

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sensores remotos y SIG para estudiar la producción de cosechas en suelos afectados por sales y con drenaje deficiente.
<i>Autor / Adscripción</i>	Leonardo Pulido Madrigal Jorge González Meraz Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jorge Luis López de Santa Ana Comisión Nacional del Agua, México
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 23(1): 45-56
<i>Fecha de publicación</i>	2008
<i>Resumen</i>	Se realizó un estudio con los objetivos de generar los mapas de salinidad del suelo, salinidad y drenaje deficiente, y rendimiento del Distrito de Riego 075, con la aplicación de imágenes de satélite, un sensor de inducción electromagnética y sistemas de información geográfica (SIG). A partir modelos de regresión, para estimar la salinidad y el rendimiento, se realizaron clasificaciones supervisadas de las imágenes para obtener un primer mapa parcial de salinidad y generar mapas de rendimiento. Se analizó la relación entre la salinidad y el rendimiento para estimar la disminución de producción en los cultivos estudiados.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/853

Sensores remotos y SIG para estudiar la producción de cosechas en suelos afectados por sales y con drenaje deficiente

Leonardo Pulido-Madrigal
Jorge González-Meraz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Jorge Luis López de Santa Ana

Comisión Nacional del Agua, México

Se realizó un estudio con los objetivos de generar los mapas de salinidad del suelo, salinidad y drenaje deficiente, y rendimiento del Distrito de Riego 075, con la aplicación de imágenes de satélite, un sensor de inducción electromagnética y sistemas de información geográfica (SIG). En lotes afectados por salinidad sembrados con cultivos extensivos se tomaron muestras de suelo para analizar su salinidad ($CE, dS \cdot m^{-1}$) y muestras de cosecha para estimar rendimiento, y se extrajeron de imágenes Landsat TM los valores espectrales de las bandas TM2 (verde), TM3 (rojo) y TM4 (infrarrojo cercano), con lo cual se generaron modelos de regresión para estimar la salinidad y el rendimiento. A partir de estos modelos se realizaron clasificaciones supervisadas de las imágenes para obtener un primer mapa parcial de salinidad y generar mapas de rendimiento. La salinidad del distrito que no fue cartografiada con las imágenes se estudió in situ con un sensor electromagnético equipado con un aparato geoposicionador para producir un segundo mapa parcial de salinidad. Con la integración de ambos mapas de salinidad se obtuvo un mapa definitivo del distrito de riego, mismo que se utilizó como base para sobreponer los mapas relacionados con problemas de drenaje, y se elaboró un mapa de áreas con problemas de salinidad y drenaje. Se analizó la relación entre la salinidad y el rendimiento para estimar la disminución de producción en los cultivos estudiados.

Palabras clave: distrito de riego, salinidad del suelo, manto freático superficial, cultivos, rendimiento, imagen de satélite, sensor electromagnético, mapa de salinidad, mapa de rendimiento.

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 distritos de riego son las zonas agrícolas más productivas, la salinidad es considerada un problema serio, ya que aproximadamente entre el 20 y el 30% del área está afectada por exceso de sales en diferente grado (Fernández, 1990; De la Peña, 1993).

Esta situación influye para que se obtengan bajos rendimientos, se subutilice la infraestructura hidroagrícola y se genere desempleo, entre otras consecuencias.

Como resultado de la dinámica del proceso de salinización en los suelos, se requiere de métodos que proporcionen resultados a corto plazo para estimar el rendimiento de los cultivos con propósitos de planeación, a fin de establecer el patrón de cultivos, la proyección del mercadeo y conocer el potencial de producción del suelo, ya que la salinidad afecta de forma diferencial a cada cultivo.

En los distritos de riego, el patrón de cultivos se modifica continuamente debido a razones de mercado y a que desde el gobierno se promueve la siembra de cultivos, sin tomar en cuenta su tolerancia a la salinidad. Por estos motivos se considera importante el desarrollo y aplicación de métodos que permitan estimar de una manera confiable y rápida el rendimiento, a fin de conocer el potencial productivo de las parcelas existentes en un DR, considerando los cultivos dominantes.

El Distrito de Riego (DR) 075 Río Fuerte es uno de los más afectados del país por problemas de salinidad y drenaje, pues aproximadamente el 22% de su área presenta problemas de este tipo (De la Peña, 1993). Para identificar la salinidad, tradicionalmente se obtienen en forma manual muestras de suelo mediante una cuadrícula de uno o dos kilómetros, para elaborar mapas de salinidad analizada; sin embargo, esta labor representa mucho tiempo y costo, lo cual limita la actualización de los mapas de salinidad.

Los objetivos de esta investigación son los siguientes:

- 1) identificar, mediante la aplicación de imágenes de satélite, un sensor de inducción electromagnética y el sistema de posicionamiento global (GPS), las áreas con problemas de salinidad del Distrito de Riego 075 Río Fuerte, y generar un mapa de clases de salinidad;
- 2) identificar, a través del análisis de información cartográfica relacionada con drenaje, las áreas que presentan necesidades de rehabilitación de suelos;
- 3) analizar el impacto de la salinidad en el rendimiento y la producción de los principales cultivos.

En general, los suelos o muestras de suelo se consideran salinos cuando la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) es mayor que $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos, 1974). Cultivos sensibles a las sales, tales como maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), empiezan a verse afectados cuando la CEe es de alrededor de $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. El rendimiento de cultivos tolerantes a las sales, como el algodón y el sorgo para grano, empieza a disminuir con valores de CEe de entre $4\text{-}6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y el suelo está estéril a partir de $16\text{-}20 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de salinidad (Ayers y Westcot, 1987; Maas y Hoffman, 1977).

