

Cartografía del uso del suelo en la subcuenca Huaquechula, Puebla, México, con un índice combinado de imágenes de satélite

Soil Use Cartography in the Subcuenca Huaquechula, Puebla, Mexico, with a Combined Index of Satellite Images

Julio Cesar Flores Cesareo,* Angel Bustamante González,** Samuel Vargas López,*** Lenom Cajuste,****
Francisco J. Escobedo† y Mario Valadez Ramírez‡

Recibido: 14/05/2019. Aprobado: 24/10/2019. Publicado en línea: 01/04/2020.

Resumen. La generación de mapas actualizados de uso del suelo en regiones de agricultura de regadío es importante tanto para el monitoreo productivo como para la aplicación de modelos hidrológicos o de otro tipo. Por requerimientos de costo y tiempo, las herramientas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica son de gran ayuda para tal fin. En este estudio se delimitaron los usos del suelo, con énfasis especial en las tierras de agricultura de riego, utilizando imágenes Landsat 8 de tres periodos con condiciones de lluvias diferentes durante 2017; para cada imagen se obtuvo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Los NDVI se combinaron para formar una imagen Red-Green-Blue-NDVI (RGB-NDVI). Con el programa ERDAS Imagine 2014 se obtuvieron las firmas espectrales para los usos del suelo y vegetación identificadas con el programa Google Earth. Se ubicaron puntos al azar para verificar si el uso del suelo del mapa obtenido corresponde con el uso verdadero.

Además, se comparó el mapa obtenido a partir de imágenes de satélite con el mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI, considerado el mapa oficial más actualizado en México. Los mapas se evaluaron utilizando matrices de confusión e índices de confiabilidad. El mapa generado con imágenes Landsat 8 tuvo mayor confiabilidad que el de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI. El mapa obtenido es útil para dar seguimiento a los cambios de uso del suelo y es insumo para modelos hidrológicos, como el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con el fin de estimar los efectos de prácticas agrícolas sobre las corrientes superficiales.

Palabras clave: agricultura, Landsat, NDVI, RGB, riego.

Abstract. The elaboration of updated land-use maps in irrigated agriculture regions is essential for the monitoring of production as well as for the application of hydrological

* Maestría en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Colegio de Postgraduados, campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula, C. P. 72760, Puebla, México.

** Colegio de Postgraduados, campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula, C. P. 72760, Puebla, México. Autor para correspondencia. Email: angelb@colpos.mx

*** Colegio de Postgraduados, campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula, C. P. 72760, Puebla, México.

**** Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, C. P. 56230, Estado de México, México.

† Universidad del Rosario, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Calle 12C núm. 6-25, Bogotá, D. C., Colombia.

‡ Colegio de Postgraduados, campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula, C. P. 72760, Puebla, México.

or other models. Due to cost and time constraints, remote sensing and Geographic Information Systems are valuable tools for this purpose. This study evaluated the applicability of an index that combines satellite imagery for mapping land uses, focusing on irrigated agriculture lands in the Huaquechula sub-basin, state of Puebla, Mexico. The study area is characterized by a complex array of irrigated crops with broad spatial variations and succession of crops throughout the year, making it difficult to delimit irrigated agricultural land. Addressing this complexity requires the application of methodologies to identify the presence/absence of irrigated crops throughout the year. As an alternative to the delimitation of land uses, we used Landsat 8 images for three dates: 23 January 2017, 19 August 2017, and 23 November 2017. For each image, we obtained the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the program ERDAS Imagine 2014; the indices for the three dates were combined to make a Red-Green-Blue NDVI image (RGB-NDVI). The spectral signatures for land uses and vegetation identified with the Google Earth program were obtained for this image. A total of 250 random points were located with ArcGis 10.4 and the Hawth's Analysis Tools extension to check the correspondence between of land uses in the map and real uses; 155 selected points were located in natural vegetation; 32, in irrigated agriculture; 52, in agriculture; 11, in urban use; and 1, in a water body. The map obtained from satellite images was compared with the Inegi Map on Land Use and Vegetation, Series VI, consid-

ered to be the most up-to-date official map in Mexico. Maps were evaluated using confusion, omission and commission matrices, and overall user and producer reliability indices. The values obtained for confusion matrices indicate that the map produced from satellite images was better at delimiting land uses compared to the Inegi Map of Vegetation and Land Use, Series VI. For the irrigated agricultural land use, the primary delimitation objective, the map produced was 81.82% reliable for the user (probability of selecting a random point in one category that really belongs to that category) for irrigated land, versus 78.57% for the Series VI map. The produced map also yielded a higher reliability for the producer, relative to the reference map (84.38% vs. 61.11%, respectively), as well as less omission errors (18.18% versus 21.43%) and commission errors (15.63% versus 38.89%). We concluded that the map generated from Landsat 8 images using the RGB-NDVI index, provided a higher reliability than the map of Land Use and Vegetation, Series VI. For regions with high spatial and temporal complexity of crops, such as the study area, the procedure involving the RGB-NDVI index is an expeditious low-cost alternative for the continuous updating of land-use maps. The map obtained here is useful for monitoring changes in land use, and as an input for hydrological models, such as the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), to estimate the effects of agricultural practices on surface streams.

Key words: Agriculture, Landsat, NDVI, RGB, irrigation.

INTRODUCCIÓN

La región de Atlixco, Puebla, México, tiene una superficie extensa con agricultura de riego, cuya producción se comercializa en mercados locales, nacionales e internacionales. Sin embargo, actualmente tiene una fuerte competencia con otras actividades económicas, como las industriales, las recreativas y los desarrollos habitacionales, tanto por el recurso de la tierra como el hídrico. Tierras de agricultura de riego son convertidas a zonas habitacionales o industriales con el consecuente requerimiento de servicios, como el abastecimiento de agua. Debido a que la agricultura de riego en la región tiene una dinámica espacio-temporal particular, ya que se practica una alta rotación anual e interanual de cultivos en un mismo predio agrícola, su delimitación cartográfica es complicada.

La cartografía más reciente sobre el uso del suelo y vegetación para la región, dentro de la que se incluye la delimitación de tierras de agricultura de temporal y de riego, es la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI, publicada en 2017

por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Esta cartografía se obtuvo a partir de la actualización de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Serie V, de 2011, imágenes de satélite Landsat 8 de 2014 y recorridos y observaciones de campo (INEGI, 2017). La cartografía tiene una escala 1:250 000 y presenta la distribución espacial de la vegetación natural e inducida de las áreas agrícolas (de riego y de temporal) y las urbanas.

