

DetECCIÓN DE SITIOS MAYAS DESDE EL ESPACIO EXTERIOR UTILIZANDO IMÁGENES DE RADAR

La cultura maya se extendió en una región que comprende el sureste de México y América Central, asentándose en zonas selváticas de difícil acceso y abundante vegetación. Debido a las condiciones climáticas del área maya y a su alto contenido de nubes, la fotografía aérea ha tenido limitaciones en la prospección arqueológica. En este trabajo se propone una metodología para realzar y detectar sitios arqueológicos de la cultura maya mediante el uso de imágenes de radar de alta resolución. El procesamiento de la imagen incluye un proceso *multi-look*, con lo cual se reduce el *speckle* y el *clutter* de la vegetación y refuerza la presencia de sitios arqueológicos en la imagen. Posteriormente, esta imagen se somete a un método de restauración a través de un filtro geométrico que reduce la degradación del ruido *speckle* y se aproxima más a la escena original. Una vez que las imágenes de radar son filtradas, se aplican algoritmos de morfología matemática que garantizan la discriminación de sitios arqueológicos de la imagen.

Uno de los métodos de prospección más utilizados en la localización de sitios arqueológicos ha sido la fotografía aérea, una tecnología que cumple más de cien años de haberse inventado. Durante todo ese periodo se ha hecho muy poco por mejorarla, a excepción del uso de fotografías aéreas de baja escala, lo que implica contratar vuelos especiales a un alto costo por kilómetro cuadrado.

Se puede decir que la fotografía aérea ha tenido una efectividad relativa en la prospección arqueológica por varias razones: *i*) las escalas utilizadas en México son en su mayoría demasiado altas: en ocasiones van desde 1:35 000 hasta 1:80 000, sobre todo en las zonas de selva; *ii*) el número de niveles de gris de una fotografía aérea es limitado: las fotografías aéreas en blanco y negro sólo registran cerca de 22 matices perceptibles de gris en el pancromático (Jensen, 1986); *iii*) existe la limitación de la visión humana para discernir valores tonales continuos en la escala de grises (8 a 16 tonos de grises); *iv*) la fotointerpretación presenta la dificultad de no poder analizar en forma simultánea más de dos fotografías; *v*) la gran mayoría de fotografías aéreas fueron tomadas hace muchos años, por lo que es imposible observar los cambios sufridos en el paisaje; *vi*) nunca se ha puesto a prueba el error estadístico involucrado en la fotointerpretación. El único cambio observado en ésta ha sido el apoyo de la estereoscopia de barra de paralaje, que permite exagerar los rasgos del terreno en 3D. Aún así, vemos que después de todos estos años el procedimiento sigue siendo empleado por un gran número de arqueólogos.

Durante las últimas décadas, la tecnología ha ido cambiando rápidamente. Se ha comenzado a utilizar una clase de información distinta, en particular la

* Centro INAH Tlaxcala. dplopez@prodigy.net.mx

** Departamento de Exploración Geofísica, Instituto de Geofísica-UNAM. efenfi@yahoo.com

constituida por imágenes digitales con resoluciones medias y altas provenientes de plataformas satelitales. Hoy se cuenta con una gran variedad de satélites que producen imágenes de alta resolución. Las plataformas equipadas con estos dispositivos para la toma de imágenes se han dividido en sensores pasivos y sensores activos; ambos poseen ventajas y desventajas para el reconocimiento de rasgos arqueológicos desde el espacio exterior. Las imágenes capturadas por los sensores pasivos son conocidas como imágenes multiespectrales. Entre los satélites más conocidos para la toma de estas imágenes se encuentran el *Landsat 7*, tres de cuyas siete bandas operan en el canal del visible, tres más en el infrarrojo cercano, medio y lejano, respectivamente, y un canal más que opera en el térmico. La resolución de *Landsat* es de 30 m y maneja una banda con una resolución de 15 m en el pancromático. El satélite *Spot* maneja resoluciones de 2.5 hasta 20 m por píxel; el satélite *Ikonos* tiene cuatro bandas, una de las cuales es tomada en tonos de gris con una resolución de un metro, y tres bandas en el visible e infrarrojo de cuatro metros de resolución. Por último, las imágenes tomadas por el satélite *Quickbird* tienen resoluciones de 61 cm en una banda tomada en tonos de gris, y con cuatro canales en el visible e infrarrojo de 2.44 m de resolución.

Las desventajas de los sensores pasivos están en razón de que son dependientes de la luz solar y deben operar durante tiempo claro (sin nubes) en días con niebla atmosférica mínima (bruma). Además, estos sensores están limitados a operar en las regiones del visible e infrarrojo del espectro electromagnético. Las ventajas de utilizar sensores pasivos en arqueología, en lugar de otros métodos convencionales, son: *i*) cubren una enorme cantidad de datos espaciales y espectrales; *ii*) los costos son menores en comparación con las fotografías aéreas, y *iii*) las imágenes captadas por estas plataformas se encuentran en formato digital. Este último punto es importante cuando se trabaja de manera automatizada. El análisis de imágenes multiespectrales en la prospección arqueológica se ha restringido, hasta ahora, al estudio de firmas espectrales y al empleo de técnicas básicas como

compuestos en falso color, cocientes de bandas, de filtros, clasificadores de máxima verosimilitud o técnicas como la descomposición en componentes principales (Pope y Dahlin, 1989; Wagner, 1991; Folan *et al.*, 1995; McClung y Tapia, 1998; Sever, 1998). Se sabe que las imágenes multiespectrales obtenidas por satélite presentan problemas debido a que la dispersión atmosférica y la radiación electromagnética no puede penetrar zonas con alto contenido de nubes o altas precipitaciones pluviales, sobre todo en zonas selváticas —donde pueden tenerse algunos problemas por la presencia de neblina, debido al alto contenido de humedad en el ambiente.

Los sensores activos, de tipo radar de apertura sintética (SAR), trabajan en la región de microondas del espectro electromagnético (EM)). En este caso la radiación es generada por el instrumento y transmitida hacia la superficie terrestre; luego es retrodispersada al sensor, y finalmente la señal es recibida por el instrumento y se le procesa para extraer la información requerida. La porción de las microondas del espectro EM incluye longitudes de onda en el rango que va desde 1 mm a 1 m, aproximadamente. Las microondas son capaces de penetrar la atmósfera bajo cualquier condición a través de niebla, lluvia ligera, nubes y contaminación. Algunos de los satélites más conocidos para la toma de estas imágenes son el JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1), con una resolución de 25 m por píxel y opera con las bandas L, C y X; el satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) fue diseñado para la observación de la tierra, es propiedad de la Agencia Espacial Japonesa y tiene una resolución de 10 m. Los dos satélites de la Agencia Espacial Europea ERS-1 y ERS-2 generan imágenes en la banda C, con una resolución de 30 m el primero y 12 m el segundo. Por último se encuentra Radarsat 1 y Radarsat 2, de la Agencia Espacial Canadiense, que producen imágenes en la banda C con resoluciones de 6 y 3 m por píxel, respectivamente.

Las ventajas de los sensores activos sobre los sensores pasivos se resumen a continuación: *i*) son sistemas independientes de la radiación solar, es decir, las longitudes de onda no son absor-

bidas ni dispersadas por efectos atmosféricos; *ii*) se tiene control sobre la geometría de observación, y *iii*) detectan rugosidad, pendiente e información de la conductividad eléctrica del terreno. Al margen de la longitud de onda, las señales de radar pueden ser transmitidas o recibidas en diferentes modos de polarización. Es decir, la señal puede ser filtrada de manera que sus vibraciones de onda electromagnética sean restringidas a un solo plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La señal, entonces, puede ser transmitida en plano vertical u horizontal o combinaciones de éstos.

Las desventajas de las imágenes de estas plataformas son: *i*) las imágenes de radar son mono-espectrales; *ii*) son afectadas por un fenómeno de degradación conocido como *speckle*, y *iii*) son difíciles de analizar. En arqueología, quienes se han aventurado a utilizar estas imágenes sólo han empleado algunos procesamientos básicos de filtrado y el análisis visual en la interpretación.

Las imágenes de radar pueden revelar rasgos de interés arqueológico no identificados con métodos convencionales. Estas imágenes pueden asistir en la planeación y organización de la investigación de campo y en las excavaciones arqueológicas. También es posible contar con imágenes para realizar análisis del uso actual del suelo y detectar patrones de vegetación, así como ayudar en la selección de áreas de ocupación probable en tiempos prehispánicos. Por otro lado, son útiles para estudiar el desarrollo y los cambios sufridos en el paisaje en relación con sitios arqueológicos. En el apartado siguiente veremos con más detalle algunas aplicaciones en varios casos de integración arqueológica.

