

Aplicación de sistemas de información geográfica y sensoría remota en el seguimiento del avance de riego en un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera

Application of geographic information systems and remote sensing to track the irrigation progress in one module of irrigation district 017 Region Lagunera

Carlos Miguel Ramos-Cruz^{1*} , Juan Estrada-Ávalos² , Gerardo Delgado-Ramírez² ,
Emilia Raquel Pérez-Evangelista³ , Ignacio Orona-Castillo⁴ 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental General Terán, 67400, General Terán, Nuevo León, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera, 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez y carretera Santa Fé, 27054, Torreón, Coahuila, México.

⁴Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, Ejido Venecia, Apdo. Postal 1-142, 35111, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor para correspondencia: ramos.carlos@inifap.gob.mx

Fecha de recepción:

2 de marzo de 2021

Fecha de aceptación:

18 de junio de 2022

Disponible en línea:

10 de noviembre de 2022

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-

NoComercia-

CompartirIgual 4.0

Internacional

RESUMEN

Los sistemas de información geográfica (SIG) y de percepción remota (PR) ayudan en el manejo y análisis de la información en los distritos de riego (DR). Por tal motivo, el objetivo del presente estudio fue generar un SIG y dar seguimiento al avance de riego superficial de un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera, México. Para esto, se integró un SIG a partir de topografía de precisión, y se utilizaron diez imágenes del satélite Landsat 8. Los resultados indican que la red principal tiene 19.5 por ciento de menor longitud en el canal lateral derecho (CLD) 57+839, de acuerdo con las cifras oficiales. Los principales cultivos sembrados fueron algodón (35.7%) y nogal (34.3%); asimismo, se identificó 24.2 por ciento de superficie excedente. Los SIG y PR facilitan el seguimiento del avance de riego en el módulo, lo cual contribuye a realizar un uso eficiente del agua.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia del agua, avance de riego, riego superficial.

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) and Remote Perception Systems (PR) aid in the management and analysis of information in irrigation districts. For this reason, the objective of this study was to generate a GIS and monitor the progress of surface irrigation of a module of irrigation district 017 Lagunera Region, Mexico. To achieve this, we integrated a GIS based on precision topography and used ten images from the Landsat 8 satellite. The results indicate that the main network is 19.5% shorter in the right lateral canal 57 + 839, according to official figures. The main crops harvested were cotton (35.7%) and walnut (34.3%); also, a 24.2% surplus was identified. The GIS and PR facilitate tracking the irrigation progress in the module, which contributes to efficient water use.

KEYWORDS

Irrigation water efficiency, irrigation progress, surface irrigation.

INTRODUCCIÓN

El mundo se encuentra en constante transformación y evolución, debido a la necesidad de acceder de forma rápida a información que dé solución a problemas complejos. Esto aceleró el desarrollo de distintas áreas en la actividad humana, entre las cuales están los sistemas de información geográfica (SIG), y los sensores remotos (SR) (Cristea y Florina 2016). En la actualidad, los SIG son una herramienta poderosa que involucra el análisis espacial y el modelado mediante la gestión de bases de datos, la interpolación, algoritmos gráficos y análisis de red (Higgins et al. 2014; Howari y Ghrefat 2021). Los SIG son sistemas combinados de *hardware* y *software* diseñados para almacenar, analizar, editar y visualizar datos espaciales (Goodchild 2015; Manson et al. 2015; Wagner 2018); dependiendo del propósito del análisis, los resultados se pueden presentar como mapas, cartas o gráficos (Korucu 2012). En resumen, los SIG almacenan la información geoespacial de forma eficiente, facilitan su actualización, así como el acceso directo para los usuarios y aumentan la posibilidad de análisis respecto a mapas convencionales (ESRI 1998; Mejía-Saenz et al. 2003). Además, permiten investigar, predecir y pronosticar de manera eficiente, repetitiva, no invasiva, rápida y rentable diversos fenómenos naturales (Choudhary et al. 2017; Kose et al. 2017).

La percepción remota (PR), los SIG y los sistemas de posicionamiento global (GPS) son herramientas de utilidad para la identificación y monitoreo de extensas áreas agrícolas, así como para la estimación de la producción, detección de plagas y enfermedades, mapeo de zonas productivas, cálculo de estrés hídrico y direccionamiento del muestreo con base en la variabilidad espacial del suelo y de los cultivos (Aguilar et al. 2010). El uso de las técnicas de percepción remota y de SIG representa una visión clara para el seguimiento temporal de las zonas agrícolas durante el desarrollo de los cultivos (Aguilar 2015). En general, son herramientas fundamentales para la integración y análisis de la información en la ejecución de diversos estudios (Santos-Hernández et al. 2019). Debido a estas características, dichas herramientas se han vuelto indispensables para los administradores y planificadores en la toma de decisiones sobre el manejo de distintos recursos (Korucu 2012; Kose et al. 2017). El uso de los SIG y de la PR en la planificación de las actividades en un distrito de

riego (DR) y sus módulos apoya en el conocimiento y análisis de la información que en éstos se genera, y permite que los recursos se aprovechen de manera eficiente (Mejía-Saenz et al. 2003).

