

La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego

Leonardo Pulido Madrigal
Craig L. Wiegand
Jorge González Meraz
Braulio David Robles Rubio
Xóchitl Cisneros Estrada
Óscar Lemus Ramírez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Entre 1994 y 1997 se determinaron las áreas con afectación por salinidad y su impacto sobre el rendimiento del trigo (*Triticum aestivum*), algodónero (*Gossypium hirsutum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*) en tres distritos de riego (DR) del noroeste de México, el DR 076 Valle del Carrizo, el DR 041 Río Yaqui y el DR 038 Río Mayo, utilizando imágenes de satélite Landsat TM. La salinidad de las áreas sembradas con estos cultivos se detectó en su etapa de floración, correlacionando la conductividad eléctrica (CE) del suelo ($dS \cdot m^{-1}$), medida en parcelas de observación, con los valores espectrales extraídos de las imágenes de las bandas en el verde (TM2), rojo (TM3) e infrarrojo cercano (TM4), para la generación de modelos de regresión lineal múltiple. Se obtuvieron también muestras de planta para estimar el rendimiento de los cultivos señalados. Los modelos de regresión lineal múltiple se utilizaron para hacer dos clasificaciones a cada imagen. En la primera, se agruparon los píxeles por sus valores de reflectancia, a partir de los cuales se obtuvieron valores medios en cada banda que sirvieron para estimar la salinidad y el rendimiento en forma preliminar. En una segunda clasificación, se agruparon los píxeles de cada imagen en clases de salinidad y rendimiento de acuerdo con los modelos de regresión, para así obtener los respectivos mapas de salinidad y rendimiento. El área de riego total de los tres distritos estudiados es de 368,569 ha, de las cuales se cartografiaron 231,380 ha, resultando con problemas de salinidad 135,096 ha, equivalentes al 58% del área cartografiada. Se estimó la disminución de la producción en 104,100 toneladas de trigo, 8,900 toneladas de algodón y 28,100 toneladas de sorgo.*

Palabras clave: distrito de riego, salinidad del suelo, trigo, algodón, sorgo, imagen de satélite, Landsat TM, modelo de regresión, rendimiento.

Introducción

En México, las áreas agrícolas que presentan mayores problemas de salinidad se localizan principalmente en los distritos de riego del norte del país. La salinidad en tales distritos se considera un problema grave debido a que aproximadamente el 30% de dicha superficie está afectada (Fernández, 1990). Algunas de las consecuencias de esta situación son la disminución de

los rendimientos, la pérdida de ingresos y el desempleo (Pulido *et al.*, 1995).

Debido a la dinámica del proceso de salinización en los suelos, se requiere de métodos que proporcionen resultados a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas y que ayuden a dar seguimiento a las medidas aplicadas para su rehabilitación (Wiegand *et al.*, 1994a). Tradicionalmente en México, los estudios de salinidad analizada en distritos de riego se obtienen tomando

muestras de suelo en puntos ubicados en una cuadrícula de uno o dos kilómetros, lo cual representa largos periodos de tiempo y altos costos. Asimismo, se necesitan procedimientos ágiles para estimar el rendimiento de los cultivos con propósitos de planeación, a fin de establecer el patrón de cultivos, la proyección del mercadeo y el potencial de producción del suelo, ya que la salinidad afecta en forma diferencial a cada cultivo.

Wiegand y Richardson (1984, 1987 y 1990, citados por Wiegand *et al.*, 1994a) 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 indica 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 μm) e infrarrojo cercano (TM4, 0.76 a 0.90 μm), mediante la fórmula: $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$.

Wiegand *et al.* (1992a; 1992b; 1993) calibraron el método SCA utilizando datos de salinidad analizada y de rendimiento en sitios de muestreo en cuatro parcelas comerciales de algodón, dentro de una área de 39 km² en el Valle de San Joaquín, California. Las ecuaciones de regresión se calcularon a partir de mediciones de salinidad realizadas en los primeros treinta centímetros de profundidad y a partir de los valores espectrales de fotografías aéreas infrarrojas y videografía para los doscientos sitios contenidos en cada parcela. Los autores concluyeron que el NDVI es un parámetro apropiado para caracterizar espectralmente la salinidad del suelo y el desarrollo vegetativo, que las clasificaciones espectrales identificaron categorías asociadas con la salinidad del suelo y que los valores espectrales extraídos de los sitios de muestreo pueden utilizarse para estimar la salinidad de todos los píxeles de la parcela.

En otro estudio, realizado en una plantación comercial de caña de azúcar de 59 ha, Wiegand y Lingle (1994b) y Wiegand *et al.* (1996), correlacionaron la conductividad eléctrica del suelo, longitud del tallo y componentes del rendimiento con la videografía digital e imágenes de satélite *Spot HRV*. El análisis estadístico consistió en regresiones lineales simples de la salinidad, el rendimiento y el NDVI, y regresiones lineales múltiples para estimar la salinidad y rendimiento a partir de los valores espectrales de las bandas infrarroja, roja y amarilla-verde. Se

obtuvieron mapas clasificados de salinidad aplicando una ecuación de regresión lineal múltiple a cada píxel. Los coeficientes de r^2 obtenidos para estimar salinidad con la imagen fueron de 0.67 a 0.79, y para estimar rendimiento, de 0.74 a 0.83. El NDVI presentó valores de r de -0.70 y -0.75. Se encontró que por cada unidad de aumento de la salinidad, el rendimiento de caña se redujo en 22 ton·ha⁻¹.

El primer trabajo de esta naturaleza realizado en México fue para identificar la salinidad del suelo en el Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo (Pulido *et al.*, 1995). Se utilizaron imágenes de satélite *Landsat TM* y *Spot pancromática* para cartografiar 19,387 ha, de las cuales 6,927 ha se clasificaron como salinas. Se generó un mapa de rendimiento de trigo y se estimó una disminución de 9,943 ton de producción a causa de la salinidad.

Los objetivos de este trabajo son dar a conocer la metodología aplicada y comparar los resultados obtenidos para identificar la salinidad del suelo y estimar la disminución de rendimiento causada por la salinidad en los distritos de riego 076 Valle del Carrizo, Sinaloa, 041 Río Yaqui, Sonora, y 038 Río Mayo, Sonora, con base en el uso de imágenes de satélite.

Metodología

Área de estudio

Los estudios se realizaron en el DR 076 Valle del Carrizo, Sinaloa (1994), localizado entre las coordenadas geográficas 26°04' y 26°25' de latitud norte, y 108°53' y 109°08' de longitud oeste; en el DR 041 Río Yaqui, Sonora (1995), localizado entre los paralelos 27°00' y 27°40', y los meridianos 109°45' y 110°20', y en el DR 038 Río Mayo, Sonora (1996), ubicado entre las coordenadas 26°21' y 28°31' de latitud norte, y 108°26' y 110°05' de longitud oeste, en el noroeste de México (ilustración 1). El DR del Valle del Carrizo abarca 43,259 ha, el DR Río Yaqui comprende 228,723 ha y el DR Río Mayo tiene una extensión de 96,587 ha; estas superficies se sustentan por riego superficial casi en su totalidad (IFEX Geotécnica, 1964; Reyes, 1994; Cisneros, 1998).

En el Valle del Carrizo, el clima se clasifica como EdA¹, el cual es semidesértico, con deficiencia de humedad en todas las estaciones. La temperatura media anual es de 23°C. La precipitación media anual es de 428.3 mm. La evaporación media anual es de 2,409 mm (Pacheco, 1988). En el área predominan los aridisoles, pero también es significativa la presencia de entisoles y vertisoles. Estos suelos se caracterizan por sus altos contenidos de salinidad y de sodio, textura arcillosa, concreciones de yeso, bajo contenido de

Ilustración 1. Ubicación de los distritos de riego Río Yaqui, Río Mayo y Valle del Carrizo.



materia orgánica y altos contenidos de magnesio, calcio y potasio (IFEX Geotécnica, 1964).

En el DR Río Yaqui, el clima es subhúmedo mesotermal, con humedad en verano e invierno; su temperatura media anual es de 22.9°C, con máximas de 40.6°C y mínimas de 9.8°C. La precipitación media anual es de 261 mm, con una evaporación media anual de 1,915 mm. Se presentan cinco tipos de suelo predominantes: xerosoles, vertisoles, litosoles, regosoles y solonchak (Cisneros, 1998).