Imágenes de radar en la prospección arqueológica

Desde hace varios años se han realizado investigaciones para demostrar que es posible hacer estudios de prospección arqueológica utilizando imágenes de radar (Siemens y Puleston, 1972; McHugh *et al.*, 1988; Anon, 1995; Fowler, 1995; Holcomb, 1998). Entre dichas investigaciones

llaman la atención las relacionadas con el estudio de grandes culturas con sociedades complejas asociadas a arquitectura monumental (templos, caminos, plazas y juego de pelota).

En estudios realizados en la década de los setentas, un grupo de arqueólogos estadounidenses afirmó haber detectado datos relacionados con lo que parecían ser canales de irrigación y sistemas de drenaje antiguos en el Petén guatemalteco. Estas suposiciones fueron basadas en la interpretación de fotografías aéreas convencionales, fotografías operando en el infrarrojo (Siemens y Puleston, 1972; Adams *et al.*, 1981) y en varios trabajos de campo realizados en Yucatán.

En 1977, con ayuda de la National Aeronautics and Space Administration (*NASA*) y el radar aerotransportado del Jet Propulsion Laboratory (*JPL*) que operaba en la banda L, se tomaron fotografías de radar sobre Guatemala y Belice. Posteriormente, otras imágenes fueron obtenidas con el radar SAR/*JPL* (*Synthetic Aperture Radar*) en 1978 y 1980 (Adams, 1980). Con estas fotografías —y un procesamiento a partir del uso de lupas con capacidad de 10 aumentos y sobre una mesa de luz—, se afirmó haber detectado sitios arqueológicos bastante grandes y muy altos, que sobresalían del terreno como puntos brillantes debido a la retrodispersión intensa de la señal del radar (Adams *et al.*, 1981). En aquella investigación se argumentó que el retorno brillante de la señal era el resultado de la geometría favorable de las caras inclinadas de las pirámides y las texturas formadas por los suaves revestimientos de las mismas. Se creyó que una serie de sombras cónicas eran proyectadas en la imagen debido a los montículos hechos por los mayas, a diferencia de lo que se esperaba ver y que era producto de las sombras irregulares provocadas por rasgos naturales del terreno.

Por otro lado, al examinar la zona de los bajos pudieron apreciar algunos patrones que se formaban a manera de retícula y otros con forma curvilínea. Este último hecho confirmaba la existencia de sistemas de canales antiguos previamente identificados en fotografías del visible y del infrarrojo. Esas afirmaciones fueron

cuestionadas por Pope y Dahlin (1989, 1993), quienes concluyeron que las imágenes de SAR eran inadecuadas en la detección de canales de riego (Holcomb, 1998). En el estudio realizado por dichos autores se evaluaron imágenes de Landsat TM, de radar aerotransportado SAR y datos del satélite SEASAT. Como la resolución del SAR en aquella época era de 20 m por píxel, para Pope y Dahlin fue imposible detectar canales de riego, además de que enfrentaron problemas debido al ruido *speckle*, inherente a las imágenes de radar. Sin embargo, Pope y Dahlin concluyeron que la resolución espacial de las imágenes no excluye el reconocimiento de rasgos pequeños (sitios arqueológicos) con retrodispersión alta.

Uno de los dispositivos más eficientes realizados por el JPL fue el SAR, una plataforma espacial de imágenes de radar conocida como SIR-C/X-SAR. Este sistema utilizaba tres longitudes de onda en la región de microondas: banda L (24 cm), banda C (6 cm) y banda X (3 cm). Con tal plataforma los científicos de China utilizaron las imágenes de este radar para localizar y estudiar dos etapas constructivas de la Gran Muralla China (NASA, 1996). Esta conocida muralla corresponde a la dinastía Ming y el remanente localizado de la otra muralla pertenece a la dinastía Sui, que es más antigua y data del año 500 d.C. (<http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/gwall.html>). Con estos hallazgos los arqueólogos lograron encontrar evidencia enterrada durante varias generaciones en el subsuelo chino.

Entre otros sitios estudiados con este radar destaca Angkor, en Camboya. El 30 de septiembre de 1994 se obtuvo una imagen de radar del enorme complejo ceremonial de Angkor, donde pudieron observarse más de 60 templos. La imagen cubría un área de 55 x 85 km² y pudo revelar gran cantidad de datos no descubiertos del asentamiento de Khmer, ocupado entre 900 y 1500 d.C. (<http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/angkor.html>). También existen imágenes de radar de la ciudad perdida de Ubar, en Oman (NASA, 1982), y del Camino de Seda a lo largo del desierto en el noroeste de China (Walter, 1982).

Una de las ventajas de utilizar las imágenes de radar en investigaciones en zonas de selva es que las longitudes de onda larga, como la banda L y la banda P, poseen la capacidad de penetrar el follaje de la vegetación (Holcomb, 1998), lo cual hace que la señal pueda interactuar con los elementos estructurales de los árboles y el suelo; también se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, el radar puede penetrar el hielo y suelos bastante áridos (Hamlin, 1977).

El ruido *speckle* en las imágenes de radar

Todas las imágenes de radar de apertura sintética SAR son afectadas por un ruido llamado *speckle*, que degrada la calidad de las mismas. El ruido *speckle* está presente en todas las imágenes producidas por sistemas que emplean radiación coherente como fuente de iluminación (Pastrana, 1996) y es resultado de un fenómeno físico inherente al proceso de formación de la imagen. Este tipo de ruido multiplicativo (la desviación estándar es proporcional a la media local) aparece sobrepuesto a la imagen como una granularidad aleatoria formada por píxeles de varios brillos (Lira y Frulla, 1998; Lira, 2002; Pastrana, 1996). Teóricamente, el ruido *speckle* para imágenes de un solo *look* obedece a una función de densidad de la distribución de Rayleigh.

Una manera de remover o reducir el *speckle* consiste en crear una imagen de vista múltiple o *multilook*, la cual se realiza al promediar varias imágenes estadísticamente independientes. Los sistemas de radar proporcionan controles separados en la longitud de la resolución espacial de celda en las direcciones del rango y el azimut. El rayo en la dirección del azimut puede ser filtrado en un número de sub-rayos, cada uno de los cuales proporciona un *look* independiente o muestra de la escena iluminada. Aquí se entiende por *looks* cada sub-imagen formada durante el proceso de captura de la escena por el sistema radar. La distribución del ruido dentro de estas imágenes independientes es, a su

vez, independiente de una imagen a otra. Así, la reducción del *speckle* puede lograrse al promediar estas imágenes independientes, y el nivel de reducción se relaciona directamente con el número de *looks*.

Con un creciente número de imágenes promediadas, la distribución de Rayleigh de la imagen se aproxima a una distribución gaussiana, mejorando el cociente de la señal/ruido por un factor igual a n , donde n es el número de *looks* utilizados para generar la imagen resultante. Como consecuencia, la variación del *speckle* se reduce de acuerdo con el número de sub-imágenes estadísticamente independientes utilizadas en el promedio. Este procedimiento de generación de *looks* es lógicamente equivalente a un filtro lineal aplicado para suavizar los datos de la imagen después de la detección (Raney, 1992).

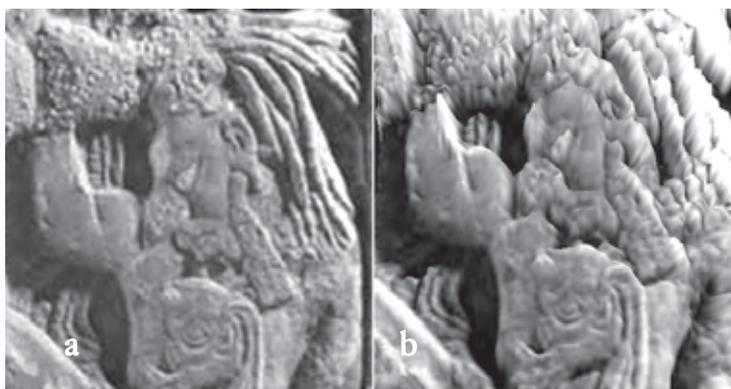
Morfología matemática para imágenes binarias y en tonos de gris

El término morfología originalmente proviene del estudio de las formas, y la morfología matemática se refiere al estudio de la topología o estructura de los objetos (patrones espaciales) a partir de sus imágenes (Lira, 2002). La morfología matemática se basa en el estudio de la estructura de los objetos inmersos en una imagen, de tal forma que en la discriminación de estos objetos las operaciones morfológicas trabajan de una manera que simplifican la estructura subyacente de los mismos.