En México, los distritos de riego operan con eficiencias globales menores a 40 por ciento (Altamirano et al. 2019; Exebio-García et al. 2005; Ochoa-Noriega et al. 2020), lo cual se atribuye a diversos factores, entre los cuales destacan algunos de naturaleza tecnológica asociados a la operación deficiente de la red de conducción, así como al diseño y manejo deficiente del sistema de riego parcelario (Ramos-Cruz et al. 2019). Aunado a éstos, se suman otros factores de naturaleza administrativa que también impactan la eficiencia de gestión del agua, como es el sobredimensionamiento, por parte de los usuarios, de las superficies de riego concedidas (Ramos y Delgado 2019). Aun cuando no se dispone de cifras reportadas oficialmente sobre la magnitud de este problema, se sabe que produce retrasos importantes en la entrega del agua a los usuarios y propicia el uso ilegal de volúmenes de agua no concesionados. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue generar un SIG a partir de un levantamiento topográfico de precisión y dar seguimiento al avance de riego superficial de un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera, México, mediante el uso de imágenes de satélite con la finalidad de identificar superficies excedentes durante el ciclo de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un módulo del distrito de riego 017 Región Lagunera (DR-017), que se localiza en la Región Lagunera, integrada por diez municipios del estado de Durango y cinco municipios del estado de Coahuila de Zaragoza, México (Macías et al. 2007). Es administrado por la Comisión Nacional de Agua (CNA) y se divide en 20 módulos de riego, de los cuales 17 pertenecen al río Nazas y el resto al río Aguanaval (Figura 1), con una superficie dotada de 223,822 ha y un volumen anual concesionado de 1,024 Mm³ para irrigar 93,409 ha (García et al. 2010). La distribución del agua se realiza por medio de una red de 1,266 km de canales, en beneficio de 37,956 usuarios. El sistema de riego utilizado para irrigar los cultivos es superficial por melgas (Ramos-Cruz et al. 2019).

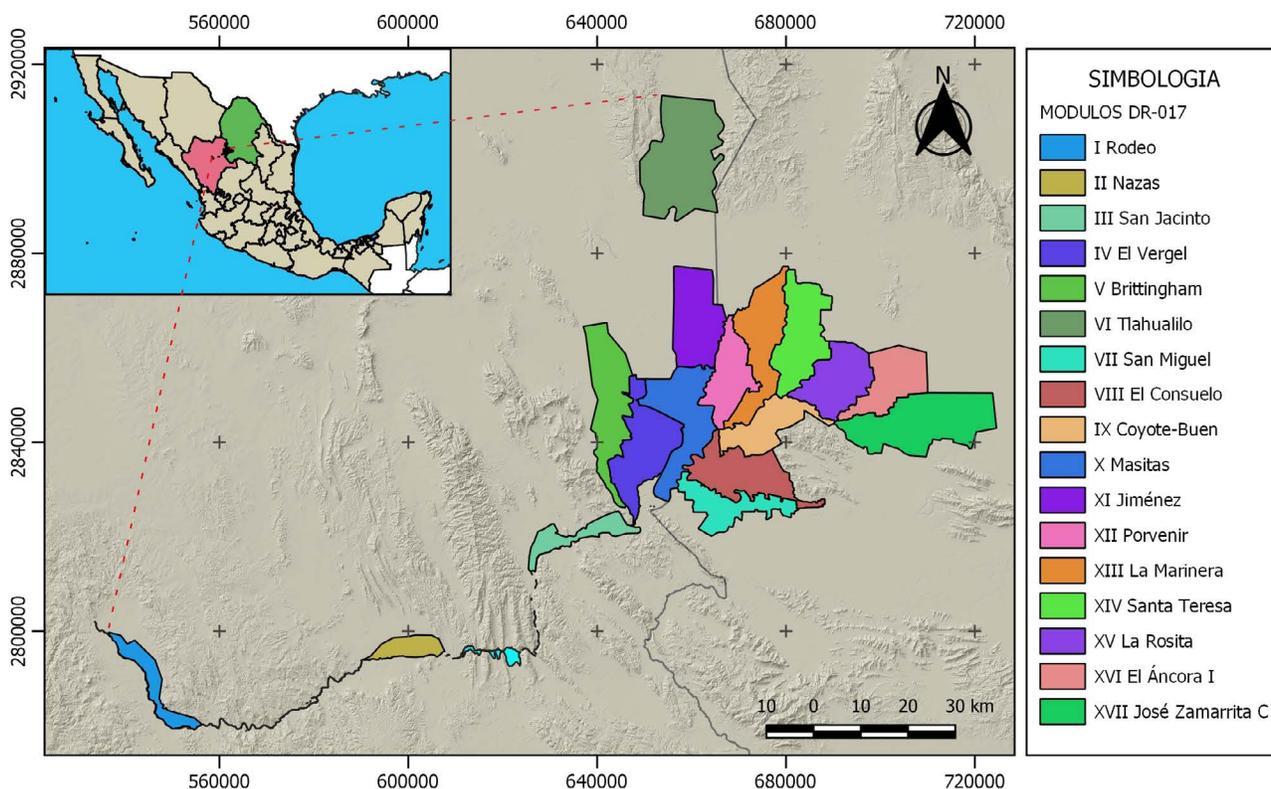


Figura 1. Distribución geográfica de los módulos del distrito de riego 017, Región Lagunera, México

El módulo evaluado se localiza en el sureste del estado de Coahuila, entre $25^{\circ} 45' 18''$ y $25^{\circ} 38' 59''$ N, $102^{\circ} 46' 06''$ y $103^{\circ} 05' 54''$ O, 1,096 msnm; cuenta con una red de canales principales de 144 km, y una superficie de riego autorizada por el DR-017 de 1,862 ha, distribuidas en seis secciones (Ramos 2016).

