaptaron la metodología descrita por Wiegand *et al.* (1992a), denominada de la planta indicadora (Pulido *et al.*, 2003b). Con este propósito utilizaron como indicadores de la salinidad la condición espectral de trigo y algodónero sembrados extensivamente. En parcelas afectadas por salinidad sembradas con estos cultivos, se tomaron muestras de suelo y se determinó su concentración de sales. Estos datos se analizaron conjuntamente con datos espectrales extraídos de imágenes de satélite Landsat TM a través de los cuales se generaron modelos estadísticos para obtener clasificaciones supervisadas de las áreas establecidas sobre las imágenes, lo cual condujo a la generación de mapas de salinidad. La superficie estudiada en el Valle del Carrizo fue de 19 387 ha, de las cuales 6927 ha (35%) se clasificaron como suelo salino. En el DR 041 se cartografiaron 140 545 ha, de las cuales 80 745 ha (57.6%) presentaban problemas de salinidad, es decir, una $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$.

La CE del suelo puede medirse remotamente utilizando la metodología de inducción electromagnética. Los sensores de inducción electromagnética son adecuados para determinar la salinidad del suelo, puesto que responden a suelos más conductivos (más salinos), y además no requieren de un contacto directo con el suelo. Estos instrumentos inducen pequeñas corrientes eléctricas en el suelo en forma de remolino con círculos, las cuales miden la magnitud del campo magnético generado por dichas corrientes. La magnitud de la corriente es directamente proporcional a la CE del suelo en las inmediaciones de esos círculos de corriente. Cada círculo de corriente genera un campo electromagnético secundario que es proporcional al valor del flujo de corriente dentro del mismo. Una fracción del campo secundario electromagnético inducido de cada círculo es interceptado por la bobina receptora, y la suma de estas señales es amplificada y transformada en voltaje el cual está linealmente relacionado con la CE aparente (CE_a) de la profundidad ponderada del suelo (Rhoades, 1993, Rhoades *et al.*, 1999, McNeill, 1980).

La profundidad de exploración de estos aparatos está determinada por el espaciamiento entre las bobinas receptora y transmisora. Debido a que estos instrumentos

promedian automáticamente la lectura de salinidad en una área lateral que es aproximadamente igual a la profundidad de exploración, proporcionan un valor muy exacto de la conductividad eléctrica del suelo y son capaces de captar muy pequeñas variaciones de ella (Mc Neill, 1980).

El sensor de salinidad comercial Geonics EM-38 contiene un sistema de circuitos apropiado para minimizar la respuesta del instrumento a la susceptibilidad magnética del suelo y para maximizar su respuesta a la conductividad CE_a . El equipo dispone de un espacio de un metro entre bobinas, trabaja a una frecuencia de 13.2 kHz, es alimentado por una batería de 9 voltios y lee directamente la CE_a . La configuración de las bobinas, la frecuencia y el espacio entre las bobinas se seleccionaron para realizar mediciones de la CE_a hasta profundidades efectivas de exploración de aproximadamente 1 metro cuando se utiliza el sensor en una posición horizontal, y de 2 m cuando se coloca en una posición vertical, aunque existen otros modelos que llegan a explorar a profundidades de varias decenas de m (McNeill, 1980; Van Der Lelij, 1983; Rhoades, 1993, Rhoades *et al.*, 1999).

Los objetivos de este trabajo fueron actualizar el mapa de salinidad del suelo del distrito de riego 038 Río Mayo, utilizando imágenes de satélite, un sensor electromagnético EM-38 y un equipo receptor del sistema de posicionamiento global, y comparar los mapas de salinidad obtenidos en 1996 y 2001.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó durante los años 1996 y 2001 en el DR 038 Río Mayo, Sonora, México. El distrito se localiza entre los paralelos 26° 21' y 28° 31' N y meridianos 108° 26' y 110° 05', con una altura media de 40 m. El DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, Sonora; tiene una superficie de riego de 96 951 ha, la cual es regada por gravedad con agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua extraída de pozos de bombeo. Su clima es estepario semiárido, con precipitación media anual de 388 mm, temperatura media anual de 21.4 °C, y evaporación media anual de 2222 mm (Reyes, 1994).

El área que constituye la zona de riego del Valle del Mayo, se integra a la planicie costera del noroeste de la República Mexicana, con suelos sensiblemente planos con pendientes menores del 1%. Su altitud oscila entre

2 y 50 m. Reyes (1994) define los suelos del DR 038 como de origen reciente, su modo de formación es mixto (aluvial-coluvial), formados a partir del material sedimentario mezclado (areniscas, calizas, conglomerados y pizarras), derivado de rocas ígneas extrusivas (granito) y rocas metamórficas de las montañas adyacentes del este y sureste. Por su grado de desarrollo estos suelos se consideran jóvenes, que no muestran eluviaciones e intemperizaciones significativas.

En el área del DR están identificadas 10 series de suelo que cubren una superficie de 104 517 ha: Tesia (Cambisol Crómico), Camoa (Cambisol Crómico), Navojoa (Fluvisol Calcáreo), Jupateco (Fluvisol Sáfico), Moroncárit (Solonchak Sódico), Buyacusi (Fluvisol Calcáreo), Campo León (Fluvisol Calcáreo), Huatabampo (Fluvisol Sáfico), Bacame (Fluvisol Calcáreo), y Sebampo (Fluvisol Éutrico). Los tipos de suelo se resumen en Cambisol Crómico, que cubren el 2.8%, Fluvisol Calcáreo, 51.5%, Solonchak Sódico, 10.5%, Fluvisol Sáfico (21.9% y Fluvisol Éutrico, 13.3%. Con excepción de la serie Camoa, todas las series presentan problemas de salinidad; se observa en el subsuelo un estrato salino-sódico (50-90 cm), con $CE > 4$ dS m⁻¹ y porcentaje de sodio intercambiable mayor que 15%. Asimismo, con excepción de las series Navojoa y Camoa las restantes tienen también las características de presentar manto freático elevado. Los suelos en su mayoría presentan pH elevado (alcalino). El contenido de materia orgánica es bajo (menos de 1%) (Reyes, 1994).

