

Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel-1A y Radarsat-2

Radar Images for Territorial Studies. Flooding in Tabasco Using SAR Sentinel-1A and Radarsat-2

Yolanda Margarita Fernández-Ordoñez, * Jesús Soria-Ruiz, ** Brigitte Leblon, *** Antonia Macedo-Cruz, * Martha Elva Ramírez Guzmán*
y Miguel Escalona-Maurice*

* Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas (COLPOS)-Campus Montecillo, yfernand@colpos.mx, amacedo@colpos.mx, martharg@colpos.mx y mescalona@colpos.mx, respectivamente.

** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), soria.jesus@inifap.gob.mx

*** University of the New Brunswick, Canadá, bleblon@unb.ca

Nota: trabajo realizado con el apoyo financiero del Fondo Sectorial CONACYT-INEGI, proyecto núm. 278970: Imágenes de Radar para Estudios Territoriales: Análisis, Aplicación y Caso de Estudio.



Streets are flooded in Villahermosa, Tabasco State, Mexico/Bloomberg/Getty Images

Este trabajo es el producto de una investigación aplicada para contribuir al conocimiento y uso de imágenes satelitales de radares de apertura sintética (SAR). Su análisis proporciona información que, junto con la de procesadores de imágenes y sistemas de información geográficos, han probado su utilidad en otros países con resultados satisfactorios para el monitoreo de fenómenos terrestres, particularmente en zonas ecuatoriales y polares. Se presenta un caso de estudio realizado en Tabasco, México: el área padece inundaciones de manera recurrente que provocan pérdidas a los sectores rural, pecuario y de servicios, afectando la economía de la entidad. Su objetivo fue determinar el comportamiento de aquellas en la temporada de lluvias utilizando imágenes de SAR *Sentinel-1A* y *Radarsat-2*. Se llevó a cabo en el 2017, cuando las precipitaciones registradas indicaron un acumulado de 2 013.9 mm y los meses más lluviosos fueron septiembre y octubre. Se obtuvo la cartografía comparativa de zonas inundadas, cuerpos de agua y humedales para la temporada de lluvia *versus* la de sequía. La metodología generada puede ser empleada para dar seguimiento a las inundaciones con imágenes SAR y es accesible a personal técnico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía y a gobiernos estatales que atienden emergencias y desastres naturales.

Palabras clave: inundaciones; imágenes de radar (SAR); *Sentinel-1A*; *Radarsat-2*.

Recibido: 30 de diciembre de 2018.

Aceptado: 4 de julio de 2019.

1. Introducción

El radar es una tecnología de teledetección que se desarrolló en la Segunda Guerra Mundial, cuyo principio físico es emitir pulsos de energía electromagnética (EM) con un rango muy estrecho de frecuencias y construir imágenes usando los datos de EM que retornan al sensor. El radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés, *Synthetic Aperture Radar*) está ofreciendo de manera intensiva conjuntos de datos que son clave en la investigación geoespacial, los cuales se integran en productos satelitales provenientes de diver-

This work is the product of applied research to contribute to the knowledge and use of satellite images of synthetic aperture radars (SAR). Its analysis provides information that, together with that of image processors and geographic information systems, have proven to be useful in other countries with satisfactory results for the monitoring of terrestrial phenomena, particularly in equatorial and polar areas. A case study is presented in Tabasco, Mexico: the area suffers from recurrent flooding that causes losses to the rural, livestock, and services sectors, affecting the economy of the entity. Its objective was to determine the behavior of those in the rainy season using images of SAR *Sentinel-1A* and *Radarsat-2*. It was carried out in 2017, when the registered rainfall indicated an accumulation of 2,013.9 mm and the rainiest months were September and October. The comparative mapping of flooded areas, bodies of water, and wetlands was obtained for the rainy season *versus* the dry season. The methodology generated can be used to monitor floods with SAR images and is accessible to technical personnel of the National Institute of Statistics and Geography and to state governments that attend to emergencies and natural disasters.

Key words: flooding; radar images (SAR); *Sentinel-1A*; *Radarsat-2*.

sos sensores SAR de agencias espaciales de varios países. A diferencia de muchos otros métodos de observación terrestre, la función del SAR no está limitada por la iluminación o la cubierta de nubes. En los últimos años, debido a un número cada vez mayor de instrumentos orbitales SAR, ha habido un aumento significativo en la calidad de los datos y en la disponibilidad de la información.

El objetivo general de este trabajo es contribuir a que instituciones mexicanas se acerquen al conocimiento de la tecnología de teledetección con SAR. Para ello, se hace una revisión somera de los

principios básicos de esta, la cual es un tema muy amplio. Para ello, se presenta un caso de estudio de interés nacional que se llevó a cabo en el estado de Tabasco, México, que se refiere al fenómeno de inundación, investigación de la que derivó una metodología que ilustra cómo puede aplicarse la percepción remota con SAR.

En la segunda sección de este documento se revisan puntos relevantes de los sensores de radar de apertura sintética y se comentan algunas aplicaciones sobresalientes que permiten resaltar la diferencia entre la percepción remota óptica y la radar. La tercera aborda el caso de estudio con las consideraciones necesarias de aplicación incorporadas en una metodología, la cual es accesible a personal técnico de diversas organizaciones, en particular del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de gobiernos estatales que atienden emergencias y desastres naturales.

2. Teledetección con SAR

El radar de apertura sintética es un sistema de visión lateral espacialmente coherente que se utiliza, sobre todo, en la trayectoria de vuelo de la plataforma del sensor para simular una apertura de antena extremadamente grande de forma electrónica y que genera, así, imágenes de detección remota de alta resolución.

Esta tecnología se utiliza, principalmente, en países ecuatoriales —donde la nubosidad es continua— para dar seguimiento a fenómenos dinámicos. Es idónea para monitorear zonas terrestres independientemente de la condición climática prevalente al momento de la toma de imagen.

Según su diseño, los distintos sensores de radar emiten con características propias su EM hacia la superficie terrestre y la reciben para integrar con los datos recibidos las imágenes de radar; por ello, estas son de naturaleza muy distinta de las ópticas y requieren de otras técnicas y conocimientos para su explotación como fuentes de información. No solo captan datos en zonas del espectro electro-

magnético diferentes de las utilizadas en las ópticas, sino que pueden contener valores inducidos por los objetos bajo estudio de acuerdo con parámetros del funcionamiento del radar.

2.1. Aplicaciones del SAR

Algunas recientes incluyen: la detección de cambios de uso de suelo (Lamperein, 2004); la identificación y seguimiento de derrames de petróleo en el mar (Solberg *et al.*, 2007); el monitoreo de cultivos (McNairn *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2017; Soria-Ruiz *et al.*, 2007); el seguimiento de inundaciones (LaRocque *et al.*, 2014; Jahncke *et al.*, 2018; Mleczko and Mróz, 2018); la interferometría, una técnica avanzada de SAR aplicada en la exploración minera y en la generación de modelos de elevación digital (Rao *et al.*, 2004), y también exploración con el radar de apertura sintética interferométrica diferencial (DInSAR, por sus siglas en inglés) (Liu *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017); la detección de asentamientos arqueológicos selváticos (LaRocque y Gadoury, 2017; LaRocque *et al.*, 2019); el mapeo de hielo en los polos (Nagler *et al.*, 2015); el estudio de incendios forestales (Polychronaki *et al.*, 2013 y Verhegghen *et al.*, 2016); e incluso, la búsqueda de agua en Marte (Holt *et al.*, 2008; Orosei *et al.*, 2018).

Recientemente, la Comisión Europea ha identificado seis temas donde el SAR tiene aplicaciones directas mediante el sensor *Sentinel-1A*, apoyándose en los servicios operativos basados en datos de observación de la Tierra: respuesta a emergencias; monitoreos marinos y atmosféricos; así como seguridad y clima (Moreira, 2013).

Los fenómenos devastadores incluyen sequías, inundaciones, deslizamiento de tierras, maremotos y descongelamiento de hielos polares, entre otros. Los eventos extremos provocados por el calentamiento global del planeta son de especial interés en la investigación científica, ya que cada vez son más recurrentes con consecuencias devastadoras en todos los rincones del mundo. Cada año se estiman más de 90 mil decesos de personas con afectación de otros 160 millones alrededor del

mundo por fenómenos naturales. Según Scheuren *et al.* (2008), las inundaciones representaron 55% de los desastres totales informados en el 2007 a nivel mundial, los cuales tuvieron un impacto humano muy alto (177 millones de víctimas) con grandes daños económicos y un estimado de 24.5 mil millones de dólares.