La descripción básica de la morfología matemática descansa en la teoría de conjuntos. Originalmente, la morfología matemática se desarrolló para operar sobre imágenes binarias, donde las formas podían representarse como conjuntos. Los conjuntos en un espacio euclidiano bi-dimensional denotan las regiones del primer plano, y el complemento de esta

imagen será todo aquello que se encuentre en el segundo plano o fondo; por ejemplo, el conjunto de todos los píxeles negros en una imagen en blanco y negro. Los principios de morfología matemática binaria fueron extendidos de dos a tres dimensiones, lo cual dio origen a la morfología en 3D que trabaja con volúmenes sólidos (Sternberg, 1986). Los filtros morfológicos son adecuados para extraer o suprimir objetos y estructuras en una imagen; éstos pueden diseñarse de acuerdo con un conocimiento *a priori* acerca de la forma y las propiedades geométricas de los objetos contenidos en la imagen.

En morfología matemática 3D, una imagen de niveles de gris es una función definida en un espacio tridimensional: la imagen es vista como un relieve topográfico al asociar a cada píxel una elevación proporcional a su intensidad. Los tonos más oscuros en el fondo de una imagen se interpretan como valles en una superficie compleja definida por sus niveles de gris, mientras los tonos más brillantes se interpretan como cumbres o crestas de la misma superficie. De esta forma, las imágenes de niveles de gris aparecen como mesetas rodeadas de pendientes inclinadas (figs. 1a y 1b). Conjuntamente con esta superficie, se considera un elemento estructural que es un objeto tridimensional de cierta forma y tamaño. El elemento estructural interacciona con la superficie de la imagen y genera otra de diferente morfología. La interacción entre la superficie de la imagen y el elemento estructural se define por diversos ope-



● Fig. 1 a) Imagen digital en tonos de gris. b) La misma imagen vista como relieve topográfico.

radores de la morfología matemática. Así, las formas son dilucidadas por el elemento estructural (que forma una estructura geométrica conveniente) para extraer o remover rasgos como picos, lomas, mesetas, colinas depresiones y cambios profundos. La representación morfológica de una imagen permite aplicar transformaciones de conjuntos a las imágenes de niveles de gris; desde el punto de vista formal, las imágenes de niveles de gris son consideradas como conjuntos.

La forma del elemento estructural se elige en función del conocimiento sobre la geometría de las estructuras relevantes e irrelevantes de la imagen. El elemento estructural es un conjunto que puede verse como una sonda que prueba la imagen estudiada, para determinar formas geométricas (Pastrana, 1996). La forma y el tamaño del elemento estructural deben adaptarse a las propiedades geométricas de los objetos contenidos en la imagen de interés. Existen operaciones con elementos estructurales en forma de conos, cilindros, esferas o paraboloides que son muy útiles para extraer patrones en las imágenes de niveles de gris.

Operadores morfológicos en 3D

Las operaciones básicas de la morfología matemática en 3D para imágenes en niveles de gris son la erosión, la dilatación, la apertura y la cerradura. La idea fundamental bajo estas operaciones es transformar la imagen de niveles de gris en comparaciones locales entre la imagen y las traslaciones del elemento estructural, el cual actúa como un sensor de propiedades geométricas de la función que explora la imagen y realza los rasgos de interés. Las operaciones morfológicas en una imagen de niveles de gris se representan, en general, como la exploración del elemento estructural tridimensional sobre las formas que describen la intensidad o brillantez de la imagen. Las ecuaciones de estos operadores básicos son las siguientes:

1. Erosión de una imagen f por el elemento estructural B :

$$(f \ominus B)(x, y) = \min[f(u, v) - B(u - x, v - y): (x, y, u, v) \in Z^2; (u - x, v - y) \in B] \quad (1)$$

donde (x, y, u, v) son las coordenadas espaciales en la imagen y Z^2 es el espacio discreto bi-dimensional. En la erosión, el objeto reduce su extensión espacial uniformemente.

2. Dilatación de una imagen f por el elemento estructural B

$$(f \oplus B)(x, y) = \max[f(u, v) - B(u - x, v - y): (x, y, u, v) \in Z^2; (u - x, v - y) \in B] \quad (2)$$

donde el elemento estructural B aumenta el objeto uniformemente en su extensión espacial.

3. Apertura de la imagen f por el elemento estructural B

$$(f \circ B)(x, y) = [(f \ominus B) \oplus B](x, y) \quad (3)$$

y es utilizada para suavizar los contornos, realzar valles y eliminar rasgos pequeños de la superficie de la imagen.

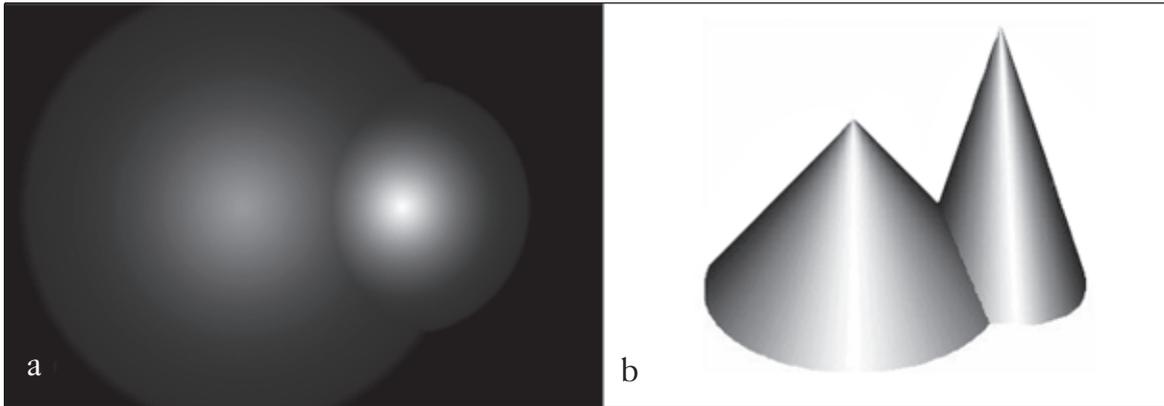
4. Cerradura de una imagen f por el elemento estructural B

$$(f \bullet B)(x, y) = [(f \oplus B) \ominus B](x, y) \quad (4)$$

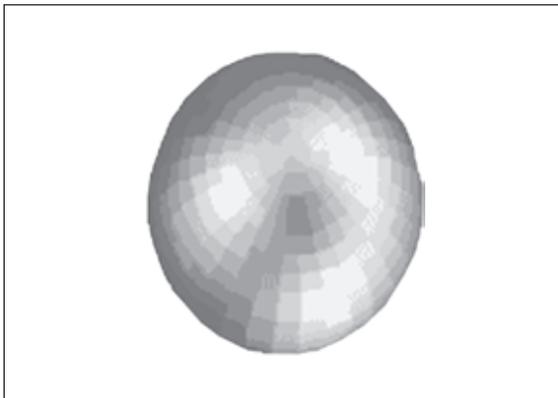
y es utilizada para rellenar huecos en los objetos, suavizar valles y contornos, y para realzar algunos rasgos de la superficie de la imagen.

Los siguientes ejemplos aclaran la manera en que actúan los operadores morfológicos sobre una imagen en escala de gris.¹ En la fig. 2a se pueden observar dos figuras geométricas vistas en planta, y varían en función de la intensidad en tonos de gris de acuerdo con la forma de cada una. En la fig. 2b se muestran las dos figuras en 3D. A partir de un elemento estructural en forma de esfera (fig. 3), y al aplicar una dilatación a la imagen de la fig. 2b se obtiene el resultado que se muestra en la fig. 4a, y viendo esta última imagen se aprecia la figura original debajo de la dilatación. Un procedimiento simi-

¹ Esta imagen fue modificada del original en Lixu-Gu.



● Fig. 2 (a) Vista en planta en dos figuras geométricas de diferente tamaño en tonos de gris. (b) Vista en volumen de las mismas figuras.



● Fig. 3 Elemento estructural en forma de esfera.

lar se aplicó a la misma imagen con las demás operaciones morfológicas, de tal forma que al aplicar una erosión a la fig. 2b se obtiene la fig. 4b, donde se muestra cómo el objeto original fue reducido hasta quedar solamente dos pequeñas figuras geométricas. Por otro lado, la apertura de la imagen por el elemento estructural puede observarse en la fig. 4c, donde fueron removidas las puntas de la figura original. Por último, la operación de la cerradura rellena el hueco entre las dos figuras, dando como resultado lo observado en la fig. 4d.