El clima del DR Río Mayo es estepario semiárido. La precipitación media anual es de 388 mm. La temperatura media anual es de 21.4°C. La evaporación media anual es de 2,222 mm. Los suelos predominantes en la planicie son los aridisoles, y en la zona de riego, los entisoles, derivados de sedimentos aluviales acarreados por el río Mayo. En las partes altas del distrito se encuentran inceptisoles en menor proporción. En general, los suelos son profundos, con texturas que van de franco arcillosa a arena francosa (Reyes, 1994).

Obtención de datos de campo y toma de las imágenes

Se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (de cero a treinta y de treinta a sesenta centímetros), así como muestras de cosecha para estimar rendimiento en parcelas comerciales que estaban sembradas con trigo (invierno), algodón (invierno) y sorgo (primavera). Estos cultivos ocuparon una mayor área de siembra durante la época en que se realizaron los estudios. Se consideraron

como indicadores de la salinidad o cultivos de referencia debido a que son semitolerantes a la salinidad, lo cual les permite desarrollarse en un rango amplio de condiciones ante esta afección (Ayers y Westcot, 1987). En el DR Valle del Carrizo se utilizó trigo; en el DR Río Yaqui, trigo y algodón, y en el DR Río Mayo, trigo, algodón y sorgo.

Para obtener los datos de campo necesarios se seleccionó un total de treinta parcelas, de aproximadamente diez hectáreas cada una: 17 de trigo (cuatro en el DR Valle del Carrizo, siete en el DR Río Yaqui, y seis en el DR Río Mayo); nueve de algodón (cinco en el DR Río Yaqui y cuatro en el DR Río Mayo), y cuatro de sorgo (en el DR Río Mayo). Dichas parcelas quedaron ubicadas en áreas afectadas por salinidad dentro de sus respectivos distritos. El trabajo de campo para tomar muestras de suelo en las que se midió la salinidad se llevó a cabo cuando los cultivos estaban en la fase final de desarrollo vegetativo y en el inicio de floración, etapas en que las plantas desarrollan la más intensa actividad fisiológica, poseen una mayor cobertura vegetativa y, en consecuencia, se logra un mayor reflejo de la luz solar. En esa época, el efecto de las sales del suelo en las raíces de las plantas y en toda la planta es mayor que en etapas fisiológicas previas, por lo que es más fácil discriminar las áreas afectadas. Cuando el contenido de sales en el suelo era tan alto que no permitía el desarrollo de las plantas, las áreas presentaban un reflejo de luz diferente al de las áreas cultivadas, por lo que podían identificarse visualmente con gran facilidad.

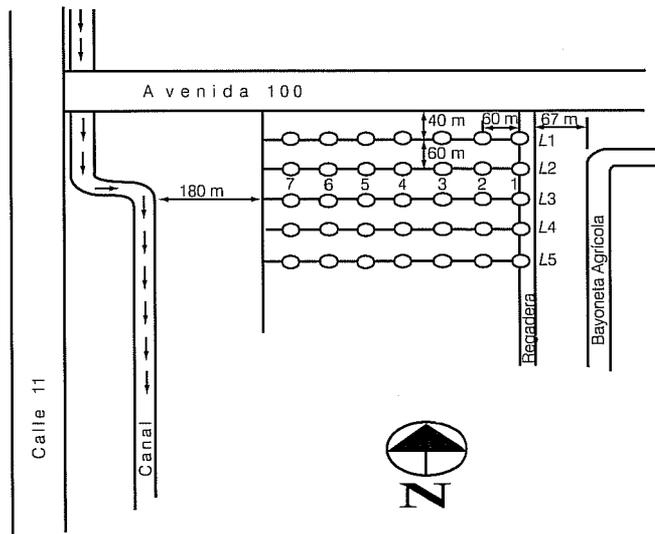
Considerando que la resolución de una imagen *Landsat TM* es de treinta (treinta metros), se tomaron muestras de las parcelas en mallas de sesenta (sesenta metros) en los DR Valle del Carrizo y Río Yaqui, y de cuarenta (cuarenta metros) en el DR Río Mayo, teniendo un promedio de 23 sitios de muestreo por parcela (690 sitios en total) (ilustración 2).

Cuando las plantas llegaron a su etapa de madurez y antes de su cosecha, se hizo un muestreo de planta en todos los sitios de muestreo en un área de aproximadamente 0.09 m² en el DR Valle del Carrizo y de 1.0 m² en los DR Río Yaqui y Río Mayo, para luego poder estimar el rendimiento y así evaluar el efecto de la salinidad del suelo sobre la producción.

Características de las imágenes de satélite

Las imágenes de satélite *Landsat TM* adquiridas comprendieron escenas en formato digital, orientadas a mapa, con corrección de sistema, proyección *UTM (Universal transversa de mercator)* y sin corrección geográfica, abarcando una superficie de 175 (180 km) por escena completa.

Ilustración 2. Ejemplo de distribución de los sitios de muestreo de suelo y planta en una parcela.



En el DR Valle del Carrizo se utilizó una imagen cuya escena se identifica como 034/042, tomada el 26 de febrero de 1994; en el DR Río Yaqui se utilizaron dos imágenes 034/041, adquiridas el 24 de marzo de 1995, para estudiar el área de trigo, y el 28 de junio de 1995, para el área del algodón. En el DR Río Mayo se tomaron dos imágenes 034/041, una el 23 de febrero de 1996, con la cual se cartografió el área de trigo, y la otra el 14 de junio de 1996, para cartografiar las áreas de algodón y sorgo.

Las imágenes se corrigieron geográficamente con base en la obtención de las coordenadas geográficas de puntos de control conocidos, localizados sobre las mismas imágenes, con el auxilio de un sistema de posicionamiento global (o GPS, por sus siglas en inglés) (DR Río Mayo) o en cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), a escala 1:50,000 (DR Valle del Carrizo y DR Río Yaqui). En el DR Río Mayo se realizaron mediciones directas utilizando dos unidades GPS, una de ellas como base de referencia ubicada sobre un banco geodésico del INEGI, localizado dentro del distrito de riego, y la otra como la unidad posicionadora en los aproximadamente 25 puntos de control establecidos en cada distrito.

Los sitios de muestreo de las parcelas del DR Río Yaqui y del DR Río Mayo fueron geoposicionados utilizando el sistema GPS señalado, para lo cual se hicieron diez mediciones en promedio por parcela. Las lecturas realizadas con los aparatos para corregir geográficamente las imágenes y localizar las parcelas en las imágenes se sometieron a un postprocesamiento, a fin de reducir el

error de ubicación y transformar las lecturas a coordenadas UTM. Con esta conversión fue posible identificar las parcelas de observación en las imágenes. En el Valle del Carrizo se hicieron croquis de las parcelas para localizarlas manualmente en la imagen.

Análisis de datos y procesamiento de las imágenes

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo en estaciones de trabajo del Laboratorio de Sensores Remotos del Servicio de Investigación Agrícola, en Weslaco, Texas (DR Valle del Carrizo y DR Río Yaqui), y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (DR Río Mayo). Se utilizaron los siguientes softwares: GRASS (*Geographical Resources Analysis Support Systems, U.S. Army*) y el sistema PCI.

Las imágenes Landsat se recortaron para separar el área de cada distrito de riego. En el Valle del Carrizo y en el DR Río Yaqui, además de las imágenes Landsat adquiridas para estudiar las áreas de trigo, se utilizaron dos imágenes Spot pancromática de nivel 2B, una por distrito, tomadas el 9 de marzo de 1994 (Valle del Carrizo) y el 3 de abril de 1995 (Río Yaqui); la resolución espacial de estas imágenes es de diez (diez metros). En el DR Valle del Carrizo se mezclaron ambas imágenes para crear una imagen híbrida, con resolución de diez metros; en esta imagen se localizaron manualmente las parcelas de observación.

Por su parte, en los DR Río Yaqui y Río Mayo, las mismas parcelas se ubicaron automáticamente con el GPS. Las parcelas se localizaron en las bandas TM2 (región del verde, 0.52 a 0.60 μm), TM3 (región del rojo, 0.63 a 0.69 μm) y TM4 (región del infrarrojo cercano, 0.76 a 0.90 μm). Se imprimieron en papel los valores espectrales correspondientes a las bandas indicadas y se localizaron manualmente los píxeles de los sitios de muestreo en cada una de las bandas, para posteriormente calcular el NDVI y obtener los modelos de regresión múltiple para estimar la CE y el rendimiento.