Muestreo de Suelo y Planta, Medición de Coordenadas Geográficas y Adquisición de la Imagen

La identificación de la salinidad con imágenes de satélite, requiere del uso de uno o más cultivos extensivos, que son utilizados como indicadores para detectar la salinidad. Los cultivos que mayor superficie ocuparon en el distrito de riego en los ciclos otoño-invierno 1995-1996 y primavera-verano 1996 son el trigo (*Triticum aestivum*), algodónero (*Gossipium hirsutum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*).

En terrenos cultivados con trigo, algodónero y sorgo, y afectados en diferente grado por la salinidad, se seleccionaron 10 parcelas comerciales de aproximadamente 10 ha cada una para realizar la calibración de la imagen de satélite, de las cuales

4 fueron de trigo, 2 de algodónero y tres de sorgo. Las parcelas se distribuyeron en los módulos de riego 1, 2, 5, 6 y 8, los cuales se ubican en las zonas central y sur del DR, donde los problemas de salinidad del suelo son mayores.

De las cuatro parcelas de trigo dos se ubicaron dentro de la serie de suelo Campo León (Fluvisol Calcáreo) y dos dentro de la serie Moroncárit (Solonchak Sódico); una parcela de algodónero se ubicó en la serie Jupateco (Fluvisol Sáfico) y otra en la serie Huatabampo (Fluvisol Sáfico); dos parcelas de sorgo quedaron en la serie Bacame (Fluvisol Calcáreo) y una en la serie Moroncárit. Los suelos de la serie Moroncárit son profundos, de más de 90 cm, en ellos el problema de salinidad es de gran importancia ya que la CE es mayor de 4 dS m^{-1} ; el drenaje interno es deficiente después de los 100 cm. Los suelos de la serie Jupateco son profundos, de más de 90 cm; el agua emanada por filtraciones de los canales de riego permanece por bastante tiempo en el subsuelo, ocasionando mantos freáticos elevados y altas concentraciones salinas en el suelo superiores a 30 dS m^{-1} ; las aguas de riego extraídas de pozos profundos que allí se localizan son de calidad no permitida para el riego (concentraciones de 700 a 4000 mg L^{-1}) por lo cual se mezclan con agua de la presa para su uso en riego. En los suelos de la serie Huatabampo el drenaje interno tiende a ser deficiente; las limitaciones que restringen la elección de cultivos son textura del suelo, profundidad al estrato impermeable y salinidad con valores $> 4 \text{ dS m}^{-1}$. Los suelos de la serie Campo León tienen como limitaciones que restringen la elección de cultivos la textura, profundidad del estrato impermeable, salinidad e inundación. Las limitaciones que presentan los suelos de la serie Bacame para la elección de los cultivos son salinidad, $\text{CE} > 20 \text{ dS m}^{-1}$ y sodicidad, profundidad del manto freático, y suelo (Reyes, 1994).

La selección de las parcelas se realizó cuando las plantas se encontraban en etapa de floración y formación de grano. En las parcelas se colocaron estacas a 60 m de separación para realizar un muestreo sistemático del suelo, de tal manera que se fijaron 26 sitios de muestreo en promedio por parcela, de donde se tomaron muestras de suelo a 0-30 cm y de 30-60 cm de profundidad en cada sitio, para luego determinar en el laboratorio la CE del extracto de saturación del suelo. En esta profundidad de muestreo es donde existe una mayor presencia de raíces y es por ello que es útil desde el punto de vista

productivo, por lo que se decidió tomar muestras por estratos para posteriormente ponderar el valor de CE. La separación entre dos sitios de muestreo estuvo en función de la resolución espacial de una imagen del satélite Landsat 5 TM, que es de 30 m, de tal forma que se cuidó que dos sitios de muestreo no quedaran en un mismo píxel de las imágenes utilizadas. El número total de sitios de muestreo fue de 260 de los cuales se seleccionaron 136, ya que algunos sitios se eliminaron como consecuencia de un manejo deficiente del cultivo por parte de los dueños de las parcelas. La distribución de parcelas de muestreo se hizo bajo el criterio de ubicarlas en las zonas con mayores problemas de salinidad, tratando de que en estas parcelas se representaran las condiciones de variabilidad en el manejo del cultivo, clima y suelo existentes en el DR. El valor de la CE considerado en el análisis, resultó de ponderar (CE_w) los valores de CE de los dos estratos: $\text{CE}_w = 0.6\text{CE}_{0-30} + 0.4\text{CE}_{30-60}$, de acuerdo con Pulido *et al.* (1997). Se efectuaron mediciones de las coordenadas geográficas latitud y longitud de los sitios de muestreo con receptores del sistema global de posicionamiento (GPS), para localizarlos en las imágenes de satélite y así extraer los valores espectrales de cada sitio. Se utilizaron receptores del GPS marca Garmin SRVY II® (Garmin Corporation, Olathe, Kansas, USA).

Se adquirieron dos imágenes del satélite Landsat 5 TM; al DR 038 lo cubre la escena 034/041. La fecha de toma de las imágenes fue lo más cercana al período de máximo desarrollo vegetativo de los cultivos indicadores, que coincide con sus etapas de floración; para cartografiar la superficie de trigo, que es un cultivo de otoño-invierno, se utilizó una imagen del 23 de febrero de 1996 y para cartografiar las áreas de algodónero y sorgo, que se producen en el ciclo de siembra de primavera-verano, una imagen del 14 de junio de 1996.

Obtención del Mapa de Salinidad a Través del Análisis de Imágenes de Satélite

Se elaboró un mosaico de cultivo de cada uno de los 16 módulos que forman el distrito de riego. El mosaico se digitalizó sobre las imágenes de satélite con la finalidad de delimitar y cuantificar las áreas de los cultivos indicadores, que posteriormente fueron sometidas a una clasificación supervisada.