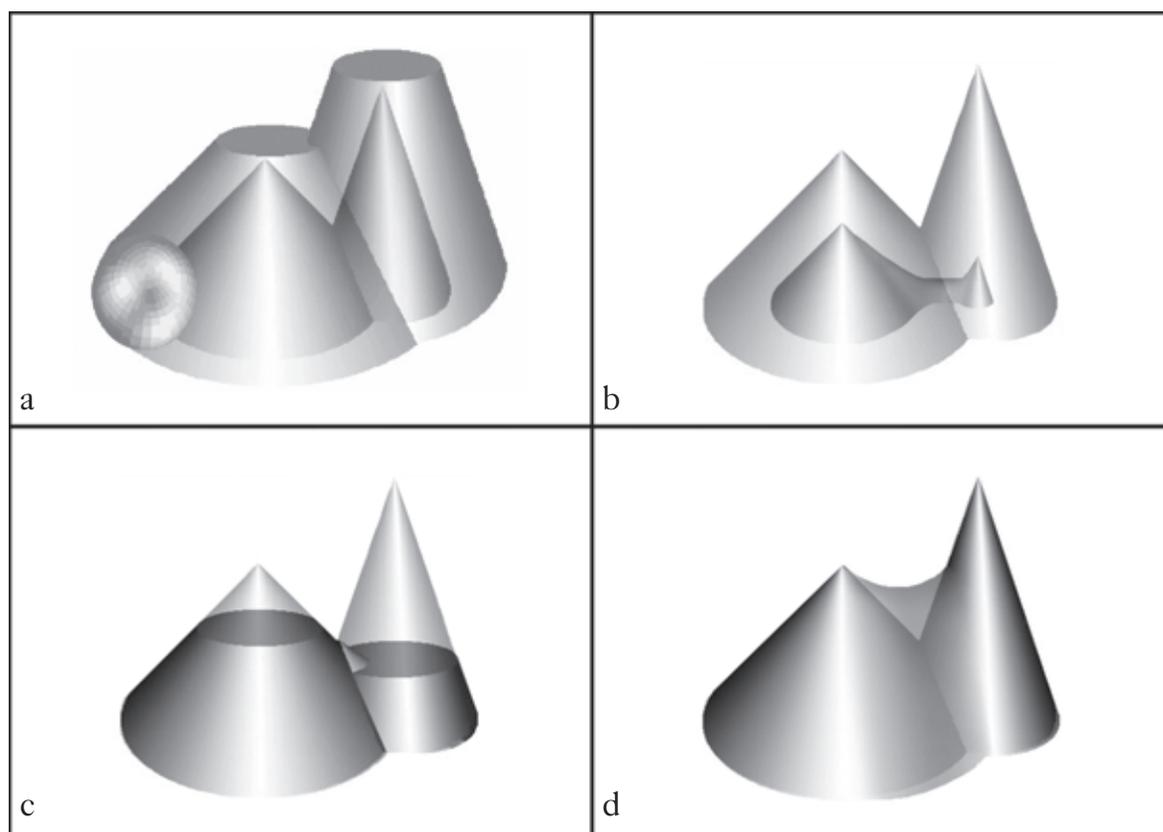
La erosión tiene como efecto reducir la extensión espacial de los objetos de manera uniforme, remueve valores brillantes de las partes altas de las cumbres en la imagen mientras expande los valles. En la dilatación, el objeto crece uniformemente en su extensión espacial, elimina parte de los valles (valores oscuros) y

realza los valores más brillantes. La apertura es resultado de primero erosionar y luego dilatar la imagen, y mientras la cerradura es una dilatación seguida de una erosión, ambas operaciones suavizan bordes y rellenan huecos.

Zona de prospección

Es bien conocida la existencia de numerosos sitios arqueológicos que permanecen ocultos bajo densa vegetación en la Península de Yucatán. Dichos sitios contienen gran número de monumentos, desde grandes pirámides y bases piramidales hasta casas-habitación. En su mayoría, la forma de tales estructuras es rectangular en su base, con una altura que puede llegar hasta 25 o 30 m (Nalda *et al.*, 1997). El estado de conservación de tales sitios es variable.

La zona de prospección elegida para probar las hipótesis de trabajo se encuentra ubicada en Quintana Roo, y corresponde a un cuadrante de selva maya de donde se tiene buena referencia de la existencia de sitios arqueológicos monumentales, registrados por el proyecto Sur de Quintana Roo (Nalda *et al.*, 1997). La región ha sido explorada durante varios años, utilizando fotografía aérea y recorridos de superficie; por medio de estas técnicas el proyecto Sur de Quintana Roo ha intentado definir el patrón de asentamientos de la región. Bajo este esquema de investigación pudieron registrar sitios arqueoló-



● Fig. 4 Resultado de la a) dilatación, b) erosión, c) apertura y d) cerradura de las formas geométricas vistas en la figura 2.

gicos del periodo Clásico temprano y Clásico terminal que cuentan con gran variedad de templos, plataformas, plazas, juegos de pelota y sistemas de cultivo; entre dichos sitios destacan Dzibanché, el Conjunto Central (Lamay), Tutil, Kinich-ná y Kohunlich.

Análisis de las imágenes de radar

Tres imágenes de radar de la misma escena fueron obtenidas con la agencia especial del sistema Radarsat.² Estas imágenes cubren el área de estudio en Quintana Roo, México (fig. 5). Las coordenadas geográficas del cuadrángulo de la imagen, desde la esquina noroeste y en direc-

ción de las manecillas del reloj: [18° 49' 35.95" N, 88° 51' 42.39" W], [18° 44' 55.75" N, 88° 26' 51.58" W], [18° 14' 35.52" N, 88° 33' 12.18" W], [18° 19' 16.51" N, 88° 57' 58.36" W]. Las fechas de adquisición y características generales de imágenes de radar se indican en la fig. 6.

De las tres imágenes se obtuvo un promedio (procesamiento *multilook* descrito anteriormente). Las imágenes utilizadas en este promedio fueron obtenidas en fechas diferentes, pero corresponden a la misma escena. Anterior a la obtención del promedio aritmético, las imágenes fueron co-registradas mediante una transformación polinomial de primer orden (Richards *et al.*, 1999); es importante identificar puntos de control comunes en las tres imágenes para co-registrarlas. La adquisición de las imágenes en distintas fechas produce una variación en la presencia de la cubierta vegetal; además, el *speckle* resulta estadísticamente no correlacionado entre las imágenes, y de hecho el *clutter* de la vege-

² Esta investigación pudo llevarse a cabo gracias al apoyo de la propuesta financiera de Radarsat 30605, y del proyecto DGAPA-IN102302 de la Universidad Nacional Autónoma de México.

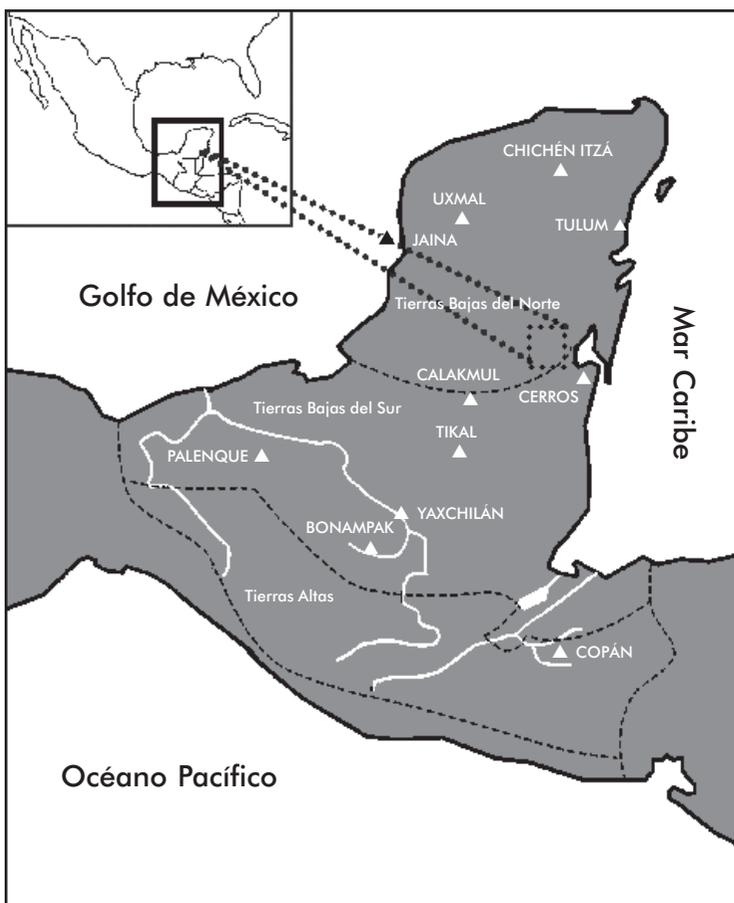


Fig. 5 Ubicación del área de estudio en la región oriental de la Península de Yucatán.