El monitoreo de cambio de uso del suelo en zonas con agricultura de riego demanda un esfuerzo considerable para el seguimiento periódico de las parcelas de cultivo. Por ello, desde hace más de 30 años se buscan técnicas y metodologías que permitan clasificar las zonas agrícolas con precisión (Espinosa-Espinosa *et al.*, 2017); esto es complicado en regiones con alta diversidad de cultivos, prácticas agrícolas y un limitado acceso al conocimiento local acerca del intercalado de especies cultivadas (Pun, Mutiibwa y Li, 2017; Xiong *et al.*, 2017). Una alternativa es el uso de imágenes satelitales y los fundamentos de teledetección para el análisis de grandes extensiones agrícolas, especialmente por el

avance tecnológico que permite tener información fiable y actualizada (Borràs *et al.*, 2017). Autores como Salas y Chuvieco (1995) mencionan que los primeros registros de su uso son de la década de los setenta. Actualmente siguen mejorándose las técnicas de análisis espacio-temporal para clasificar las áreas de riego, con énfasis en la creación, calibración y validación de modelos para identificar mejor las áreas agrícolas (Mangiarotti *et al.*, 2018). Con imágenes satelitales, como Landsat serie 8, y herramientas de análisis espacial, como Google Earth Engine, es posible identificar satisfactoriamente diferentes usos del suelo; son metodologías confiables para el desarrollo de mapas temáticos (Dong *et al.* 2016; Azzari y Lobell, 2017; Chen *et al.*, 2017; Belgiu y Csillik, 2018; Ghebreamlak *et al.*, 2018). Para la generación de mapas de uso del suelo también se utiliza el NDVI, el cual permite estimar el estado de salud vegetal con la relación entre la energía absorbida por los objetos y la reflejada por éstos. Para las áreas con vegetación se analiza el grado de verdor y se interpreta como los valores más altos de reflectancia, lo cual se explica por la mayor actividad fotosintética (Meneses-Tovar, 2011). En la clasificación de zonas con agricultura de riego el NDVI es un recurso indispensable en los modelos más actualizados, principalmente por el desarrollo de algoritmos con base en los valores de reflectancia para asociar los valores de dato con los tipos de cultivo en específico (Meier, Zabel y Mauser, 2018). Metodologías de validación con métodos estadísticos permiten conocer los niveles de confianza en la clasificación de los mapas desarrollados con base en imágenes satelitales. El proceso de verificación se puede realizar mediante análisis espacial con la ayuda de herramientas de información geográfica y de análisis geoespacial (Gorelick *et al.*, 2017).

El objetivo de este estudio fue aplicar un procedimiento de delimitación de áreas de tierras de riego en la subcuenca Huaquechula en el estado de Puebla, México, utilizando imágenes de satélite, y comparar la delimitación obtenida con la cartografía digital oficial más reciente. Se postula que el procedimiento de delimitación de áreas de riego a través de la combinación de bandas de imágenes de satélite de tres épocas del año permite delimitar las

áreas de riego con una mayor precisión en la región, donde se tiene una diversidad espacial y temporal de cultivos agrícolas. Este procedimiento permite dar seguimiento a la dinámica espacial del uso del suelo y la actualización periódica de la cartografía. Se utilizaron imágenes satelitales tipo Landsat 8 y el NDVI en tres épocas de 2017. La verificación y validación se realizó con matrices de confusión y el índice de confiabilidad global, la confiabilidad de usuario, el error de omisión, la confiabilidad del productor y el error de comisión (François, Reyes y Pérez, 2003). Los resultados de este estudio pueden mejorar el proceso de delimitación de usos del suelo en zonas con alta complejidad de cultivos, utilizando una metodología rápida y de bajo costo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La subcuenca Huaquechula se ubica en el estado de Puebla, México (Figura 1). Comprende en su totalidad los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Nealtican, Tianguismanalco, Santa Isabel Cholula, Atlixco, San Diego la Meza Tochimiltzingo, Tepeojuma, Tlapanalá, Tilapa, Atzala, Epatlán, San Martín Totoltepec y Xochiltepec, y la mayor parte de Calpan, San Jerónimo Tecuaniapan, Ocoyucan, Tochimilco, Atzitzihuacan, Huaquechula, Tepexco, Chietla e Izúcar de Matamoros. La superficie total es de 2 299.3 km².

Delimitación de los usos del suelo

Se utilizó el procedimiento de combinaciones de color RGB-NDVI propuesto por Sader y Winne (1992) para la visualización de las dinámicas de cobertura vegetal. Se usaron tres imágenes de satélite Landsat 8 del 23 de enero, 19 de agosto y 23 de noviembre de 2017. Para cada imagen de satélite, a partir de las bandas rojo e infrarrojo cercano (bandas 4 y 5), se obtuvo el NDVI mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{[Infrarrojo\ cercano - rojo]}{[Infrarrojo\ cercano + rojo]}$$

El NDVI genera una imagen que realza el verdor, asociado a la vegetación, a partir de las bandas

