

Arqueología desde el espacio

por Manuel Castillo Fraile
Unitat de Teledetecció i Procés d'Imatge
del Institut Cartogràfic de Catalunya

Desde sus inicios, la fotografía aérea ha sido ampliamente utilizada como herramienta auxiliar del reconocimiento arqueológico. Actualmente, las modernas técnicas de observación de la Tierra desde el espacio permiten realizar reconocimientos regionales a una escala que no es posible desde el terreno ni desde avión, reduciendo así el lento y costoso reconocimiento convencional. Esto es particularmente valioso en zonas remotas donde el acceso está seriamente limitado. Al mismo tiempo, estas técnicas permiten evaluar factores relacionados con el trabajo intensivo sobre el terreno: acceso, material excavable, presencia de agua, etcétera.



SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center/CIRES

Imagen óptica del sur de la península Ibérica, norte de África e Islas Canarias. Una tormenta de arena se extiende entre el continente y el archipiélago.

espacio

Uno de los instrumentos que más ha revolucionado la observación de la Tierra desde el espacio es el radar de apertura sintética (SAR: *Synthetic Aperture Radar*). Básicamente, consta de un sistema de emisión y recepción de radar conectado a una antena a través de la cual se emiten pulsos de microondas y se recibe su reflejo. La intensidad de la señal reflejada permite construir imágenes del terreno muy útiles para diferentes propósitos. En general, cuanto mayor es la antena, mayor información se obtiene de los objetos visualizados. A más información, mayor resolución de la imagen. Sin embargo, para obtener una resolución de orden métrico se requeriría una antena de unos cien metros. Como, desde el punto de vista tecnológico, es prohibitivo colocar en el espacio antenas de radar tan grandes -el tamaño típico es de una decena de metros-, una forma de obtener una buena resolución consiste en simular una gran antena utilizando el movimiento de la plataforma espacial y avanzadas técnicas de procesado de la señal. Dado que una antena SAR transmite pulsos de radar muy rápidamente -de hecho es capaz de emitir cientos de pulsos mientras la plataforma vuela sobre una determinada zona- se obtienen muchas respuestas de una misma región. A continuación, con un proceso intensivo de todas las señales reflejadas, se consigue una imagen similar a la que se obtendría con una gran antena estacionaria. En este caso, la apertura sintética (el tamaño de la antena virtual) es la distancia recorrida por la plataforma espacial mientras la antena recoge información sobre una misma zona del terreno.

La intensidad de la señal reflejada depende de diferentes factores ligados a las características del terreno observado: material, rugosidad, relieve, etcétera. Esto no es muy diferente a otras imágenes de observación de la Tierra. Lo que hace que las imágenes obtenidas con el

SAR sean especialmente útiles en todos sus campos de aplicación, es la capacidad de éste para operar independientemente de las condiciones de iluminación solar y meteorológicas. Se puede hacer una analogía con la fotografía. En condiciones de oscuridad es necesario utilizar un flash. Este envía luz que se refleja sobre los objetos que deben ser impresionados sobre la película. Así, tanto el SAR como la cámara fotográfica, no dependen de la iluminación solar porque incorporan su propia fuente de iluminación para poder captar la imagen. El otro aspecto importante es que la atmósfera es prácticamente transparente a la longitud de onda utilizada por el radar. En el rango de las microondas, la señal no se ve influenciada por el vapor de agua de la atmósfera y por lo tanto puede atravesar las nubes.