Las escenas se georeferenciaron y de las ocho bandas que tiene una imagen fueron utilizadas las bandas

TM2 (reflectancia en el verde, 500-590 nm), TM3 (reflectancia en el rojo, 610-680 nm) y TM4 (reflectancia en el infrarrojo cercano, 790-890 nm). En cada una de ellas fueron localizadas las parcelas de observación referidas, con el propósito de extraer los valores espectrales correspondientes. Estos valores se utilizaron posteriormente para elaborar modelos de regresión lineal múltiple, mismos que sirvieron para clasificar por salinidad la superficie de trigo, algodónero y sorgo.

Esta clasificación permitió estimar la superficie afectada por salinidad; desde áreas sin problemas ($CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$) hasta áreas con altos niveles de afectación ($CE > 12 \text{ dS m}^{-1}$). Como resultado se obtuvieron tres mapas de salinidad (uno por cada cultivo), que al ser integrados permitieron disponer de un mapa de salinidad que cubrió parcialmente el área geográfica del distrito de riego

Medición Extensiva de la Salinidad con un Sensor Electromagnético EM-38

En el estudio de 1996 se utilizó un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited (Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá) para estimar la CE del área del distrito de riego que no fue cartografiada a través de los cultivos indicadores. En el estudio realizado en 2001 se cartografió la totalidad del distrito de riego con el mismo sensor electromagnético. El sensor fue calibrado en forma previa a su aplicación extensiva, lo cual posibilitó la obtención de modelos estadísticos para cada estudio, que sirvieron posteriormente para estimar la CE de los sitios de medición que se establecieron en los módulos de riego. Para calibrarlo, se realizaron mediciones con el sensor en 70 sitios en 1996 y 71 sitios en 2001. Los sitios se distribuyeron sistemáticamente con separaciones de 60 m en cuadrícula, y se tomaron muestras de suelo a 0 - 30 y 30-60 cm de profundidad para determinar la CE en el extracto de saturación del suelo; las mediciones se hicieron en forma simultánea al muestreo del suelo. En cada sitio se tomaron las lecturas con el sensor en posiciones vertical y horizontal a una misma altura sobre la superficie del suelo, para determinar la CE del estrato 0-60 cm de profundidad.

En el estudio realizado en 1996 la calibración se realizó en tres de las cuatro parcelas de trigo que se utilizaron para la calibración de las imágenes de satélite, ubicadas en los módulos de riego 5 y 6. En el estudio

de 2001 la calibración se realizó en tres parcelas ubicadas en los módulos 2, 6 y 8; en cada parcela se ubicaron en promedio 23 sitios de muestreo de suelo.

La cantidad de muestras (ecuación 1) se determinó con base en la variabilidad de la población, y de la precisión y un nivel de confianza deseados, según el criterio señalado por Hanson y Grattan (1990).

$$N = \left[\frac{(z)(CV)}{k} \right]^2 \quad (1)$$

donde:

N = cantidad de muestras;

z = 1.96, 1.64 y 1.28 para niveles de confianza de 95%, 90% y 80%, respectivamente;

CV = coeficiente de variación;

k = 0.1 hasta 0.2.

Se consideró un nivel de confianza de 80% y un error de la media de las muestras de 0.15. Tanto en 1996 como en 2001 se hizo un premuestreo de suelo en una parcela y se determinó en laboratorio la salinidad, con cuyos datos se calculó la cantidad de muestras que deberían de tomarse. Por ejemplo, en 2001 en una parcela se tomaron 30 muestras de suelo y se determinó la salinidad; con los datos de CE se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variación, y seguidamente se calculó la cantidad de muestras definitiva que resultó de 80, la cual se distribuyó en tres parcelas distantes geográficamente, como ya se refirió. El número de 71 muestras utilizadas se obtuvo después de eliminar datos de 9 muestras que resultaron inconsistentes. Hanson y Grattan (1990) refieren que un error entre 0.1 y 0.2 de la media de las muestras y un nivel de confianza de 80% son suficientes para una recomendación de suelos.

Los modelos resultantes de la calibración se utilizaron para estimar la CE de un total de 206 sitios (412 lecturas) en 1996 y 533 sitios (1066 lecturas) en 2001. Los sitios se distribuyeron en el área del distrito de riego, en parcelas que no fueron incluidas en el mapa que se produjo por medio de las imágenes de satélite (1996). En los sitios de medición se determinaron con receptores GPS las coordenadas geográficas longitud y latitud.

En 1996 con las lecturas del sensor transformadas a valores de CE, y con las correspondientes coordenadas geográficas se elaboró un mapa de isolíneas de CE que posteriormente fueron transformadas a áreas de igual

valor de salinidad, dando como resultado el segundo mapa parcial de clases de salinidad. La obtención del mapa en formato vectorial se logró mediante el programa Surfer®, generando isolíneas de CE; la interpolación de valores de CE se logró mediante el método Kriging. Se utilizaron cinco clases de CE: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y >16 dS m⁻¹. Este mapa se transformó a formato raster y luego se integró al mapa de salinidad parcial obtenido con las imágenes de satélite, y ello permitió generar un mapa de toda el área del distrito; la integración de ambos mapas se hizo mediante el programa de cómputo Arc-Info®. Las lecturas efectuadas en 2001 con el sensor permitieron elaborar el mapa del área total del distrito de riego.