Existen contrastes en la reflectancia entre las plantas verdes, el suelo y el agua, en el intervalo de longitud de onda entre 400 y $2\ 500 \text{ nm}$. La reflectancia del suelo típicamente aumenta en forma gradual con el incremento de la longitud de onda en este intervalo si el suelo está seco. Sin embargo, el agua absorbe fuertemente en el intervalo infrarrojo entre $1\ 350$ y $2\ 500 \text{ nm}$, de tal forma que los suelos secos y húmedos difieren marcadamente en su reflectancia. La clorofila y otros pigmentos en las plantas vivientes fuertemente absorben la luz de choque

(radiación electromagnética) en el rango de longitud de onda visible (400 a 700 nm). En la región del infrarrojo cercano (750 a $1\ 350 \text{ nm}$), la hoja de un cultivo típico refleja aproximadamente el 45% y transmite cerca del 45% de la radiación electromagnética. En doseles de plantas, parte de la energía transmitida por las hojas más altas es reflejada y transmitida por las hojas que están bajo ellas. En consecuencia, mientras más sano está el cultivo y a mayor cantidad de capas de hojas en su dosel, se observa una más alta reflectancia. Los sensores ópticos para el estudio de cultivos son las longitudes de onda en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio; los sensores son las imágenes de satélite, fotografía y videografía (Wiegand y Richardson, 1992a).

Wiegand *et al.* (1992b, 1994 y 1996) en estudios realizados en California y Texas, Estados Unidos, utilizaron parcelas de observación de 15, 36 y 59 hectáreas cultivadas con algodón (*Gossypium hirsutum*) y caña de azúcar, en las que obtuvieron datos de salinidad y parámetros fisiológicos en sitios de muestreo para calibrar imágenes del 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 pixels 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 ($500\text{-}590 \text{ nm}$), rojo ($610\text{-}680 \text{ nm}$) e infrarrojo cercano ($790\text{-}890 \text{ nm}$). El conteo de beyotas que se realizó en alrededor de veinte sitios por parcela se convirtió a rendimiento de fibra y se correlacionó con la salinidad. El rendimiento de fibra disminuyó $43 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ por cada unidad de aumento de la salinidad del suelo, equivalentes a 52 dólares/ha a precios de mercado del algodón.

Estos autores analizaron la relación entre la salinidad y el rendimiento de caña de azúcar, y encontraron que por cada $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ que aumentó la salinidad en la zona radical, se redujo el rendimiento en $22 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Concluyeron que la caña de azúcar es una planta muy sensible a la salinidad, que la videografía es una buena técnica para caracterizar el desarrollo de la cobertura vegetal y el rendimiento, y que la combinación de datos obtenidos en las parcelas de calibración, las observaciones espectrales y las clasificaciones de las imágenes llevadas a cabo son muy prácticas y útiles para medir el efecto de la salinidad del suelo en la caña de azúcar y otros cultivos.

Pulido *et al.* (1997a, b; 1998; 2003), en estudios realizados para identificar la salinidad del suelo en

los DR 076 Valle del Carrizo, 041 Río Yaqui y 038 Río Mayo, adaptaron la metodología descrita por Wiegand *et al.* (1992b, 1994 y 1996). Con este propósito utilizaron como indicadores de la salinidad al trigo (*Triticum aestivum*), algodón y sorgo (*Sorghum bicolor*), que son sembrados extensivamente. Aplicaron imágenes de satélite Landsat TM, con las que se obtuvieron modelos estadísticos para estimar la salinidad y el rendimiento de las parcelas sembradas con estos cultivos, y para generar mapas de salinidad y rendimiento; los modelos estadísticos se generaron con el análisis de 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). La superficie estudiada en el Valle del Carrizo fue de 19 387 ha, de las cuales 6 927 ha (35%) se clasificaron como suelo salino. En el DR 041 se cartografiaron 140 545 ha, de las cuales 80 745 ha (57.6%) presentaron problemas de salinidad, $CE > 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. En el DR 038 se estudiaron 71 446 ha, de las cuales 47 422 ha (66.4%) resultaron con salinidad.

En estudios con imágenes de satélite en los DR 076 Valle del Carrizo, 041 Río Yaqui y 038 Río Mayo, se concluyó que las imágenes empleadas para identificar la salinidad son útiles también para estimar y cartografiar el rendimiento. El análisis de las áreas afectadas y del rendimiento permite estimar el impacto de la salinidad en el rendimiento y la producción. Así, en los tres distritos estudiados, se estimó que la disminución de producción de trigo fue de 104 100 ton, de algodón de 8 900 ton, y de sorgo de 28 100 ton, haciendo un total de 141 100 toneladas, equivalentes al 14% de la producción estimada de 1 010 200 toneladas (Pulido *et al.*, 2003). La metodología aplicada en los distritos de riego Valle del Carrizo, Río Yaqui y Río Mayo, se denomina Metodología de la Planta Indicadora (Wiegand *et al.*, 2005).

En el DR 038 se complementó la tecnología de imágenes de satélite con el uso de un sensor de inducción electromagnética EM-38 para cartografiar el área total del distrito. Tanto en este distrito de riego como en el DR 041, los mapas de salinidad producidos se utilizaron para analizar, mediante los sistemas de información geográfica, la cartografía básica relacionada con drenaje (mapas de isobatas, mapas de isohipsas, red de conducción del agua, red de drenaje y mapa de topografía). Mediante este análisis se elaboraron mapas que son útiles para la planificación de acciones de rehabilitación de suelos (Pulido *et al.*, 1997b y 1998).

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante 1998 en el DR 075 Río Fuerte, Sinaloa, el cual se localiza en la parte norte del estado,

entre los municipios de El Fuerte, Ahome, Guasave y Sinaloa de Leyva, entre las coordenadas $25^{\circ} 20'$ y $26^{\circ} 05'$ de latitud norte, y entre $108^{\circ} 25'$ y $109^{\circ} 25'$ de longitud oeste (ilustración 1). Presenta una altura media de 15 metros sobre el nivel del mar. Ocupa una superficie bruta de 326 578 ha, de las cuales son regables 236 231 ha, en virtud de que existen algunas áreas con problemas de salinidad, desniveladas y enmontadas.

Se recopiló en los archivos del DR 075 la cartografía básica, consistente en mapas de infraestructura de canales, drenes, caminos, poblados, división de módulos de riego, isobatas, y catastral; posteriormente, estos mapas se digitalizaron para su análisis. Asimismo, se elaboraron en forma manual los mosaicos de cultivo por módulo de riego de los ciclos otoño-invierno (O-I) 1998-1999, y primavera-verano (P-V) 1999.