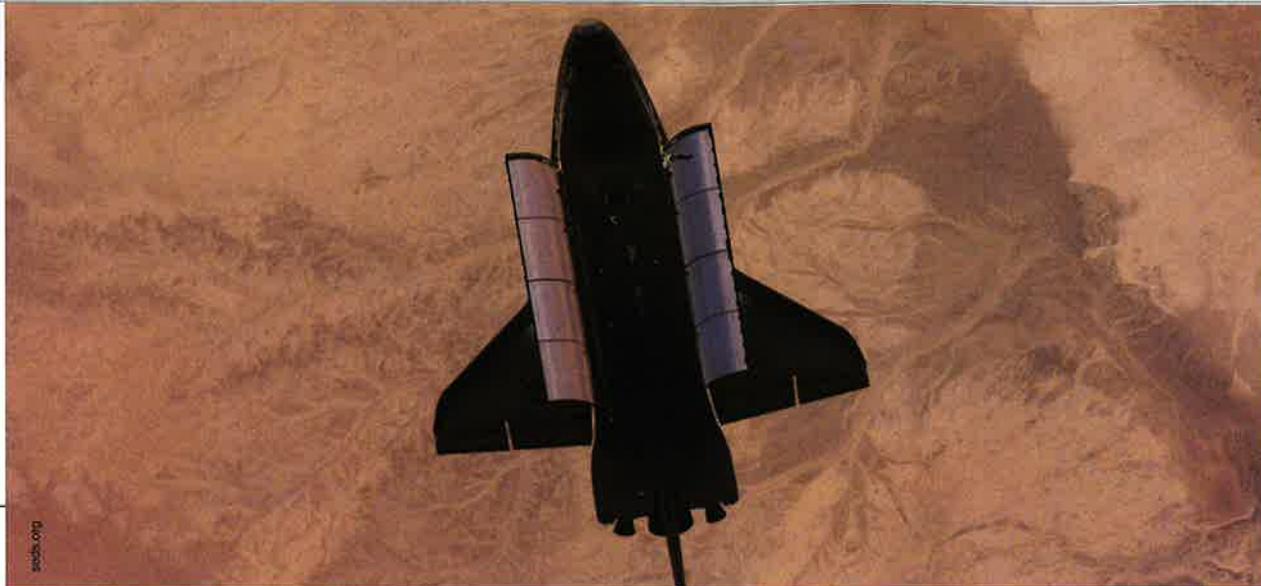
Una de las propiedades más importantes de los sistemas SAR, de cara a su utilización en el reconocimiento arqueológico, es su capacidad potencial de penetración para revelar detalles subterráneos. Este fenómeno no se produce siempre, siendo necesario que las condiciones del material superficial y sus propiedades sean las adecuadas. Así, las longitudes de microondas más largas (entre 3 y 30 cm.), pueden atravesar diferentes materiales de la superficie como arena o sedimentos poco densos, siempre que estos presenten una humedad muy baja facilitando así la máxima penetración de la señal.

Es necesario que este material no presente una rugosidad superficial elevada, para que no refleje demasiado y oculte la señal que pueda ser reflejada por el material situado

bajo la superficie. Y finalmente, como la onda no tiene un poder de penetración ilimitado, puesto que ésta se acaba atenuando sin reflejar nada, es necesario que la profundidad a la que se encuentran los elementos subterráneos de interés no sea demasiado grande.



Comparación entre una imagen LANDSAT óptica y la imagen SAR correspondiente, sobre una zona del desierto de Sudán. Obsérvese cómo en la imagen SAR se ven los cauces fluviales enterrados en la arena.



Space Shuttle con el desierto del Sáhara al fondo.

El radar de apertura sintética (SAR: *Synthetic Aperture Radar*) ha revolucionado la observación de la Tierra desde el espacio

Debe ser como máximo, y dependiendo de las condiciones, de uno a dos metros. Estas condiciones se cumplen excepcionalmente bien en zonas áridas. En particular, los desiertos presentan grandes áreas cubiertas de arena muy seca en forma de capas, dunas o depósitos provocados por el viento, que ocultan estructuras naturales o artificiales que han sido preservadas bajo dicha cubierta y que son de interés para la geología y la arqueología.

Otro aspecto importante en arqueología, es la detección y reconocimiento de estructuras de interés (caminos, asentamientos, edificaciones, ríos, etcétera). Estas, en función de su configuración geométrica, pueden aparecer enmascaradas en la imagen SAR.

Para resaltarlas en lo posible, se combinan imágenes ligeramente diferentes pero directamente comparables, captadas con la misma longitud de onda, pero modificando la onda para destacar en lo posible la geometría de las diferentes estructuras. Para ello la señal emitida se polariza. La polarización de la señal consiste en hacer que la onda electromagnética oscile sólo en una dirección perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas electromagnéticas de origen natural normalmente oscilan en todas las direcciones perpendiculares de forma aleatoria. En el caso que nos ocupa, es posible modificar electrónicamente dichas direcciones de oscilación. Al incidir una onda polarizada en una dirección particular -por ejemplo horizontal (H)- sobre una estructura determinada, se reflejará de una manera diferente en función de su geometría. Como es fácil intuir, si la polarización es vertical (V) se destacarán unas características ligeramente diferentes.

Así, combinando polarizaciones de la onda se pueden obtener diferentes imágenes que aportan información complementaria de la escena observada. Se pueden realizar diferentes combinaciones: emitir con polarización horizontal y recibir sólo con polarización horizontal (modo HH); emitir con polarización vertical y recibir con vertical (modo VV) y cruzarlas (modos HV y VH).

Actualmente, existen varios satélites SAR operativos que permiten una cobertura constante de la superficie de la tierra para diferentes aplicaciones, que van desde el control del medio ambiente hasta la agricultura, pasando por múltiples usos cartográficos.