2.2. Ventajas del SAR

Las imágenes satelitales de los sensores ópticos se han incorporado cada vez más en la colecta de información terrestre y marina; sin embargo, estas no son las idóneas para la adquisición de datos de manera ininterrumpida, ya que dependen de la luz solar, por lo que se ven afectadas por efectos del clima. Por otra parte, su utilización presenta limitaciones en zonas nubladas, con bruma, niebla y en regiones tropicales, haciendo imposible un seguimiento adecuado de fenómenos dinámicos. Por ello, el uso de la teledetección en estos casos solo es posible con imágenes de radar.

La EM con la que operan los sensores SAR permite obtener datos de observación de la Tierra independientemente de perturbaciones atmosféricas y de luz solar. La EM penetra nubosidad y otras perturbaciones atmosféricas e incluso logra cierta penetración en el terreno. Por esa capacidad, es posible obtener tomas de imágenes diurnas y nocturnas, cuyo contenido de datos es de naturaleza distinta de los de las ópticas. Estos dependen de parámetros y características como: la polarización de la señal electromagnética enviada y recibida, el ángulo de incidencia del rayo y la resolución espacial y temporal. La polarización es una de las características relevantes para la extracción de información de imágenes SAR. Este documento no pretende abordar de manera exhaustiva el vasto tema de la percepción remota por radar de apertura sintética.

En los siguientes párrafos se resumen explicaciones necesarias para una mayor claridad de resultados de este trabajo: la designación de las bandas de radar, la naturaleza de la polarización de las imágenes

y las características de los datos que se incorporan en el histograma correspondiente a una imagen de radar procesada.

Los rangos del espectro electromagnético de las imágenes de radar se conocen técnicamente como bandas, las cuales se caracterizan por la frecuencia y la longitud de onda de EM en las que opera un sensor de radar determinado. El cuadro 1 muestra la nomenclatura de bandas de radar donde se encuentran subrayadas las usadas con más frecuencia.

Cuadro 1
Bandas de radar y los rangos de longitud de onda y frecuencia que operan

Banda	Longitud de onda (λ) (cm)	Frecuencia (GHz)
Ka	0.8 a 1.1	40.0 a 26.5
K	1.1 a 1.7	26.5 a 18.0
Ku	1.7 a 2.4	18.0 a 12.5
<u>X</u>	2.4 a 3.8	12.5 a 8.0
<u>C</u>	3.8 a 7.5	8.0 a 4.0
S	7.5 a 15.0	4.0 a 2.0
<u>L</u>	15.0 a 30.0	2.0 a 1.0
P	30.0 a 100.0	1.0 a 0.3

La polarización estudia el uso de múltiples retornos de la señal devuelta o rebotada para inferir información sobre una superficie. La de instrumentos espaciales SAR se define en términos del campo eléctrico denotado por Y y del magnético, por X. En la figura 1 se ilustra una onda plana linealmente polarizada que se propaga de izquierda a derecha. Los campos eléctrico y magnético están en fase uno respecto al otro, es decir, alcanzan de manera simultánea sus máximos y mínimos. Los sensores SAR tienen distintas posibilidades de polarización de la EM que transmiten a la Tierra y la que captan al retorno: la transmisión puede ser de señal polarizada vertical u horizontalmente y la de retorno o retrodispersión terrestre, horizontal o verticalmente (ver figura 2).

Figura 1

Onda plana linealmente polarizada que se propaga de izquierda a derecha

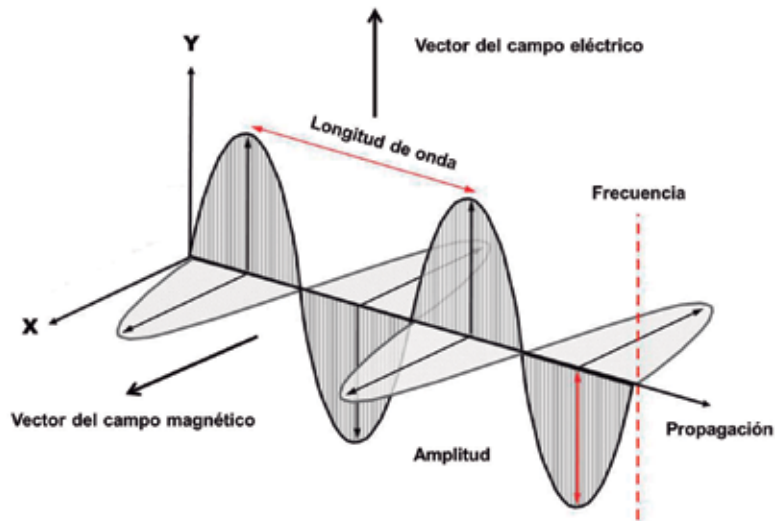
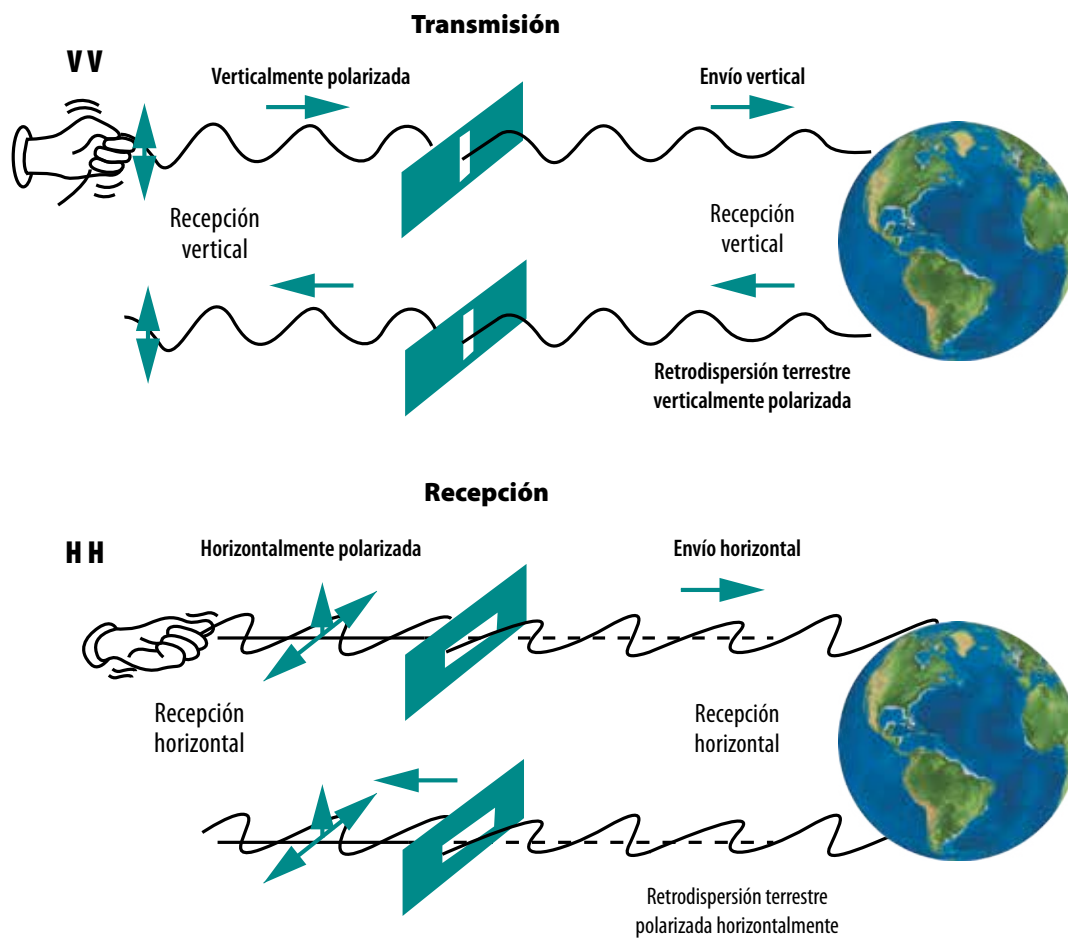


Figura 2

Señales vertical y horizontalmente polarizadas de transmisión (envío) y recepción (retrodispersión)



Fuente: Jensen, J. R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, 2000 (adaptada).

El cuadro 2 muestra la banda y la polarización de los sensores SAR *Sentinel-1A* y *Radarsat-2*. Obsérvense las alternativas disponibles en los productos de ambos: el primero ofrece polarizaciones simples y duales, mientras que el segundo es completamente polarimétrico al incluir, además de las simples y duales, las cuatro combinaciones posibles simultáneamente. Existen otros parámetros involucrados en la toma de imágenes SAR, los cuales incluyen el ángulo de incidencia del rayo de energía, el ancho de barrido o *swath* y las resoluciones espacial y temporal.