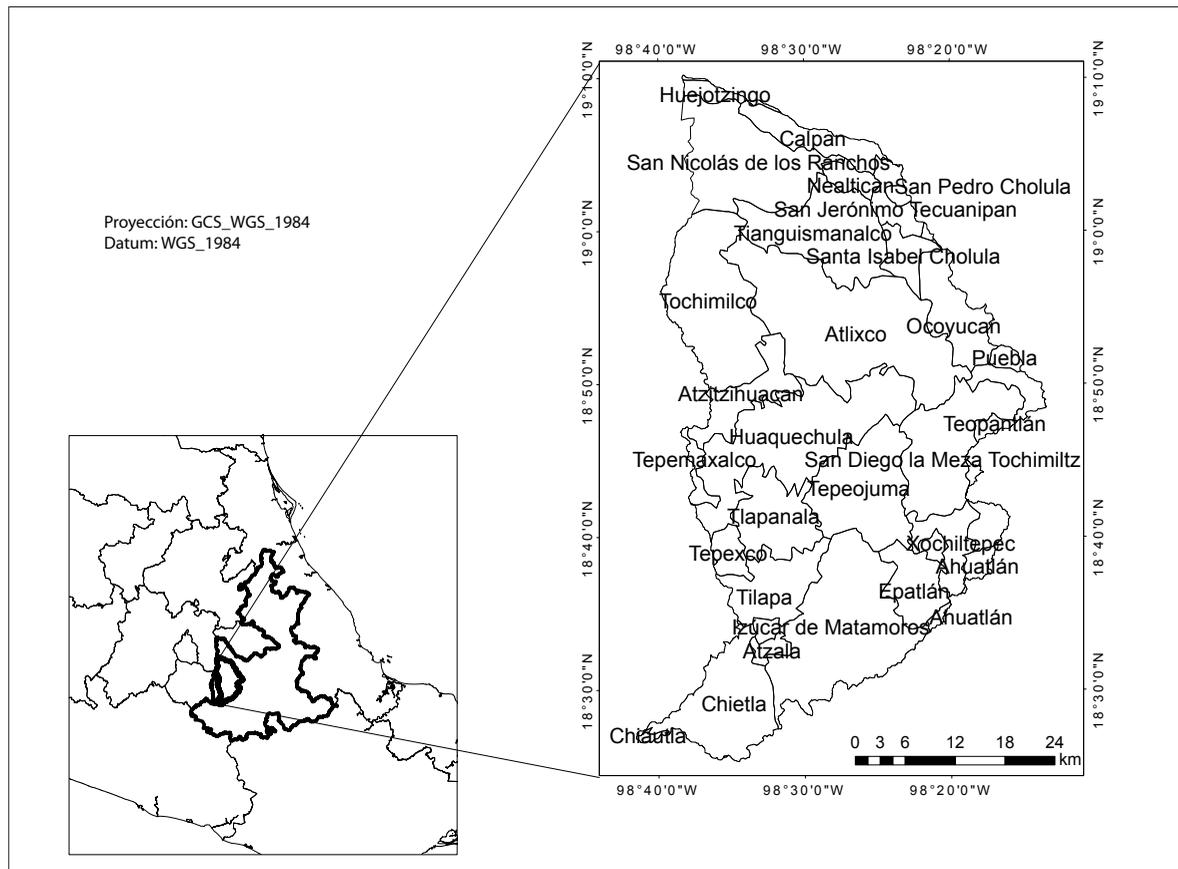


Figura 1. Ubicación de la subcuenca Huaquechula en el estado de Puebla. Fuente: elaboración propia.

infrarrojo cercano y rojo. De acuerdo con Sader y Winne (1992), el NDVI reduce el volumen de datos pero mantiene una variable semicontinua que ha sido bien correlacionada con la biomasa aérea verde y el índice de área foliar verde. A medida que el área foliar o la biomasa de las hojas aumenta, como en el caso de las áreas de cultivo de riego que en todo el año tienen cultivo, comparado con las áreas de cultivo de temporal donde se tienen periodos durante el año sin biomasa vegetal, aumentan los valores de NDVI. Tal índice se utiliza para una variedad de propósitos, como estudios de biodiversidad y seguimiento de sequías, productividad de cultivos e incendios (Spiekermann, Brandt y Samimi, 2015; Robinson *et al.*, 2017). A partir de los tres NDVI se obtuvo una imagen RGB-NDVI. En el programa ERDAS Imagine 2014 se asignó *R* al NDVI del 23 de enero de 2017; *G*, a la imagen

del 19 de agosto de 2017, y *B*, a la imagen del 23 de noviembre de 2017. Posteriormente, con el programa ERDAS Imagine 2014 se obtuvieron las firmas espectrales para los usos del suelo y vegetación: agua, urbano, temporal, vegetación natural y riego. Se utilizó el programa Google Earth para identificar el uso del suelo en la imagen de satélite.

Se usó el programa Erdas Imagine 2014 para generar un mapa de uso del suelo y vegetación de la subcuenca Huaquechula con base en la imagen RGB-NDVI. Se realizó una clasificación supervisada de la imagen RGB-NDVI para identificar los diferentes usos del suelo (riego, temporal, urbano, agua y vegetación) con base en la firma espectral obtenida previamente. Finalmente, se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud (García y François, 2008) para etiquetar los valores de pixel en cada una de las categorías determinadas. Debido

a la variabilidad de tonos de color de las zonas con tierra de riego (azul fuerte, azul magenta, blanco, rosa fuerte, amarillo y rojo), se consideraron en la clasificación seis subcategorías de éstas (Riego 1, Riego 2, Riego 3, Riego 4, Riego 5, y Riego 6), ya que el uso de una sola categoría no proporcionó una buena clasificación. El resultado fue un mapa de uso del suelo y vegetación de la subcuenca Huaquechula en formato raster que clasificó todos los píxeles de la imagen RGB-NDVI en alguna de las categorías. En el programa ArcGis 10.4 se procesó el mapa temático para agrupar las diferentes categorías de riego en únicamente zonas con agricultura de riego. Se convirtió el mapa en formato raster a formato shape file y se estimó el área en kilómetros cuadrados para cada categoría (riego, temporal, urbano, agua y vegetación). Se utilizó un criterio de área mínima cartografiable de 4 x 4 mm (Lencinas y Siebert, 2009) para una escala 1:50 000. Con el programa ArcGis 10.4 se seleccionaron los polígonos inferiores a 40 000 m² y se eliminaron con el comando Eliminate para obtener el mapa final.

Verificación de la delimitación

Se seleccionaron puntos de verificación en el programa ArcGis 10.4, con la extensión Hawth's Analysis Tools. Se crearon 250 puntos de muestreo al azar. Sánchez (2016) menciona que para un correcto proceso de validación es suficiente establecer un mínimo de 50 puntos por clase con el fin de comprobar la confiabilidad del mapa. Además, señala que el uso de un método aleatorio estratificado es correcto cuando las proporciones

no son igualitarias, como en el caso de la subcuenca Huaquechula. Con la herramienta Google Earth se analizaron cada uno de los puntos de verificación de uso del suelo, como lo sugieren François, Reyes y Pérez (2003) y François, Velázquez y Couturier (2009), y se corroboró que cada uno de los puntos coincidiera con la categoría correspondiente.

Comparación del mapa obtenido con el mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI

Se reclasificaron las clases de vegetación y uso del suelo del mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI, en las cinco clases utilizadas en el mapa obtenido con imágenes de satélite en este estudio: riego, temporal, urbano, agua y vegetación, y se calculó su superficie. El área de cada uso del suelo no es proporcional, por lo que se ubicaron, con la extensión Hawth's Analysis Tools y en un muestreo estratificado al azar, 250 puntos diferentes a los utilizados para verificar el mapa obtenido. Se utilizó una matriz de confusión o matriz de error (Tabla 1) por cada uno de los mapas. Las columnas registraron la verdad de la imagen, y las filas, la verdad del terreno. La validación consistió en confrontar en los 250 puntos creados aleatoriamente la categoría de uso del suelo del mapa obtenido con el uso del suelo que realmente existe en el terreno, observado con el *software* Google Earth Pro, el cual permitió analizar cada punto de muestreo y determinar el tipo de uso del suelo (François, Velázquez y Couturier, 2009). Los puntos de verificación realizados con el método estratificado al azar por cada uso de suelo fueron:

Tabla 1. Matriz de confusión.