Todas las áreas sembradas extensivamente con los cultivos de referencia, dibujadas en los mosaicos de cultivo elaborados manualmente ex profeso, se digitalizaron sobre las imágenes. Las áreas de trigo cartografiadas en los distritos de riego Valle del Carrizo y Río Yaqui se digitalizaron sobre las imágenes Spot pancromática referidas; el mosaico de cultivo de algodón del Río Yaqui y el de trigo, algodón y sorgo del DR Río Mayo se digitalizaron sobre imágenes Landsat TM.

De acuerdo con Wiegand *et al.* (1993), se analizaron los valores de CE junto con las observaciones de rendimiento (R) de cada cultivo para estimar la disminución de producción por efecto de las sales. El

análisis de la información consistió en correlacionar las observaciones de suelo y planta con los valores espectrales mediante la técnica de regresión. Se calcularon los valores del *NDVI* por cultivo para estimar salinidad y rendimiento. Asimismo, se correlacionaron los datos de CE y rendimiento con los valores espectrales de las bandas dos, tres y cuatro por separado, a fin de generar modelos estadísticos que correlacionaran dichas variables en las parcelas. Se compararon los coeficientes de correlación que resultaron. El valor de CE utilizado en el análisis resultó de ponderar la salinidad encontrada de cero a treinta centímetros y de treinta a sesenta centímetros: $CE_w = 0.6CE_1 + 0.4CE_2$, CE_1 es la conductividad eléctrica medida en el estrato de cero a treinta centímetros, $dS \cdot m^{-1}$, y CE_2 es la conductividad eléctrica observada en el estrato de treinta a sesenta centímetros, $dS \cdot m^{-1}$.

Se hicieron dos clasificaciones espectrales a cada subimagen digitalizada: una no supervisada y otra supervisada. La clasificación no supervisada tuvo el propósito de agrupar en clases los píxeles por su nivel de reflectancia; en el DR Valle del Carrizo se emplearon siete clases; en el DR Río Yaqui las subimágenes de trigo y algodón se clasificaron en nueve clases, y en el DR Río Mayo se utilizaron 12 clases para clasificar la subimagen de trigo y siete, para clasificar las subimágenes de algodón y sorgo. Mediante esta clasificación se obtuvieron los valores espectrales medios de cada clase en las tres bandas. La clasificación supervisada consistió en sustituir estos valores en los modelos de regresión lineal múltiple que se lograron en las parcelas de observación para calcular valores de salinidad y rendimiento que sirvieron como base en la elaboración de un algoritmo que asignara un valor de salinidad y rendimiento a todos los píxeles de las subimágenes. Estos valores de salinidad se agruparon de acuerdo con las clases y rangos utilizados por la Comisión Nacional del Agua. Por su parte, los valores de rendimiento se agruparon a partir de los valores de cosecha registrados.

Con el propósito de editar los mapas de salinidad y rendimiento, estos rangos se identificaron con un color específico de acuerdo con el nivel de salinidad y con el rendimiento. El mapa de salinidad del área de cada cultivo se clasificó en cinco clases: $< 4 dS \cdot m^{-1}$ (azul); $4-8 dS \cdot m^{-1}$ (verde); $8-12 dS \cdot m^{-1}$ (amarillo); $12-16 dS \cdot m^{-1}$ (rojo), y $> 16 dS \cdot m^{-1}$ (cyan), con lo que se obtuvieron mapas parciales de salinidad. Cada uno de los dos mapas parciales del DR Río Yaqui (trigo y algodón), y los tres mapas del DR Río Mayo (trigo, algodón y sorgo) fueron sobrepuestos, de modo que se obtuvo un mapa final de salinidad para cada distrito de riego. Los mapas de rendimiento se generaron para cada cultivo en cada distrito de riego; las clases y rangos de rendimiento que

se establecieron en la edición de los mapas fueron diferentes entre los cultivos.

Resultados y discusión

Efecto de la salinidad sobre el rendimiento de las parcelas de observación

Los datos de campo obtenidos se depuraron, como consecuencia de que en algunas parcelas hubo infestaciones de maleza; en ciertos casos, los agricultores trillaron antes de que se tomaran las muestras de cosecha y en otras parcelas hubo un manejo deficiente al cultivo, cuya limitación principal en su desarrollo no sólo se debió al efecto de las sales, sino al de otros factores.

Las parcelas de observación mostraron una amplia gama de valores de salinidad. Así, en los tres distritos de riego estudiados, la variación abarcó un rango de valores que va desde menos de uno hasta más de $23 dS \cdot m^{-1}$ (ilustración 3).

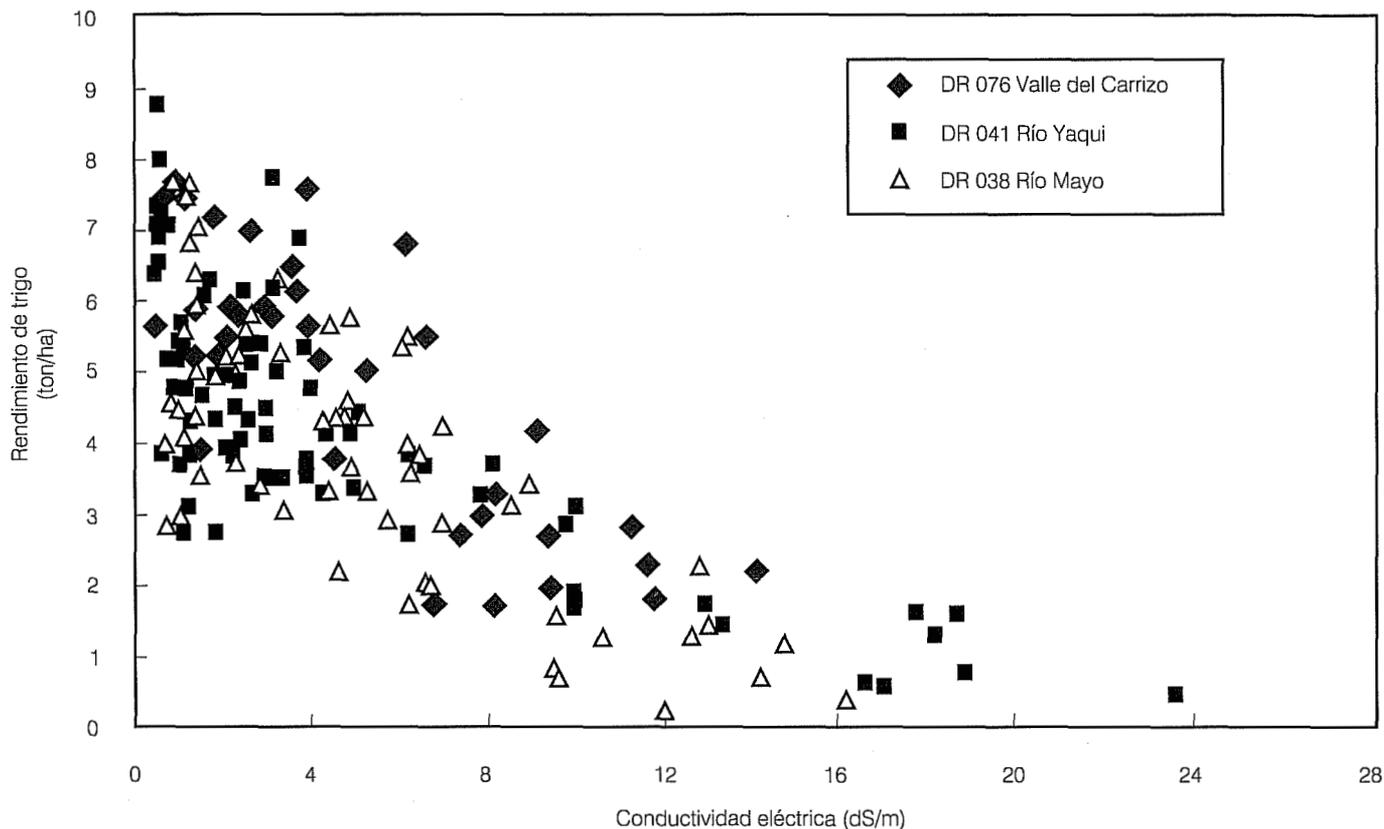
Al parecer, el efecto observado de la salinidad sobre el rendimiento de trigo (el único cultivo común en los tres distritos) fue diferente en cada distrito (ilustración 3). En el DR Valle del Carrizo, un rendimiento observado de $2.2 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ correspondió a un valor de CE de $14.2 dS \cdot m^{-1}$; mientras que en el DR Río Yaqui, el rendimiento más bajo registrado, $0.41 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, se observó con una CE de $24 dS \cdot m^{-1}$, y en el DR Río Mayo, un rendimiento de $0.34 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ se registró en un sitio con $16.7 dS \cdot m^{-1}$ de conductividad eléctrica.