Cuadro 2

Algunos sensores SAR

Sensor	Banda	Polarización
<i>TerraSar-X</i>	X 12.5 GHz	HH VV HV VH HH+HV VV+VH HH+VV+HV+VH
<i>Sentinel-1A</i>	C 5.4 GHz	HH VV VV+VH HH+HV
<i>Radarsat-2</i>	C 5.4 GHz	HH VV HH+HV VV+VH HH+VV+HV+VH

3. Caso de estudio: inundaciones en Tabasco

El objetivo de este, realizado como parte de la investigación, es ilustrar, por una parte, cómo aplicar la percepción remota con SAR y, por la otra, abordar un fenómeno de interés nacional consistente en determinar zonas inundadas con imágenes de sensores de radar.

En México existen zonas que constantemente están expuestas a eventos extremos de inundación. De acuerdo con informes meteorológicos, estos se presentarán con mayor frecuencia e intensidad en los años venideros. Saber qué ocurre en una ven-

tana de tiempo mediante la percepción remota acerca al conocimiento de este tipo de eventos. En algunas regiones de país, cuando la precipitación es excesiva, en particular en la temporada de lluvias, esta se convierte en un problema que ocasiona inundaciones severas. El fenómeno ha sido más recurrente en zonas de impacto de los huracanes (costas del Pacífico y la península de Yucatán) o en regiones donde la lluvia sobrepasa la media normal (por lo regular en Tabasco y Chiapas) causando el desbordamiento de ríos.

Por ello, se eligió un evento extremo particular de inundación para resaltar las ventajas de aplicación de imágenes SAR bajo condiciones de nubosidad y lluvia referido en especial al estado de Tabasco, y se desarrolló una metodología para determinar el comportamiento de las inundaciones que ocurren en la temporada de lluvias utilizando imágenes SAR de los sensores *Sentinel-1A* y *Radarsat-2*. Se anticipa que dicha metodología incrementa la capacidad de respuesta a las demandas nacionales para estudios de este tipo.

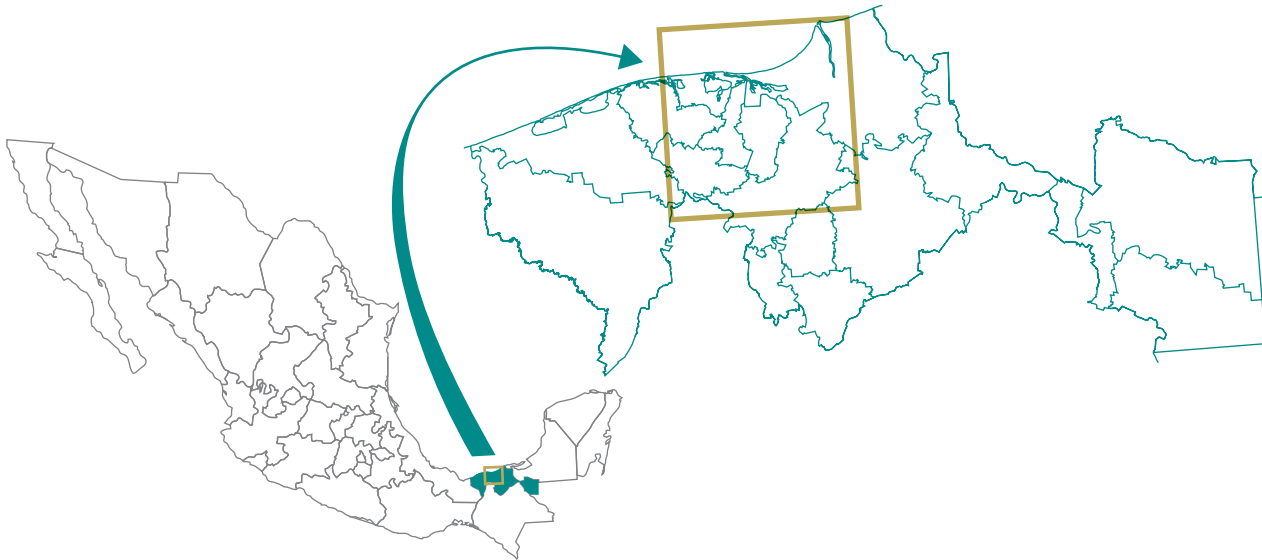
Tabasco es una entidad que padece inundaciones año con año que provocan pérdidas en los sectores agrícola, pecuario y de servicios, así como, en general, en la economía del estado, esto debido a dos causas: a) entre los límites con Chiapas se registran los índices más altos de lluvia en el país y b) 89% de la superficie de su territorio es plana, lo que provoca fuertes inundaciones por los desbordamientos de ríos, cuyos afluentes provienen de las áreas de captación de Chiapas y Guatemala.

3.1. Área de estudio

Se ubica dentro del estado de Tabasco (ver figura 3) y cubre una superficie total de 3 800.9 km²: abarca parte de los municipios de Comalcalco, Paraíso, Cunduacán, Centla, Centro, Macuspana y la totalidad de los de Jalpa de Méndez y Nacajuca. El trabajo de investigación se realizó en el 2017 y 2018, y se eligió para abarcar zonas agrícolas y pecuarias que han reportado inundaciones recurrentes en los últimos 10 años.

Figura 3

Área de estudio en el contexto del estado de Tabasco



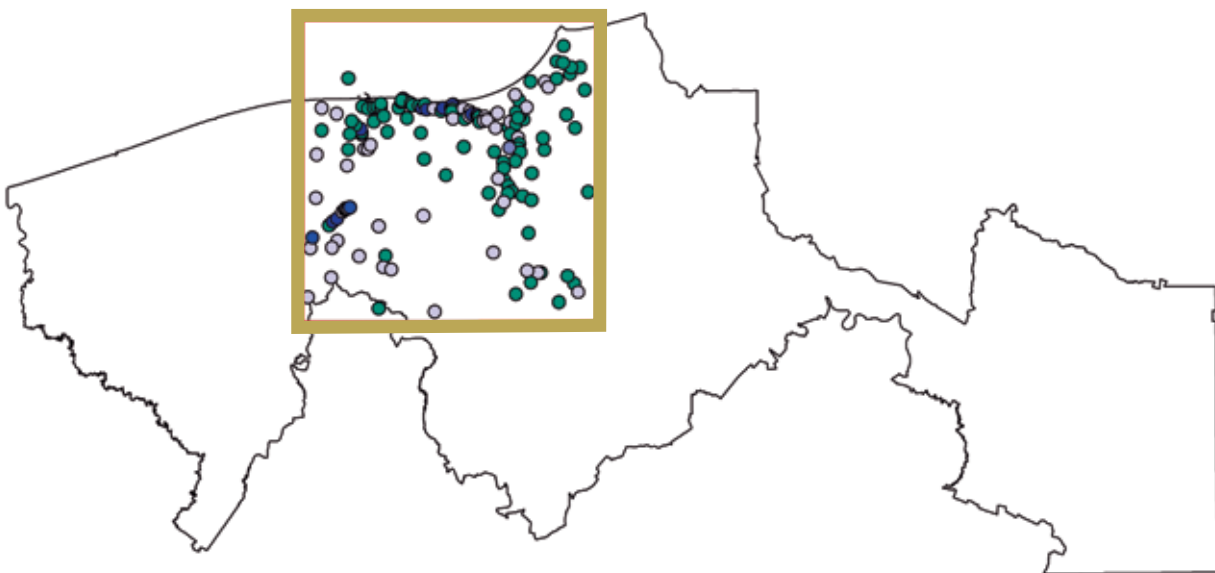
3.2. Trabajos de campo

Consistió en hacer recorridos dentro del área de estudio durante el periodo de lluvias (octubre del 2017) con el propósito de realizar el levantamiento de puntos georreferenciados mediante el uso de

navegadores satelitales. Se generaron 147 puntos que corresponden a praderas y áreas agrícolas inundadas, pantanos, zonas urbanas y semiurbanas, cuerpos de agua permanentes e intermitentes, terrenos frutícolas y manglares, entre otros (ver figura 4).

Figura 4

Puntos generados en el área de estudio



3.3. Gestión de imágenes de radar utilizadas

Tanto las *Sentinel-1A* como *Radarsat-2* se ubican en la banda C (5.4 GHz). Para determinar la dinámica de las inundaciones, se analizaron imágenes de radar correspondientes a dos fechas de toma: temporadas de sequía (febrero y marzo del 2017) y lluvias (agosto y octubre del 2017).