Entre ellos cabe destacar los satélites de la serie ERS de la Agencia Espacial Europea, el JERS japonés y el RADARSAT canadiense. Los satélites ERS y RADARSAT funcionan en una longitud de onda de seis cm. y en modo de polarización VV. El satélite JERS trabaja con 23.5 cm. y en modo HH. Todos ellos funcionan sólo en una única longitud de onda y en un sólo modo de polarización y se han utilizado escasamente en aplicaciones arqueológicas.

Por otra parte, el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA dispone de un SAR multibanda (funciona en 3.6 y 23.5 cm.) y multipolarización embarcable en las lanzaderas espaciales (*Space Shuttle*). Desde 1982, el JPL/NASA ha estado realizando periódicamente misiones experimentales de algunas semanas de duración para probar mejoras y aplicaciones de estas técnicas. Así, desde las primeras misiones, al descubrir de forma fortuita que la penetración potencial de las ondas de radar era mayor de lo esperado, se realizaron las primeras aplicaciones geológicas y arqueológicas.

Imagen del oasis de *Wadi Kufra* (Libia) en la que se ven bajo la arena del desierto tres antiguos grandes cauces fluviales. Se trata de una combinación en color de tres imágenes SAR con diferentes longitudes de onda y polarizaciones, para distinguir detalles relacionados con la diferente penetrabilidad y estructura del terreno.

(Rojo: 24 cm, HH; Verde: 24 cm, HV; Azul 6 cm, HH).

Éstas se llevaron a cabo principalmente en el desierto del Sáhara donde las condiciones de penetrabilidad son especialmente óptimas.

Desde la primera misión en 1982 del SAR de la JPL/NASA sobre el Sáhara Oriental (Libia, Sudán y Egipto), se pudo comprobar que la información que aportaban las imágenes radar era muy diferente de la de las imágenes ópticas obtenidas desde el espacio. Las primeras mostraban muchísimas estructuras y detalles que no podían ser observados en las segundas. Sorprendentemente, en las imágenes se podían observar cauces fluviales; algunos de ellos más anchos que el propio río Nilo en la actualidad. Estos cauces estaban cubiertos por uno/dos metros de arena, con lo que se demostraba que la penetrabilidad del radar era una realidad práctica. La detección bajo la arena de estos cauces y otras estructuras geomorfológicas, y su estudio sobre el terreno, ha dado lugar a toda una serie de re-análisis importantes de la historia geológica, climática y humana del Norte de África. Durante la excavación en zonas muy próximas a estos antiguos cauces fluviales, se encontraron herramientas paleolíticas y neolíticas que demostraban la presencia humana en estas áreas mucho antes de la completa desertización del Sáhara.

De hecho, se ha podido comprobar que estos cauces formaban parte de un sistema fluvial activo durante el pleistoceno (o quizás antes) y durante el cual existiría en la zona gran cantidad de fauna y flora. Las riberas de estos ríos habrían servido posteriormente como focos de actividad prehistórica humana.

La segunda misión se llevó a cabo en 1986 e incluyó la captación de imágenes sobre el Sáhara como un objetivo de primer orden. Esta misión y otras posteriores han llevado a la localización de más yacimientos prehistóricos que permiten construir una primera historia del asentamiento humano en estas áreas. Así, excavando en las riberas de los cauces detectados en las imágenes SAR se han podido encontrar herramientas de piedra datadas en al menos 250.000 años de antigüedad. Algunas evidencias arqueológicas de ocupación humana, aunque escasas, ya se remontan a 44.000 años de antigüedad (Paleolítico Medio). Así, parece ser que hubo unos

200.000 años de condiciones áridas durante los cuales la presencia humana se redujo o desapareció. Nuevamente, después del Paleolítico Medio no hay más evidencias hasta hace 15.000 años, época de la que se han encontrado muchos hallazgos clasificados como neolíticos. Con estas evidencias arqueológicas y otras de tipo geológico, se puede inferir que el Sáhara ha estado sometido a episodios periódicos de cambio climático muy ligado a las diferentes glaciaciones, pasando de condiciones de habitabilidad óptima a condiciones de aridez extrema que han modificado la presencia humana en estas zonas.

Con datos de las misiones del SAR del JPL/NASA y de los otros satélites SAR, se han llevado a cabo otros estudios arqueológicos en otras zonas desérticas del mundo que vale la pena mencionar. En estos casos, se han utilizado también imágenes ópticas de otros satélites: SPOT, LANDSAT, etcétera; que aportan información complementaria para corroborar en lo posible el reconocimiento realizado con las imágenes SAR.