Estas diferencias pueden deberse a la variabilidad natural del suelo. Por ejemplo, en el DR Valle del Carrizo, los suelos son más arcillosos, por lo que son más susceptibles a volverse salinos o sódicos (De la Peña, 1982); otras causas pueden ser la presencia de sales sódicas, que destruyen la estructura del suelo y limitan la aireación de las raíces; la toxicidad de algunas sales como los cloruros y los nitratos, y las diferentes variedades de semilla utilizadas. El manejo del cultivo es otro factor relevante, ya que algunos agricultores sembraron el trigo en surcos, lo que favorece el ascenso capilar de las sales y, en otros casos, aplicaron los riegos con mayor frecuencia, con lo cual se promovió el lavado de las sales fuera de la zona radical.

Con los valores de CE y rendimiento obtenidos en campo, se generaron modelos de regresión para cada parcela individual, así como un modelo global por cultivo, mismo que se utilizó —como se indicará más adelante— para analizar el impacto de la salinidad sobre el rendimiento (cuadro 1).

En trigo se encontró cierta consistencia en los modelos obtenidos (ilustración 3), a pesar de que se trató de

Ilustración 3. Efecto de la salinidad en el rendimiento del trigo en las parcelas de observación.



Cuadro 1. Ecuaciones de regresión obtenidas de rendimiento versus CE en tres cultivos y en tres distritos de riego.

*DR	Trigo				Algodonero			Sorgo		
	Ecuación	r	n	Ecuación	r	n	Ecuación	r	n	
V. del Carrizo	$R=5.39-0.359CE_w$	-0.73	43	---	---	---	---	---	---	
Río Yaqui	$R=5.59-0.266CE_w$	-0.77	74	$R=3.16-0.149CE_w$	-0.75	34	---	---	---	
Río Mayo	$R=6.23-0.393CE_w$	-0.82	64	$R=2.93-0.194CE_w$	-0.87	57	$R=7.92-0.545CE_w$	-0.82	52	
Global	$R=5.92-0.314CE_w$	-0.77	181	$R=3.06-0.176CE_w$	-0.80	91	$R=7.92-0.545CE_w$	-0.82	52	

*DR= distrito de riego, R= rendimiento, $ton \cdot ha^{-1}$, CE_w = conductividad eléctrica ponderada del estrato 0-60 cm $dS \cdot m^{-1}$, r= coeficiente de correlación, n= número de observaciones.

distritos de riego que presentan algunas diferencias en clima y suelo. Comparativamente, el coeficiente de correlación fue mayor en el DR Río Mayo, posiblemente debido a que en las parcelas seleccionadas se tuvo un mejor manejo de los factores de la producción. En el DR Valle del Carrizo, el tamaño de muestra para estimar rendimiento fue menor ($0.09 m^2$) que el utilizado en los otros distritos y esto pudo influir en los resultados;

además, en el ciclo de cultivo 1993-1994, se obtuvieron buenos rendimientos de trigo en general (comunicación personal con el ingeniero Rodrigo Patrón Castro, gerente general, en 1994, de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego Valle del Carrizo). La disminución de rendimiento por efecto de la salinidad fue de 0.359, 0.266 y 0.393 $ton \cdot ha^{-1} / dS \cdot m^{-1}$ en los DR Valle del Carrizo, Río Yaqui y Río Mayo, respectivamente (cuadro

1), lo que demuestra una mayor semejanza en los resultados del Valle del Carrizo y Río Mayo. El menoscabo en el rendimiento fue inferior en el DR Río Yaqui; esto se debió, probablemente, a que en este distrito se retrasó la fecha de siembra y ello afectó la producción, sensible a la duración de horas-frío; también pudo deberse a que las variedades sembradas presentaron una mayor tolerancia a las sales, a pesar de que el trigo es un cultivo semitolerante a ellas, con una salinidad umbral teórica de $6.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Ayers y Westcot, 1987). Ayers y Westcot (1987) reportan el valor de salinidad umbral de los cultivos (el límite de la salinidad del suelo), a partir del cual se observa un decremento en el rendimiento. La salinidad umbral estimada con el modelo global de trigo (cuadro 1) fue de $5.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. La salinidad umbral se obtiene al dividir la pendiente por el intercepto de la ecuación.

El algodón pertenece al grupo de cultivos considerados como tolerantes a la salinidad, con un valor umbral teórico de $7.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Ayers y Westcot, 1987). El valor umbral estimado a partir de las ecuaciones del cuadro 1 fue de $4.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Río Yaqui) y $6.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Río Mayo), con un valor global de $5.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Las diferencias pueden deberse a que en el trabajo reportado por Ayers y Westcot (1987), los valores umbrales de salinidad se observaron en condiciones de laboratorio, a diferencia del trabajo de campo realizado en los tres distritos, en donde no se tuvo control de ningún factor de la producción, pues sólo se vigilaron las muestras de suelo y planta.

En algodón se tuvieron valores de correlación de 0.75 (Río Yaqui) y 0.87 (Río Mayo) (cuadro 1). De acuerdo con estos valores, entre un 56 y un 76% de la disminución del rendimiento se debió a la presencia de exceso de sales solubles en el suelo. La disminución del rendimiento de algodón por unidad de salinidad fue menor en el DR Río Yaqui que en el DR Río Mayo. Considerando los dos distritos de riego, la pérdida de rendimiento de algodón con semilla fue de $176 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}/\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Wiegand *et al.* (1994a) encontraron una disminución de $43 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}/\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en el rendimiento de algodón en los treinta centímetros superficiales de suelo. La diferencia entre lo reportado y lo observado pudo deberse a que Wiegand *et al.* (1994a) estimaron el rendimiento de fibra sin semilla, al contar las bellotas de las parcelas de observación; mientras que en estos trabajos, se cosecharon las motas para extraer la fibra con semillas, por lo que se consideró el rendimiento de fibra con semillas en el análisis estadístico. Asimismo, en dichas investigaciones se consideró para el análisis estadístico el valor de la salinidad en el estrato de cero a sesenta centímetros de profundidad, por lo que el efecto de la salinidad en el rendimiento es mayor, a diferencia de Wiegand *et al.* (1994a) que únicamente

analizaron el estrato de cero a treinta centímetros de profundidad.

De acuerdo con Ayers y Westcot (1987), el sorgo es una planta semitolerante a la salinidad, con un valor umbral teórico de $6.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. El valor umbral estimado con el modelo del cuadro 1 fue de $6.9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Se encontró que la salinidad estuvo ligada con la disminución del rendimiento en un 67%; se estimó que la pérdida de rendimiento de sorgo por cada unidad de incremento de la CE fue de $545 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (cuadro 1). Esta cantidad equivale a un 13.16% por aumento unitario de salinidad, inferior a 16.13%, calculado con el modelo del rendimiento potencial, reportado por Ayers y Westcot (1987). La diferencia se puede deber a que estos autores obtuvieron los resultados en condiciones de laboratorio, mientras que en las presentes investigaciones, los resultados fueron producto del muestreo directo de suelo y planta en parcelas comerciales.

En general, en los tres cultivos estudiados, se encontró que la salinidad es una variable asociada estrechamente con el rendimiento, que explicó las variaciones observadas desde un 53 hasta un 76%.

Estimación de la salinidad y el rendimiento a través del NDVI en las parcelas de observación

A partir de los valores estimados de NDVI para cada cultivo y de los valores de CE y rendimiento, se desarrollaron modelos estadísticos para estimar la salinidad (cuadro 2) y el rendimiento (cuadro 3).

Los valores de NDVI de los sitios de muestreo de los tres distritos fluctuaron desde 0.783 hasta 0.08, correspondiendo los valores más altos a sitios con plantas vigorosas desarrolladas en suelo no salino, y los valores más bajos, a sitios salinos con ausencia de plantas o con escasa población, y nulos o muy bajos rendimientos. En todos los casos, los valores más altos correspondieron a sitios con plantas exuberantes y los más bajos, a suelo desnudo.