		Verdad de la imagen			
		Categoría j ₁	Categoría j ₂	Categoría j _n	Total
Verdad del terreno	Referencia i ₁	i _{1j1}	i _{1j2}	i _{1jn}	i ₁₊
	Referencia i ₂	i _{2j2}	i _{2j2}	i _{2jn}	i ₂₊
	Referencia i _n	i _{nj1}	i _{nj2}	i _{njn}	i _{n+}
	Total	+J ₁	+J ₂	+j _n	

Nota: *ij*: número de sitios de validación correctamente clasificados; *i+*: suma de sitios clasificados para las referencias, relacionado con la verdad del terreno; *+j*: suma de sitios clasificados para la categoría, relacionado con la verdad de la imagen, y *i++j*: suma de todas las categorías (*+j*) o de todas las referencias (*i+*); se relaciona con el número total de puntos a validar.

155 para vegetación, 32 para agricultura de riego, 52 para agricultura de temporal, 11 para uso urbano y 1 para cuerpos de agua.

Para mostrar la correcta distribución de los puntos de muestreo por categoría, se trabajó también la matriz de confusión en proporciones (Tabla 2). La suma de las referencias es el equivalente a la proporción que ocupa cada uso del suelo en el mapa.

de validación correctamente clasificados; p_{i+} : suma de las proporciones de sitios clasificados para las referencias, relacionado con la verdad del terreno; $+j$: suma de las proporciones de los sitios clasificados para la categoría, relacionado con la verdad de la imagen, y $i++j$: suma de las proporciones de todas las categorías ($+j$) o de todas las

referencias ($i+$); se relaciona con el número total de puntos a validar y es igual a 1.

En la Tabla 3 se muestran las ecuaciones para el cálculo de los índices utilizados: 1) confiabilidad global, referente a la probabilidad de escoger cualquier sitio y que se encuentre correctamente clasificado; 2) confiabilidad del usuario referente a la probabilidad de elegir un punto al azar en el mapa y que realmente coincida en campo con la categoría asignada en el mapa; 3) error de omisión referente a la proporción de sitios que no corresponden con la categoría asignada en el mapa y lo que existe en campo; 4) confiabilidad del productor referente al número de sitios utilizados para la validación y que se encuentran correctamente clasificados en el mapa, y 5) error de comisión que representa el

Tabla 2. Matriz de confusión expresada en proporción.

		Verdad de la imagen			
		Categoría j_1	Categoría j_2	Categoría j_n	Total
Verdad del terreno	Referencia i_1	$p_{i_1j_1}$	$p_{i_1j_2}$	$p_{i_1j_n}$	p_{i_1+}
	Referencia i_2	$p_{i_2j_1}$	$p_{i_2j_2}$	$p_{i_2j_n}$	p_{i_2+}
	Referencia i_n	$p_{i_nj_1}$	$p_{i_nj_2}$	$p_{i_nj_n}$	p_{i_n+}
	Total	p_{+j_1}	p_{+j_2}	p_{+j_n}	

Nota: p_{ij} : proporción del número de sitios.

Tabla 3. Índices de confiabilidad.

Indicadores	Fórmula	Descripción
Confiabilidad global	$P_c = (\sum P_{ij} / \sum P_{ij}) * 100$	Es el grado de exactitud con la que el mapa fue correctamente clasificado. Es la probabilidad de seleccionar un punto al azar en el mapa y que coincida con lo que existe en campo.
Confiabilidad de usuario	$C_u = (P_{ij} / \sum P_{+j}) * 100$	Es la probabilidad de seleccionar un punto al azar en cualquier categoría j y que éste realmente sea j en campo.
Error de omisión	$E_o = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Es la probabilidad de seleccionar un punto al azar en cualquier categoría j y que ésta realmente pertenezca a otra categoría j en campo.
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación j que se encuentran correctamente cartografiados en el mapa.
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+i})) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación j que se encuentran clasificados en otra clase del mapa.

Fuente: elaboración propia con datos de François, Velázquez y Couturier (2009), Blanco et al. (2012) y Camacho et al. (2015).

número de sitios de verificación clasificados en una categoría y encontrada en otra (François, Velázquez y Couturier, 2009; Blanco *et al.*, 2012; Camacho *et al.*, 2015).

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el resultado con el índice NDVI para cada una de las fechas. Las áreas con mayor reflectancia (color cercano al blanco) son áreas con vegetación de mayor verdor.

En la Figura 3, correspondiente a la imagen RGB-NDVI, la variedad de colores entre magenta y cian representan las áreas de tierras de riego. Se observa una alta variabilidad de cultivos dentro de la cuenca.

En la Figura 4 se presenta el mapa obtenido para las zonas agrícolas de riego en la subcuenca Hua-

quechula y el mapa de la Serie 6 de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI. Las zonas de vegetación se presentan en color verde, con una extensión de 1 425.71 km² y 1 097.3 km² respectivamente; las áreas con agricultura de temporal en color rojo ocupan 474.90 km² y 625.7 km²; las zonas urbanas en color negro representan 100.2 km² y 74.8 km²; los cuerpos de agua en azul magenta miden 0.91 km² y 1.22 km², y las zonas de riego tienen un área de 297.76 km² y 493 km² respectivamente, lo que da un total de 2 299.3 km² y 2 292.02 km² de superficie total de la cuenca.