Muestreo de suelo y planta y medición de la salinidad in situ

Se seleccionaron 17 parcelas cultivadas para calibrar las imágenes de satélite de aproximadamente 10 ha cada una, afectadas por salinidad, sembradas de maíz de los ciclos de O-I y P-V, trigo (*Triticum aestivum*), sorgo (*Sorghum bicolor*) y algodón (en lo sucesivo se les llamará parcelas de calibración). Las parcelas estuvieron localizadas en los módulos de riego con mayores problemas de salinidad: Guasave, Fuerte, Leyva Solano, Juncos, Taxtes, Sevelbampo, Pascola y Cahuinahua. La selección de estos cultivos como indicadores de la salinidad obedeció a que el maíz es el cultivo más

Ilustración 1. Ubicación del Distrito de Riego 075 Río Fuerte.



extensivo en el distrito, y los otros cultivos son tolerantes y semitolerantes a la salinidad. Se tomaron muestras de suelo en marzo y julio, cuando las plantas estaban en sus etapas de floración, e inicio de formación de fruto, a profundidades de 0-30 y 30-60 cm para analizar su conductividad eléctrica. En la etapa de madurez de cosecha se tomaron muestras de planta en 1 m² de superficie, en los sitios de muestreo, para evaluar el rendimiento.

El valor de CE considerado fue el resultado de ponderar su contenido en los estratos 0-30 y 30-60 cm, mediante la siguiente ecuación:

$$CE_w = 0.6CE_1 + 0.4CE_2 \quad (1)$$

Donde CE_w es la CE (dS·m⁻¹) ponderada del estrato 0-60 cm; CE_1 es la CE del estrato 0-30 cm; CE_2 es la conductividad eléctrica del estrato 30-60 cm.

Para localizar las parcelas de calibración en las imágenes de satélite, se utilizó un equipo del sistema global de posicionamiento (GPS, marca Garmin, modelo 100 SRVY II), con el que se determinaron las coordenadas geográficas de latitud y longitud en todos los sitios de muestreo. Con las lecturas registradas se hizo un postprocesamiento y se obtuvieron valores corregidos más precisos.

En el área del DR que no se estudió con las imágenes, la salinidad (conductividad eléctrica, CE, dS·m⁻¹) se detectó con un sensor de inducción electromagnética EM-38 de Geonics Limited, el cual se utilizó y calibró de acuerdo con Van Der Lelij (1983) y Rhoades (1992). El sensor se calibró *in situ* en forma previa a su uso extensivo en las mismas parcelas utilizadas para calibrar las imágenes de satélite, para lo cual se tomaron muestras de suelo a 0-30 y 30-60 cm de profundidad, a fin de analizar su salinidad, y se tomaron lecturas con el aparato en posiciones vertical (EM_v) y horizontal (EM_h) a dos alturas sobre la superficie del suelo: primero a 120 cm para medir la CE del estrato 0-30 cm y después a 90 cm para medir la salinidad del estrato 0-60 cm. Con los datos de la CE y con las lecturas instrumentales se realizó una correlación y se obtuvo un modelo para estimar la conductividad eléctrica.

Para identificar la salinidad con el sensor EM-38 se realizaron mediciones extensivas, por lo que se tomaron lecturas en 620 sitios distribuidos en el distrito de riego. Simultáneamente a la toma de lecturas, se midieron con un GPS la latitud y longitud de cada uno de los sitios de medición. Dichos sitios fueron ubicados geográficamente, asignándoles los valores correspondientes de CE estimados, con los cuales se realizó una interpolación de valores para delimitar áreas con diferentes niveles de

afectación por salinidad, dando por resultado un mapa de salinidad con las clases 0-4, 4-8- 8-12, 12-16 y > 16 dS·m⁻¹.

Obtención de modelos estadísticos y procesamiento de las imágenes de satélite

La información espectral fue obtenida del análisis digital de cuatro imágenes de satélite Landsat TM, de las cuales dos fueron tomadas el 5 y 12 de febrero de 1998; las otras dos imágenes de las mismas escenas se tomaron el 3 y 12 de mayo del mismo año. Las imágenes Landsat incluyen siete bandas, de las cuales se utilizaron las bandas TM2, TM3 y TM4. La amplitud de la sensibilidad al reflejo de la luz de estas bandas es coincidente con la amplitud de las bandas XS 1, XS 2 y XS 3, respectivamente, del satélite Spot 4 (Spot Image Corporation, 1998).

Las escenas fueron georreferenciadas con el GPS mediante mediciones de las coordenadas geográficas en puntos de control ubicados en campo. Las parcelas de calibración se localizaron en las imágenes y se extrajeron los valores espectrales de cada una de las tres bandas referidas.

Los valores espectrales y los datos de salinidad y rendimiento de las parcelas de observación se correlacionaron con los datos de campo de los sitios muestreados para obtener modelos que estimaran la CE y el rendimiento en el resto del área de estudio. Se realizó una clasificación espectral no supervisada, en la que se agruparon los píxeles en 12 clases por su valor de reflectancia; se obtuvo un reporte con los valores espectrales medios de cada banda. Luego se realizó una clasificación supervisada, misma que consistió en agrupar los píxeles en función de los modelos de CE y rendimiento introducidos al *software*, de acuerdo con límites de clase preestablecidos de CE y rendimiento. Mediante la clasificación supervisada se crearon cinco mapas de salinidad y cinco mapas de rendimiento; a cada cultivo correspondió un mapa de cada tipo. Los mapas de salinidad por cultivo se integraron para formar un primer mapa parcial.

El mapa definitivo de salinidad se obtuvo con la integración de los mapas creados con mediciones hechas con el sensor EM-38. La edición del mapa se hizo utilizando las cinco clases de salinidad referidas.

Los datos de salinidad y rendimiento colectados en las parcelas de calibración se analizaron estadísticamente para medir el grado de relación entre estas variables, y así se desarrollaron cinco modelos con los que se estimó la disminución de rendimiento en función de la salinidad. A partir de estos modelos y de la información

de los mapas de salinidad y rendimiento, se calculó la pérdida de producción causada por la salinidad.

Los mapas de isobatas del mes de noviembre de 1995, el de la red de distribución y de drenaje, y el general del DR, se digitalizaron para formar capas en un sistema de información geográfica, mismas que se superpusieron para generar un mapa de áreas con problemas de drenaje y de salinidad, con lo cual se delimitaron aquellas áreas con salinidad mayor que $8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y manto freático de 0-1.5 m de profundidad, dando por resultado un mapa que muestra las áreas con mayores problemas de salinidad y que están afectadas por manto freático superficial; este mapa es denominado de necesidades de rehabilitación de suelos.