Parámetros	Valores
Plataforma satelital	RADARSAT
Tipo de rayo	Fine 1
Tamaño de la imagen	9126 líneas x 7121 píxeles
Cuantización	16 bits por píxel
Proyección geográfica	UTM, modelo elipsoidal
Orientación de la escena	11.17° con respecto al norte
Tamaño del píxel	6.25 x 6.25 m ²
Fechas de adquisición	4/19, 2003; 11/21/2003; 12/15, 2003
Modo de adquisición	Amplitud
Esquema de polaridad	HH
Numero de looks	1
Orbita	38915 descendiente
Escena ID	C0025021

Fig. 6 Características generales de las imágenes de radar.

tación y el *speckle* son de naturaleza aleatoria (Frery *et al.*, 1997).

El promedio de las imágenes tiende a reducir la presencia del *speckle* y, por otro lado, reafirma y realza los objetos constantes, como son los caminos, ciudades y sitios arqueológicos. Después de promediar y co-registrar las imágenes, se seleccionaron cuatro sub-regiones, por lo que se hicieron los cuatro recortes correspondientes. Las coordenadas geográficas de estas cuatro sub-imágenes pueden verse en la fig. 7. Nuestro análisis se concentró en estas sub-imágenes como se explica más adelante.

El procedimiento de análisis de la imagen puede ser resumido como sigue: *i*) co-registro de las imágenes de radar; *ii*) promedio aritmético de tres imágenes de radar de la misma escena; *iii*) reducción del ruido *speckle* y el *clutter* por medio del filtro geométrico; *iv*) aplicación de transformaciones morfológicas en 3D para realzar los sitios arqueológicos, y *v*) aplicación del operador de Kirsch para mayor realce de los sitios arqueológicos.

Las operaciones señaladas en los puntos *i*), *ii*) y *v*) pueden hacerse en cualquier programa de procesamiento de imágenes: PCI-Geomática, ENVI, Erdas o Idrisi. Mas para llevar a cabo las operaciones *iii*) y *iv*) se tuvieron que programar los algoritmos correspondientes, tanto para el filtro geométrico como para las operaciones morfológicas, en un lenguaje de última generación conocido como Delphi 6; en dicho programa se diseñaron las interfaces de usuario, que operan bajo ambiente Windows y cuyo lenguaje subyacente es Object Pascal.

Área	Coordenadas geográficas	Tamaño de la imagen
1	[18° 39' 15" N; 88° 48' 54" W]; [18° 39' 22" N; 88° 46' 40" W] [18° 36' 40" N; 88° 46' 07" W]; [18° 37' 08" N; 88° 48' 53" W]	804 píxeles 738 líneas
2	[18° 26' 10" N; 88° 48' 73" W]; [18° 25' 75" N; 88° 46' 70" W] [18° 24' 59" N; 88° 49' 00" W]; [18° 24' 24" N; 88° 46' 80" W]	501 píxeles 540 líneas
3	[18° 32' 06" N; 88° 50' 06" W]; [18° 32' 13" N; 88° 48' 35" W] [18° 30' 17" N; 88° 48' 18" W]; [18° 30' 18" N; 88° 50' 01" W]	561 píxeles 522 líneas
4	[18° 25' 20" N; 88° 46' 40" W]; [18° 25' 22" N; 88° 44' 45" W] [18° 23' 35" N; 88° 44' 40" W]; [18° 23' 37" N; 88° 46' 31" W]	666 píxeles 498 líneas

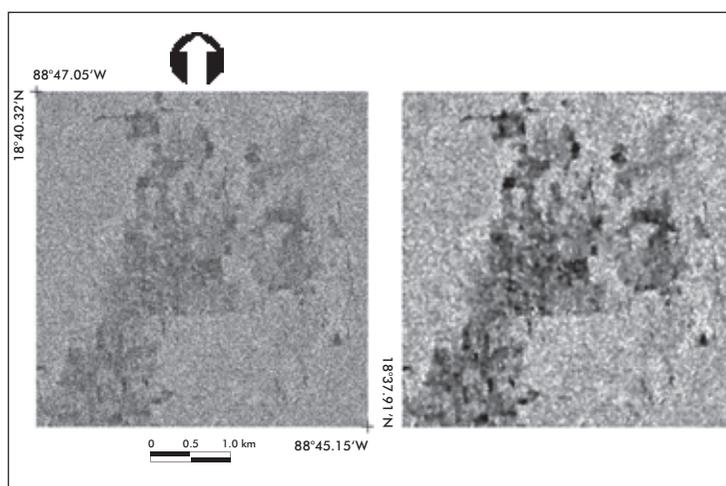
● Fig. 7 Coordenadas geográficas, en dirección de las manecillas del reloj y a partir de la esquina superior izquierda, de las zonas en que se llevó a cabo la investigación.

Reducción del *speckle*

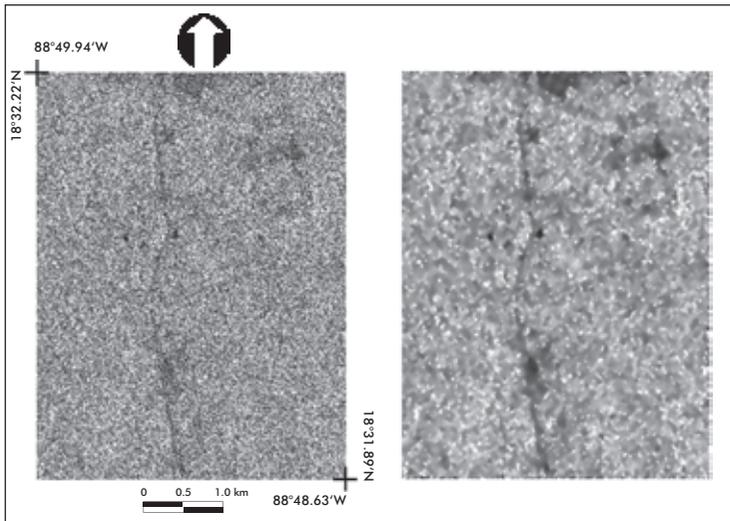
Para reducir el *speckle* se aplicó una serie de pruebas —con varios filtros publicados en la literatura— sobre la imagen de radar, entre ellos los siguientes: filtro de la mediana, de Lee, de Frost, Kuan, gamma y geométrico. Para decidir cuál filtro reduce mejor el *speckle* se consideraron los siguientes parámetros: mejoramiento del cociente señal/ruido, preservación del contraste y brillantez de la imagen, preservación de bordes, preservación sobre detalles de textura, diferencia de la imagen original con la imagen filtrada, y cálculo equivalente del número de *looks*. Una evaluación completa de estos parámetros permitió concluir que el filtro que produce la mejor reducción del ruido *speckle* y conserva los detalles de la imagen es el filtro geométrico (figs. 8 a 11). Los métodos de evaluación y operación acerca de todos estos filtros han sido expuestos en trabajos anteriores (Escalante-Ramírez *et al.*, 1996).

Una vez filtrada la imagen, se hizo el procesamiento morfológico para discriminar los sitios arqueológicos. Los modelos de elemento estructural utilizados en estas operaciones morfológicas fueron formas geométricas de tamaño variable, como el paraboloide, el cubo, una semi-esfera, un cono,

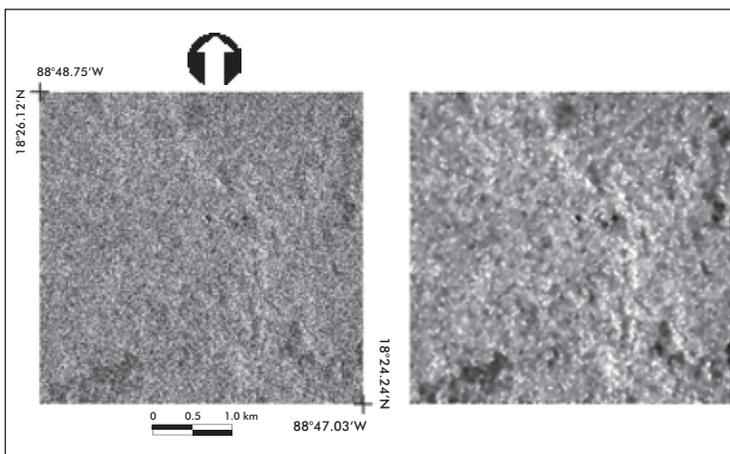
un cilindro y una gaussiana (fig. 12), tomando en cuenta las formas que presentan las pirámides tanto restauradas como sin reconstruir (fig. 13). El tamaño de los elementos estructurales fue de 5 ´ 5 a 15 ´ 15 píxeles en la dirección X-Y, y las cuatro operaciones definidas arriba se aplicaron con dichos elementos estructurales. Los mejores resultados se obtuvieron con la dilatación, al usar un cono como elemento estructural; para un mejor realce de los asentamientos arqueológicos se aplicó el operador de Kirsch (Pratt, 2001). Las imágenes resultantes del procesamiento muestran un conjunto de rasgos circulares y rectangulares. A partir de sitios arqueológicos de coordenadas geográficas conocidas y publicadas en la literatura (Nalda *et al.*,



● Fig. 8 Resultado de la remoción del *speckle* aplicando el filtro geométrico en las cuatro subáreas.