En la matriz de confusión para el mapa obtenido de zonas con agricultura de riego de la subcuenca Huaquechula (Tabla 4), los valores de la diagonal de la matriz son los aciertos, mientras que los laterales corresponden al error de clasificación o de comisión. Para el uso de suelos de tierras de riego, 27 de los 32 sitios de validación coincidie-

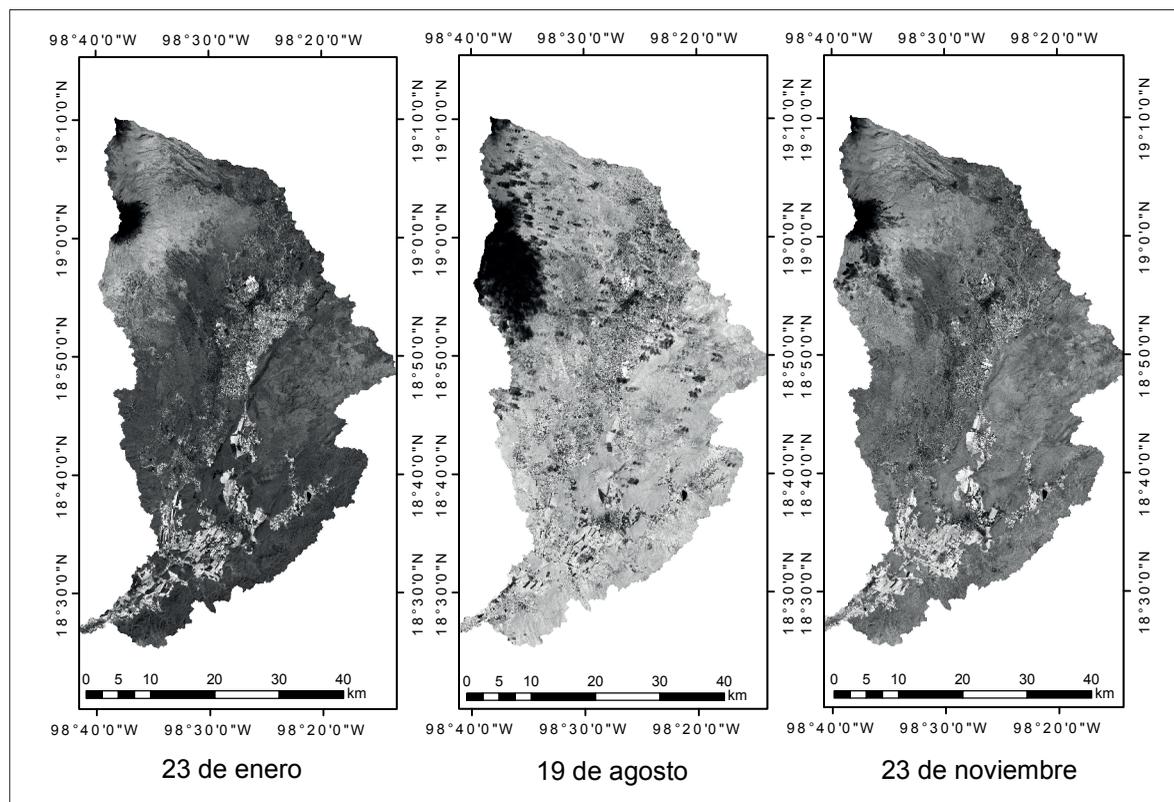


Figura 2. NDVI para la subcuenca Huaquechula en el estado de Puebla, México. Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de satélite Landsat 8.

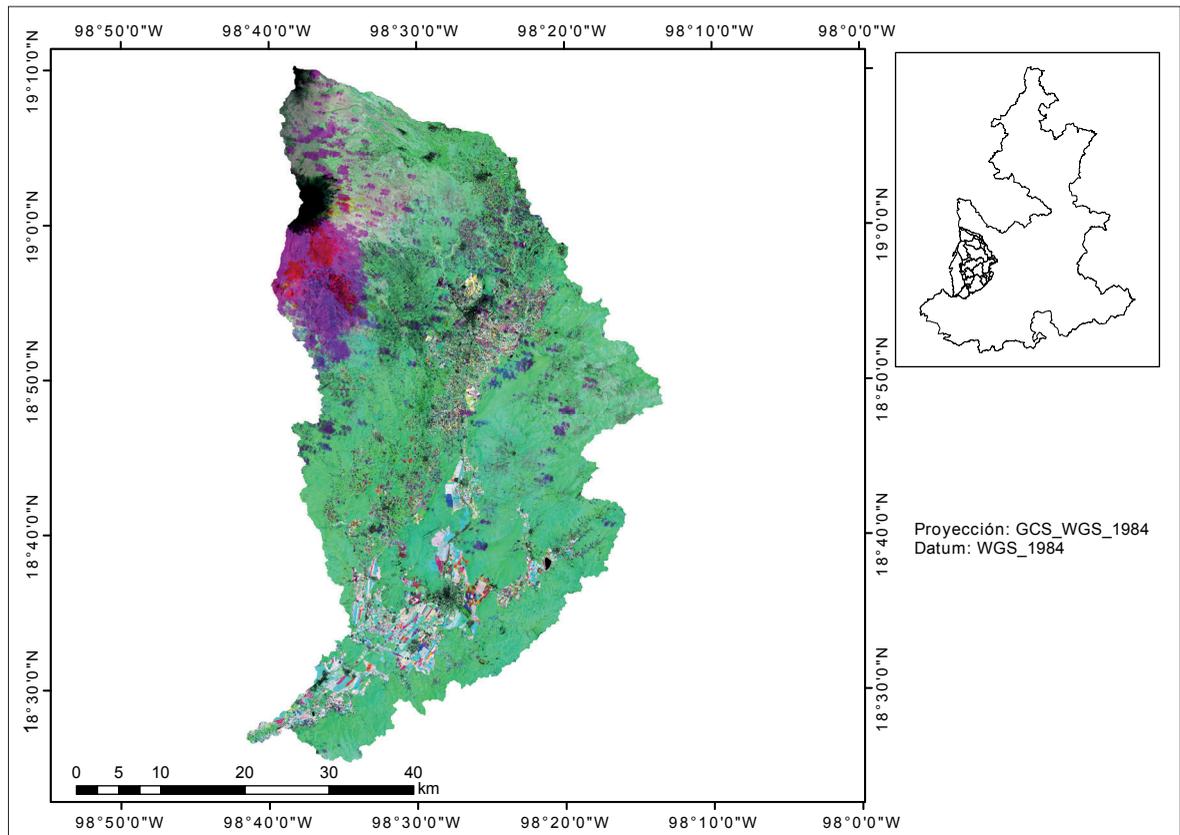


Figura 3. Imagen RGB-NDVI para la subcuenca Huaquechula en el estado de Puebla, México. Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de satélite Landsat 8.

Tabla 4. Matriz de confusión para el mapa. generado.