Esta clasificación de suelos por salinidad se adoptó debido a que es la que emplean en el distrito de riego 041 Río Yaqui (y en otros distritos de riego del noroeste de México) para elaborar los mapas de salinidad, y es la que recomienda la Comisión Nacional del Agua (De la Peña, 1982).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención de los Modelos Estadísticos para Estimar la Salinidad con Imágenes de Satélite

La relación entre la CE y los valores espectrales se señalan en el Cuadro 1. El coeficiente de correlación obtenido para las parcelas de trigo, $r = 0.74$, fue similar en magnitud al obtenido para el mismo cultivo en el Valle del Yaqui (Pulido *et al.*, 2003a), y menor al obtenido en el Valle del Carrizo (Pulido *et al.*, 1997). Una posible explicación es que en el Valle del Carrizo se utilizaron parcelas de observación de trigo más uniformes en cuanto al material genético y al manejo del cultivo, ya que las parcelas se encontraban en suelos de textura arcillosa, a diferencia de las parcelas del Valle del Mayo que tuvieron variaciones por cuanto a su material genético, textura del suelo, fecha de siembra y método de riego. En cuanto al algodón, la correlación entre la imagen y la CE resultó más alta ($r = 0.8$) en comparación con el valor obtenido para el mismo cultivo en el Valle del Yaqui ($r = 0.65$). Pulido *et al.* (2003a). No existen referencias sobre la utilización del sorgo como cultivo indicador de la salinidad; sin embargo, se observó que el valor del coeficiente de correlación del modelo desarrollado fue similar al obtenido para el trigo (Cuadro 1).

En vista de que los modelos del Cuadro 1 se obtuvieron con la información de campo y espectral de los sitios de muestreo, en primer lugar los modelos sirvieron para estimar la salinidad de los píxeles que integran las parcelas de calibración de las imágenes, y en segundo lugar los mismos modelos se utilizaron para realizar una extrapolación en todos los píxeles de la subimagen del cultivo de referencia en el área del distrito de riego, para clasificarlos en función de su valor espectral. Los coeficientes de correlación obtenidos permitieron observar que la mayor parte de la variabilidad ($r^2 = 0.53, 0.54$ y 0.64 , para trigo, algodón y sorgo, respectivamente) encontrada en el desarrollo de las plantas en las parcelas de observación, medida a través de la reflectancia de la luz en las bandas verde, rojo e infrarrojo cercano, se debieron a la salinidad del suelo. La prueba de $F_{0.05}$ realizada indica que existe una diferencia significativa entre los valores espectrales de las bandas TM2, TM3 y TM4, y que dichos valores se relacionan con las variaciones de la CE del suelo; por lo tanto, los modelos obtenidos resultaron adecuados para estimar la CE del suelo.

Los modelos de regresión lineal se elaboraron con datos de parcelas de calibración distantes geográficamente y manejadas por diferentes dueños, por lo que en su estructura son representativos de las condiciones de manejo, suelo y clima prevalecientes en el DR. Además de la salinidad, existieron otros factores que causaron un efecto negativo en el desarrollo de los cultivos como son las diferentes variedades de semilla utilizadas por los productores, fechas de siembra, control de plagas y enfermedades, y características físico-químicas de los suelos; sin embargo, el supuesto es que los productores realizaron un buen manejo de sus parcelas ya que buscaban como objetivo productivo el de lograr ganancias económicas, sin importar que hubiera afectaciones de salinidad del suelo. La falta de humedad del suelo no se consideró como una limitante productiva ya que en este DR se programan anualmente las superficies de cultivo en función de la disponibilidad de agua almacenada en la presa Adolfo Ruiz Cortines, y en 1996 no se tuvieron problemas de sequía.

En la clasificación no supervisada el usuario somete sus datos espectrales a un proceso de clasificación no supervisada y especifica el número de clases espectrales o categorías en que quiere que el programa de cómputo clasifique el área geográfica. Los objetivos de la clasificación no supervisada son: 1) agrupar los píxeles

Cuadro 1. Ecuaciones de regresión para estimar la salinidad del suelo a partir de imágenes de satélite.

Cultivo	Ecuación de regresión [†]	F _{0.05}		r	n
		Fc	Ft		
Trigo	CE _w = 7.015 + 0.5184(TM2) - 0.0765(TM3) - 0.1635 (TM4)	18.299*	2.79	0.74	51
Algodonero	CE _w = 5.205 - 0.3969(TM2) + 0.4844(TM3) - 0.0109(TM4)	17.295*	2.934	0.80	33
Sorgo	CE _w = 11.3309 + 0.5965(TM2) - 0.2684(TM3) - 0.1424(TM4)	17.944*	2.79	0.73	52

[†] CE_w = conductividad eléctrica ponderada en el estrato 0-60 cm, dS m⁻¹; TM2 = reflectancia en el verde; TM3 = reflectancia en el rojo; TM4 = reflectancia en el infrarrojo cercano; Fc = F calculada; Ft = F tabulada; r = coeficiente de correlación; n = número de observaciones.

dentro de clases con base en valores espectrales; 2) generar un reporte estadístico que contenga el valor medio espectral para cada banda de cada clase, la desviación estándar de cada media, y el número de píxeles de cada clase; y 3) producir mapas a color de clases no supervisadas (Pulido *et al.*, 2003b). En este estudio el algoritmo matemático fue el de *clustering*, que divide el espacio de las variables en una serie de regiones de manera que se minimice la varianza interna de los píxeles incluidos en cada clase. En el proceso de *clustering* los individuos que primero se aglutinan son los que están a una menor distancia (los más parecidos). El proceso de clasificación se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido a priori. En este estudio se decidió utilizar 12 clases para clasificar la superficie de trigo, y 7 para las superficies de algodónero y sorgo, respectivamente. El programa de cómputo que permitió realizar tanto la clasificación no supervisada como la supervisada fue PCI Geomatics®. El resultado de la clasificación no supervisada efectuada en la superficie de trigo se presenta en el Cuadro 2.