Levantamiento topográfico. Se realizó un levantamiento detallado de la red principal de conducción, la red secundaria, la red interparcelaria y de cada parcela programada para riego por el módulo. Para ello, se empleó un equipo GPS diferencial (Trimble® modelo R3, Trimble Inc., Sunnyvale, California, Estados Unidos), el cual tiene una precisión de ± 10 mm en horizontal y ± 20 mm en vertical. El estilo de levantamiento fue PPK cinemático, configurado en el sistema UTM con Datum WGS'84 para la zona 13 Norte. Posterior al trabajo en campo, en gabinete se realizó el post-proceso de cada levantamiento, con el *software* Trimble Business Center®, Ver. 2.0, con la finalidad de reducir el error de las observaciones brutas entre el receptor base y móvil.

Proyección de coordenadas del GPS diferencial. Las coordenadas corregidas con formato xlsx se convirtieron a formato CSV (del inglés Comma-Separated

Values), debido a que el formato xlsx no es compatible con el *software* QGIS. La proyección de los puntos se realizó mediante el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), con datum WGS'84 para la zona 13 Norte.

Integración de un SIG. Éste se llevó a cabo en el Laboratorio de SIG-Agua-Suelo del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), con sede en Gómez Palacio, Durango, México. Consistió en digitalizar las coordenadas obtenidas en campo, con el GPS diferencial en mapas digitales de formato shapefile, bajo la proyección WGS 84 UTM, para la zona 13 N. Se crearon distintas capas en formato vectorial, al considerar polígonos para las parcelas y la red principal de canales; líneas para los canales interparcelarios, y puntos para las distintas estructuras de operación de la red principal de canales. Para esto se utilizó Quantum QGIS, versión 3.10, desarrollado por la asociación QGIS.ORG, Suiza, *software* libre y de código abierto (FOSS) (Lakota y Stajko 2013; Dile et al. 2016; Meyer y Riechert 2019).

Adición de atributos a los mapas. Los mapas digitales deben disponer de información de origen y de las modificaciones realizadas; por tal motivo, es necesario que contengan información que ayude a su rápida identificación (Harlow y Vienneau 2003). Dependiendo del tipo de capa, se agregó información como: nombre del usuario, módulo, sección de riego, superficie, cultivo, longitud del canal, tipo de estructura (Espinosa-Espinosa et al. 2017).

Adquisición de imágenes de satélite. Se utilizaron diez imágenes captadas por el sensor OLI (Operational Land Imager), que se encuentra a bordo del satélite Landsat 8, correspondientes a los días julianos 84, 104, 113, 120, 136, 168, 177, 193, 209 y 216 (Cuadro 1). Las imágenes se obtuvieron de manera gratuita en el portal de la United States Geological Survey (USGS) <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Caballero y Treviño 2018). Las características básicas de las imágenes son: campo de visión 180 x 175 km², resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 30 m, la cual permite el seguimiento de parcelas mayores a una ha (Cuesta et al. 2005).

Corrección radiométrica. Con las imágenes descargada se realizó la corrección radiométrica, debido a que los datos de las bandas del sensor TIRS y OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y deben ser reescalados a valores de reflectancia en el techo de la atmósfera "Top of Atmosphere" (TOA). Para esto, se utilizaron los coeficientes radiómetros incorporados en los metadatos de la imagen y la ecuación 1 (Ariza 2013):

$$PA' = (Mq * Qcal + Aq) / \sin(\theta SE)$$

Donde: PA' = al valor de reflectancia con corrección de ángulo solar; Mq = al factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x (x = número de la banda)); Aq = al factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato ((REFLECTANCE_ADD_BAND_x (x = número de la banda)); Qcal = al producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN); y θSE = al ángulo de elevación solar del centro de la escena, el cual es provisto en los metadatos (SUN_ELEVATION).

Combinación de bandas. De cada imagen obtenida, mediante el *software* QGIS ver. 3.10, se combinaron las bandas cinco, cuatro y tres para generar una a falso color. Esto sucede al pasar las bandas por los filtros rojo, verde y azul. Cada banda muestra un degradado de grises que serán saturados por el color de su canal de manera proporcional durante la composición de la imagen RGB. Esta combinación de las tres bandas saturadas de color hará que se generen imágenes con tramas rojas, verdes y azules, así como otros colores secundarios. El falso color representa mejor la presencia de vegetación en comparación con el color natural.

Verificación de la superficie de riego. Se recopiló información diaria sobre los avances de riego, la cual fue proporcionada por los canaleros de las secciones de riego del módulo, además de la obtenida durante las visitas. Esta información se agregó a la base de datos del SIG y se contrastó con las zonas de crecimiento de vegetación captadas a través de las imágenes de satélite. También fue necesario hacer una supervisión en

Cuadro 1. Imágenes captadas por el sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8.