		Verdad de la imagen					Puntos de validación
		Vegetación	Riego	Temporal	Urbano	Agua	
Verdad del terreno	Vegetación	130	6	17	1	0	154
	Riego	4	27	1	0	0	32
	Temporal	12	0	37	3	0	52
	Urbano	1	0	5	5	0	11
	Agua	0	0	0	0	1	1
		147	33	60	9	1	250

Fuente: elaboración propia.

ron tanto en el mapa como en lo observado en el terreno; un sitio se clasificó erróneamente como agricultura de temporal y 4 como de vegetación

(error de comisión). En el caso de la agricultura de temporal, de los 52 puntos de validación, 37 se clasificaron correctamente, y de 15, que en el mapa

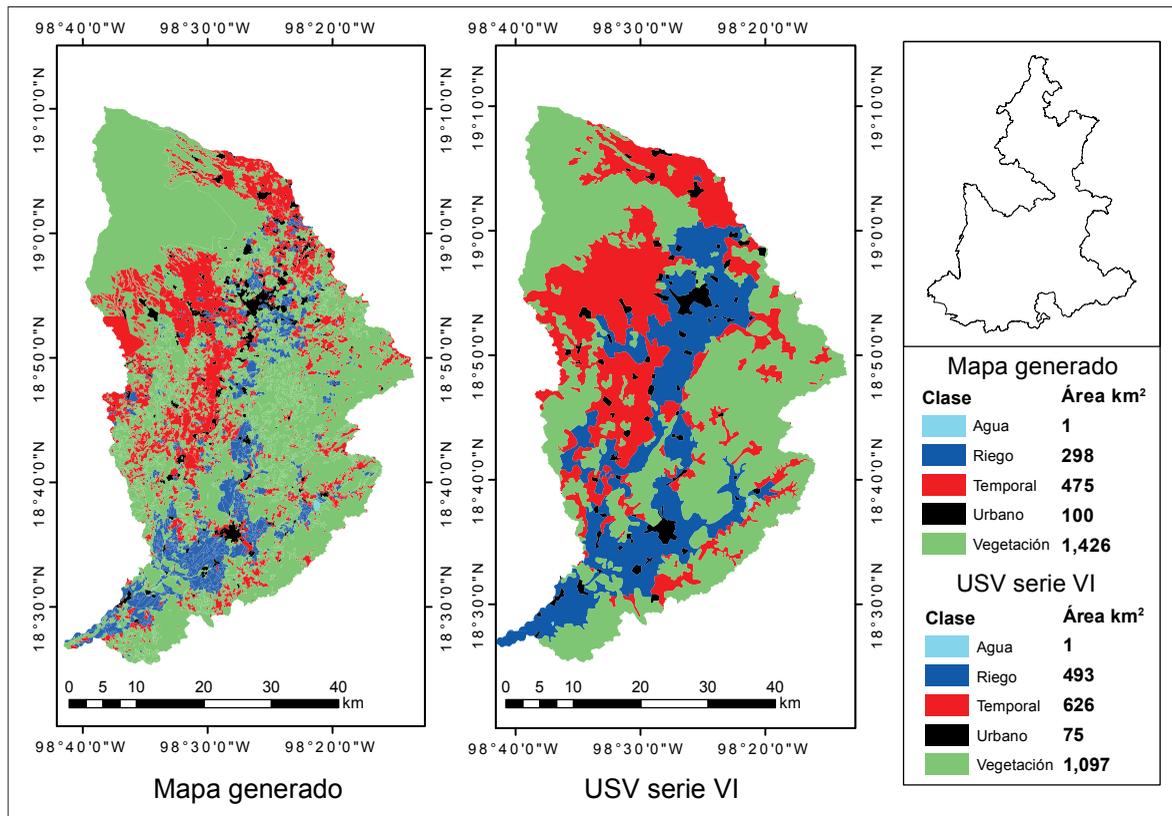


Figura 4. Mapas de uso del suelo y vegetación de la subcuenca Huaquechula, Puebla, México. Fuente: Elaboración propia elaborada a partir de imágenes de satélite Landsat 8 e INEGI (2016).

correspondían a este uso del suelo en el terreno, 12 eran de vegetación natural y 3 de uso urbano. En cuanto al error de omisión para la categoría tierras de riego, fueron 6 sitios, es decir que estos sitios verificados para otras categorías del mapa en el te-

rreno son realmente tierras de riego. En el caso del mapa de Uso del Suelo y Vegetación de la Serie VI de INEGI (Tabla 5), de 54 puntos de validación, 33 se clasificaron correctamente, mientras que 21 puntos que en el mapa aparecen como tierras de

Tabla 5. Matriz de confusión para el Mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI.

		Verdad de la imagen					Puntos de validación	
		Clase	Vegetación	Riego	Temporal	Urbano		Agua
Verdad del terreno	Vegetación		110	0	8	2	0	120
	Riego		7	33	10	4	0	54
	Temporal		23	8	33	3	0	67
	Urbano		1	1	1	5	0	8
	Agua		0	0	0	0	1	1
			141	42	52	14	1	250

Fuente: elaboración propia.

riego, en el terreno se observó que pertenecen a tierras de vegetación (7 puntos), agricultura de temporal (10 puntos) y áreas urbanas (4 puntos), mientras que 9 puntos validados que aparecen en otras categorías del mapa, en el terreno se observó que son realmente tierras de agricultura de riego (error de omisión).

En las Tablas 6 y 7 se muestran las matrices de confusión expresadas en proporción. La proporción de puntos de validación es equivalente a la de superficie de terreno de cada categoría de uso. Los valores obtenidos para el mapa generado a partir de las imágenes de satélite indican una mejor deli-

mitación de los usos del suelo comparados con la delimitación contenida en el mapa de Vegetación y Uso del Suelo, Serie VI, del INEGI.

El mapa generado tuvo una confiabilidad del usuario (probabilidad de seleccionar un punto al azar de una categoría y que realmente pertenezca a ésta) de 81.82% para el área de tierras de riego, mientras que para el mapa de la Serie VI fue de 78.57% (Tablas 8 y 9). Para el mapa obtenido se tuvo menor error de comisión y de omisión, y mayor confiabilidad del producto (mayor coincidencia mapa-terreno de los sitios validados).

Tabla 6. Matriz de confusión expresada en proporción para el mapa generado.

		Verdad de la imagen					Proporción de puntos de validación
		Clase	Vegetación	Riego	Temporal	Urbano	
Verdad del terreno	Vegetación	0.52	0.02	0.07	0	0	0.62
	Riego	0.02	0.11	0	0	0	0.13
	Temporal	0.05	0	0.15	0.01	0	0.21
	Urbano	0.004	0	0.02	0.02	0	0.04
	Agua	0	0	0	0	0.004	0.004
	Suma	0.59	0.13	0.24	0.04	0.004	1
Terreno (km ²)		1425.71	297.76	474.9	100.02	0.91	2299.3
Proporción de terreno		0.62	0.13	0.21	0.04	0.0004	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Matriz de confusión expresada en proporción para el mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI.