Resultados

Obtención del mapa parcial de salinidad y de los mapas de rendimiento a través de las imágenes

En el maíz de O-I se observaron valores de CE desde 1.1 hasta $30.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; en maíz de P-V hubo valores de CE desde 1.1 hasta $18.9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; en trigo, los valores fluctuaron entre 1.5 y $29.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; en sorgo, variaron desde 0.7 hasta $16.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, y en algodón desde 2.4 hasta $13.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Los valores espectrales de las bandas en el verde (TM2), rojo (TM3) e infrarrojo cercano (TM4) se correlacionaron con los valores ponderados de CE en el estrato 0-60 cm y se obtuvieron los modelos de regresión del cuadro 1.

Los coeficientes de correlación obtenidos en los cinco modelos variaron desde 0.67 hasta 0.85, por lo que en el trigo su magnitud fue inferior a la de los modelos desarrollados en otros distritos de riego; esto pudo deberse a que hubo diferencias en las fechas de siembra entre las parcelas de calibración, lo cual repercutió en una falta de uniformidad (y en el desarrollo

de las plantas cuando se tomaron las imágenes. En la imagen de satélite, esta desigualdad se tradujo en diferentes valores de reflectancia, para condiciones de salinidad similares. El trigo es el único cultivo que se ha utilizado como indicador en todos los estudios realizados, en los que se ha aplicado la metodología de la planta indicadora (Pulido *et al.*, 1997a, b; 1998, y 2003; Wiegand *et al.*, 2005).

El coeficiente de correlación del algodón ($r=0.67$) fue similar al obtenido en el DR 041 Río Yaqui ($r=0.65$) e inferior al reportado para el DR 038 Río Mayo ($r=0.80$) (Pulido *et al.*, 2003). Una posible explicación de esta diferencia es que en el algodón, el periodo de floración es indefinido, lo que dificulta precisar la fecha de toma de la imagen, que de acuerdo con la experiencia adquirida, debió ser entre junio y julio. En este caso, las imágenes adquiridas se tomaron el 3 y 12 de mayo. Además, el manejo del cultivo fue deficiente por cuanto a la presencia de maleza, fecha de siembra, y al uso de semilla de diferentes variedades, cuyos hábitos de crecimiento difirieron entre sí.

Comparativamente, el coeficiente de correlación obtenido para calibrar las imágenes con los datos de las parcelas de sorgo fue inferior ($r=0.71$) al obtenido en el DR 038 ($r=0.73$) (Pulido *et al.*, 2003). La magnitud de este valor pudo deberse a que las parcelas utilizadas en el presente estudio, en general tuvieron un manejo agronómico inadecuado, que se reflejó en el deficiente desarrollo que tenían las plantas cuando se tomó la imagen y que repercutió en el rendimiento de grano que produjeron.

El maíz como indicador de la salinidad no se había reportado en estudios de este tipo, por lo que no hay antecedentes que permitan comparar el modelo del cuadro 1. Este cultivo es el más extensivo del DR 075, además de que se produce tanto en el ciclo de O-I como en el de P-V. Su periodo de siembra es muy amplio, particularmente en el ciclo O-I (su fecha de siembra abarcó desde octubre hasta enero), aspecto que dificulta

Cuadro 1. Modelos de regresión para estimar la salinidad del suelo, elaborados a partir de valores espectrales y datos de conductividad eléctrica.

Cultivo	Ecuación de regresión ¹	F _{0.05}		r	n
		Fc	Ft		
Maíz de O-I	$CE_w^1 = 5.071 - 0.240TM2 + 0.835TM3 - 0.145TM4$	31.893*	2.719	0.75	79
Trigo	$CE_w = 28.937 - 1.683TM2 + 0.867TM3 - 0.070TM4$	12.230*	2.839	0.68	47
Algodonero	$CE_w = 17.076 + 0.281TM2 - 0.216TM3 - 0.151TM4$	15.070*	2.758	0.67	53
Maíz de P-V	$CE_w = 5.186 - 0.189TM2 + 0.283TM3 - 0.072TM4$	33.556*	2.845	0.85	39
Sorgo	$CE_w = 3.632 - 0.897TM2 + 0.683TM3 + 0.041TM4$	10.460*	2.922	0.71	34

¹CE_w = conductividad eléctrica ponderada en el estrato 0-60 cm, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$; 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.

su estudio con imágenes de satélite. No obstante lo anterior, los valores de los coeficientes de correlación fueron de los más altos, particularmente en maíz de P-V. Posiblemente ello está relacionado con el hecho de que el maíz cubre rápidamente con su follaje la superficie del terreno, y esta cualidad permite separar en una imagen, por su reflectancia, las áreas ensalitradas (menos biomasa) de las que no lo están. El periodo de siembra del maíz sembrado en P-V es más corto que el del maíz de O-I, lo cual puede ser factor de mayor uniformidad en el desarrollo de las plantas. Debe observarse que para estudiar este cultivo se tomó la imagen de satélite a principios de febrero, cuando algunas plantas estaban en floración, otras empezaban la maduración de fruto, y otras más en la etapa vegetativa.

La tolerancia a la salinidad de los cultivos utilizados como indicadores es variable, ya que el algodón es tolerante, el trigo y sorgo son semitolerantes, y el maíz es moderadamente sensible (Ayers y Westcot, 1987). Esta cualidad es importante, puesto que mientras más tolerante es un cultivo, es más probable que produzca biomasa aérea en suelos con altos contenidos de salinidad, lo cual amplía el rango de valores altos de salinidad, que son necesarios para cartografiar áreas ensalitradas.

La correlación de los datos de rendimiento con los valores espectrales produjo los modelos de regresión del cuadro 2. Los valores de correlación de los modelos de los cultivos estudiados en otros distritos (trigo, algodón y sorgo) resultaron más bajos que los obtenidos en el DR 075.