Los valores espectrales medios de las bandas TM2, TM3 y TM4, permitieron calcular una serie de valores de CE a través de las ecuaciones del Cuadro 1. A manera de ejemplo, se calcularon valores de CE con el modelo de regresión lineal múltiple de trigo del Cuadro 1, sustituyendo los valores espectrales del Cuadro 2 y mediante la ecuación obtenida en este estudio para correlacionar el rendimiento de trigo y la salinidad cuya estructura es: $R = 6.23 - 0.393CE_w$, donde: $r^2 = 0.82$ y CE_w = conductividad eléctrica ponderada en el estrato 0-60 cm (Pulido *et al.*, 2003a). El resultado se muestra en la Figura 1, en la que se puede distinguir que los valores de CE estimados con el modelo de regresión lineal múltiple fluctuaron entre 1.0 y 13.2 dS m⁻¹ y los obtenidos con datos de campo con el modelo de regresión lineal simple, entre 0.3 y 18.7 dS m⁻¹; la relación entre

los valores estimados con datos de campo y mediante la clasificación no supervisada resultó con una $r^2 = 0.98$.

Los valores de CE calculados se tomaron como referencia para generar una clasificación supervisada, en la cual se definieron cinco clases de salinidad: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y >16 dS m⁻¹. Se obtuvieron tres mapas parciales, uno para la superficie sembrada de trigo (48 250 ha), uno para la de algodónero (11 657 ha), y uno para la superficie de sorgo (11 539 ha). Los tres mapas o capas se integraron en un primer mapa parcial de salinidad del DR, de lo que resultó una superficie estudiada de 71 446 ha de las cuales 47 422 ha (66.4%) se clasificaron como salinas con una CE > 4 dS m⁻¹.

Obtención de los Mapas de Salinidad

La calibración del sensor electromagnético EM-38 permitió la obtención de los modelos estadísticos 2 (1996)

Cuadro 2. Resultado de la clasificación no supervisada realizada en la superficie de trigo, en el ciclo de siembra otoño-invierno 1995-1996.

Cluster	Cantidad de píxeles	Valor espectral medio		
		TM2	TM3	TM4
1	254 745	23.11	28.59	33.75
2	329 174	21.59	23.58	43.6
3	280 238	27.35	34.58	48.53
4	561 113	20.93	21.18	53.75
5	748 527	19.23	17.52	62.21
6	831 918	17.98	14.92	70.4
7	691 350	17.81	14.15	78.53
8	466 315	17.66	13.52	86.26
9	218 683	17.97	13.56	93.9
10	69 071	18.55	13.88	102.39
11	206	45.85	66.67	76.29
12	-	42.00	58.00	123.00

TM2 = reflectancia en el verde, 500 - 590 nm, TM3 = reflectancia en el rojo, 610 - 680 nm y TM4 = reflectancia en el infrarrojo cercano, 790 - 890 nm.

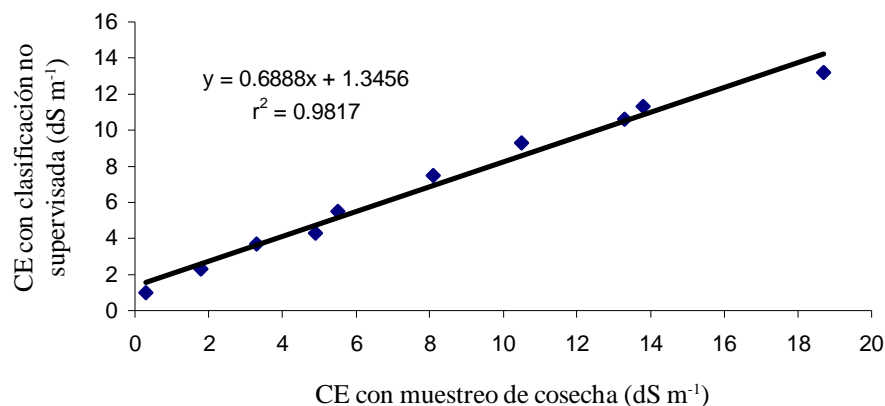


Figura 1. Relación entre la conductividad eléctrica (CE) estimada con datos de campo y la CE estimada a partir de la clasificación no supervisada.

y 3 (2001) para estimar la CE en el estrato 0-60 cm:

$$\text{Log CE}_a = 0.009\text{EM}_H + 0.002\text{EM}_V; r = 0.955; n = 70 \quad (2)$$

$$\text{Log CE}_a = 0.003\text{EM}_H + 0.005\text{EM}_V; r = 0.932; n = 71 \quad (3)$$

donde:

CE_a = conductividad eléctrica aparente;

EM_H = lectura del sensor en posición horizontal;

EM_V = lectura del sensor en posición vertical.

En 1996 las 206 lecturas y sus correspondientes coordenadas geográficas permitieron la generación de un mapa parcial de cinco clases de salinidad. Este mapa se manejó como una capa, misma que a través del programa Arc-Info se sobrepuso al mapa parcial de salinidad elaborado a partir de las imágenes de satélite. La sobreposición produjo un mapa de salinidad del área total del distrito de riego (Figura 2); las clases de salinidad se separaron mediante colores, utilizando el patrón de colores que se aplica en los mapas de salinidad del Distrito de Riego 041 Río Yaqui (De la Peña, 1982), con excepción de los suelos de quinta clase, ya que en este estudio se coloreó con cian en vez de café. Se cartografiaron 120 778 ha que es la superficie bruta del DR. La superficie ensalitrada, $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$, fue de 62 181 ha; esta superficie representó el 51.5% de la superficie total cartografiada. En la clase de $4\text{-}8 \text{ dS m}^{-1}$ se ubicó el 26.5% del área total; en la clase $8\text{-}12 \text{ dS m}^{-1}$ se clasificó el 16.0% del área total, y el área con una $\text{CE} > 12 \text{ dS m}^{-1}$ cubrió el 9% de la superficie bruta del distrito de riego (Cuadro 3). La superficie total cartografiada resultó mayor que la superficie de riego, de 96 951 ha, ya que la superficie bruta comprende tanto el área agrícola de riego como la superficie que se destina a usos del suelo diferentes a ésta.