No.	Día Juliano	ID	Path	Row
1	84	LC08_L1TP_029042_20130325_20170310_01_T1	29	42
2	104	LC08_L1TP_030042_20130414_20170310_01_T1	30	42
3	113	LC08_L1TP_029042_20130423_20170310_01_T1	29	42
4	120	LC08_L1TP_030042_20130430_20170310_01_T1	30	42
5	136	LC08_L1TP_030042_20130516_20170310_01_T1	30	42
6	168	LC08_L1TP_030042_20130617_20170309_01_T1	30	42
7	177	LC08_L1TP_029042_20130626_20170309_01_T1	29	42
8	193	LC08_L1TP_029042_20130712_20170309_01_T1	29	42
9	209	LC08_L1TP_029042_20130728_20170309_01_T1	29	42
10	216	LC08_L1TP_030042_20130804_20170309_01_T1	30	42

campo para excluir parcelas regadas mediante pozos profundos y parcelas con presencia de maleza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El módulo dispone de una red de canales de distribución de 51.5 km, de los cuales 47.6 por ciento corresponden al canal principal sacramento (CPS) y el resto (52.4%) al canal lateral derecho (CLD) 57+839; 100 por ciento de estos están revestidos. Además, se identificó que el CPS tiene 17.8 por ciento de mayor longitud y el CLD 57+83 un 19.5 por ciento menor a la cifra oficial. Las causas probables de la pérdida de longitud del CLD 57+83 se deben al bajo grado de conservación que ha originado azolvamiento y el abandono de la red por la disminución de la superficie regable (Pedroza e Hinojosa 2014). La baja conservación de la red mayor se debe a una inversión por debajo de lo requerido, pues, a pesar de que existe una cuota para los usuarios,

ésta no considera ni los costos de conservación ni de mantenimiento de canales y estructuras (Ramírez et al. 2019).

Para el caso de la red de canales interparcelarios, éstos presentan una longitud de 83.9 km, de los cuales únicamente 15 por ciento se encuentran revestidos, y el resto (85%) son canales no revestidos (Figura 2). En los módulos de riego, estos canales presentan las mayores pérdidas por conducción, y por ende, las menores eficiencias de conducción (Ramos-Cruz et al. 2018). De acuerdo con un estudio realizado por Ramos et al. (2018), en un módulo del distrito de riego 017, sobre eficiencias de conducción, encontraron que, al realizar un programa de revestimiento con concreto en canales interparcelarios, es posible obtener un ahorro de 30.8 por ciento, equivalente a 1,693 m³ por cada m que se rehabilite durante el ciclo de riego.

Respecto al SIG de la red mayor, existen 257 estructuras hidroagrícolas (Figura 2), de las cuales 47.1 por ciento corresponden a estructuras de operación

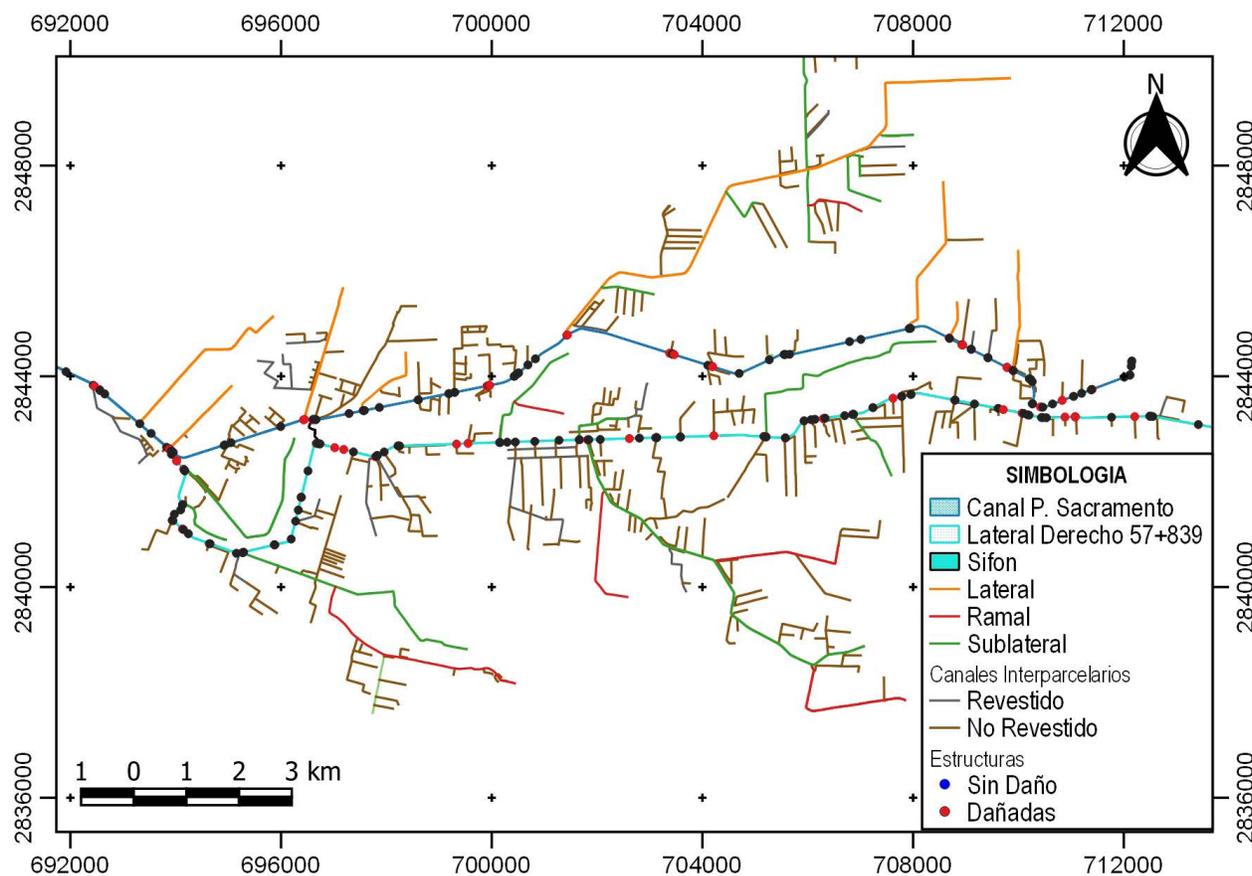


Figura 2. Distribución geográfica de canales interparcelarios (revestidos y no revestidos) y estructuras hidroagrícolas con daños y sin daño del módulo de riego de estudio, Región Lagunera, México