La estimación de la salinidad a partir del NDVI tuvo coeficientes de correlación superiores a 0.72, que son aceptables de acuerdo con Wiegand *et al.* (1994a), excepto para los modelos correspondientes al algodón (en el DR Río Yaqui) y sorgo (en el DR Río Mayo) (cuadro 2). En cada cultivo, la estimación de rendimiento —con excepción del trigo en el DR Valle del Carrizo— presentó coeficientes de correlación ligeramente más altos (0.79 a 0.66) que aquellos obtenidos para estimar la CE (-0.76 a -0.64). Esto, en parte, explica por qué el rendimiento de los cultivos se relaciona más estrechamente con la cantidad de tejido fotosintéticamente activo en las coberturas vegetativas. Las plantas integran los efectos

Cuadro 2. Modelos de regresión del NDVI versus conductividad eléctrica por distrito y por cultivo.

Distrito de riego	Cultivo	Ecuación	r	n
Valle del Carrizo	Trigo	*CE= 19.59 - 25.64(NDVI)	-0.83	43
Río Yaqui	Trigo	CE=26.93 - 36.98(NDVI)	-0.74	74
Río Yaqui	Algodón	CE= 16.31 - 22.68(NDVI)	-0.64	34
Río Mayo	Trigo	CE= 14.39 - 18.02(NDVI)	-0.72	64
Río Mayo	Algodón	CE= 15.16 - 16.78(NDVI)	-0.76	57
Río Mayo	Sorgo	CE= 17.34 - 18.62(NDVI)	-0.65	52
Global	Trigo	CE= 17.16 - 21.35(NDVI)	-0.67	181
Global	Algodón	CE= 15.18- 18.61(NDVI)	-0.67	91

*CE = conductividad eléctrica en el estrato 0-60 cm, dS·m⁻¹, r = coeficiente de correlación, n = número de observaciones.

Cuadro 3. Modelos de regresión del NDVI versus rendimiento por distrito y por cultivo.

Distrito de riego	Cultivo	Ecuación	r	n
Valle del Carrizo	Trigo	*R=0.342 + 9.291(NDVI)	0.74	43
Río Yaqui	Trigo	R= -4.162 + 14.164 (NDVI)	0.74	74
Río Yaqui	Algodón	R= 0.014 + 4.839(NDVI)	0.69	34
Río Mayo	Trigo	R=-0.46 + 8.475(NDVI)	0.74	64
Río Mayo	Algodón	R= -0.308 + 3.853(NDVI)	0.79	57
Río Mayo	Sorgo	R= -2.74 + 12.518(NDVI)	0.66	52
Global	Trigo	R= -0.957 + 9.31(NDVI)	0.72	181
Global	Algodón	R= -0.005 + 4.07(NDVI)	0.66	91

*R = rendimiento, ton·ha⁻¹, r = coeficiente de correlación, n = número de observaciones.

de las condiciones de desarrollo y expresan sus respuestas a través de la cubierta vegetal que producen (Wiegand *et al.*, 1996).

Para calcular rendimientos a partir del índice de vegetación normalizado (cuadro 3) y de la conductividad eléctrica (cuadro 1), con base en los valores de r, se encontró que la confiabilidad es mayor al utilizar la CE que el NDVI, lo cual es contrario a lo reportado por Wiegand *et al.* (1996). La explicación es que, en algunos casos, el día en que se obtenía la imagen no necesariamente correspondía al de la etapa más conveniente de crecimiento de los cultivos de las parcelas de observación, pues las diferentes fechas de siembra provocan una variación en el desarrollo de las plantas entre parcelas de un mismo cultivo.

Así, se establece que, en general, los valores espectrales extraídos de las bandas TM3 y TM4 en los sitios de observación predijeron entre r²= 0.41 y 0.69 a la

salinidad, y entre r²= 0.43 y 0.62 el rendimiento. Wiegand *et al.* (1994a) reportaron valores de r²= 0.51 y 0.53 para fotografía y sistemas de video, respectivamente.

Estimación de la salinidad y el rendimiento a través de las bandas TM2, TM3 y TM4

Las correlaciones de los valores espectrales de las bandas TM2, TM3 y TM4 con la CE y el rendimiento generaron modelos para clasificar por salinidad y rendimiento las subimágenes de los cultivos (cuadros 4 y 5). Los coeficientes de correlación para CE y rendimiento de las áreas de trigo variaron de 0.72 a 0.86, respectivamente; en algodón, de 0.65 a 0.81; en sorgo, de 0.73 y de 0.77. De forma comparativa, los coeficientes fueron ligeramente mayores para estimar el rendimiento que la CE, lo cual pudo deberse a que la cantidad de energía reflejada por la biomasa —captada por el sensor en sus tres bandas—

se relacionó de manera más estrecha con el rendimiento. Para estimar el rendimiento, los modelos de regresión presentaron coeficientes similares.

Al comparar los coeficientes de correlación de los modelos de los cuadros 2 y 3, con los de los cuadros 4 y 5, se observó que en los modelos que involucraron las tres bandas, los valores de r fueron superiores en general, lo cual indica la importancia de considerar en este tipo de análisis a las bandas dos, tres y cuatro, y no únicamente las bandas tres y cuatro para el cálculo del índice de vegetación normalizado. Wiegand *et al.* (1994a) reportaron valores de r^2 de 0.39 a 0.68, y de 0.39 a 0.59 para las áreas de algodón, utilizando fotografía infrarroja y sistemas de video. Al igual que en el NDVI, el análisis estadístico arrojó coeficientes de correlación más altos con el rendimiento que con la salinidad, considerando las tres bandas.

Generación de mapas de salinidad y rendimiento

Mediante la clasificación no supervisada de cada subimagen, se calculó el valor promedio de los valores espectrales correspondientes a cada categoría para cada

banda. Estos valores se sustituyeron en las ecuaciones de los cuadros 4 y 5, a fin de calcular los valores de salinidad y rendimiento dentro de cada categoría (cuadro 6).

Para valores de salinidad similares calculados con los modelos 1, 2 y 4 del cuadro 4, se estimaron valores de rendimiento de trigo también similares, utilizando los modelos 1, 2 y 4 del cuadro 5. En el DR Valle del Carrizo, para una $CE = 6.31 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, con los mismos valores de reflectancia, se estimó un rendimiento de $3.73 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$; en el DR Río Yaqui, una $CE = 6.53 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ correspondió a un rendimiento de $3.41 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$; en el DR Río Mayo, una $CE = 6.68 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ indicó un rendimiento de $3.14 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ (cuadro 6). Por lo anterior, se concluye que existió semejanza entre los resultados de salinidad y rendimiento estimados mediante los modelos de los cuadros 4 y 5, con los valores medios de reflectancia obtenidos a través de la clasificación no supervisada, no obstante las diferencias existentes en cuanto al suelo, manejo de cultivos, variedades y que los estudios se realizaron en diferentes años.

Los valores estimados de salinidad en los distritos variaron desde 0.4 hasta $18.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, y los valores de rendimiento de trigo fluctuaron entre 0 y $7.3 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$

Cuadro 4. Modelos de regresión para estimar la salinidad del suelo de tres cultivos de referencia con las bandas TM2, TM3 y TM4.

Distrito de riego	Cultivo	Ecuación	r	n
Valle del Carrizo	Trigo	* $CE = 0.819 + 0.551(TM2) - 0.011(TM3) - 0.100(TM4)$	0.86	43
Río Yaqui	Trigo	$CE = 13.541 + 0.815(TM2) + 0.140(TM3) - 0.043(TM4)$	0.73	74
Río Yaqui	Algodón	$CE = 2.756 + 0.777(TM2) + 0.770(TM3) + 0.022(TM4)$	0.65	34
Río Mayo	Trigo	$CE = 7.063 + 0.617(TM2) - 0.166(TM3) - 0.177(TM4)$	0.72	64
Río Mayo	Algodón	$CE = 5.205 - 0.396(TM2) + 0.484(TM3) - 0.010(TM4)$	0.80	57
Río Mayo	Sorgo	$CE = 11.330 + 0.596(TM2) - 0.268(TM3) - 0.142(TM4)$	0.73	52

*CE = conductividad eléctrica en el estrato 0-60 cm, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, TM2 = banda en el verde, TM3 = banda en el rojo, TM4 = banda en el infrarrojo cercano, r = coeficiente de correlación, n = número de observaciones.

Cuadro 5. Modelos de regresión para estimar el rendimiento de tres cultivos de referencia con las bandas TM2, TM3 y TM4.