Imágenes *Sentinel-1A*

Estas forman parte de una constelación de dos satélites de radar de apertura sintética coordinada por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés, *European Space Agency*) que se emplean para las misiones de observación de la Tierra que conducen diversas naciones con sensores SAR (Batazza, 2011). Las imágenes que se usaron en este trabajo se gestionaron desde la plataforma denominada *Alaska Satellite Facility* de la ESA.

Debido a que el sensor *Sentinel-1A* proporciona imágenes en polarizaciones duales (HH o VV), y adicionalmente las que operan en altas frecuencias de transmisión de la señal, para detectar cuerpos

de agua y humedales con presencia de vegetación herbácea, en este estudio de caso se eligieron VV y VH (ver cuadro 3).

Imágenes *Radarsat-2*

El sensor para estas forma parte de una misión satelital financiada conjuntamente por la Agencia Espacial Canadiense (CSA, por sus siglas en inglés) y *MacDonald Dettwiler Associates (MDA)* en una asociación industria/gobierno. Proporciona imágenes desde alta resolución (5 m) hasta estándar (100 m). Las utilizadas fueron seleccionadas desde la plataforma de la empresa *MDA-Corporation* de Canadá y se adquirieron mediante orden de compra a través de su proveedor en México. El cuadro 4 resume sus características.

3.4. Software utilizado

Para el procesamiento de las imágenes *Sentinel-1A* y *Radarsat-2*, se eligió el procesador SNAP© Versión 6.0 (*Sentinel Application Platform*), desarrollado por la ESA bajo una arquitectura de *software* unificada para la explotación de datos de observación terrestre. Para manipular información de campo

Cuadro 3

Características de las imágenes de radar *Sentinel-1A* utilizadas

Producto:	S1A_IW_GRDH_1SDV	S1A_IW_GRDH_1SDV
Fechas de toma:	14 de marzo del 2017 (sequía)	08 de octubre del 2017 (lluvias)
Nivel procesamiento:	(1), estándar (georreferenciado)	(1), estándar (georreferenciado)
Modo del haz (<i>Beam mode</i>):	(IW) <i>Interferometric Wide</i> (5 x 20)	(IW) <i>Interferometric Wide</i> (5 x 20)
Ancho de barrido:	250 km	250 km
Tipo de producto:	(GRD) <i>Ground Range Detection</i>	(GRD) <i>Ground Range Detection</i>
Polarización:	1SDV: (dual VV + VH)	1SDV: (dual VV + VH)
Frecuencia:	Banda C	Banda C
Paso:	Ascendente	Descendente

Características de las imágenes *Radarsat-2* utilizadas

Producto:	RS2_OK95717_PK841604_DK772742_XF0W2	RS2_OK95717_PK841605_DK772743_XF0W2
Fechas de toma:	10 de marzo del 2017 (sequía)	25 de agosto del 2017 (lluvias)
Nivel de procesamiento:	1	1
Modo adquisición:	Extrafino (5 m)	Extrafino (5 m)
Ancho de barrido (<i>swath</i>):	50 km	50 km
Angulo de incidencia:	30-50°	30-50°
Tipo de producto:	SGF	SGF
Polarización:	Simple: HH	Simple: HH
Frecuencia:	Banda C	Banda C
Paso:	Ascendente	Ascendente

de formato *raster* y/o vectorial y la producción de mapas finales, se utilizó el sistema de información geográfica (SIG) *ArcGis*®-Versión 10.5.

3.4.1. Formatos de las imágenes SAR

El formato nativo de las *Sentinel-1A* es **.DIMAP*; al momento de abrir una imagen con el procesador SNAP se reconoce y el *software* la abre sin problema alguno. Para el caso de las *Radarsat-2*, es **.GeoTIFF*; para abrir y visualizar las imágenes en la plataforma SNAP, previamente deben ser importadas a un formato genérico **.DIMAP*. Es muy importante tomar en cuenta que todos los archivos de origen de las imágenes SAR están compactadas con **.zip*; se recomienda no descomprimir el archivo antes de ser visualizadas con SNAP, el *software* lo hace de forma automática.

3.4.2. Procesamiento de imágenes SAR

Este se dividió en dos etapas: preprocesamiento y análisis para extracción de la información.

Preprocesamiento

Esta fase incluye:

- Recorte y extracción de la subimagen. Se realiza un primer recorte de la imagen original para reducir su tamaño.
- Calibración radiométrica. Consiste en crear una imagen donde el valor de cada pixel esté relacionado directamente con la retrodispersión de la escena; en otras palabras, la corrección radiométrica elimina valores altos de la señal de rebote en áreas con topografía compleja.
- Filtrado y/o *multilooking*. El ruido (*speckle*) es inherente a las imágenes de radar y dificulta la interpretación por el efecto de *sal y pimienta*, el cual distorsiona la información del terreno. Existen varias técnicas para eliminar el ruido; se puede utilizar el filtrado espacial para alisar la imagen, o bien, realizar el *multilook* a la imagen, que consiste en dividir el haz del radar en varios subhaces (más angostos). Cada subhaz proporciona un *look* independiente al área iluminada; cada *look* contiene *speckle*; al sumar los diferentes *looks* y promediar, se obtiene una imagen con el ruido reducido.
- Calibración geométrica. Las principales distorsiones geométricas de la imagen son debidas al rango oblicuo (*slant range*), a la inversión del relieve, a las sombras y al des-

plazamiento en contra del nadir. Para corregir todas las distorsiones, se aplica la corrección geométrica utilizando el sistema de proyección UTM/WGS84, en este caso es el que corresponde a la zona 15 de Tabasco. El algoritmo de corrección utiliza un modelo digital de elevación (MDE) para realizar la corrección.

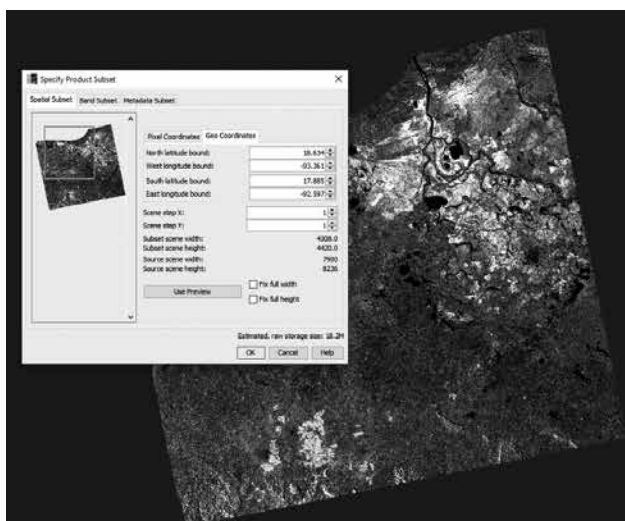
- Conversión de Sigma^0 a decibeles (dB). La señal de rebote contenida en la imagen original contiene ruido, y se expresa como Sigma^0 . Para una mejor interpretación de esta señal, se debe convertir a dB. La información numérica que se capta —*Digital Number (DN)*— en una imagen de radar es el haz de luz que fue devuelta de la superficie (retrodispersión) y que fue captada por la antena del radar. La interpretación de las relaciones entre los DN almacenados en forma matricial no es inmediata, requiere de una serie de transformaciones. El resultado es la retrodispersión, conocida como Sigma^0 (σ^0), cuyos valores se miden en dB y son independientes del tamaño de pixel. Cada pixel de una imagen representa, entonces, la retrodispersión normalizada de un área en la superficie, las más oscuras indican valores bajos y las brillantes, altos. El rango típico

de valores para superficies terrestres naturales es de +5 dB correspondiente a muy brillante y -40 dB, a muy oscuro. De manera general, los valores en áreas brillantes indican que una porción significativa de la energía en la señal de radar fue rebotada hacia la antena; áreas oscuras indican escasa energía; sin embargo, los valores de σ^0 varían de acuerdo con otras condiciones, como el tamaño de los objetos retrodispersores (tipo de cultivos, hojas de árboles, movimiento de aguas, etc.), orientación respecto del sensor y longitud de onda que usa, contenido de humedad, polarización de la energía enviada/recibida y ángulos de observación. El histograma es la representación gráfica básica de los valores de brillantez que forman la imagen; indica valores de dispersión en el eje x y la frecuencia de ocurrencia de estos en el y. En este trabajo no se consideró necesario hacer una ampliación del histograma pues, simplemente, se muestra que la mayoría de los valores indican agua, aunque los histogramas para las polarizaciones sí presentan diferencia.