(toma granja o tomas directas). Sin embargo, 35 por ciento de estas estructuras presentan daños que impiden su correcto funcionamiento (cierres de las compuertas deslizantes), por lo cual se presentan fugas de agua. Asimismo, se observó que los daños a estas estructuras son ocasionados por los usuarios y personas sin derecho para la extracción lícita de agua hacia sus parcelas. Lomelí et al. (2000) establecieron que para mantener o incrementar la eficiencia y la productividad del agua en los distritos de riego es imprescindible que la infraestructura funcione correctamente, es decir, que opere a su máxima capacidad y que cumpla con el objetivo para el que fue construida.

En cuanto a la superficie sembrada autorizada, los cultivos con mayor superficie en el módulo de riego fueron el algodón (35.7%) y el nogal (34.3%), seguido en menor superficie por el melón (11.5%) y el sorgo forrajero (10.5%) (Cuadro 2). Lo anterior indica que, en este módulo, el algodón no es el cultivo principal como en años anteriores; esto coincide con Miranda (2008), quien indica que el cultivo de algodón en la Comarca Lagunera fue el impulsor en sus inicios; sin embargo,

en los últimos 20 años ha sufrido una disminución considerable en cuanto a superficie sembrada y cosechada. Esto se atribuye a la caída del precio internacional de la fibra y a los altos costos de producción (Ríos et al. 2009; SAGARPA/FAO 2014). Asimismo, es un indicador para realizar una reconversión de cultivos, debido a que el distrito de riego 017 se basa en el cultivo de algodón para realizar la programación de riego, lo cual ocasiona estrés hídrico a 64.3 por ciento de los cultivos establecidos en el módulo. Lo anterior puede deberse al intervalo entre el riego de aniego y el primer auxilio, que comprende a más de 55 días (Cháirez-Araiza y Palerm-Viqueira 2013).

En el módulo, 12.1 por ciento de las parcelas son niveladas. Esta actividad se realizó en mayor porcentaje en la sección 92, lo que podría atribuirse a que en esta sección existe un mayor número de parcelas de la pequeña propiedad (Ramos 2016). Por el contrario, el resto de la superficie (87.9%) no lleva a cabo la nivelación de las tierras (Figura 3), lo cual se atribuye a que aproximadamente 65 por ciento son parcelas ejidales con una superficie promedio de 3.2 ha. Este sector de

Cuadro 2. Superficie sembrada en el módulo del distrito de riego 017, Región Lagunera, por cultivo y sección de riego.

Sección de Riego	Cultivo	Superficie (ha)			Excedente
		Autorizada	Real	Excedente	%
91	Nogal	232.0	257.0	25.0	5.5
	Algodón	100.4	110.9	10.5	2.3
	Sandía	40.9	48.7	7.8	1.7
	Melón	15.1	21.8	6.7	1.5
	Sorgo forrajero	-	3.1	3.1	0.7
	Sorgo escobero	2.9	5.4	2.5	0.6
	Otros	3.2	5.6	2.4	0.5
92	Nogal	114.5	132.1	17.6	3.9
	Algodón	96.7	164.2	67.8	15.0
	Sandía	24.0	39.0	15.0	3.3
	Melón	10.7	19.4	8.7	1.9
	Sorgo forrajero	-	17.9	17.9	4.0
	Sorgo escobero	5.5	8.0	2.5	0.6
93	Nogal	110.2	131.0	20.8	4.6
	Algodón	108.8	145.0	36.2	8.0
	Sandía	13.4	18.7	5.3	1.2
	Melón	31.2	42.9	11.7	2.6
	Sorgo forrajero	-	12.4	12.4	2.7
	Sorgo escobero	7.4	9.6	2.2	0.5

Cuadro 2. Continuación.

Sección de Riego	Cultivo	Superficie (ha)			Excedente
		Autorizada	Real	Excedente	%
95	Nogal	75.6	82.1	6.5	1.4
	Sandía	-	3.1	3.1	0.7
	Melón	-	4.8	4.8	1.1
	Sorgo forrajero	160.1	163.4	3.3	0.7
	Sorgo escobero	-	1.5	1.5	0.3
96	Nogal	81.5	97.8	16.3	3.6
	Algodón	183.0	192.1	9.1	2.0
	Sandía	15.1	20.7	5.6	1.2
	Melón	129.4	149.9	20.5	4.5
	Sorgo forrajero	25.1	27.8	2.7	0.6
	Sorgo escobero	1.3	3.8	2.5	0.6
	Otros	1.5	6.4	4.9	1.1
97	Nogal	24.1	49.4	25.3	5.6
	Algodón	175.9	215.4	39.9	8.8
	Melón	27.8	40.9	13.1	2.9
	Sorgo forrajero	10.9	20.2	9.3	2.1
	Sorgo escobero	34.2	41.0	6.8	1.5

Real = Superficie autorizada más la superficie excedente encontrada en el módulo de riego.

productores tiene menor acceso a maquinaria agrícola y, en la mayoría de los casos, utilizan tracción animal para desarrollar ciertas actividades (Palacios y Ocampo 2012). Al respecto, Delgado et al. (2014) indican que, al considerar la nivelación del terreno antes de establecer el cultivo, así como las demás variables de diseño de riego superficial (longitud de melga no mayor a 180 cm, ancho de melga en función al gasto unitario), es posible tener una eficiencia de riego de 80 por ciento. Por otra parte, el INTA (2015) considera que, al relizar la nivelación del terreno, se puede incrementar hasta 30 por ciento la superficie regable.