En la magnitud de los valores de correlación posiblemente tuvo que ver la dificultad para obtener imágenes de satélite tomadas en las fechas más adecuadas; los amplios periodos de siembra (en trigo abarca desde principios de noviembre hasta principios de enero), así como el manejo deficiente de las parcelas utilizadas para el muestreo de suelo y rendimiento. En

este tipo de estudios, un supuesto es que las parcelas de calibración de las imágenes reciben buen manejo, a pesar de los contenidos altos de sales que limitan tanto el desarrollo de las plantas como la obtención de altos rendimientos agronómicos; en estas parcelas, el factor más limitante de la producción es la salinidad (ver cuadro 7), sin demérito de otros factores, como fecha de siembra, riegos oportunos y con láminas en cantidades suficientes, y control de plagas, entre otros. No es común que parcelas ensalitradas reciban un buen manejo por parte de los productores, quienes saben que no obtendrán buenas cosechas. Al comparar los modelos de los cuadros 1 y 2, se encontró una mayor correlación para estimar salinidad que rendimiento, debido posiblemente a que el rendimiento está muy ligado con el manejo de los factores de la producción.

Los modelos de regresión de los cuadros 1 y 2 reflejan la variabilidad de condiciones de clima, suelo y manejo de los cultivos que existen en el DR. En estudios de este tipo, en donde se presenten casos de cultivos con un amplio periodo de siembra, como el maíz de O-I, se tendrían que tomar por lo menos dos escenas para cartografiar el área ocupada por éste y, en consecuencia, el costo del estudio se incrementaría.

En la clasificación no supervisada se utilizaron de siete a 12 clases, lo que dio por resultado un reporte con los valores medios de reflectancia para cada clase, para las bandas 2, 3 y 4. Estos valores fueron sustituidos en los modelos de los cuadros 1 y 2, para estimar así la CE y el rendimiento de manera extensiva. En maíz de O-I se estimaron valores de CE de 0 hasta 22 dS.m⁻¹, y de rendimiento de 0 hasta 10.7 ton.ha⁻¹. En maíz de P-V se estimaron valores de CE desde 0 hasta 9 dS.m⁻¹, y de rendimiento desde 0 hasta 10 ton.ha⁻¹. En sorgo se estimaron valores de CE desde 0 hasta 16 dS.m⁻¹, y de rendimiento desde 0 hasta 7 ton.ha⁻¹. En algodón se estimaron valores de CE que variaron desde 0 hasta 8 dS.m⁻¹, y valores de rendimiento que fluctuaron entre

Cuadr□
datos de rendimiento.

Cultivo	Ecuación de regresión ¹	F _{0.05}		r	n
		Fc	Ft		
Maíz de O-I	R = 15.094 - 0.489TM2 - 0.191TM3 + 0.083TM4	18.791*	2.719	0.65	79
Trigo	R = -5.178 + 0.459TM2 - 0.212TM3 + 0.042TM4	10.493*	2.790	0.67	47
Algodonero	R = 1.638 - 0.141TM2 + 0.065TM3 + 0.034TM4	9.029*	2.790	0.60	53
Maíz de P-V	R = 1.004 - 0.285TM2 + 0.071TM3 + 0.123TM4	20.143*	2.845	0.78	39
Sorgo	R = -0.975 + 0.272TM2 - 0.233TM3 + 0.049TM4	5.763*	3.708	0.68	34

R = rendimiento, ton.ha⁻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.

uno y 4 ton.ha⁻¹. Finalmente, en trigo, la CE estimada varió entre 2 y 11 dS.m⁻¹, y el rendimiento entre uno y 5 ton.ha⁻¹.

Con los modelos de regresión del cuadro 1 y las clases de salinidad establecidas, se generó un mapa de salinidad por cultivo; el área estudiada se clasificó como se indica en el cuadro 3.

Los cinco mapas individuales se integraron para disponer de un primer mapa parcial de salinidad. Como resultado se obtuvo un área cartografiada de 135 033 ha, la cual estuvo dividida en superficies ocupadas por maíz de O-I (62.6%), maíz de P-V (20.9%), trigo (2.3%), sorgo (11.1%), y algodón (3.1%); de esta superficie, 75 731 ha (56.08%) se clasificaron como salinas, CE > 4 dS.m⁻¹ y 59 303 ha (43.9%) como no salinas, CE < 4 dS.m⁻¹ (cuadro 4).

En el DR 075, generalmente se siembra más superficie durante el ciclo O-I, que en el ciclo P-V. En 1997/1998 se reportaron 210 122 ha sembradas, repartidas en un patrón aproximado de veinte cultivos. Parte de esta superficie se sembró con cultivos de otoño (159 000 ha). En P-V se reportó una superficie sembrada de 51 000 ha, con un patrón de cultivos de aproximadamente cinco. Por lo tanto, la superficie cartografiada con imágenes de satélite (135 000 ha) representó el 64.3% del área regada durante el periodo del estudio, y cubrió el 57.14% del área regable del DR 075 (con base en 236 578 ha).

Para validar la información del mapa de salinidad, cuya clasificación se señaló en el cuadro 4, se realizaron mediciones de salinidad (CE, dS.m⁻¹) en 43 sitios del distrito de riego, en diferentes parcelas, en las que se sembró maíz de P-V; las mediciones consistieron en tomar muestras de suelo a la profundidad de 0-60 cm para medir la salinidad en el laboratorio; el muestreo del suelo se llevó a cabo en octubre de 1998. Los datos de CE medidos y los valores estimados, registrados en el mapa de salinidad, se correlacionaron, con lo que se obtuvo un modelo de regresión, r² = 0.75, y se elaboró una gráfica de dispersión (ilustración 2); en la prueba de

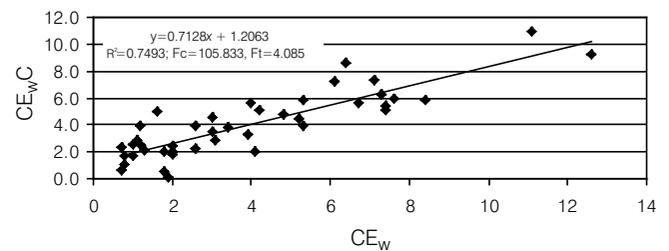
F realizada (F_{0.05}), resultó que Fc = 105.833 (F calculada) y Ft = 4.085 (F de tablas), por lo que los valores de salinidad estimados a través de las imágenes de satélite son confiables.