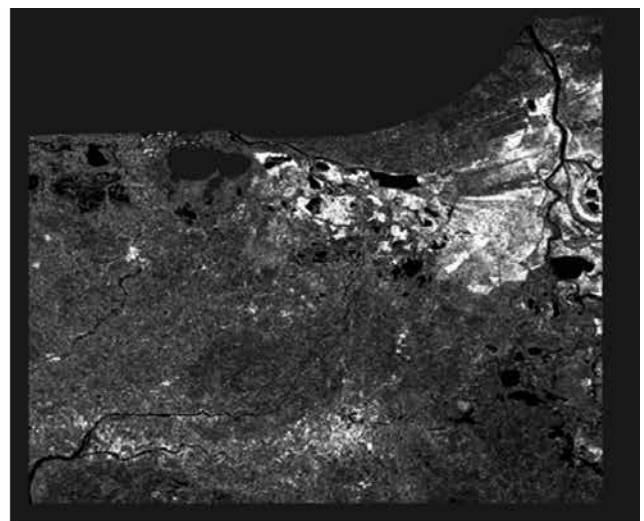
- Segundo recorte con coordenadas extremas. Esto se hace una vez obtenida la imagen preprocesada (ver figura 5).

Figura 5

Imagen recortada que muestra el área de estudio



(a) Primer recorte.



(b) Segundo recorte.

Análisis y extracción de información

Esto incluye el análisis del histograma de la imagen y la definición de límites de valores de dB:

- Análisis de histograma. Con este se separan las zonas inundadas, cuyo criterio es el valor promedio de la señal de retrodispersión expresado en dB en la imagen, como se indicó arriba, para lo cual se identifican dos picos: el inferior representa agua y el superior, lo que no es agua. Se elige el que separa el agua de otros valores, en este caso es -18.85 dB. Este análisis se realiza para cada una de las imágenes según su polarización; para este trabajo, se utilizó la dual de *Sentinel-1A* (VV y VH) tanto del periodo de sequía como el de lluvias y, así, determinar las zonas inundadas.
- Definición de límites de valores de dB. Mediante el análisis de los valores de dB en el histograma, se definieron los límites de los de la retrodispersión expresados en dB. Para ello, se utilizó un editor matemático que contiene el SNAP en el módulo *Raster*. Se edita la expresión matemática para que indique lo siguiente: $-255 * (\text{Sigma}^0_{\text{VHdB}} < -18.85)$. El resultado es una imagen donde el agua tiene un valor de 255 y el dB es igual a 19.71; la resultante muestra los cuerpos de agua, zonas inundadas y humedales según el periodo de análisis de esta.

3.5. Cartografía temática de zonas inundadas

Las imágenes SAR clasificadas de *Sentinel-1A* y *Radarsat-2* de las temporadas de sequía y lluvia fueron respaldadas en dos formatos para su visualización: *.shp y *.kmz. El primero es para extraer las estadísticas de superficies inundadas y la elaboración de los mapas temáticos en un SIG (*ArcGis*®-V 10.5); el segundo es útil para visualizar las zonas inundadas en la plataforma *Google Earth*.

3.5.1. Registro de lluvias 2017 y zonas susceptibles de inundación

Se obtuvieron los datos de lluvia mensual y el acumulado reportados en el 2017 (CONAGUA, 2017). Estos son de suma importancia para relacionar la información pluviométrica con los resultados obtenidos a partir de las imágenes SAR y, para darles soporte, se utilizaron MDE de terreno y de superficie generados con tecnología LIDAR de 5 metros de resolución (INEGI, 2018), esto para determinar las zonas susceptibles de inundación.

3.6. Diagrama de la metodología generada

Esta se deriva de lo descrito en la sección anterior y se muestra en la figura 6: constituye el flujo de trabajo (protocolo técnico-operativo) para el procesamiento y análisis de imágenes *Sentinel-1A* y *Radarsat-2* con el software SNAP para detectar cuerpos de agua, zonas inundadas y humedales.

4. Resultados y discusión

Estos se presentan, primeramente, en lo que concierne a los dos tipos de imágenes utilizadas: *Radarsat-2* y *Sentinel-1A*. Enseguida, se aborda lo correspondiente a climatología y lluvias registradas en el 2017 y los comentarios sobre zonas susceptibles de inundación.

4.1. Zonas inundadas, cuerpos de agua y humedales en temporadas de lluvia y sequía con Radarsat-2

La figura 7 muestra la cartografía generada. La diferencia de superficie inundada en temporada de lluvia respecto a la de sequía es de 88.2 km², que representa un incremento de 16.9%; la imagen *Radarsat-2* analizada con polarización simple HH durante las lluvias corresponde al mes de agosto y, como se puede observar en la gráfica (precipitaciones 2017), las más abundantes del año en esas fechas de análisis aún no se habían registrado.

Figura 6

Diagrama metodológico generado para determinar zonas inundadas con imágenes SAR utilizando SNAP

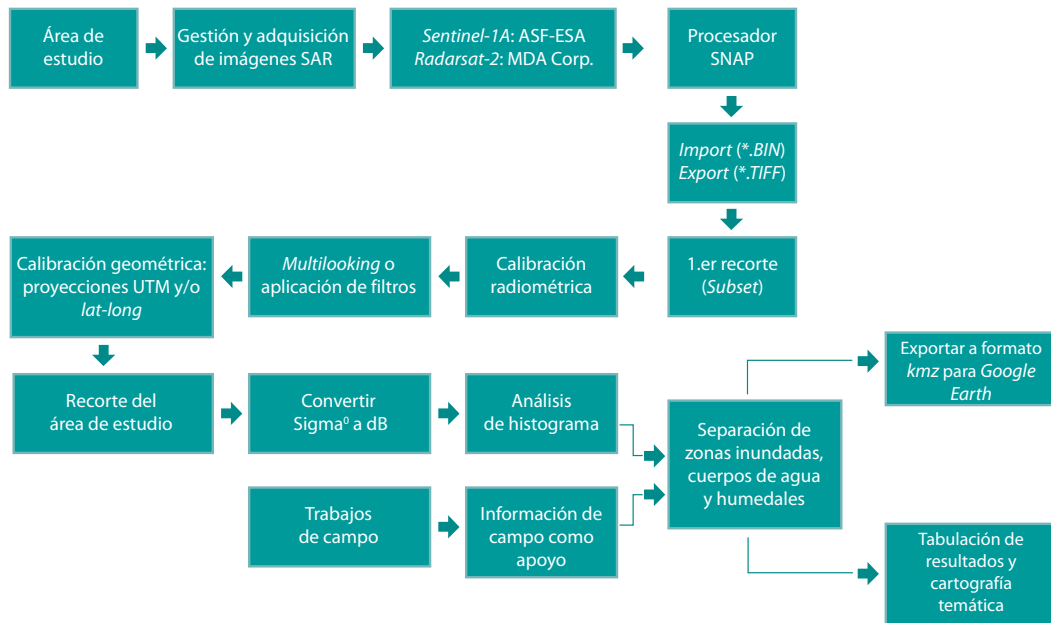


Figura 7

Zonas inundadas, cuerpos de agua y humedales en la temporada de lluvia versus la de sequía obtenidas con imágenes Radarsat-2



Temporada de lluvias-polarización HH.

Temporada de sequía-polarización HH.

Las distintas polarizaciones producen datos diferentes; como en el caso de algunas investigaciones realizadas con datos del sensor ASAR para delimitar áreas inundadas, los resultados mostraron que los mejores datos se obtuvieron con la HH (Henry *et al.*, 2006). En el presente estudio, utilizando esta se hace evidente el incremento de las superficies inundadas en la temporada de lluvias (ver cuadro 5). La señal de envío/recepción con polarización dual para detectar inundaciones en aguas no abiertas, sino con presencia de vegetación inundada, depende de la física de la interacción de las microondas con la superficie de áreas inundadas, particularmente del grado de turbidez del agua y de la dispersión de la señal que retorna por la presencia de vegetación inundada.

Cuadro 5

Superficie inundada, cuerpos de agua y humedales en temporadas de lluvia y sequía en el 2017 obtenidas con imágenes Radarsat-2, polarización simple HH

SAR	Superficie inundada		Diferencia (%)
	Temporada		
	Sequía (km ²)	Lluvias (Km ²)	
Radarsat-2, polarización HH	519.7	607.9	16.9

4.2. Zonas inundadas, cuerpos de agua y humedales en temporadas de lluvia y sequía con Sentinel-1A

El cuadro 6 muestra que las superficies inundadas presentan comportamientos similares en ambas polarizaciones (VH y VV) tanto en la temporada de lluvias como en la de sequía. La orientación del vector eléctrico presenta variaciones no significativas en la polarización, esto debido a que las antenas del sistema de radar Sentinel-1A están configuradas para transmitir y recibir radiación electromagnética polarizada horizontal (H) y verticalmente (V).