Con el seguimiento de los avances de riego y las imágenes de satélite se identificaron áreas con presencia de vegetación que no fueron consideradas en el padrón de riego (Figura 4). Estas superficies fueron verificadas en campo y se excluyeron áreas con riego mediante pozo profundo. Se identificaron aproximadamente 451 ha de excedentes, lo cual representa 24.2 por ciento de mayor superficie regada a la autorizada por el distrito de riego 017 (1,862 ha); de estas hectáreas, el cultivo de algodón fue el que más se regó en el módulo (36.2%), dividido en las secciones 92, 93 y 97,

seguido del cultivo de nogal (24.7%), distribuido en todas las secciones (Cuadro 2). La superficie excedente encontrada en este estudio no fue reportada por el personal encargado de la administración del agua del módulo. Lo anterior puede atribuirse a lo señalado por Mejía-Saenz et al. (2003), quienes indican que, en la mayoría de los distritos de riego del país, existe mayor superficie regada de la autorizada debido a la venta no oficial de volúmenes de agua, así como por el robo por parte de los usuarios. En otro estudio realizado por Caballero (2013) mediante técnicas de información, encontró que los usuarios en los distritos de riego establecen mayores superficies a las programadas, y que éstas no son reportadas de manera oficial por parte del personal técnico de las asociaciones civiles de usuarios. Asimismo, Palerm (2020) señala que la toma ilícita del agua en los distritos puede atribuirse al usuario y a la entrega de agua por el canalero fuera de la normatividad. El IICA (2015) propone el entubamiento de canales como una alternativa para reducir el robo de volúmenes de agua en la conducción, tema que tiende a agravarse a medida que aumenta la escasez del recurso.

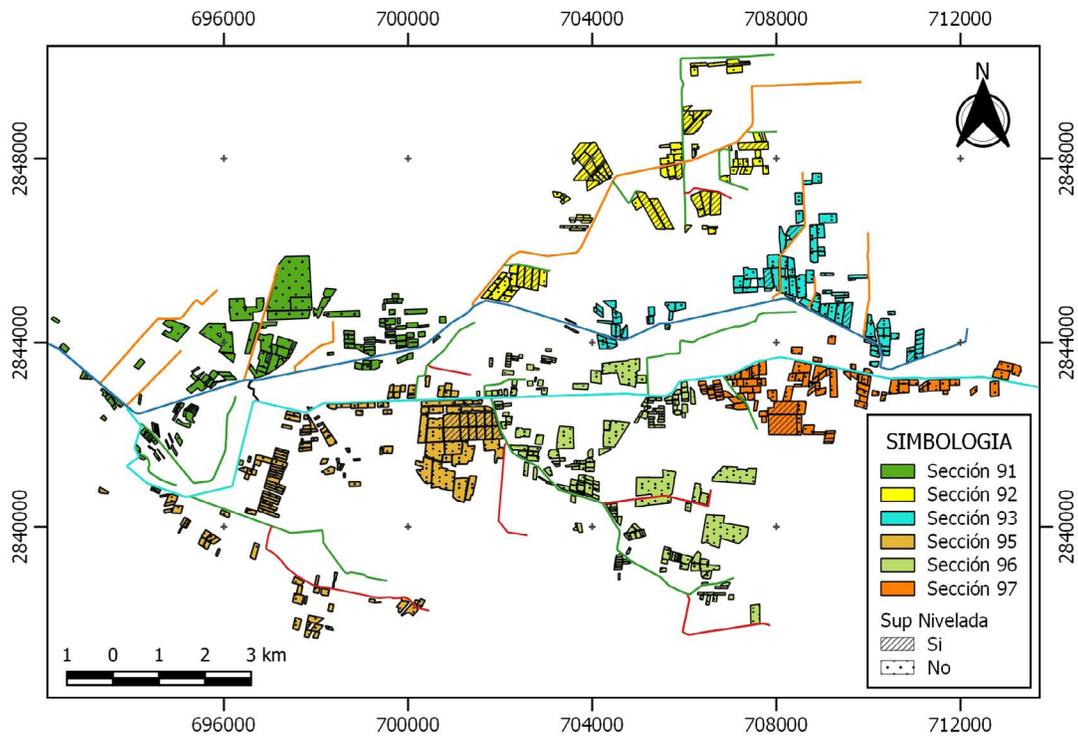


Figura 3. Distribución geográfica de las secciones del módulo de riego y parcelas con nivelación agrícola y sin ella, Región Lagunera, México