● Fig. 9 Resultado de la remoción del *speckle* aplicando el filtro geométrico en las cuatro subáreas.



● Fig. 10 Resultado de la remoción del *speckle* aplicando el filtro geométrico en las cuatro subáreas.

1997) se pudo inferir que éstos aparecen como rasgos rectangulares, mientras el *clutter* y el *speckle* aparecen como objetos redondos (figs. 14 a 17). Estas inferencias establecen el fundamento para el trabajo de campo descrito a continuación.

Trabajo de campo

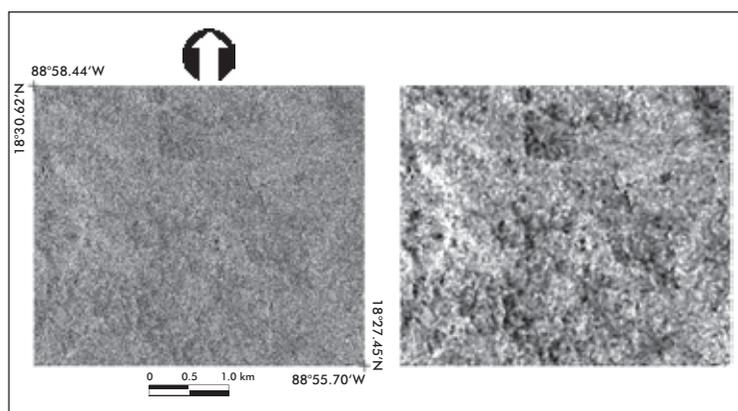
Con los resultados obtenidos mediante el procesamiento digital de la imagen, se planeó la estrategia del trabajo de campo para verificar y comprobar los datos en las cuatro sub-áreas es-

cogidas para el estudio (ver la fig. 7). En esta etapa de la investigación se realizaron las actividades siguientes: *i*) la imagen procesada era desplegada en una computadora portátil; *ii*) sobre estas imágenes se determinaron las coordenadas geográficas de varios rasgos de forma rectangular; *iii*) las coordenadas eran verificadas en el campo con ayuda de un GPS; *iv*) se tomaron notas y fotografías de los sitios correspondientes a estas coordenadas. Las coordenadas geográficas de los sitios visitados, junto con una breve descripción de los mismos, pueden verse en la fig. 18.

La densidad de vegetación en el área de estudio impuso que las condiciones del trabajo de verificación resultaran difíciles, y por ello solamente un pequeño número de sitios pudieron ser visitados cada día. Por otro lado, un sitio visitado en ocasiones se componía de varias estructuras arrasadas por la maquinaria pesada que los campesinos utilizan para habilitar el terreno para cultivos. La verificación se llevó a cabo en un total de 22 marcas.

Resultados

Las figs. 14, 15, 16 y 17 muestran los resultados del procesamiento digital. Todos los objetos rectangulares importantes presentes en estas imágenes fueron numerados del 1 al 22, y representaban los sitios arqueológicos seleccionados para su verificación. Las marcas de la lista fueron visitadas y sus descripciones se reportan en la fig. 18. De esta información se concluye que la mayoría de sitios registrados corresponden a sitios con evidencia real de estructuras arqueológicas, y también permite apreciar tres tipos principales de asentamientos: *i*)



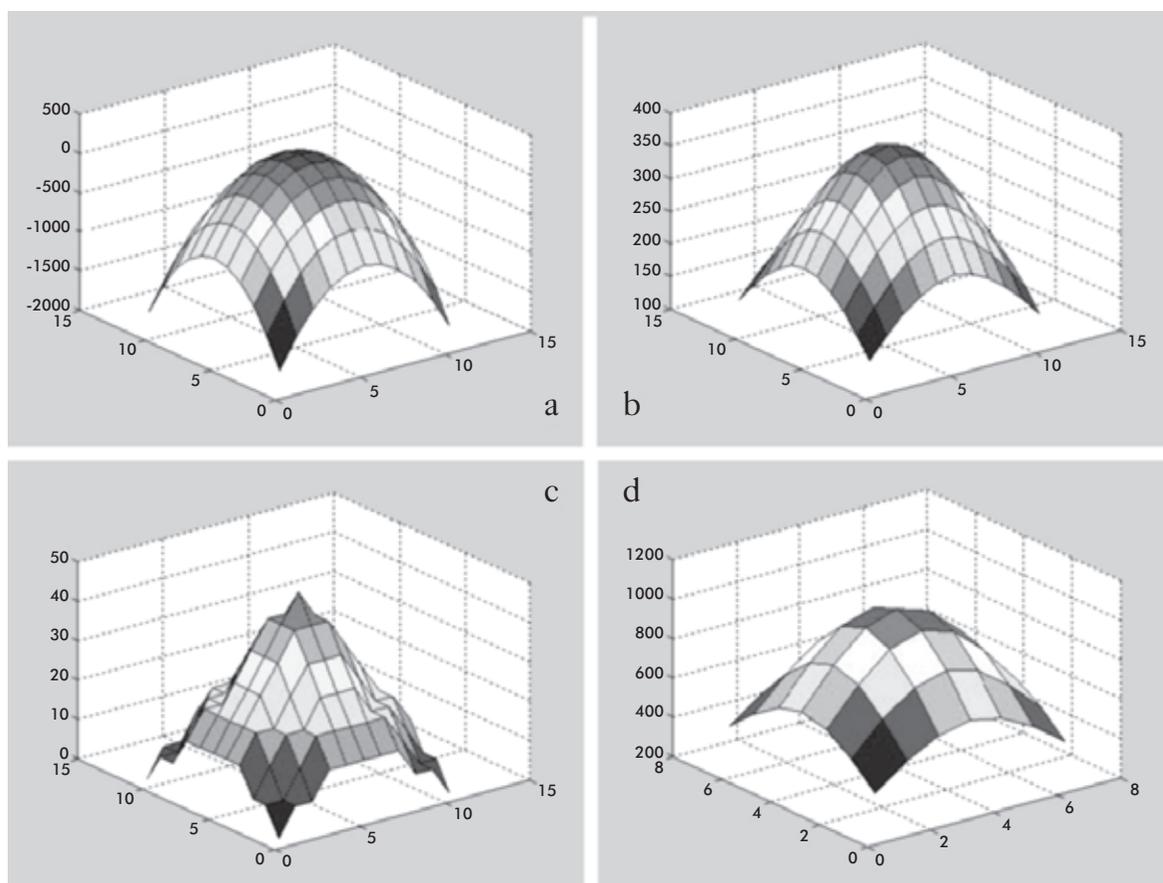
● Fig. 11 Resultado de la remoción del *speckle* aplicando el filtro geométrico en las cuatro subáreas.

los sitios arqueológicos de primer orden, como Tutil 1 (marca 11), Tutil 2 (marca 12), Complejo Central (marca 13), Dzibanche (marca 14), Kinich-na (marca 15), Pol Box (marca 16) y Kohun-

lich (marca 19); *ii*) los sitios arqueológicos de segundo orden, numerados con las marcas 5, 6, 9, 20, 21 y 22, y *iii*) los sitios arqueológicos de tercer orden, numerados con las marcas 1, 2, 3, 4, 7 y 18.

Cabe recordar que los sitios de primer orden corresponden a sitios grandes, con estructuras monumentales; los de segundo orden se relacionan con lugares importantes, pero de menor tamaño y estructuras no tan altas. Los sitios de tercer orden se refieren a asentamientos comunes, con estructuras de tipo casa-habitación (Nalda, 1995-1996).