Las áreas afectadas se ubicaron en los módulos de riego 1, 2, 5, 6, 8, 10 y 15 los cuales cubren las regiones sur y central del DR, donde se encuentran suelos de las series Jupateco, Moroncárit, Campo León, Huatabampo y Bacame; estas series comprenden suelos con problemas de salinidad, sodicidad y manto freático superficial (Reyes, 1994). En nueve estudios de salinidad analizada realizados entre los años 1971 a 1991 en el DR 038, se señala que las áreas afectadas por sales considerando la profundidad 0-60 cm se extienden en 45 000 ha (47% del área cartografiada) aproximadamente, y se localizan en las mismas áreas geográficas que se reportan en el presente estudio. Los 9 mapas generados se obtuvieron haciendo un pozo por cada 148 ha, en promedio (Pulido *et al.*, 2009).

Las 1066 lecturas que en total se realizaron con el sensor en 2001 se transformaron a valores de CE sustituyendo sus valores en el Modelo 2. Los valores de CE estimados para cada sitio, así como sus coordenadas geográficas, permitieron la generación de un mapa parcial georeferenciado de cinco clases de salinidad. El mapa se produjo mediante el programa Surfer®, generando isolíneas de CE; la interpolación de valores de CE se logró mediante el método Kriging; se utilizaron 5 clases de CE: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y $>16 \text{ dS m}^{-1}$.

Los resultados mostraron que la superficie cartografiada fue de 122 754 ha, considerando el estrato de 0-60 cm de profundidad, de las cuales 97 449 ha (79.4%) se clasificaron como no salinas ($\text{CE} < 4 \text{ dS m}^{-1}$) y 25 305 ha (20.6%) se clasificaron como suelo salino ($\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$) (Cuadro 4). La superficie total cartografiada en 2001 resultó mayor que la obtenida en 1996, debido a que en algunos módulos de riego se regó una superficie mayor que la programada en el ciclo

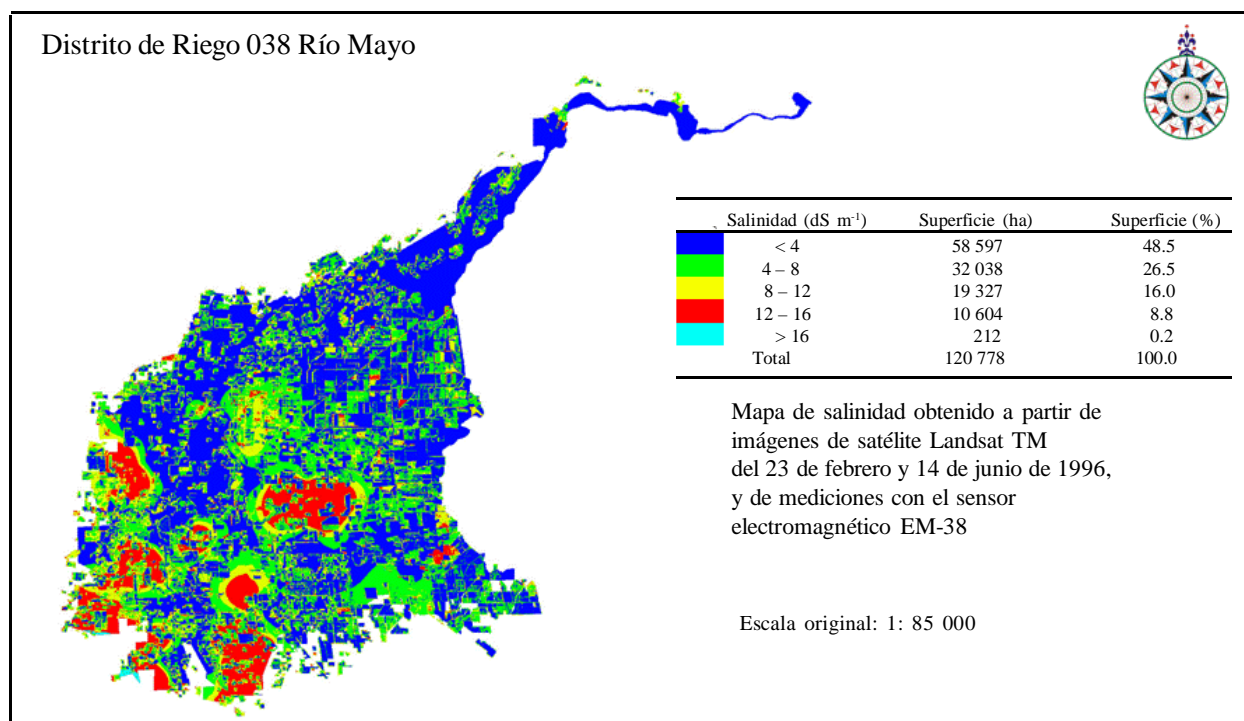


Figura 2. Mapa de salinidad del distrito de riego 038 obtenido en 1996.

de siembra otoño-invierno 2000-2001 (Pulido *et al.*, 2000). La superficie afectada se distribuyó entre los módulos de riego 1, 2, 5, 6, 8 y 15 ubicados en las regiones central y baja del DR (Figura 3). La clase de salinidad de 4-8 dS m⁻¹ fue la que ocupó mayor superficie tratándose del área ensalitrada, misma que cubrió el 10.5% del área cartografiada equivalente a 12 899 ha. Este rango de salinidad afecta el rendimiento de cultivos como maíz, papa, frijol, cempazúchitl, hortalizas y árboles frutales. El 10.1% de la superficie total afectada, equivalente a 12 406 ha, se clasificó con una CE > 8 dS m⁻¹; este valor de CE es restrictivo para la siembra de la mayoría de cultivos que se practican

Cuadro 3. Clasificación por salinidad del área del distrito de riego 038 Río Mayo, obtenida en 1996 mediante la aplicación de sensores remotos.