Cuadro 6

Superficie inundada, cuerpos de agua y humedales en temporadas de lluvia y sequía en el 2017 obtenidas con imágenes Sentinel-1A, polarización dual

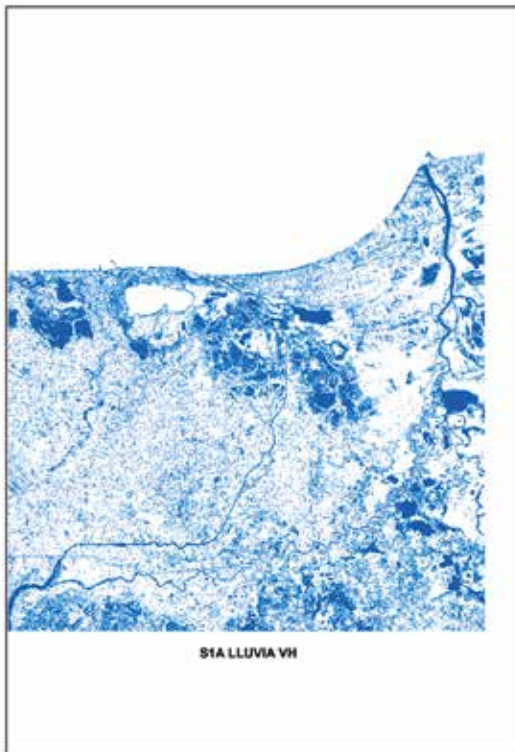
SAR	Superficie inundada Temporada		Incremento (%)
	Sequía (km ²)	Lluvias (Km ²)	
Sentinel-1A, polarización VH	1 076.51	1 280.52	18.9
Sentinel-1A, polarización VV	1 088.48	1 225.69	12.6
Promedio	1 082.49	1 253.10	15.7

Al comparar los resultados de las dos polarizaciones en una misma temporada (Lluvia), con la VH se registra una superficie mayor de área inundada con respecto a la VV; esto se puede deber a la constante dieléctrica que influye en la absorción y reflexión de la energía de microondas. Debido a las diferencias en la humedad y, por lo tanto, en la constante dieléctrica, los materiales idénticos pueden variar en apariencia en diferentes momentos o lugares de acuerdo con la cantidad de humedad que contienen. Durante la transición de la superficie del suelo del estado seco al húmedo se registra un cambio en las propiedades dieléctricas de la superficie, lo cual causa un incremento notable en retrodispersión; nótese en los resultados de las temporadas de sequía y lluvias que registra un incremento en la superficie inundada con un porcentaje promedio de 15.7 (ver figura 8).

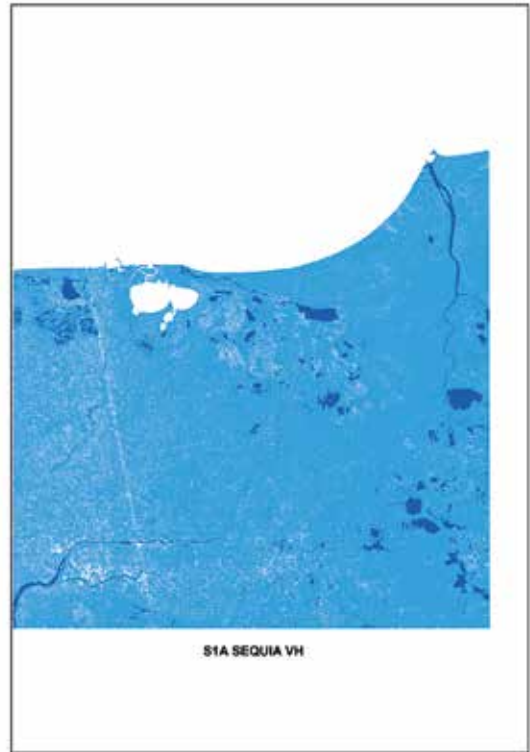
De acuerdo con investigaciones pioneras sobre la selección de parámetros para obtener imágenes de radar que incluyen distintas polarizaciones, la VV usualmente tiene una mayor razón señal/ruido que la HH. En este caso, se trabajó con polarizaciones duales (VV+VH) que están disponibles en Sentinel-1A. En estudios de percepción remota con radar, conviene determinar sobre la mejor selección de parámetros en función de los objetivos a alcanzar por una aplicación; por ejemplo, Evans *et al.* (1986) encontraron que los datos de imágenes

Figura 8

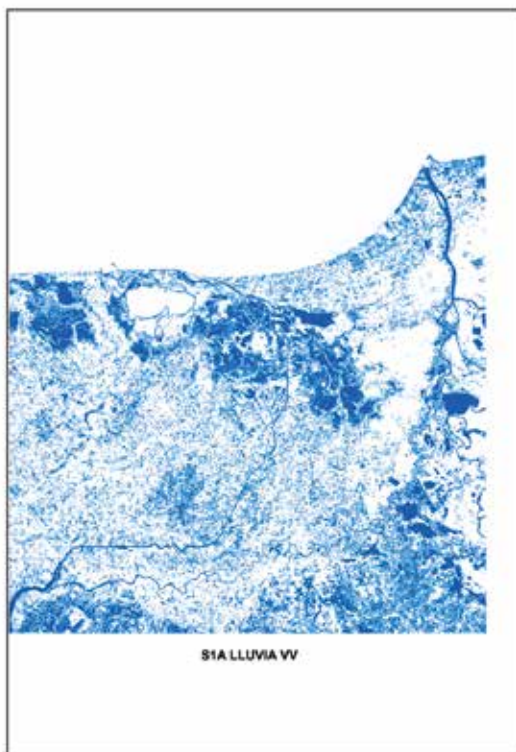
**Zonas inundadas, cuerpos de agua y humedales en las temporadas de lluvia y sequía
obtenidas con imágenes *Sentinel-1A*, polarización VH y VV**



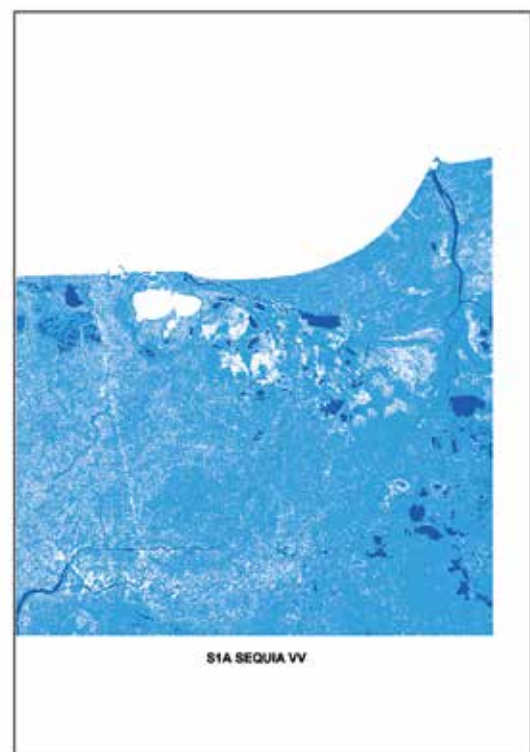
Temporada de lluvias-polarización VH.



Temporada de sequía-polarización VH.



Temporada de lluvias-polarización VV.



Temporada de sequía-polarización VV.

de polarización cruzada (i.e., HV o VH) son, en particular, útiles cuando se usan conjuntamente con datos de copolarización (i.e., HH o VV) para mapeos geológicos con presencia de vegetación.

4.3. Climatología y lluvias registradas en el 2017

En el área de estudio, 95.5% del estado tiene clima cálido húmedo y el restante, cálido subhúmedo. La temperatura media anual es de 27° C y la máxima promedio, de 36° C y se presenta en mayo; la mínima promedio es de 18.5° C y se registra en enero. La precipitación media es de 2 550 mm anuales; las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes de junio a octubre. Al analizar las estadísticas climatológicas normales mensuales de un periodo de análisis 1991-2003 de la estación González (DGE), ubicada en el municipio de Centro (dentro del área de estudio), estas indican que la mayor precipitación pluvial (mm) se dio en septiem-

bre y octubre con un acumulado de 2 084.9 mm y 124.5 días con lluvia durante el año (Díaz *et al.*, 2006). Las precipitaciones registradas en Tabasco en el 2017 (CONAGUA, 2017) indican un acumulado de 2 013.9 mm, cuyos meses más lluviosos fueron septiembre y octubre, con 377.5 y 414 mm, respectivamente (ver gráfica).