El desierto de Taklamakán es una zona situada en Asia Central que, durante los últimos 1.000 años, ha estado desertificándose de forma gradual pero intensa. En su periferia y en su interior existe toda una serie de yacimientos arqueológicos de las dinastías *Han* (206-220 a.C.) y *Tang* (618-907 a.C.) durante las cuales, la zona, atravesada por la ruta de la seda, estaba bajo control chino. En el año 206 d.C., la dinastía *Han* unificó China y se inició la extensión del imperio. Posteriormente, diferentes tribus hostiles del norte ocuparon la zona destruyendo las ciudades y asentamientos existentes. Los episodios de desertización extrema que ha habido hasta ahora contribuyeron a su abandono y olvido. Algunas ciudades fueron encontradas entre los años 1902 y 1914 por el explorador británico Stein, tras un arduo trabajo sobre el terreno. Hoy en día, utilizando imágenes SAR del JPL/NASA sobre la zona de *LopNor* -en el centro del Taklamakán, ocupada anteriormente por un gran lago- se han encontrado cauces fluviales antiguos; más recientes pero similares a los encontrados en el Sáhara, que están directamente relacionados con yacimientos arqueológicos conocidos.



Entre estos cauces identificados en las imágenes, se han podido encontrar canales de irrigación fabricados por el hombre, que también se están utilizando para buscar nuevos yacimientos correspondientes a las ciudades que en su momento florecieron allí. También en los desiertos de Egipto próximos al Nilo, donde en épocas menos áridas se extendió la cultura faraónica, recientemente se han localizado restos correspondientes a la época dinástica utilizando imágenes del satélite JERS-1 y del SAR del JPL/NASA. Finalmente, es necesario mencionar uno de los mayores éxitos de la arqueología desde el espacio: la identificación de la ciudad de Ubar. Ésta es una de las ciudades de las caravanas que aparecen mencionadas en *Las mil y una noches* y *El Corán*, y que está situada en el desierto de Orán, en la Península Arábiga. Utilizando complementariamente imágenes ópticas tomadas desde el espacio (LANDSAT) y SAR (JPL/NASA) se identificaron rutas y caminos antiguos que condujeron, en 1992, a la identificación del punto más probable en el que deberían estar los restos de la ciudad. Es necesario señalar, no obstante, que debido al carácter experimental de las misiones del JPL/NASA, la captación de las

imágenes no es sistemática y en este caso, si bien ayudaron en el descubrimiento de la ciudad, el punto en el que ésta se encontraba fue identificado sobre las imágenes ópticas.

Como se ha visto en los ejemplos mencionados, el uso de las imágenes SAR en el reconocimiento arqueológico ha quedado demostrado con sorprendentes resultados. No obstante, debido al bajo retorno económico de las aplicaciones arqueológicas, éstas no son tenidas en cuenta a la hora de diseñar sistemas de detección remota; y en consecuencia, éstas van a remolque de otras aplicaciones de más interés social, económico y político. Actualmente se están desarrollando nuevos sistemas SAR embarcados en satélite con mejores prestaciones útiles para la arqueología: más resolución, multipolarización, etcétera; que serán operativos en un futuro próximo y que obtendrán imágenes de forma sistemática de toda la superficie terrestre. Así, en julio de 2001, la agencia espacial europea lanzará el satélite ENVISAT que, pese a no estar específicamente diseñado para ello, se convertirá en una nueva fuente de datos para la arqueología desde el espacio. **a**

Referencias de Internet:

Cursos de Teledetección:

<http://rst.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/indexe.html>

Información, documentación e imágenes SAR:

<http://www.asf.alaska.edu/>

<http://earth.esa.int/>

Imágenes SAR del JPL/NASA:

<http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/>

Referencias bibliográficas:

Henderson, F.M. y Lewis, A. J., "Principles and Applications of Imaging Radar", *Manual of remote Sensing*, Vol 2, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1999.

Mc Cauley, J. F. y colaboradores, "Subsurface Valleys and Geoarchaeology of the Eastern Sahara revealed by Shuttle Radar", 1982, *Science*, Vol 218, 1004-1020.

McCauley y colaboradores, "The Sahara Paleodrainages: SIR-C/X-SAR Flights", 1986, *Final Report to JPL/NASA*, p. 26. <http://southport.jpl.nasa.gov/reports/finrpt/McCauley/mccauley.htm>

Mc Hugh y colaboradores, "Acheulian sites along the "radar rivers", Southern Egyptian Sahara", 1988, *Journal of Field Archaeology*, Vol. 15

Holcomb, D. W., "Space Shuttle Eyes Silk Road", 1992, *Archaeology*, Vol. 19, No. 1. 129-138.

Blom, R. G., "Space Technology and the Discovery of Ubar", 1992, *Point of Beggining*, 1992 Data Collector Survey, Vol. 17, No. 6, p. 11.