Distrito de riego	Cultivo	Ecuación	r	n
Valle del Carrizo	Trigo	* $R = 3.87 - 0.372(TM2) + 0.152(TM3) + 0.077(TM4)$	0.80	43
Río Yaqui	Trigo	$R = 9.130 - 0.432(TM2) + 0.042(TM3) + 0.052(TM4)$	0.77	74
Río Yaqui	Algodón	$R = 7.086 - 0.052(TM2) - 0.083(TM3) - 0.002(TM4)$	0.70	34
Río Mayo	Trigo	$R = 1.934 - 0.115(TM2) - 0.028(TM3) + 0.076(TM4)$	0.75	64
Río Mayo	Algodón	$R = 3.748 - 0.063(TM2) - 0.031(TM3) + 0.009(TM4)$	0.81	57
Río Mayo	Sorgo	$R = -1.540 - 0.277(TM2) + 0.140(TM3) + 0.096(TM4)$	0.77	52

*R = rendimiento, $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, TM2 = banda en el verde, TM3 = banda en el rojo, TM4 = banda en el infrarrojo cercano, r = coeficiente de correlación, n = número de observaciones.

Cuadro 6. Valores de salinidad y rendimiento estimados a partir de la clasificación no supervisada de las subimágenes de trigo y de los modelos de regresión lineal múltiple.

Valle del Carrizo		Río Yaqui		Río Mayo	
*CE, dS·m ⁻¹	R, ton·ha ⁻¹	CE, dS·m ⁻¹	R, ton·ha ⁻¹	CE, dS·m ⁻¹	R, ton·ha ⁻¹
0.47	7.26	2.58	5.40	0.41	6.08
1.40	6.48	3.47	5.43	2.17	5.27
2.27	5.86	4.76	4.33	4.14	4.35
3.21	5.28	6.53	3.42	6.68	3.14
4.43	4.61	9.33	2.12	9.10	1.75
6.31	3.73	12.88	0.43	9.63	1.56
9.58	2.61	18.21	0	10.17	1.29

*CE = conductividad eléctrica estimada en el estrato 0-60 cm, dS·m⁻¹, R = rendimiento estimado, ton·ha⁻¹.

(cuadro 6). Estos valores sirvieron de referencia para establecer el número de clases y sus límites en la clasificación supervisada de las subimágenes de cada cultivo.

Cada una de las subimágenes supervisadas se clasificó en cinco categorías de salinidad (cuadro 7, foto 1). El área total cartografiada en los tres distritos de riego fue de aproximadamente 231,380 ha, que representan el 63% de las 368,569 ha de riego. El mayor porcentaje le correspondió al DR Río Yaqui con 140,500 ha (60.7%), después al DR Río Mayo con 71,400 ha (30.8%) y luego al DR Valle del Carrizo con 19,400 ha (8.4%). En los tres distritos, 135,096 (58%) se clasificaron como salinas; es decir, con una CE > 4 dS·m⁻¹ (cuadro 7). El distrito que se consideró como el de mayores problemas fue el Río Mayo (66.4% del área estudiada), seguido por el Río Yaqui (57.5% del área estudiada) y, por último, el DR Valle del Carrizo (35.7% del área estudiada).

También se obtuvieron los mapas de rendimiento (foto 2, cuadro 8). En el DR Valle del Carrizo, el trigo se clasificó en seis clases de rendimiento (cuadros 8 y 9); en el 57.4% del área se estimaron rendimientos superiores a la media estimada (5.3 ton·ha⁻¹). En este distrito se reportó en el mismo ciclo un rendimiento medio de 5.05 ton·ha⁻¹ (comunicación personal con el ingeniero Rodrigo Patrón Castro, gerente general de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Valle del Carrizo, 1994); como puede verse, el rendimiento medio estimado con la imagen fue un 5% mayor que el promedio registrado por el distrito de riego.

En el DR Río Yaqui, la subimagen de trigo se clasificó en siete categorías (foto 2). En el 46.3% del área se estimaron rendimientos superiores a 4.5 ton·ha⁻¹ (cuadro 8); el rendimiento medio estimado fue de 4.7 ton·ha⁻¹ (cuadro 9). En cuanto al rendimiento medio estimado de algodón con hueso (semilla), de 3.1 ton·ha⁻¹, se estimó

que el 72.1% del área presentó rendimientos superiores a 3.5 ton·ha⁻¹ (cuadro 8). Comparativamente, el rendimiento medio estimado en este distrito (4.7 y 3.1 ton·ha⁻¹ de trigo y algodón, respectivamente) fue menor en trigo (2.1%) y algodón (8.8%), al reportado por el DR Río Yaqui en el ciclo agrícola 1994-1995, de 4.8 y 3.4 ton·ha⁻¹ de trigo y algodón, respectivamente (comunicación personal con el ingeniero Leonel Fernando Soto Vega, jefe de Operación del DR Río Yaqui, 1996).

Para el DR Río Mayo, en el 49.5% del área de trigo se estimaron rendimientos mayores al promedio estimado de 4.6 ton·ha⁻¹; en algodón, el promedio valorado fue de 2.1 ton·ha⁻¹ de algodón con semilla, y en el 69.8% del área de algodón se tasaron rendimientos por arriba de 1.5 ton·ha⁻¹ (cuadro 8). En este distrito se consideró un rendimiento medio de sorgo de 4.2 ton·ha⁻¹ (cuadro 9) similar al reportado por el distrito de riego en este ciclo de cultivo, de 4.4 ton·ha⁻¹; en el 29.9% del área de sorgo se presumieron rendimientos superiores a 4 ton·ha⁻¹. Como comparación, en este distrito los rendimientos medios registrados en un periodo de diez años son de 4.8, 2.4, y 4.3 ton·ha⁻¹ en trigo, algodón y sorgo, respectivamente (comunicación personal con el ingeniero Jorge Infante Reyes, gerente de Riego y Drenaje de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego Río Mayo, 1996); es decir, las diferencias entre los rendimientos medios estimados y los rendimientos medios reportados por el distrito fueron 4.2% (trigo), 12.5% (algodón) y 2.3% (sorgo).

El mayor rendimiento medio de trigo se obtuvo en el Valle del Carrizo y el mayor rendimiento medio de algodón, en el DR Río Yaqui (cuadro 9).

Con base en la información del cuadro 7, se calculó la disminución de la producción asociada con la salinidad (cuadro 9). Para realizar los cálculos, se utilizaron los modelos del cuadro 1, considerando el valor del intercepto

Cuadro 7. Clasificación de suelos por salinidad de los distritos de riego estudiados con imágenes de satélite.

CE (dS·m ⁻¹)	Valle del Carrizo		Río Yaqui		Río Mayo	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
0 - 4	12,460	64.27	59,800	42.5	24,024	33.6
4 - 8	5,615	28.96	43,379	30.8	25,934	36.3
8 - 12	1,150	5.93	19,463	13.8	17,486	24.5
12 - 16	159	0.82	9,308	6.8	3,806	5.3
> 16	3	0.01	8,595	6.1	198	0.3
Subtotal	19,387	99.99	140,545	100.0	71,448	100.0

Área total cartografiada: 231,380 ha

Foto 1. Mapa de salinidad del suelo en el distrito de riego 041 Río Yaqui, Sonora, obtenido con imágenes de satélite Landsat TM.

Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

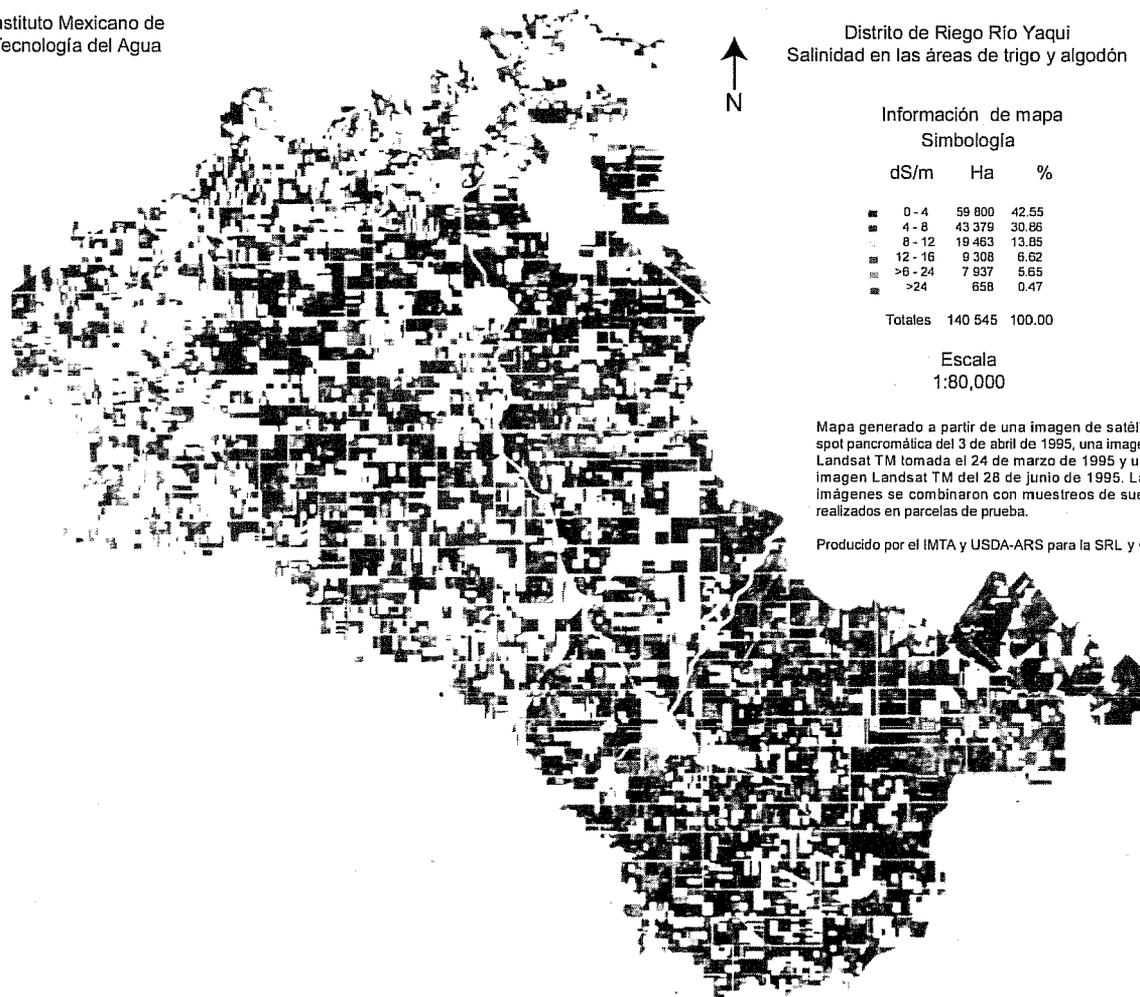
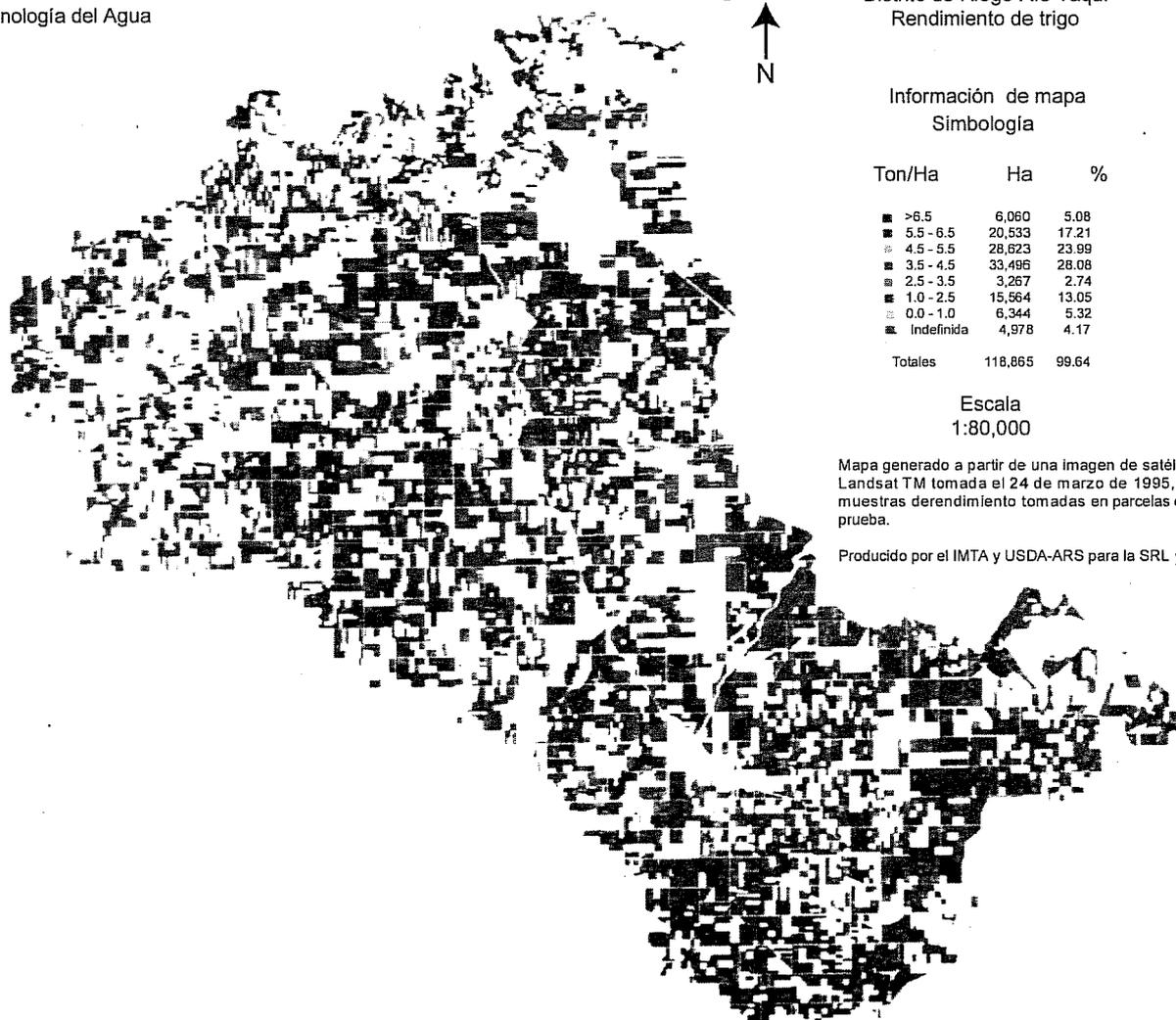


Foto 2. Mapa de rendimiento de trigo en el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, Sonora, obtenido con imágenes de satélite Landsat TM.

Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua



Cuadro 8. Clasificación por rendimiento de las superficies sembradas con trigo, a partir de imágenes de satélite.

Distrito de Riego 076		Distrito de Riego 041		Distrito de Riego 038	
Rendimiento (ton-ha ⁻¹)	Área (%)	Rendimiento (ton-ha ⁻¹)	Área (%)	Rendimiento (ton-ha ⁻¹)	Área (%)
>6.5	13.9	>6.5	5.1	>6.0	14.5
5.5 - 6.5	28.8	5.5 - 6.5	17.2	4.5 - 6.0	35.0
4.5 - 5.5	28.4	4.5 - 5.5	24.0	3.0 - 4.5	23.0
3.5 - 4.5	17.3	3.5 - 4.5	28.1	1.5 - 3.0	15.3
2.5 - 3.5	8.8	2.5 - 3.5	2.7	<1.5	12.2
<2.5	2.9	2.5 - 1.0	13.0		
		<1.0	5.3		

Cuadro 9. Disminución de la producción estimada mediante imágenes de satélite en tres distritos de riego.

Distrito de riego	Cultivo	Superficie cultivada (ha)*	Producción (ton)	Rendimiento medio (ton·ha ⁻¹)	Disminución (ton)
076	Trigo	19,387	106,482	5.3	9,943
041	Trigo	113,886	537,697	4.7	50,796
041	Algodón	22,163	68,717	3.1	3,654
038	Trigo	48,250	224,225	4.6	43,350
038	Algodón	11,659	24,640	2.1	5,224
038	Sorgo	11,539	48,402	4.2	28,124
Total	Todos	226,884	1,010,163	---	141,091

*La superficie total difiere del cuadro 7 en que 4,504 ha del Distrito de Riego 041 se clasificaron como suelo desnudo, ocupado por caminos, canales, drenes, poblados.

como el rendimiento más alto y el valor de la pendiente como el indicador del decremento de rendimiento. La superficie de la clase se dividió en cuatro subáreas; cada subárea se multiplicó por una unidad de CE y por el valor de la pendiente, de tal forma que la segunda subárea se multiplicó por dos y por la pendiente; la tercera por tres y por la pendiente, y la cuarta por cuatro y por el valor de la pendiente. La suma del producto de las subáreas dio el total de la clase. Este criterio se aplicó para todas las clases después de 4 dS·m⁻¹.