4.4. Zonas susceptibles de inundación

A partir del MDE obtenido con LIDAR de 5 m y a través del SIG ArcGis®-V 10.5 se generaron 11 rangos de altitud. Las zonas susceptibles de inundación se muestran en la figura 9, en la cual se aprecian los diversos rangos de altitud donde el color azul oscuro corresponde a zonas más susceptibles de inundarse, cuyos rangos de altitud respecto al nivel medio del mar es de 0 a 2 metros. Los resultados indican que hay una alta correlación de zonas inundadas obtenidas con las imágenes de radar *versus* el modelo digital de elevación. Los afluentes

Gráfica

Comportamiento de la lluvia en el estado de Tabasco durante el 2017

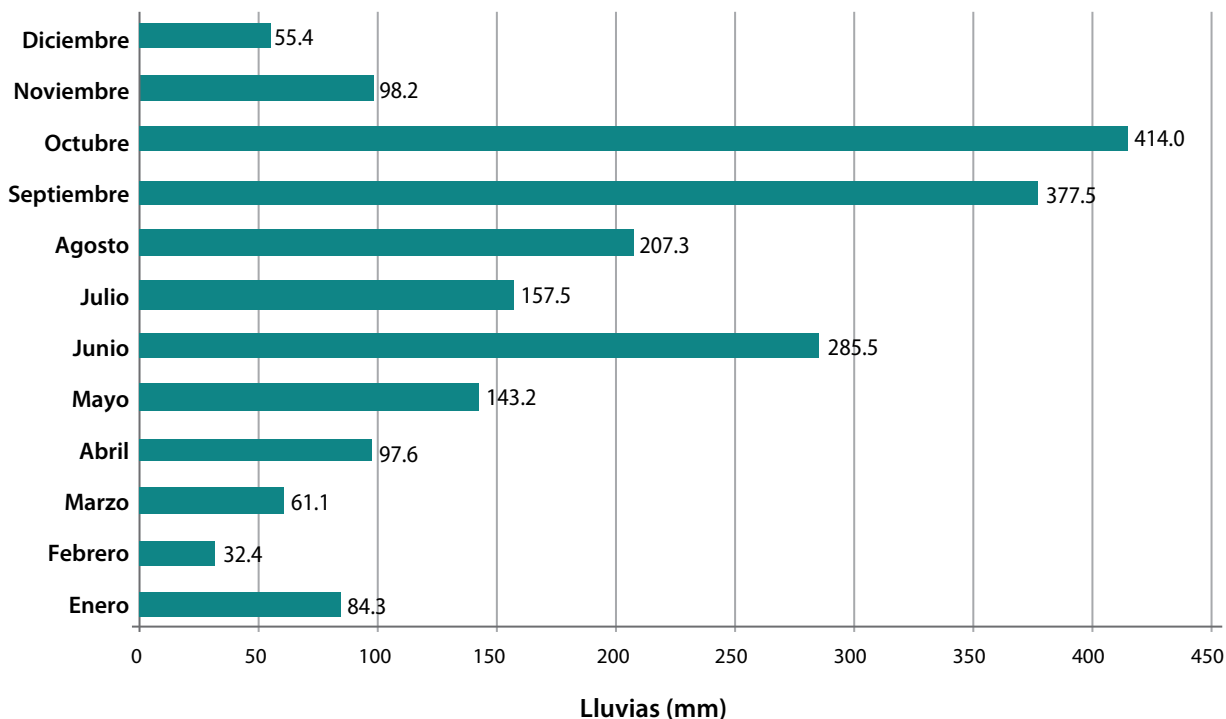
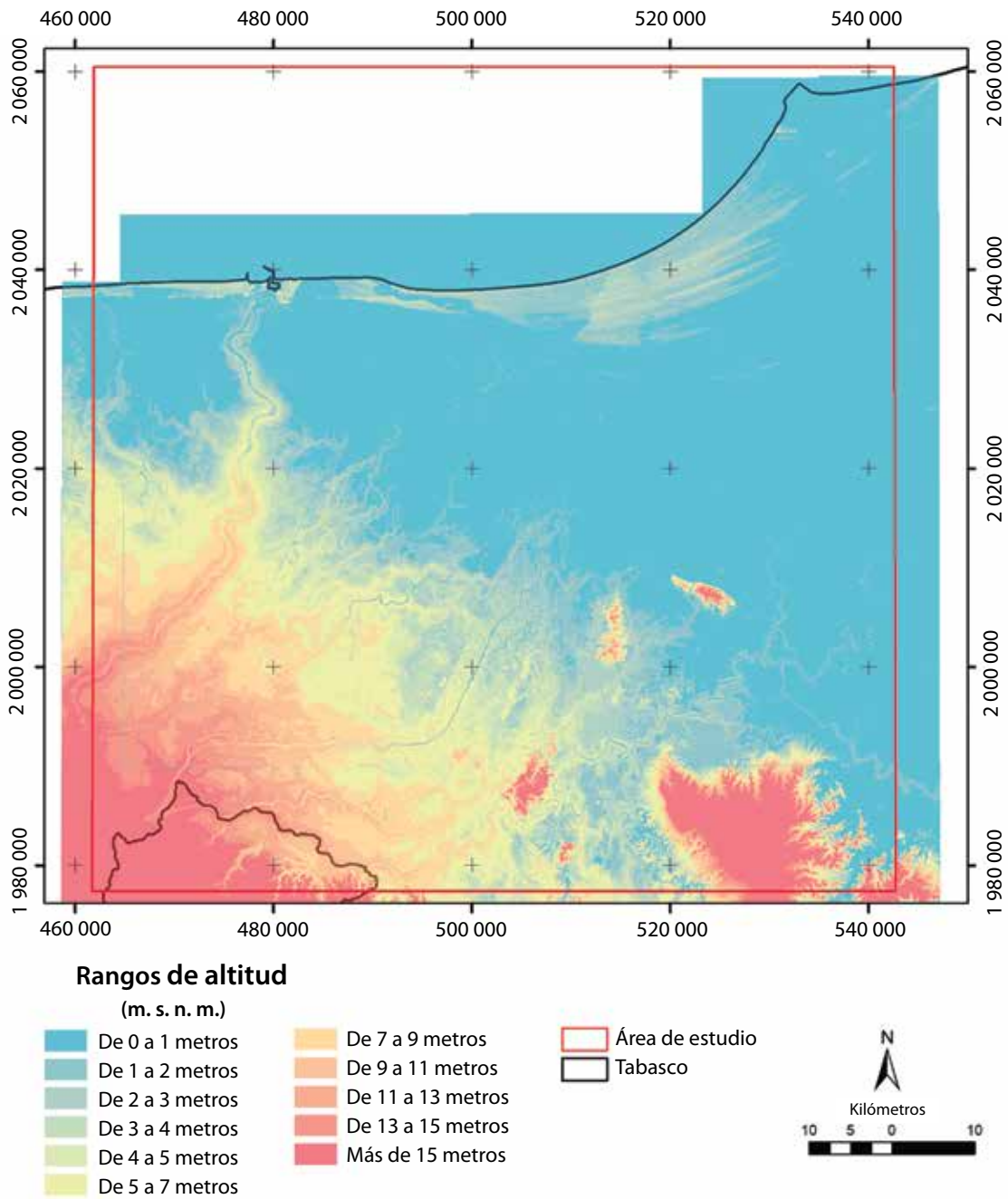


Figura 9

Rangos de altitud para identificar zonas susceptibles de inundación obtenidos con LIDAR de 5 m de resolución



de agua provienen de las zonas de captación de partes altas (color rojo). Las lluvias de mayor intensidad y duración que se registraron en el 2017 fueron en septiembre y octubre, inundando las partes más bajas del área de estudio, incluyendo la capi-

tal Villahermosa (áreas de color azul pálido), además de los afluentes provenientes de los Altos de Chiapas y Guatemala que forman los ríos Grijalva y Samaria, los cuales, al desbordarse a lo largo de su trayecto causan grandes inundaciones antes de

desembocar al Golfo de México. Esta es la razón por la cual el estado de Tabasco sufre de inundaciones recurrentes.