Para clasificar por rendimiento las subimágenes, se siguió el mismo procedimiento que con la salinidad. Como resultado de la clasificación se obtuvieron mapas de rendimiento, uno por cultivo. El maíz de O-I se clasificó en seis clases de rendimiento (cuadro 5). De las 84 489 ha de maíz cartografiadas, 26 259 ha (31%) rindieron menos de 3.0 ton.ha⁻¹; el rendimiento medio estimado fue de 6.49 ton.ha⁻¹, que fue inferior al de 8.07 ton.ha⁻¹ reportado en el ciclo agrícola O-I 96-97 (información proporcionada por la Red del Valle del Fuerte); la

Cuadro 4. Clasificación por salinidad de la superficie estudiada con imágenes de satélite.

Clase, dS.m ⁻¹	(ha)	(%)
0 - 4	59 302	43.9
4 - 8	30 350	22.5
8 - 12	15 200	11.2
12 - 16	9 519	7.0
> 16	20 662	15.3
Total	135 033	99.9

Ilustración 2. Relación entre la conductividad eléctrica observada (CE_w) y la estimada (CE_{wC}), en sitios distribuidos en el distrito de riego.



Cuadr □ **satélite.**

Salinidad, dS.m ⁻¹	Cultivo indicador de la salinidad									
	Maíz de O-I		Maíz de P-V		Trigo		Sorgo		Algodonero	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
0-4	25 062	29.7	20 045	70.9	906	28.9	10 863	72.5	2 426	58.3
4-8	19 453	23.0	5 081	18.0	1 515	48.4	2 655	17.7	1 646	39.5
8-12	10 373	12.3	2 963	10.5	568	18.1	1 206	8.0	90	2.2
12-16	9 026	10.7	187	0.6	138	4.4	167	1.1	1	-
> 16	20 576	24.3	-	-	3	0.06	84	0.6	-	-

producción estimada de maíz fue de 548 135 ton. En el maíz de P-V, el rendimiento medio estimado fue de 6.78 ton·ha⁻¹, que resultó superior al reportado en el ciclo de siembra inmediato anterior de 6.0 ton·ha⁻¹. En trigo, el rendimiento medio estimado fue de 4.08 ton·ha⁻¹, que fue casi igual al registrado en el ciclo de cultivo 96-97 de 4.09 ton·ha⁻¹. De algodón se clasificaron 4 163 ha en tres categorías; se estimó un rendimiento medio de 3.58 ton·ha⁻¹, a diferencia de 3.13 ton·ha⁻¹ registradas en el ciclo inmediato anterior. La producción total estimada de algodón con semilla fue de 14 928 ton. En sorgo se estimó un rendimiento medio de 4.06 ton·ha⁻¹, inferior a las 5.67 ton·ha⁻¹ registradas en el mismo distrito en el ciclo 1996-1997. La producción total estimada de sorgo fue de 60 790 toneladas. La producción estimada para los cinco cultivos fue de 828 500 toneladas.

Los valores de rendimiento obtenidos en estas clasificaciones tienen congruencia con los de la clasificación no supervisada, y con la información

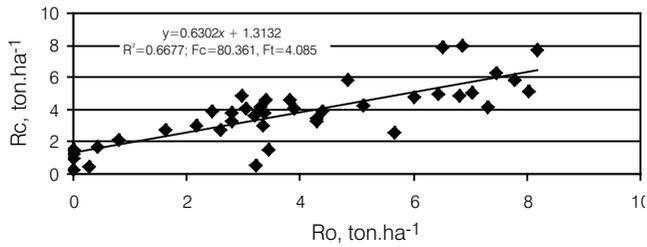
de cosechas reportada por el DR, por lo que se considera que los mapas de rendimiento son confiables, y pueden ser utilizados para los programas de operación y conservación que llevan a cabo las autoridades de los módulos de riego y del DR 075.

Se realizó una verificación del mapa de rendimiento de maíz de P-V, a través de una encuesta llevada a cabo en octubre de 1998 entre los propietarios de 42 parcelas, para comparar los datos de rendimiento obtenidos por los productores con los datos estimados mediante las imágenes de satélite. Los datos se analizaron estadística y gráficamente (ilustración 3); tanto el valor de r² del modelo (r² = 0.67) obtenido como la prueba de F_{0.05} realizada [Fc = 80.361 (F calculada) y Ft = 4.085 (F de tablas)], permiten concluir que los valores de rendimiento estimados a través del análisis de imágenes de satélite son confiables.

**Cuadro □
imágenes de satélite.**

Cultivo	Rendimiento (ton·ha ⁻¹)	Área cartografiada		Producción (ton)
		(ha)	(%)	
Maíz O-I	0 – 1.5	19 556	23.1	29 334
	1.5 – 3.0	6 703	7.9	20 109
	3.0 – 6.0	13 619	16.1	81 714
	6.0 – 8.0	14 571	17.2	116 568
	8.0 – 10.0	23 375	27.7	233 750
	> 10.0	6 666	7.9	66 660
	Total	84 489	99.9	548 135
Maíz P-V	0 – 1.5	2 960	10.5	4 440
	1.5 – 3.0	3 085	10.9	9 255
	3.0 – 6.0	7 940	28.0	47 640
	6.0 – 8.0	6 186	21.9	49 488
	8.0 – 10.0	5 247	18.5	52 470
	> 10.0	2 858	10.1	28 580
	Total	28 276	99.9	191 873
Trigo	0 – 1.5	269	8.6	403
	1.5 – 3.0	967	30.9	2 901
	3.0 – 5.0	1 733	55.4	8 665
	> 5.0	161	5.1	805
	Total	3 130	100.0	12 774
Algodonero	0 – 2.0	866	20.8	1 732
	2.0 – 4.0	2 933	70.4	11 736
	> 4.0	364	8.7	1 460
	Total	4 163	99.9	14 928
Sorgo	0 – 1.5	2 899	19.3	4 348
	1.5 – 3.0	1 964	13.1	5 892
	3.0 – 5.0	2 666	17.8	13 315
	> 5.0	7 447	49.7	37 235
	Total	14 976	99.9	60 790

Ilustración 3. Relación entre el rendimiento de maíz de P-V medido (Ro) y el calculado (Rc), en sitios distribuidos en el distrito de riego.