Los sitios arqueológicos de primer orden se encuentran actualmente en etapas de estudio y consolidación; los de segundo y ter-



● Fig. 12 Ejemplos de elementos estructurales utilizados en las operaciones morfológicas: a) un paraboloides, b) una gaussiana, c) un cono y d) una semi-esfera.



● Fig. 13 Ejemplos de las formas de algunas estructuras encontradas en la zona de estudio.

cer orden presentan diferentes grados de degradación, y en su mayoría son montículos arrasados por las prácticas agrícolas actuales. Las marcas 8, 10 y 17 corresponden a construcciones modernas con techos de lámina y son consideradas falsas alarmas dentro del análisis de la imagen, ya que por su fuerte respuesta hacia la señal del radar no pueden discriminarse de los sitios arqueológicos.

Los resultados presentados en las figs. 14 a 17 confirman la hipótesis de que los objetos rectangulares corresponden en su mayoría a sitios arqueológicos, mientras los objetos circulares representan otro tipo de objetos de la escena. Según la fig. 18, la proporción de éxitos es de casi 86 por ciento. Los campos cubiertos de piedra con una cierta rugosidad de la textura de su superficie producen una respuesta similar a la de los sitios arqueológicos. Construcciones modernas con techos de lámina generan una fuerte retrodispersión de la señal, y se traduce en una confusión con los sitios arqueológicos. Otros asentamientos modernos, como las ciudades, poblados y ranchos, producen una confusión similar. Dado que la ubicación de la mayoría de poblados modernos es bien conocida, pueden ser discriminados *a priori* de los sitios arqueológicos.

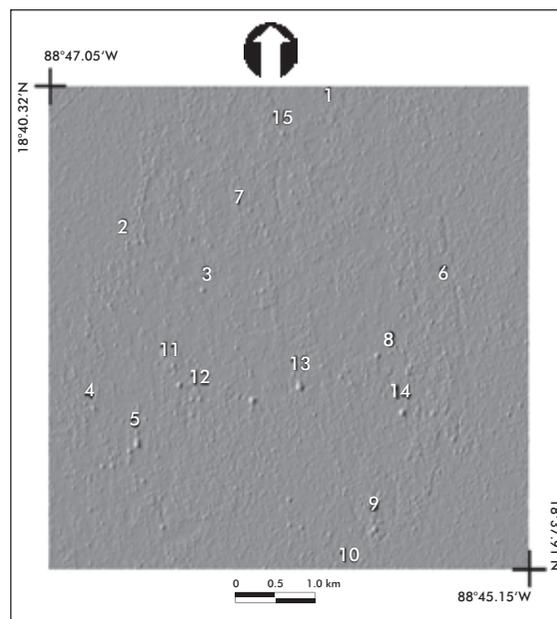
Conclusiones

Se propone un nuevo método de prospección arqueológica para la detección de sitios arqueológicos en zonas con topografía

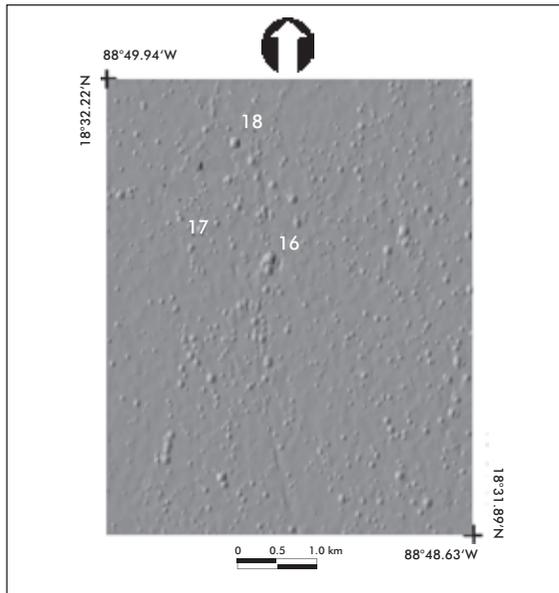
uniforme, que presenten elevada densidad de cobertura vegetal y alto contenido de nubes. El método se basa en el análisis de imágenes de radar por medio de un conjunto de transformaciones morfológicas. Las imágenes de radar son independientes de las condiciones atmosféricas, por ello pueden ser utilizadas en zonas de selva con abundante vegetación y gran cantidad de nubes. El uso de morfología matemática con las imágenes de radar para la prospección

arqueológica es una nueva herramienta que parece tener gran potencial en la investigación, de acuerdo con los resultados presentados en este trabajo.

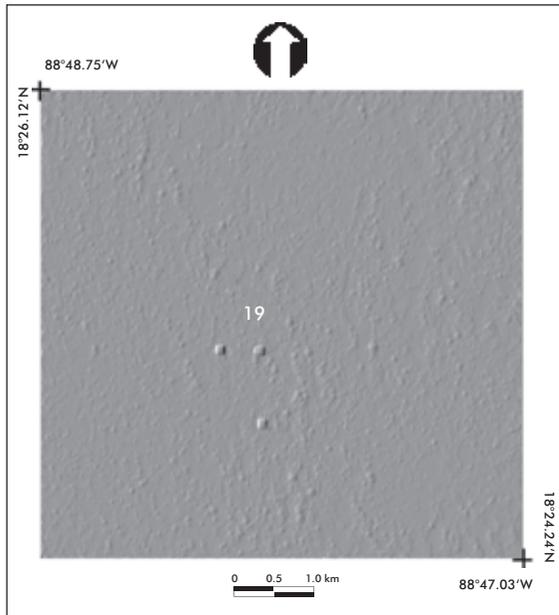
En este método se pueden identificar tres etapas principales. Primero, el promedio aritmético de las tres imágenes de radar. En determinada escena de un paisaje como el de la Península de Yucatán, los sitios arqueológicos permanecen sin cambio durante largos periodos, en tanto otros rasgos de la escena, como la



● Fig. 14 Ubicación de los sitios visitados en la etapa de verificación. Los números de identificación corresponden a las descripciones de la fig. 18.

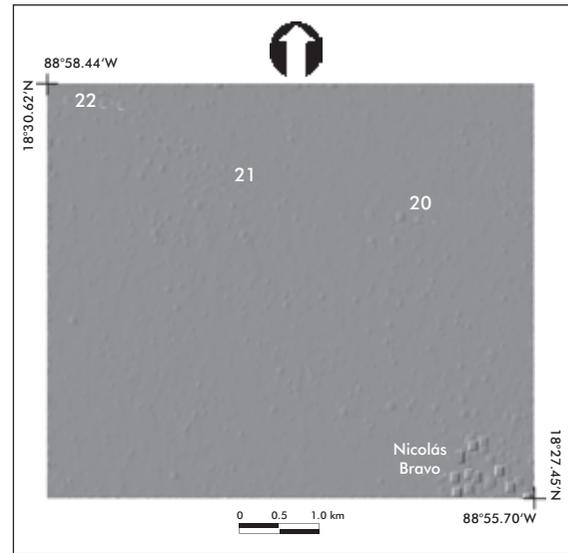


● Fig. 15 Ubicación de los sitios visitados en la etapa de verificación. Los números de identificación corresponden a las descripciones de la fig. 18.



● Fig. 16 Ubicación de los sitios visitados en la etapa de verificación. Los números de identificación corresponden a las descripciones de la fig. 18.

cubierta vegetal y asentamientos modernos, experimentan cambios. Por tanto, el promedio de varias imágenes de la misma escena obtenidas en fechas diferentes tiende a reducir el ruido *speckle* y el *clutter* de la vegetación, mientras se



● Fig. 17 Ubicación de los sitios visitados en la etapa de verificación. Los números de identificación corresponden a las descripciones de la fig. 18.

refuerzan los rasgos arqueológicos. Segundo, un filtro morfológico adecuado —conocido como el filtro geométrico— reduce la presencia del ruido *speckle* y del *clutter* preservando los rasgos asociados a los sitios arqueológicos. Y tercero, una transformación morfológica para realzar los rasgos de la imagen asociados a sitios arqueológicos, lo cual realza dichos rasgos en mayor proporción que los remanentes del ruido *speckle* y el *clutter*. La aplicación final del operador de Kirsch introduce una apariencia de iluminación en la imagen, y posteriormente realza los sitios arqueológicos.