Las pérdidas estimadas de trigo en los tres distritos fueron de 104,089 ton de trigo, 8,878 ton de algodón y 28,124 ton de sorgo, haciendo un total de 141,091 ton, equivalentes al 14% de la producción total estimada, la cual fue de aproximadamente 1,010,163 ton (cuadro 9).

Conclusiones

La presente metodología permite detectar variaciones de la salinidad del suelo y del rendimiento, por lo que es factible utilizarla para identificar y cartografiar la salinidad, así como para estimar y cartografiar el rendimiento en distritos de riego con problemas de salinidad.

Para aplicar la metodología aquí descrita, es necesario tomar como indicadores de la salinidad a cultivos extensivos que hayan sido establecidos en un periodo específico, como es el caso de los cultivos señalados en este trabajo.

La salinidad del suelo en un distrito de riego se estima indirectamente con los datos de campo y los valores espectrales, considerando que la pérdida de vigor de la parte aérea y radical de las plantas es causada principalmente por dicha salinidad y suponiendo que el agricultor tiene control sobre los otros factores de la producción. Esto se confirma al observar que en los

distritos estudiados, la conductividad eléctrica del suelo por sí sola explica entre un 53 y un 76% la disminución de rendimiento de trigo, algodón y sorgo.

Los modelos de regresión elaborados con las bandas en el verde, rojo e infrarrojo cercano para estimar la salinidad y el rendimiento presentaron coeficientes de correlación ligeramente mayores que los modelos obtenidos al utilizar únicamente las bandas en el rojo e infrarrojo cercano, mediante el índice de vegetación normalizado, por lo que es más confiable clasificar imágenes con los modelos de regresión lineal que consideran a las tres bandas. La aplicación de estos modelos en las imágenes de los tres distritos dio como resultado que en una área total cartografiada de 231,400 ha, 135,100 ha (58.38%) presentaron algún nivel de salinidad (CE > 4 dS·m⁻¹).

Los mapas de salinidad que se generan en formato digital tienen la posibilidad de utilizarse en equipos de cómputo personales, con lo cual se obtienen impresiones en papel del área total o de fracciones del distrito de riego. Estos mapas pueden usarse para planificar adecuadamente el aprovechamiento del suelo, considerando que las áreas con mayores problemas pueden requerir de la aplicación de prácticas agronómicas de rehabilitación de suelos y de cambio del patrón de cultivos.

Las imágenes empleadas para identificar la salinidad también son útiles para estimar y cartografiar el rendimiento, aspecto que le da un valor agregado al trabajo y a la metodología. El análisis de las áreas afectadas y del rendimiento permite estimar el impacto de la salinidad en el rendimiento y en la producción. Así, en los tres distritos estudiados se estimó que la disminución de producción de trigo fue de 104,100 ton, 8,900 ton en algodón y 28,100 ton de sorgo, lo cual da un total de 141,100 ton, equivalentes al 14% de la producción estimada: 1,010,200 toneladas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las autoridades de las sociedades de responsabilidad limitada de los Distritos de Riego 076, 041 y 038, por el apoyo económico (DR 041 y 038), humano y de información técnica. Asimismo, a los directivos de los distritos de riego por el apoyo en los análisis de laboratorio, proporcionando personal técnico y de campo, e información técnica. A las autoridades del Laboratorio de Investigación en Agricultura Subtropical del Servicio de Investigación Agrícola de Weslaco, Texas (*Subtropical Agricultural Research Laboratory, USDA-ARS*), por la asesoría y servicios brindados para la conclusión de los estudios e impresión de los mapas de los DR Valle del Carrizo y Río Yaqui, y por facilitar la participación directa del doctor Craig L. Wiegand, siempre dispuesto a brindar su mejor esfuerzo a estos proyectos. En especial se agradece la participación de los ingenieros Rodrigo Patrón Castro y Néstor Gastelo del DR Valle del Carrizo; Benjamín Domínguez, Rafael Renero Amparán, Julio López Hernández y Ricardo Ruelas de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del DR Río Yaqui; Rubén Briseño Borbón, Jorge Infante Reyes y José M. Delgado, y a los señores Efraín Cervantes Luna y Ramón Laveaga, de la la Sociedad de Responsabilidad Limitada de DR Río Mayo.

Recibido: 18/07/1999

Aprobado: 20/05/2002

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, pp. 172.
- CISNEROS, E.O.X.. *Análisis retrospectivo integral de la agricultura de riego caso del DR Río Yaqui, Son. -Un enfoque medio ambiental y socioeconómico en el DR 041*. Tesis de maestría en Ciencias. Cuernavaca: Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, México, 1998.
- DE LA PEÑA, I. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. *Boletín técnico núm. 10*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1982, 127 pp.
- 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.
- IFEX GEOTÉCNICA. *Estudio de suelos e investigación del terreno Valle "El Carrizo"*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1964, 76 pp.
- PACHECO, H.P. *Eficiencia de mejoradores químicos en un suelo de la zona de riego El Carrizo, Sinaloa*. Tesis de licenciatura. México: Universidad Autónoma Chapingo, 1988, 102 pp.
- PULIDO, M.L., SANVICENTE, H.S., WIEGAND, C.L. y RODRÍGUEZ, C.Z. Identificación con imágenes *Landsat TM* y *Spot pancromática* de suelo ensalitrado en los distritos de riego de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. X, núm. 2, 1995, pp. 95-102.
- REYES, Q.C. *Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo*. Sonora: Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. México, 1994.
- 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, 1992a, pp. 1511-1525.
- WIEGAND, C.L., RHOADES, J.D., EVERITT, J.H. Y ESCOBAR, D.E. Comparison of photography, videography and spot-1 HRV digital observations for salinity assessment in the San Joaquin Valley of California. *Land reclamation. Advances in research & technology*. Younos, T., Diplas, P. y Mostaghimi, S. (editores). Nashville, Tennessee: ASAE. Proceedings of the International Symposium. 14 y 15 de diciembre, 1992b, pp. 268-282.
- WIEGAND, C.L., ESCOBAR, D.E. y LINGLE, S.E. Growth and yield responses of sugar cane to saline soil: 1. Sensing and mapping using aerial videography. *Proc. Inter American Sugar Cane Seminars, Sugar Cane and our Environment*. Vol. 1. Miami, 15, 16 y 17 de septiembre, 1993, pp. 75-92.
- 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. 48, 1994a, pp. 1-25.
- WIEGAND, C.L. y LINGLE, S.E. *Effect of soil salinity on growth and yield of sugarcane*. Vol. 36. Acapulco, México: Trans. 15th World Congress of Soil Science, del 10 al 16 de julio, 1994b, pp. 378-379.
- WIEGAND, C.L., ANDERSON, G., LINGLE, S. y ESCOBAR, D. Soil salinity on crop growth and yield -illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *J. Plant Physiol*. Vol. 148, 1996, pp. 418-424.

Abstract

PULIDO MADRIGAL, L., WIEGAND, C.L., GONZÁLEZ MERAZ, J., ROBLES RUBIO, B.D., CISNEROS ESTRADA, X. & LEMUS RAMÍREZ, O. Soil salinity and its effect on crop yield - a study using satellite imagery in three irrigation districts. *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. April-June, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 83-97.

Soil salinity and yield were studied in the Valle del Carrizo, Rio Yaqui and Rio Mayo irrigation districts (ID) using satellite imagery. The reference crops evaluated were wheat (*Triticum aestivium*), cotton (*Gossypium hirsutum*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). Soil salinity of the cropped areas was detected by correlating soil electrical conductivity determined at point sites within previously designated fields, to spectral values extracted from the green (TM2), red (TM3) and infrared (TM4) bands of the Landsat images. Yield samples were also collected around the same points, and multiple regression models were developed to estimate crop yield. The planted areas were digitized on the images to obtain an unsupervised classification and all the pixels were grouped by reflectance. Based on the multiple regression models, codes were created to classify all the pixels into several classes to generate salinity and yield maps. The total area of the three irrigation districts encompasses 466,927 ha, from which 231,378 ha were mapped, and 135,094 ha (58%) were classified as saline land ($EC > 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). A total loss of 104,000 tons of wheat, 8,900 tons of cotton, and 28,100 tons of sorghum was estimated.

Keywords: irrigation district, soil salinity, wheat, cotton, sorghum, satellite image, Landsat TM, regression model, yield.

Dirección institucional de los autores:

Leonardo Pulido Madrigal
Craig L. Wiegand
Jorge González Meraz
Braulio David Robles Rubio
Xóchitl Cisneros Estrada
Óscar Lemus Ramírez

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