Impacto de la salinidad en la producción

Los valores de CE y de rendimiento se analizaron para estimar el efecto de la salinidad sobre el rendimiento; en los modelos de regresión lineal generados se observa una clara influencia de la salinidad en el rendimiento. La disminución de rendimiento en ton·ha⁻¹ por unidad de aumento de la CE, dS·m⁻¹, fue de 0.555, 0.309, 0.279, 0.751, y 0.448 en maíz de O-I, trigo, algodónero, maíz de P-V y sorgo, respectivamente (ilustración 4 y cuadro 6). Considerando estas cifras y la superficie ensalitrada del cuadro 3, se hicieron cálculos para estimar la disminución de producción, cuyo valor fue de 104 682 ton de los cultivos estudiados. Con base en el valor de estos productos en el mercado a principios de 1999, el impacto económico fue de \$140 099 290.00 (ciento

cuarenta millones noventa y nueve mil doscientos noventa pesos, equivalentes a 17.512 millones de dólares americanos (cuadro 7).

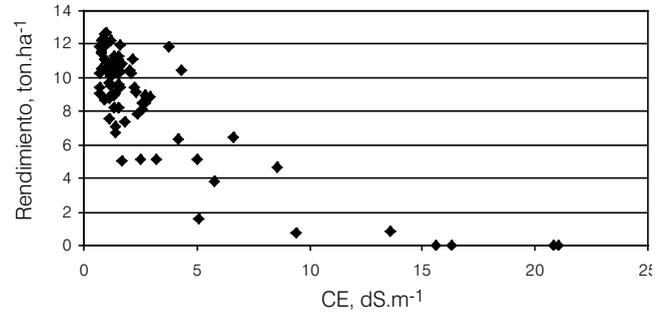
Obtención del mapa final de salinidad y del mapa de necesidades de rehabilitación de suelos

Como resultado de la calibración del sensor EM-38 se obtuvo el siguiente modelo:

$$\text{Log CE}_e = 0.025 \text{EM}_H - 0.008 \text{EM}_V; r = 0.86; n = 90; F_{0.05} = 3.098; F_c = 32.250 \quad (2)$$

Donde EM_H = lectura horizontal; EM_V = lectura vertical; r = coeficiente de correlación.

Ilustración 4. Efecto de la conductividad eléctrica en el rendimiento de maíz de otoño-invierno.



Cuadro 6. Relación entre el rendimiento y la conductividad eléctrica en las parcelas de calibración.

Cultivo	Modelo de regresión	F _{0.05}		r	n
		F _c	F _t		
Maíz de O-I	R ¹ = 10.747 - 0.555CE _w	136.659*	3.960	0.81	79
Trigo	R = 5.293 - 0.309CE _w	90.628*	4.034	0.82	47
Algodonero	R = 3.646 - 0.279CE _w	57.422*	4.001	0.74	53
Maíz de P-V	R = 7.468 - 0.751CE _w	42.637*	4.160	0.75	39
Sorgo	R = 6.158 - 0.448CE _w	45.377*	4.260	0.80	34

¹R = rendimiento, ton·ha⁻¹; CE_w = conductividad eléctrica ponderada, dS·m⁻¹ del estrato 0-60 cm; r = coeficiente de correlación; n = número de observaciones.

Cuadro 7. Estimación de la disminución de producción causada por la salinidad en el DR 075 Río Fuerte, Sinaloa.

Cultivo	Superficie (ha)	Producción (ton)	Disminución de producción (ton)	Valor en el mercado (\$)
Maíz O-I	84 490	548 127	81 713	107 452 600.00
Maíz P-V	28 276	191 873	15 434	20 295 710.00
Sorgo	14 975	60 790	4 599	4 231 080.00
Trigo	3 129	12 774	1 721	2 409 400.00
Algodonero	4 163	14 928	1 215	5 710 500.00
Total	135 033	828 492	104 682	140 099 290.00

Este modelo se utilizó para obtener los valores equivalentes de CE de las 1 042 lecturas realizadas con el sensor EM-38 en los 521 sitios de lectura. Cada sitio fue ubicado geográficamente con el GPS. Se generaron isolíneas de CE con las clases 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y $>16 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, de lo que resultó un segundo mapa parcial de salinidad.

El mapa general de salinidad se formó mediante la integración de los mapas parciales generados con imágenes de satélite y con el sensor EM-38. Este procedimiento produjo un mapa del área total del DR, que fue de 319 976 ha (cuadro 8); de esta superficie, 138 345 ha (43.2%) se clasificaron como salinas, con una $\text{CE} > 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Comparativamente, para una superficie de riego de 236 231 ha, el área clasificada como salina es de 57 130 ha (24.2%) (De la Peña, 1993). El mapa obtenido se clasificó en cinco clases de salinidad: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y $> 16 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. La superficie afectada por sales se ubicó principalmente en los módulos de riego Mavari, Pascola, Sevelbampo, Ruiz Cortínez, Leyva Solano, Fuerte y Guasave.

El mapa de isobatas de noviembre de 1995 proporcionado por el DR se digitalizó en *Arc View* y se integró al mapa de salinidad definitivo. Este procedimiento permitió la elaboración de un mapa del DR que presenta las áreas con suelo salino, $\text{CE} > 8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y manto freático de 0-1.5 m de profundidad. La superficie delimitada con estos problemas fue de 25 132 ha, equivalentes al 7.85% de las 319 976 ha cartografiadas en este estudio.

Conclusiones

La metodología aplicada permitió la identificación de la salinidad, la estimación del rendimiento de los cultivos utilizados como indicadores de la salinidad, y la delimitación de áreas con problemas de salinidad y drenaje en el DR 075, con lo cual se comprueba que es factible la obtención de los mapas respectivos que son útiles para la planeación de acciones de rehabilitación de

Cuadro 8. Clasificación por salinidad de la superficie estudiada con imágenes de satélite y el sensor electromagnético EM-38 del Distrito de Riego 075.

Clase, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	Superficie, ha	Superficie, %
0 – 4	181 630.75	56.77
4 – 8	69 316.12	21.66
8 – 12	27 427.93	8.57
12 – 16	14 909.06	4.66
> 16	26 692.43	8.34
Total	319 976.29	100.00

suelos, y para la programación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a la salinidad, y de este modo reducir el impacto negativo en la producción de cosechas y en la economía de los productores de la región.