		Verdad de la imagen					
		Clase	Vegetación	Riego	Temporal	Urbano	
Verdad del terreno	Vegetación	0.4	0	0.03	0.008	0	0.48
	Riego	0.028	0.13	0.04	0.016	0	0.22
	Temporal	0.09	0.032	0.13	0.012	0	0.27
	Urbano	0.004	0.004	0.004	0.02	0	0.03
	Agua	0	0	0	0	0.004	0.004
	Suma	0.564	0.168	0.208	0.056	0.004	1
Terreno		1097.3	493	625.7	74.8	1.22	2292.02
Proporción		0.48	0.22	0.27	0.03	0.0005	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Índices de confiabilidad del usuario para el mapa generado.

	Vegetación	Riego	Temporal	Urbano	Agua
Confiabilidad usuario	88.44	81.82	61.67	55.56	100.00
Error de omisión	11.56	18.18	38.33	44.44	0
Confiabilidad del producto	84.42	84.38	71.15	45.45	100.00
Error de comisión	15.58	15.63	28.85	54.55	0

Confiabilidad global = 80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Índices de confiabilidad del usuario para el mapa de Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI.

	Vegetación	Riego	Temporal	Urbano	Agua
Confiabilidad usuario	78.01	78.57	63.46	35.71	100.00
Error de omisión	21.99	21.43	36.54	64.29	0
Confiabilidad del producto	91.67	61.11	49.25	62.50	100.00
Error de comisión	8.33	38.89	50.75	37.50	0

Confiabilidad global = 72.8

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

En la cuenca de estudio la alta rotación de cultivos durante el año, y entre años, dificulta la identificación de firmas espectrales, que son la base, junto con algoritmos, para la clasificación de la vegetación (Lee *et al.*, 2016). Esto se observó en la comparación de los tres NDVI correspondientes a tres épocas del año con diferente régimen hídrico, a diferencia de zonas agrícolas donde se tiene mayor homogeneidad de cultivos y para identificar las áreas con agricultura de riego los valores de reflectancia calculados por el índice NDVI son un método de discriminación efectiva (Pulido *et al.*, 2003; Meneses-Tovar, 2011).

El análisis espacio-temporal basado en el uso de tres índices NDVI de tres diferentes fechas del mismo año permitió dar un mejor seguimiento a las áreas de riego. Esto, de acuerdo con las propuestas de análisis de autores (Pun, Mutibwa y Li, 2017; Ghebreamlak *et al.*, 2018) que sugieren utilizar más de una fecha que permita contrastar los valores de reflectancia efectivamente, por ejemplo,

lluvias y secas, lo que permite que las zonas de riego mantengan mejores índices de vegetación en ambas fechas. Sader y Winne (1992) combinaron tres NDVI en una sola imagen RGB, con lo cual lograron identificar diferentes usos de suelo del área de interés. Cada índice NDVI representó una banda en los colores rojo (*R*), verde (*G*) y azul (*B*), y cada banda fue asignada de acuerdo a sus valores de reflectancia (los de valores más altos representan la azul). Para la cuenca Huaquechula, la combinación de bandas (RGB) con base en los tres NDVI reflejó una variedad de colores, donde los tonos pastel (magenta, blanco, morado, azul, amarillo, rojo y rosa) representaron las áreas con agricultura de riego.

Generalmente, la verificación de un mapa requiere un trabajo intensivo de campo y altos costos. En el estudio se comprobó que el uso de un sistema de análisis geoespacial como el Google Earth permite verificar la información obtenida en mapas temáticos generados con imágenes de satélite como los Landsat 8. Estudios previos (Azzari y Lobell, 2017; Xiong *et al.*, 2017) han reportado la utilidad

de esta herramienta para realizar identificaciones y verificaciones de usos del suelo de manera más rápida y a menor costo.

La utilización del mapa de Vegetación y Uso del Suelo, Serie VI, que es el mapa oficial de mayor uso y más reciente, permitió tener un mapa de comparación y da idea de la precisión de la clasificación de uso del suelo obtenida. Este tipo de análisis comúnmente se utiliza en mapas temáticos para evaluar el cambio de cobertura de una región (Guerra y Ochoa, 2006; Loya-Carrillo *et al.*, 2013; GIZ, 2016). También se utiliza para someter a un análisis riguroso el grado de confiabilidad de recursos oficiales, como las series de uso y vegetación del INEGI (François, Velázquez y Couturier, 2009).

Durante el proceso de validación de las clasificaciones de vegetación y uso del suelo uno de los problemas más frecuente es la falta de rigor estadístico. Los índices de confiabilidad global, confiabilidad de usuario y confiabilidad del productor, junto con la cuantificación de los errores de comisión y omisión, permiten tener certeza de la calidad de la información obtenida. Estos índices se consideran buenos indicadores para estimar el grado de clasificación de un mapa. Además, el análisis por categoría permite conocer si se está sobrestimando o subestimando alguna de ellas (François, Velázquez y Couturier, 2009; Camacho *et al.*, 2015). En este estudio, para todas las categorías de uso del suelo, el índice de confiabilidad global (80% y 72.8% para el mapa generado y el de INEGI, respectivamente) indicó una mayor precisión del mapa generado a partir de las imágenes Landsat 8. Esto es confirmado al analizar los resultados para las áreas con agricultura de riego: índices de confiabilidad de usuario (81.82%, 78.57%), confiabilidad del productor (84.38%, 61.11%), error de omisión (18.18%, 21.43%) y error de comisión (15.63%, 38.89%). El proceso de validación mostró que el mapa generado tiene un mejor nivel de confiabilidad.

El índice de confiabilidad del usuario consiste en el grado de predicción para seleccionar un punto dentro de alguna categoría y que corresponda a la categoría establecida por el mapa; el nivel de 80% del mapa propuesto contra 79.8% de la Serie VI, del INEGI, establecen mejor poder de predicción

por parte del mapa generado para tierras con agricultura de riego. Por su parte, el índice de confiabilidad del productor se refiere al número de puntos que se utilizaron para la verificación y que realmente coincidieron con la clase que indicaban; para ello, nuestro mapa tiene niveles de 84% de certeza, mientras que para el de la Serie VI tan sólo es de 63%, teniendo menos puntos de verificación correctamente clasificados. Autores como Couturier *et al.* (2008) y François, Velázquez y Couturier (2009) sugieren que los problemas con los niveles de confiabilidad para los recursos oficiales de México se asocian con la escala de proyección, pues las series de uso de vegetación y mapas del inventario forestal nacional creadas por el INEGI están a una escala de 1:250 000, lo que crea una sobreestimación en áreas con alta heterogeneidad en sus usos del suelo.