Salinidad	Superficie	
	ha	%
dS m ⁻¹		
< 4	58 597	48.5
4 - 8	32 038	26.5
8 - 12	19 327	16.0
12 - 16	10 604	8.8
> 16	212	0.2
Total	120 778	100.0

en el distrito de riego. Dentro del patrón de cultivos del Valle del Mayo, el trigo, algodón, cártamo, sorgo y zacate bermuda (*Cynodon dactylon*) son los que toleran entre 8-10 dS m⁻¹ de CE sin que su rendimiento potencial se reduzca menos del 10% (Ayers y Westcot, 1987).

Al comparar los mapas obtenidos en 1996 y 2001, se puede observar que en 2001 la superficie cartografiada con salinidad resultó menor (20.6% contra 51.5%). Sin embargo, debe señalarse que en 2001 únicamente se detectó la salinidad con el sensor EM-38, a diferencia del estudio de 1996 en el que se utilizaron en forma conjunta imágenes de satélite y un sensor electromagnético. Con las imágenes fue posible cartografiar con mayor detalle el área parcial del distrito, ya que el tamaño de un píxel es de 900 m²; sin embargo, debe destacarse que en el mapa que se obtuvo con la integración de las imágenes y el sensor EM-38, se distinguen grandes áreas con afectaciones salinas, producto de la baja densidad de mediciones con el sensor EM-38 en las zonas no cartografiadas con las imágenes. En el mapa producido en 1996 con el sensor EM-38 se sobreestimaron las áreas afectadas debido a la baja densidad de mediciones. Estas áreas resultaron de menor tamaño en 2001, en donde se utilizaron más sitios de medición con el sensor. En 1996 con el sensor se realizaron mediciones en 206 sitios, equivalentes

Cuadro 4. Clasificación por salinidad del área del distrito de riego 038 Río Mayo, obtenida en 2001 mediante la aplicación del sensor electromagnético EM-38.

Salinidad	Superficie	
	ha	%
dS m ⁻¹		
< 4	97 449	79.4
4 - 8	12 899	10.5
8 - 12	5 420	4.4
12 - 16	3 191	2.6
> 16	3 795	3.1
Total	122 754	100.0

a una medición por cada 586 ha, mientras que en 2001 se midió la salinidad en 533 sitios, una medición por cada 248 ha.

De la Peña (1982) señala que para obtener mapas de salinidad de áreas de 100 000 ha se recomienda tomar una muestra por cada 100 ha; si se considera dicha recomendación la cantidad de mediciones que debieron realizarse con el sensor es de 1200, que es una cantidad grande considerando aspectos prácticos, ya que significa mayores costos financieros y más tiempo para obtener un mapa de salinidad. Se considera que la cantidad de mediciones realizadas con el sensor en 2001

es adecuado, desde el punto de vista de calcular dicha cantidad tomando en cuenta la varianza entre una muestra de la población.

Para obtener el mapa de salinidad con imágenes de satélite y el sensor EM-38, en 1996 se requirieron alrededor de nueve meses; el costo para cartografiar las aproximadamente 121 000 ha, fue de \$520 000 (\$4.3 ha⁻¹). El mapa de salinidad obtenido en 2001 se realizó en un periodo de cinco meses; el costo por ha para cartografiar las 122 754 ha fue de \$ 1.7.

CONCLUSIONES

- Utilizando el sensor electromagnético EM 38 y el sistema global de posicionamiento, en el año 2001, se cartografiaron 122 754 ha considerando la profundidad 0-60 cm, de las cuales 25 305 ha (20.6%) se clasificaron como salinas (CE > 4 dS m⁻¹). Esta superficie resultó menor que la obtenida en 1996, de 62 181 ha (51.5%), en el cual la identificación de la salinidad se realizó mediante imágenes de satélite y el sensor EM-38. En ambos estudios la superficie afectada se distribuyó en los módulos de riego 1, 2, 5, 6, 8, 10 y 15, ubicados en las zonas baja y central del distrito; en estos módulos es donde los problemas de salinidad y manto freático

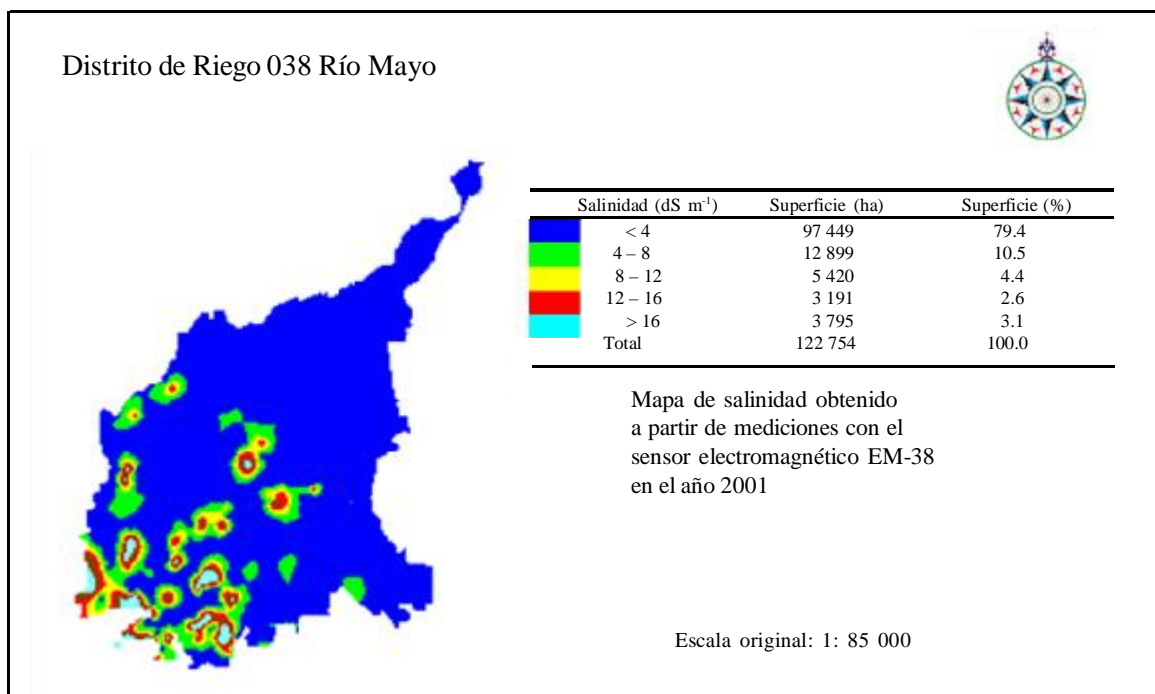


Figura 3. Mapa de salinidad del distrito de riego 038 obtenido en 2001.