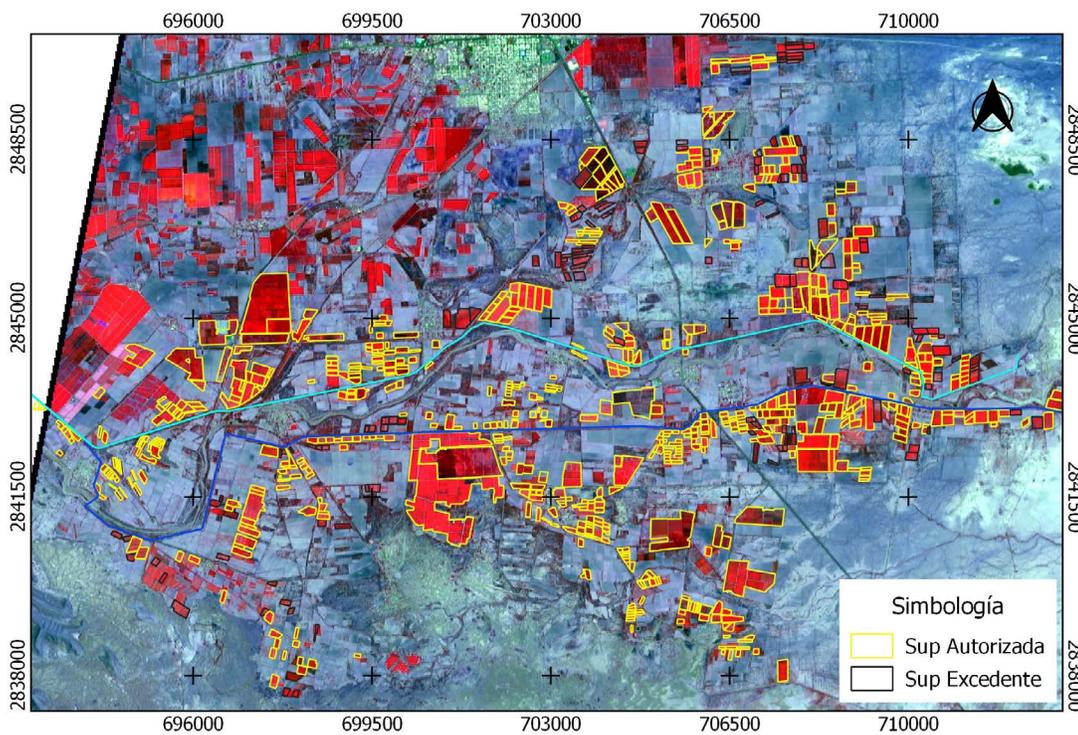


Figura 4. Distribución geográfica de las parcelas autorizadas y superficie excedente identificada en el módulo del distrito de riego 017, Región Lagunera, México

CONCLUSIONES

Con el uso de los Sistemas de Información Geográfica y sensoría remota se nos permitió detectar y ubicar espacialmente desviaciones entre las superficies reales, las programadas y las autorizadas oficialmente, gracias a lo cual se facilitó y precisó la supervisión de áreas específicas que presentaron superficies de riego mayores a las concesionadas. El uso de estas herramientas contribuirá a lograr una mejor administración del agua en los módulos de los distritos de riego del país; asimismo, al tener bien definido el padrón de usuarios, se podría identificar y ubicar a los usuarios infractores para sancionarlos de acuerdo con la normatividad vigente, con la finalidad de hacer un uso eficiente del agua de riego superficial en los diferentes distritos.

LITERATURA CITADA

- Aguilar N. 2015. Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 399-405.
- Aguilar N, Galindo G, Fortanelli J, Contreras C. 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria* 14: 49-65.
- Altamirano A, Valdez JB, Valdez C, León JI, Betancourt M, Osuna T. 2019. Evaluación del desempeño de los distritos de riego en México mediante análisis de eficiencia técnica. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10: 85-121. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-04>
- Ariza A. 2013. Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- Caballero J. 2013. Uso de técnicas de la información para estimar parámetros estratégicos en la operación de los distritos de riego. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Caballero P, Treviño EJ. 2018. Análisis de la pertinencia de las plantaciones forestales en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9: 400-414. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.252>
- Cháirez-Araiza C, Palerm-Viqueira J. 2013. Organizaciones autogestivas en los distritos de riego: el caso del módulo III San Jacinto en el Distrito de Riego 017, Durango, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 4: 19-46.
- Choudhary K, Boori MS, Kupriyanov A. 2017. Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan, Russia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 21: 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.05.003>
- Cristea C, Florina A. 2016. GIS application for wind energy. *Energy Procedia* 85: 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.283>
- Cuesta A, Montoro A, Jochum AM, López P, Calera A. 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *Información Técnica Económica Agraria* 101: 212-224.
- Delgado G, Estrada J, Rivera M, Catalán E, Esquivel G. 2014. Evaluación y diseño del riego por melgas mediante un modelo de simulación. *AGROFAZ* 14: 45-51.
- Dile YT, Daggupati P, George C, Srinivasan R, Arnold J. 2016. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software* 85: 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- Espinosa-Espinosa JL, Palacios-Vélez E, Tijerina-Chávez L, Flores-Magdaleno H, Quevedo-Nolasco A. 2017. Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8: 95-104. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-07>
- [ESRI] Environmental Systems Research Institute. 1998. ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI white paper-july 1998. Environmental Systems Research Institute, Inc. Nueva York, Estados Unidos.
- Exebio-García A, Palacios-Vélez E, Mejía-Saenz E, Ruiz-Carmona V. 2005. Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *Terra Latinoamericana* 23: 213-223.
- García MY, Sánchez I, García G, Moreno L, Trejo R, Hernández MA. 2010. Evaluación de la eficiencia de riego en el Módulo IV del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 9: 99-106.
- Goodchild MF. 2015. Geographic information systems. En: Wright JD, editor. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford, Elsevier. P. 58-63.