5. Conclusiones

El presente trabajo muestra que las imágenes de SAR son un aporte real para el monitoreo de emergencias y la obtención de información base para la prevención de desastres, ya que pueden obtenerse datos bajo condiciones de lluvia, llovizna, nubosidad, humo o bruma, es decir, bajo cualquier condición atmosférica y climática. En particular, las imágenes que ofrecen distintas opciones de polarización permiten ensayos orientados a determinar sobre la selección de parámetros en función de los objetivos a alcanzar por una aplicación.

Las imágenes de radar de apertura sintética que se usaron en este trabajo permiten el seguimiento y monitoreo de fenómenos naturales, como las inundaciones que de manera recurrente padece el estado de Tabasco. El estudio mostró que en el 2017 se registró un incremento de la superficie inundada de 16.9 y 15.7% respecto a la temporada de sequía, resultados obtenidos con *Radarsat-2* y *Sentinel-1A*, respectivamente, utilizando polarizaciones simples y duales.

El aporte del presente estudio es la metodología generada para identificar y determinar zonas inundadas. Esta podrá ser utilizada por personal del INEGI, CENAPRED y gobiernos estatales para dar seguimiento a este fenómeno en el futuro inmediato, que cada vez se presenta con mayor frecuencia en el sur-sureste de México.

En la actualidad, la tecnología de percepción remota con SAR ha probado su utilidad en muchos ámbitos y países para la observación terrestre, como puede constatarse por la cantidad de eventos técnicos y científicos que se realizan, así como por la creciente cantidad de publicaciones. Es importante promover que instituciones mexicanas amplíen las aplicaciones y realicen investigación sobre los múltiples aspectos teóricos y

de aplicación involucrados, contribuyendo con ello al estudio y conocimiento del territorio nacional.

Fuentes

- Batazza, F. *Mapping of the Antarctic Peninsula using COSMO-SkyMed constellation ScanSAR mode*. Agencia Espacial Italiana, 2011 (DE) http://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/PSTG-1_Doc_07-02-03_ASI.pdf consultado el 29 de septiembre de 2018.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Rainfall (mm) at National and Federation Entities 2017*. México, 2017 (DE) <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/> consultado el 4 de enero de 2018.
- Díaz, P. G., A. Ruiz, G. Medina, M., A. Cano y V. Serrano. *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Tabasco (periodo 1961-2003)*. Libro técnico núm. 12. Veracruz, México, INIFAP-CIRGOC, Campo Experimental Cotaxtla, 2006, 159 p.
- Evans, D. L, T. G Farr, J. P. Ford y T.W. Thompson. "Multipolarization Radar Images for Geologic Mapping and Vegetation Discrimination", en: *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*. Vol. Ge-24, No.2. March, 1986, pp. 246-257.
- Henry, J. B., P. Chastanet, K. Fellah and Y. L. Desnos. "Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping", en: *International Journal of Remote Sensing*. 27:10, 2006, pp. 1921-1929, DOI: 10.1080/01431160500486724.
- Holt, J. W., A. Safaeinili, J. J. Plaut, J. W. Head, R. J. Phillips, R. Seu, S. D. Kempf, P. Choudhary, D. A. Young, N. E. Putzig, D. Biccari and Y. Gim. "Radar Sounding Evidence for Buried Glaciers in the Southern Mid-Latitudes of Mars", en: *Science*. 322-5905, 2008, pp. 1235-1238.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Modelo de elevación tipo superficie con 5 metros de resolución derivados de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados*. México, INEGI, 2108 (DE) <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/> consultado el 21 de febrero de 2018.
- Jahncke, R.; L. Leblon; P. Bush & A. Larocque. "Mapping wetlands in Nova Scotia with multi-beam RADARSAT-2 Polarimetric SAR, optical satellite imagery, and Lidar data", en: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 68, 2018, 10.1016/j.jag.2018.01.012.
- Lamperein, P. P. *Diálogo Andino*. Núm. 23, agosto. Arica-Chile, Departamento de Antropología. Geografía e Historia, Facultad de Educación y Humanidades Universidad de Tarapacá, 2004.
- LaRocque, A. y W. Gadoury. "Mapping potential Maya sites in the Petén Campechano area (state of Campeche, Mexico) using optical and radar remote sensing", en: *Proceeding 37th Canadian Remote Sensing Symposium (Earth Observation Summit 2017)*. June 20-22, Montréal, QC, Canada, 2017.
- LaRocque, A., B. Leblon, R. Woodward, M. Mordini, L. Bourgeau-Chavez, A. Landon, N. French, J. McCarthy, T. Huntington y P. Camill. "Use of

- radarsat-2 and Alos-PalSAR SAR images for wetland mapping in New Brunswick”, en: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Geosci. Remote Sens. Symp.* 2014, pp. 1226-1229.
- LaRocque, A., B. Leblon y J. Ek. “Detection of potential large Maya settlements in the northern Petén area (State of Campeche, Mexico) using optical and radar remote sensing”, en: *Journal of Archaeological Science: Reports*. Volume 23, 2019, pp. 80-97.
- Liu, D., Y. Shao, Z. Liu, B. Riedel, A. Sowter, W. Niemeier and Z. Bian. “Evaluation of InSAR and TomoSAR for Monitoring Deformations Caused by Mining in a Mountainous Area with High Resolution Satellite-Based SAR”, en: *Remote Sensing*. 6(2), 2014, pp. 1476-1495.
- McNairn, H., C. Champagne, J. Shang, D. A. Holmstrom and G. Reichert. “Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories”, en: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 64(5), 2009, pp. 434-449.
- Mleczo, M. y M. Mróz. “Wetland Mapping Using SAR Data from the Sentinel-1A and TanDEM-X Missions: A Comparative Study in the Biebrza Floodplain (Poland)”, en: *Remote Sens.* 2018, pp. 10, 78.
- Moreira, A. *Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications*. German Aerospace Center (DLR), Microwaves and Radar Institute Germany, 2013.
- Nagler, T., H. Rott, M. Hetzenecker, J. Wuite and P. Potin. “The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations”, en: *Remote Sensing*. 7(7), 2015, pp. 9371-9389.
- Orosei, R. S., E. Lauro, E. Pettinelli, A. Cicchetti, M. Coradini, B. Cosciotti, F. Di Paolo, E. Flamini, E. Mattei, M. Pajola, F. Soldovieri, M. Cartacci, F. Cassenti, A. Frigeri, S. Giuppi, R. Martufi, A. Masdea, G. Mitri, C. Nenna, R. Noschese, M. Restano and R. Seu. “Radar evidence of subglacial liquid water on Mars”, en: *Science*. 361-6401, 2018, pp. 490-493.
- Polychronaki, A. L., Z. Gitas, S. Veraverbeke and A. Debien. “Evaluation of Alos- PalSAR Imagery for Burned Area Mapping in Greece Using Object-Based Classification”, en: *Remote Sensing*. 5(11), 2013, pp. 5680-5701.
- Rao, Y. S., Gopalan Venkataraman and K. S. Rao. “SAR interferometry for DEM generation and movement of Indian glaciers”, en: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International*. IEEE, 2004, pp. 1128-1131.
- Scheuren, J-M, O. de le PolainWaroux y R. Below. *Annual disaster statistical review – the number and trends 2007*. Melin, Belgium, Center for Research of the Epidemiology of Disasters (CRED), Jacoffsaet Printers, 2008.
- Solberg, A., C. Brecke and O. Per. “Oil Spill Detection in Radarsat and Envisat SAR Images”, en: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 45-3, 2007.
- Soria-Ruiz, J., Y. Fernandez-Ordonez, H. McNairn and J. Bugden-Storie. “Corn monitoring and crop yield using optical and RADARSAT-2 images”, en: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2007, DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423638.
- Verhegghen, A. H. Eva, G. Ceccherini, F. Achard, V. Gond, S. Gourlet-Fleury and P. O. Cerutti (2016). The Potential of Sentinel Satellites for Burnt Area Mapping and Monitoring in the Congo Basin Forests. *Remote Sensing*. 8(12), 986.
- Yang, Z., Z. Li, J. Zhu, H. Yi, J. Hu and G. Feng. “Deriving Dynamic Subsidence of Coal Mining Areas Using InSAR and Logistic Model”, en: *Remote Sensing*. 9(2), 2017.
- Zhou, T., P. Jianjun, P. Zhang, S. Wei and T. Han. “Mapping Winter Wheat with Multi-Temporal SAR and Optical Images in an Urban Agricultural Region”, en: *Sensors (Basel)*. 17(6): 1210, 2017, DOI: 10.3390/s17061210.