La superficie cartografiada con imágenes de satélite y con el sensor EM-38 fue de 319 976 ha, de las cuales 138 345 ha (43.2%) se clasificaron salinas $\text{CE} > 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. De esta superficie, 25 132 ha se delimitaron con problemas de salinidad y drenaje, $\text{CE} > 8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y manto freático entre 0 y 1.5 m, por lo que se considera que es un área factible para un proyecto de rehabilitación de suelos. Se obtuvieron mapas de rendimiento de los cultivos indicadores de la salinidad y se estimó la disminución de producción asociada con la salinidad, en 104 682 ton, equivalentes a \$140 099 290.00.

Recibido: 17/04/2006
Aprobado: 28/05/2007

Referencias

- AYERS, R.S. y WESTCOT, D.W. La calidad del agua en la agricultura. *Estudio FAO. Riego y Drenaje*. Núm 29, rev. 1. Roma, 1987, 172 pp.
- DE LA PEÑA, I. *Problemas de salinidad y drenaje*. Documento de circulación interna. Ciudad Obregón, México: Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje, 1993.
- FERNÁNDEZ, G.R. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra*. Vol. 8, núm.2, 1990, pp. 226-240.
- LABORATORIO DE SALINIDAD DE LOS ESTADOS UNIDOS. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. México, D.F.: Limusa, 1974.
- MAAS, E.V. y HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance – Current assessment. Proceeding Paper 12993. *J. Irrigation and Drainage Division*. Vol. 103 (IRZ). ASCE, 1977, pp. 115-134.
- PULIDO, L., WIEGAND, C.L., RODRÍGUEZ, Z.C. y NECK, S. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra*. Vol. 15, núm. 2, 1997a, pp. 201-210.
- PULIDO, L., ROBLES, B.D.R., WIEGAND, C.L. y LÓPEZ, J.L. Aplicación de imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo y las áreas con mal drenaje. *Memorias del VII Congreso Nacional de Irrigación*. Hermosillo, Sonora, México, 22-24 de octubre de 1997b.
- PULIDO, L., GONZÁLEZ, M.J., ROBLES, R.B.D., WIEGAND, C.L. e INFANTE, J.R. Actualización con imágenes de satélite de los estudios de salinidad y drenaje en el DR 038 Río Mayo. *Memorias del VIII Congreso Nacional de Irrigación*. Gómez Palacio, Durango, 2-4 de septiembre de 1998.

- PULIDO, L., WIEGAND, C.L., GONZÁLEZ, M.J., ROBLES, R.B.D., CISNEROS, E.O.X. y LEMUS, R.O. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVIII, núm. 2, 2003, pp. 83-97.
- RHOADES, J.D. Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. *Advances in Agronomy*. Núm. 49, 1992, pp. 201-251.
- SPOT IMAGE CORPORATION. *Satellite Imagery*. An Objective Guide. Produced by the Business Image Group and SPOT Image Corporation. Toulouse, France, 1998.
- VAN DER LELIJ, A. *Use of an Electromagnetic Induction Instrument (type EM38) for Mapping Soil Salinity*. Internal Report Research Branch. New South Wales, Australia: Water Resources Commission. Murrumbidgee Division, 1983.
- WIEGAND, C.L. y RICHARDSON, A.J. Relating Spectral Observations of the Agricultural Landscape to Crop Yield. *Food Structure*. Vol. 11, 1992a, pp. 249-258.
- WIEGAND, C.L., EVERITT, J.H. y RICHARDSON, A.J. Comparison of Multispectral Video and Spot-1 HRV Observations for Cotton Affected by Soil Salinity. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 13, núm. 8, 1992b, pp. 1511-1525.
- WIEGAND, C.L., RHOADES, J.D., ESCOBAR, D.E. y EVERITT, J.H. Photographic and Videographic Observations for Determining and Mapping the Response of Cotton to Soil Salinity. *Remote Sens. Environ.* Vol. 49, 1994, pp. 212-223.
- WIEGAND, C.L., ANDERSON, G., LINGLE, S. y ESCOBAR, D. Soil Salinity Effects on Crop Growth and Yield –Illustration of an Analysis and Mapping Methodology for Sugarcane. *J. Plant Physiol.* Vol. 148, 1996, pp. 418-424.
- WIEGAND, C.L., YANG, CH. y PULIDO, L. The plant indicator method (PIM) for mapping crop yields in response to drought, soil salinity, and other stresses. *20th Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography, and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, Weslaco, Texas. October 4-6, 2005.

Abstract

PULIDO-MADRIGAL, L., GONZÁLEZ-MERAZ, J. & LÓPEZ DE SANTA ANA, J.L. Remote sensing and GPS systems for studying crop yield in salt-affected and shallow water table soils. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 1, January-March, 2008, pp. 45-56.

Soil mapping of salt-affected and shallow water table areas was carried out using satellite imagery, an electromagnetic device and geographic information systems in the Rio Fuerte Irrigation District, Mexico. Salt-affected fields were sampled to evaluate soil electrical conductivity, and yield. The spectral values from TM2, TM3 and TM4 bands were taken from Landsat images, and regression models were obtained to estimate soil salinity and crop yield. Supervised classifications were run from these models in order to get partial maps. Non-classified areas were mapped in situ using an electromagnetic device and a positioning system (GPS), and a second partial map was generated. By overlapping the partial maps, a final map was obtained. Shallow water table areas were incorporated to the salinity map in order to get the affected areas with both high soil salinity and shallow water table. The relationship between soil salinity and yield was analyzed to quantify the effect of salinity on crop yield.

Keywords: *irrigation district, soil salinity, shallow water table, crops, crop yield, satellite image, electromagnetic sensor, salinity map, yield map.*

Dirección institucional de los autores:

*Leonardo Pulido-Madrigal
Jorge González-Meraz*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Morelos,
México,
teléfono: + (52) (777) 329 3600,
lpulido@tlaloc.imta.mx

Jorge Luis López de Santa Ana-R.

Comisión Nacional del Agua,
Distrito de Riego 075 Río Fuerte,
Guillermo Prieto y Marcial Ordóñez,
Los Mochis, Sinaloa, México