CONCLUSIÓN

El mapa generado con base en imágenes satelitales Landsat 8 y el índice NDVI permitió identificar las zonas con agricultura de riego de la subcuenca Huaquechula con una mayor precisión que la cartografía oficial más reciente. Los métodos de validación demostraron que el mapa generado para las zonas de riego en la cuenca de estudio tiene mejores niveles de confianza que el de Usos del Suelo y Vegetación, Serie VI, creado por el INEGI, lo cual se explica por la escala con la que fueron clasificados.

REFERENCIAS

- Azzari, G. y Lobell, D. (2017). Landsat-Based Classification in the Cloud: An Opportunity for a Paradigm Shift in Land Cover Monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 202, 67-74. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.025
- Belgiu, M. y Csillik, O. (2018). Sentinel-2 Cropland Mapping Using Pixel-Based and Object-Based Time-Weighted Dynamic Time Warping Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 209, 509-523. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.005
- Blanco, P., López, G., Colditz, R., Hardtke, L., Mari, N., Fischer, A., Caride, C., Aceñolaza, P., Valle, H., del,

- Opazo, S., Sione, W., Lillo, M., Zamboni, P., Cruz, I., Anaya, J., Morelli, F., y Jesús, S., de (2012). Propuesta metodológica para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe: estado de situación y avances. *Revista de Teledetección*, 38, 65-70.
- Borràs, J., Delejido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G. y Camps-Valls, G. (2017). Clasificación del uso del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55-66. DOI: 10.4995/raet.2017.7133
- Camacho, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena E., Bravo, L. y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura / uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112. DOI: 10.21829/myb.2015.211435
- Chen, B., Xiao, X., Li, X., Pan, L., Doughty, R., Ma, J., Dong, J., Qin, Y., Zhao, B., Wu, Z., Sun, R., Lan, G., Xie, G., Clinton, N. y Giri, C. (2017). A Mangrove Forest Map of China in 2015: Analysis of Time Series Landsat 7/8 and Sentinel-1A Imagery in Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 104-120. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.011
- Couturier, S., Vega, Á., François, J., Tapia, V. y López, E. (2008). Evaluación de confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 67, 20-38.
- Dong, J., Xiao, X., Menarguez, M., Zhang, G., Qin, Y., Thau, D., Biradar, C. y Moore, B. (2016). Mapping Paddy Rice Planting Area in Northeastern Asia with Landsat 8 Images, Phenology-Based Algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 185, 142-154. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.016
- Espinosa-Espinosa, J., Palacios-Vélez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H. y 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(1), 95-104. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-07>
- François, J., Reyes, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 51, 53-72.
- François, J., Velázquez, A. y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*, 1(1), 23-39.
- García, T. y François, J. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 67, 7-19.
- Ghebreamlak, A., Tanakamaru, H., Tada, A., Ahmed, B. y Elamin, K. (2018). Satellite-Based Mapping of Cultivated Area in Gash Delta Spate Irrigation System, Sudan. *Remote Sensing*, 10, 2-14. DOI: 10.3390/rs10020186
- GIZ (2016). *Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial, periodo 2010-2015: área de influencia del mecanismo socioambiental Diquís*. El Salvador: Programa REDD/CCAD-GIZ.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Llyushchenco, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
- Guerra, V. y Ochoa, S. (2006). Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 59, 7-25.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2016). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional). Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017). INEGI presenta Carta del Uso del Suelo y Vegetación, Serie VI. Comunicado de prensa núm. 535/17. Recuperado de http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017_12_01.pdf el 30 de agosto de 2017.
- Lee, J., Wich, S., Widayati, A. y Koh, L. (2016). Detecting Industrial Oil Palm Plantations on Landsat Images with Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 219-224. DOI: 10.1016/j.rsase.2016.11.003
- Lencinas, J. D. y Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala. *Quebracho*, 17(1, 2), 101-105.
- Loya-Carrillo, J., Aguilar-Estrada, S., Bravo-Peña, L. y Sánchez-Flores, E. (2013). Evaluación espacio-temporal del impacto del crecimiento urbano sobre la cobertura vegetal en la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos, durante el periodo 1995-2010. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 124-140.
- Mangiarotti, S., Sharma, A., Corgne, S., Hubert-Moy, L., Ruiz, L., Sekhar, M. y Kerr, Y. (2018). Can the Global Modeling Technique Be Used for Crop Classification? *Chaos, Solitons and Fractals*, 126, 363-378. DOI: 10.1016/j.chaos.2017.12.003

- Meier, J., Zabel, F. y Mauser, W. (2018). A Global Approach to Estimate Irrigated Areas. A Comparison between Different Data and Statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1119-1133. DOI: 10.5194/hess-22-1119-2018
- Meneses-Tovar, C. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva*, 62(238), 39-46.
- Pulido, L., Wiegand, C., Gonzáles, J., Robles, B., Cisneros, X. y Lemus, Ó. (2003). 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*, 18(2), 83-97.
- Pun, M., Mutiibwa, D. y Li, R. (2017). Land Use Classification: A Surface Energy Balance and Vegetation Index Application to Map and Monitor Irrigated Lands. *Remote Sensing*, 9, 1-19. DOI: 10.3390/rs9121256
- Robinson, N. P., Allred, B. W., Jones, M. O., Moreno, A., Kimball, J. S., Naugle, D. E., Erickson, T. A. y Richardson, A. D. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 2-14. DOI: 10.3390/rs9080863
- Sader, S. A. y Winne, J. C. (1992). RGB-NDVI Colour Composites for Visualizing Forest Change Dynamics. *Int. J. Remote Sensing*, 13(16), 3055-3067. DOI: 10.1080/01431169208904102
- Salas, F. y Chuvieco, E. (1995). Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles. *Revista de Teledetección*, 5, 1-12.
- Sánchez, J. (2016). Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 9-26.
- Spiekermann, R., Brandt, M. y Samimi, C. (2015). Woody Vegetation and Land Changes in the Sahel of Mali (1967-2011). *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 34, 113-121. DOI: 10.1016/j.jag.2014.08.007
- Xiong, J., Thenkabail, P., Gumma, M., Tluguntla, P., Poehnetl, J., Congalton, R., Yadav, K. y Thau, D. (2017). Automated Cropland Mapping of Continental Africa Using Google Earth Engine Cloud Computing. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 225-244. DOI: 10.1016/j.isprs.2017.01.019