A través del trabajo de campo se confirma la presencia de sitios arqueológicos detectados por este método y la proporción de éxitos es relativamente alta, si bien prevalece cierta confusión debida a los asentamientos modernos y algunos rasgos particulares de la escena, que presentan una textura y pendiente similar a la de un sitio arqueológico. Con el uso del radar polarimétrico (que puede enviar la señal en diferentes polaridades al mismo tiempo) e imágenes de mayor resolución, esta confusión disminuye en una gran proporción. La aplicación de este tipo de estudios puede construir un puente entre disciplinas aparentemente desconectadas, pero juntas pueden proporcionar

<i>Sitio</i>	<i>Coordenadas</i>	<i>Descripción</i>
1	18° 39.88' N 88° 45.84' W	Campo pedregoso con tres pequeñas elevaciones.
2	18° 39.52' N 88° 46.90' W	Campo pedregoso con tres pequeñas montículos arqueológicos degradados.
3	18° 39.36' N 88° 46.31' W	Pequeño montículo arqueológico erosionado y cubierto de vegetación.
4	18° 38.51' N 88° 47.41' W	Montículo arqueológico grande, algunas partes están degradadas.
5	18° 38.45' N 88° 46.90' W	Conjunto de montículos arqueológicos de entre 8 y 10 m de alto.
6	18° 38.40' N 88° 46.90' W	Conjunto de montículos arqueológicos de entre 5 y 7 metros de alto.
7	18° 39.16' N 88° 46.55' W	Pequeño montículo arqueológico erosionado y cubierto de vegetación.
8	18° 38.34' N 88° 45.26' W	Campo pedregoso con preparación para cultivo.
9	18° 37.73' N 88° 45.67' W	Sitio conocido como El Rancho, con montículos de 12 m de alto.
10	18° 37.75' N 88° 45.81' W	Casa moderna con techo de lámina.
11	18° 38.70' N 88° 46.80' W	Montículos arqueológicos conocidos como Tutil 1, de 15 m de alto.
12	18° 38.61' N 88° 46.74' W	Montículos arqueológicos conocidos como Tutil 2, de 15 m de alto.
13	18° 38.59' N 88° 46.10' W	Gran complejo arqueológico conocido como Complejo Central.
14	18° 38.32' N 88° 45.53' W	Sitio conocido como Templo I de Dzibanché.
15	18° 39.80' N 88° 46.11' W	Sitio conocido como Acrópolis de Kinich-ná de 20 m de alto.
16	18° 32.70' N 88° 49.33' W	Área conocida como Pol Box, compuesta de varios montículos arqueológicos cubiertos por vegetación.
17	18° 32.78' N 88° 49.68' W	Causa desconocida de una repuesta brillante en el radar.
18	18° 33.30' N 88° 49.75' W	Dos montículos arqueológicos degradados de 4 m de alto.
19	18° 25.17' N 88° 47.35' W	Sitio arqueológico conocido como Kohunlich.
20	18° 28.33' N 88° 56.15' W	Varios montículos arqueológicos de 12 m de alto.
21	18° 29.06' N 88° 55.48' W	Varios montículos arqueológicos de 12 m de alto.
22	18° 29.58' N 88° 58.23' W	Varios montículos arqueológicos de 10-12 m de alto.

● Fig. 18 Coordenadas geográficas y descripción de los sitios donde se realizó la verificación de campo.

información que de otra forma sería muy difícil obtener. La localización e identificación de sitios arqueológicos de diferente orden por medio de técnicas espaciales pueden aumentar nuestro conocimiento acerca de los patrones de asentamiento que prevalecían en diferentes etapas de la época prehispánica.

Bibliografía

- Adams, R. E. W.
1980. "Swamps, Canals and the Location of the Ancient Maya Cities", en *Antiquity*, núm. 54, pp. 206-214.
- Adams, R.E.W.; W. Brown y P. Culbert
1981. "Radar Mapping, Archaeology and Ancient Maya Land Use", en *Science*, vol. 213, núm. 4515, pp. 1457-1463.
- (s.a.)
1995. "Angkor by Satellite", en *Athena Review*, vol. 1, núm. 1, pp. 12-13.
- Dougherty, E.R.
1992. *An Introduction to Morphological Image Processing*, Bellingham, SPIE Press.
- Escalante, B.; J. Bernard y H. de Ridder
1995. "Multidimensional Characterization of the Quality of Noise-Reduced Computed Tomography Images", en *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 6, núm. 4, pp. 317-334.
- Folan, W. J.; J. Marcus y F.M. Millar
1995. "Verification of a Maya Settlement Model y Through Remote Sensing", en *Cambridge Archaeological Journal*, vol. 5, núm. 2, pp. 277-301.
- Fowler, M. J. F.
1995. "Detection of Archaeological Features on Multispectral Satellite Imagery", en *AARGnews*, núm. 10, pp. 7-14.
- Frery C.; H. J. Muller, C. D. F. Yanasse y S. J. S. SantAnna
1997. "A Model for Extremely Heterogeneous Clutter", en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 648-659.
- Hamlin, C. L.
1977. "Machine Processing of Landsat Data, an Introduction for Anthropologists and Archaeologists", en *MASCA Newsletter*, vol. 13, núm. 1-2, pp. 1-11.
- Holcomb, D.W.
1998. "Application of Imaging Radar to Archaeological Research, Principles y Applications of Imaging Radar", en F.M. Henderson y A.J. Lewis (eds.), *Manual of Remote Sensing*, Nueva York, John Wiley and Sons, vol.2, pp. 769-777.
- 2001. "Imaging Radar and Archaeological Survey: An Example from the Gobi Desert of Southern Mongolia", en *Journal of Field Archaeology*, vol. 28, núm. 1-2, pp. 131-141.
- Jensen, J. R.
1986. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, New Jersey, Prentice Hall.
- Lira, J.
2002. *Introducción al tratamiento digital de imágenes*, México, IPN/UNAM/FCE.
- Lira, J. y L. Frulla
1998. "An Automated Region Growing Algorithm for Segmentation of Texture Regions in SAR Images", en *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, pp. 3595-3606.
- McClung, E.
1998. "Informe técnico del proyecto 'Cambios paleoambientales y sus efectos sociales en Teotihuacan: 1995-1996'", Conacyt 5412-59411, mecanoescrito.
- McHugh, W.P. *et al.*
1988. "Paleorivers and Geoarchaeology in the Southern Egyptian Sahara", en *Geoarchaeology: An International Journal*, vol. 3, núm. 1, pp. 1-40.
- Nalda, E.; A. Velazquez, S. Balanzario y A. Maciel
1997. "Proyecto arqueológico Sur de Quintana Roo, 1993-1994, Kohunlich", en *Reporte Técnico*, vol. I-A, México, INAH.
- Pastrana, R.
1996. "Restauración de imágenes digitales: eliminación de ruido por medio de un filtro

geométrico”, tesis de licenciatura, Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

- Pope, K. O. y B. Dahlin
1989. “Ancient Maya Wetland Agriculture: New Insights Form Ecological and Remote Sensing Research”, en *Journal of Field Archaeology*, vol. 16, pp. 87-106.
- 1993. “Radar Detection and Ecology of Ancient Maya Canal Systems-Reply to Adams *et al.*”, en *Journal of Field Archaeology*, vol. 20, pp. 379-383.
- Pratt, W. K.
2001. *Digital Image Processing*, Nueva York, John Wiley and Sons.
- Raney, R.K.
1992. *Course Notes. Unpublished Notes*, Ottawa, Canada Center for Remote Sensing.
- Richards, J.A. y X. Jia
1999. *Remote Sensing. Digital Image Analysis, an Introduction*, Berlín, Springer-Verlag.
- Sever, T.
1998. “Validating Prehistoric and Current Social Fenomena upon the Landscape of the Peten Guatemala”, en D. Liverman, *et al.* (eds.), *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science*, Washington, D.C., National Academic Press.
- Siemens, A. H. y D. E. Puleston
1972. “Ridged Fields and Associated Features in Southern Campeche: New Pespectives on the Lowland Maya”, en *American Antiquity*, vol. 37, pp. 228-239.
- Sternberg, S.R.
1986. “Grayscale Morphology”, en *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 2, pp. 377-393.
- Wagner, D.
1991. “Analysis of Prehistoric Roadways in Chaco Canyon Using Remotely Sensed Digital Data”, en Charles Trombols (ed.), *Ancient Road Networks and Settlement Hierarchies in the New World*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Walter, A. S.
1982. “Deserts of China”, en *American Scientist*, vol. 70, pp. 366-376.

Páginas electrónicas

Alos
http://directory.eoportal.org/pres_ALOSAdvancedLAndObservingSatelliteDaichi.html
 ERS-1 y ERS-2
<http://earth.esa.int/ers/>
 JERS-1
<http://www.eorc.nasda.go.jp/jers-1>
 Lixu-GU
<http://www.imaging.robarts.ca/~gu/Seminars/amip-8.pdf>
 Radarsat
<http://www.space.gc.ca/asc/eng/default.asp>
<http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/angkor.html>