- Harlow M, Vienneau A. 2003. ArcCatalog Tutorial. Environmental System Research Institute, Inc. Wilson, Estados Unidos.
- Higgins E, Taylor M, Francis H, Jones M, Appleton D. 2014. The evolution of geographical information systems for fire prevention support. *Fire Safety Journal* 69: 117-125. [Doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.004](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.004)
- Howari FM, Ghrefat H. 2021. Geographic information system. En: Onsy A-M, Paleologos E, Howari F, editores. *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*. Oxford, Butterworth-Heinemann. P. 165-198. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809582-9.00004-9>
- [IICA] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 2015. Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura. Documento para ser presentado por la Dirección General del IICA ante la Junta Interamericana de Agricultura (JIA) México. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- [INTA] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2015. Manual de capacitación: riego superficial. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Korucu MG. 2012. GIS and types of GIS education programs. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 46: 209-2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.095>
- Kose E, Erbas M, Ersen E. 2017. An integrated approach based on game theory and geographical information systems to solve decision problems. *Applied Mathematics and Computation* 308: 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.03.020>
- Lakota M, Stajniko D. 2013. Using of GIS tools for analysis of organic waste management in Slovenia region Pomurje. *Procedia Technology* 8: 570-574. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.081>
- Lomelí J, Jaimes S, Patrón R, Estrada A. 2000. Conservación de distritos y módulos de riego. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México.
- Macías H, Sánchez I, Catalán EA. 2007. Sistema soporte de decisiones para el manejo integral del agua en el DR 017, Coahuila y Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas* 6: 77-89.
- Manson SM, Bonsal DB, Kernik M, Lambin EF. 2015. Geographic information systems and remote sensing. En: Wright JD, editor. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford, Elsevier. P. 64-68. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.91027-4>
- Mejía-Saenz E, Exebio-García A, Palacios-Vélez E, Santos-Hernández AL, Delgadillo-Piñón ME. 2003. Mejoramiento del manejo de distritos y módulos de riego utilizando Sistemas de Información Geográfica. *Terra Latinoamericana* 21: 513-522.
- Meyer D, Riechert M. 2019. Open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF modelling system. *Environmental Modelling & Software* 112: 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.018>
- Miranda R. 2008. Caracterización de la producción del cultivo de algodónero (*Gossypium hirsutum*, L) en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Agronegocios* 23: 696-705.
- Ochoa-Noriega CA, Aznar-Sánchez JA, Velasco-Muñoz JF, Álvarez-Bejar A. 2020. The use of water in agriculture in Mexico and its sustainable management: A bibliometric review. *Agronomy* 10: 1957. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121957>
- Palacios MI, Ocampo J. 2012. Los tractores agrícolas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Núm. Esp. 4*: 812-824.
- Palerm J. 2020. Caracterización de los módulos de los distritos de riego y presencia de organizaciones locales. *Región y Sociedad* 32: e1335. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1335>
- Pedroza E, Hinojosa GA. 2014. Manejo y distribución del agua en distritos de riego: breve introducción didáctica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México.
- Ramírez BA, González A, Valdivia R, Salas JM, García JA. 2019. Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Ramos CM. 2016. Productividad del agua en un módulo del distrito 017 Región Lagunera, Universidad Juárez del Estado de Durango. Venecia, México.
- Ramos CM, Delgado G. 2019. Aplicación de la teledetección para el monitoreo de la superficie irrigada en los módulos de riego. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. General Terán, México.
- Ramos CM, Delgado G, Estrada J, López R, Miguel E. 2018. Evaluación de la red hidroagrícola de un módulo de riego en el norte de México. XXX Reunión Científica Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco/VII Simposio Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical. Villahermosa, Tabasco, México.

- Ramos-Cruz CM, Estrada-Ávalos J, Delgado-Ramírez G, Miguel-Valle E, Domínguez D. 2018b. Estimación de la eficiencia de riego superficial parcelario en un módulo del distrito 017 Región Lagunera. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 17: 21-30. <https://doi.org/10.5154/rchsza.2018.04.011>
- Ramos-Cruz CM, Estrada-Ávalos J, Delgado-Ramírez G, Pérez-Evangelista ER, Domínguez-Alemán D. 2019. Evaluación de variables involucradas en riego superficial para incrementar la eficiencia del uso del agua en la Región Lagunera, Coahuila de Zaragoza, México. *Acta Agrícola y Pecuaria* 5: 24-31. <https://doi.org/10.30973/aap/2019.5.005100>
- Ríos JL, Torres M, Ramírez M, Caamal I, Jerónimo F, Márquez L. 2009. Productividad y ganaderización del sector agrícola en la Laguna, México, de 1990 a 2005. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 8: 141-147.
- [SAGARPA/FAO]. Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2014. Análisis de la cadena de valor en la producción de algodón en México. Informe final agosto de 2013. SAGARPA/FAO. Ciudad de México, México.
- Santos-Hernández AL, Palacios-Velez E, Mejía-Saenz E, Matus-Gardea JA, Galvis-Spíndola A, Vásquez-Soto D, Ascencio-Hernández R, Peña-Díaz SA. 2019. Análisis del uso del agua del acuífero Cuauhtémoc, Chihuahua, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10: 156-189. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-07>
- Wagner K. 2018. Geographic information systems and glacial environments. En: Menzies J, van der Meer JJM, editores. *Past Glacial Environments*. Amsterdam, Elsevier. P. 503-536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100524-8.00015-4>