superficial se han manifestado desde que el distrito de riego entró en operación, hace aproximadamente 40 años.

- El mapa de salinidad elaborado en 1996 con la integración del método de la planta indicadora y del sensor EM-38 y receptores del sistema global de posicionamiento (GPS) ofreció información de mayor detalle y calidad sobre la magnitud y ubicación de las áreas afectadas, excepto en las áreas no cubiertas por la imagen, que el obtenido en 2001 sólo con el sensor y un GPS.

- De los estudios realizados en 1996 y 2001 se pueden destacar cuatro aspectos. El primero es que no es posible desarrollar mapas de salinidad de toda el área del distrito de riego utilizando únicamente imágenes de satélite, debido a la diversidad de cultivos que se producen y a la existencia de áreas sin cultivo, por lo que es conveniente utilizar en forma combinada ambas herramientas.

- El segundo aspecto es que se requiere una mayor densidad de muestreo al utilizar solamente el sensor EM-38; en el mapa obtenido en 1996 se considera que se sobreestimó la superficie ensalitrada debido a la baja densidad de mediciones con el sensor EM-38.

- En tercer lugar destaca el aspecto de que es más rápido y menos costoso cartografiar la salinidad únicamente con el sensor electromagnético y un receptor GPS con respecto al uso conjunto de ambos métodos, por lo que dada la dinámica de salinización de los suelos, se recomienda cartografiar la salinidad cada dos años con el sensor EM-38 y cada cuatro años con el sensor en conjunto con las imágenes de satélite. El último aspecto a destacar es que es evidente que en 2001 la superficie afectada por sales resultó menor que en 1996.

- La información generada en el presente estudio puede ser de gran utilidad para planificar la rehabilitación de suelos ensalitrados, para ajustar el patrón de cultivos considerando la siembra de especies más tolerantes a las sales, y para adecuar el programa de uso del suelo considerando la tolerancia de los cultivos a la salinidad.

LITERATURA CITADA

Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje. No. 29. FAO, Roma, Italia.

De la Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. Boletín técnico No. 10, SARH. México, D. F.

Fernández G., R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra* 8: 226-240.

Hanson, B. R and S. R. Grattan. 1990. Field sampling of soil, water, and plants. pp. 186-200. *In*: Kenneth K. Tanji (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and reports on engineering practice No. 71. Am. Soc. Civil Engin. New York, NY, USA.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Drenaje y salinidad en zonas áridas y semiáridas. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.

Läuchli, A. and E. Epstein. 1990. Plant responses to saline and sodic conditions. pp. 113-137 *In*: Kenneth K. Tanji (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and reports on engineering practice No. 71. Am. Soc. Civil Engin. New York, NY, USA.

McNeill, J. D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Technical note TN-5. Geonics Ltd. Mississauga, ON, Canada.

Pulido M., L., C. L. Wiegand, C. Rodríguez Z. y S. Neck. 1997. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra* 15: 201-210.

Pulido M., L., B. Robles Rubio y O. Lemus Ramírez. 2000. Estimación mediante imagen de satélite Landsat TM, del área cultivada en el ciclo de siembra otoño-invierno en el Distrito de Riego 038. Informe interno. IMTA, Jiutepec, Morelos, México.

Pulido M., L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, O. X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 2003a. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ing. Hidrául. Méx.* 18: 83-97.

Pulido M., L., B. Robles Rubio, J. González Meraz y O. X. Cisneros Estrada. 2003b. Manual para identificación de salinidad del suelo y cartografía del rendimiento de cultivos con sensores remotos. IMTA, Jiutepec, Morelos, México.

Pulido M., L., J. González M. y M. Villarreal P. 2009. Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México. *Ing. Hidrául. Méx.* 24: 55-72.

Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojoa, Sonora, México.

Rhoades, J. D. 1993. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *Adv. Agron.* 49: 201-251.

Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch. 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Irrigation and Drainage Paper 57*. FAO. Rome, Italy.

Van Der Lelij, A. 1983. Use of an electromagnetic induction instrument (type EM38) for mapping of soil salinity. Internal report research branch. Water Resources Commission. New South Wales, Australia.

Wiegand, C. L. and A. J. Richardson. 1990. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. *Rationale. Agron. J.* 82: 623-629.

Wiegand, C. L., A. J. Richardson, D. E. Escobar, and A. H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sens. Environ.* 35: 105-119.

- Wiegand, C. L., J. H. Everitt, and A. J. Richardson. 1992a. Comparison of multispectral video and spot-1 HRV observations for cotton affected by soil salinity. *Int. J. Remote Sensing* 13: 1511-1525.
- Wiegand, C. L. and A. J. Richardson. 1992b. Relating spectral observations of the agricultural landscape to crop yield. *Food Struc.* 11: 249-258.
- Wiegand, C. L., J. D. Rhoades, D. E. Escobar, and J. H. Everitt. 1994. Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sens. Environ.* 49: 212-223.
- Wiegand, C. L., G. Anderson, S. Lingle and D. Escobar. 1996. Soil salinity effects on crop growth and yield –illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *J. Plant Physiol.* 148: 418-424.