

LA TELEDETECCIÓN EN ARQUEOLOGÍA: EL INSTRUMENTO SAR

HELENA PALACIOS JURADO⁽¹⁾
MANUEL MARTÍN-BUENO⁽²⁾

RESUMEN: La búsqueda de técnicas e instrumentos cada vez más poderosos y eficaces para la prospección aérea con aplicación arqueológica ha alcanzado cotas inimaginables hace unos decenios. En la actualidad las viejas técnicas de prospección aérea que admiraban a los pioneros de estas observaciones en los primeros decenios del siglo XX y sobre todo a partir de la II GM (Guerra Mundial) en que se empiezan a generalizar, son en la actualidad casi recuerdos del pasado. La observación efectuada a partir de la navegación espacial y la fabricación de nuevos dispositivos de detección capaces de descubrir en imágenes de óptima resolución restos y evidencias antes ignorados o desconocidos nos ponen ante un umbral de conocimientos cuyo desenlace no podemos predecir.

Para el arqueólogo la posibilidad de acceder a esta información por medio de herramientas cada vez más sofisticadas se fundamenta en la capacidad de interrelación que tiene nuestra ciencia y en la infinita curiosidad que el arqueólogo debe desarrollar para recibir esta ingente información procedente de técnicos de ciencias aparentemente poco conexas con la nuestra como es la ingeniería espacial. Los equipamientos que permiten instrumentos como los que aquí se mencionan y en los que se fundamenta la teledetección aplicada a la Arqueología proceden de progresos científicos que antes eran completamente ajenos a nosotros pero que poco van entrando en nuestra investigación para su mejora y evolución progresiva.

Un repaso desde las técnicas más sencillas que iniciaron esta carrera imparable como las sísmicas, electromagnéticas, sencillos detectores de metales, etc. dio paso a los llamados relojes radioactivos para llegar poco a poco a los sistemas de teledetección ahora tan en boga.

La descripción del instrumento SAR (Radar de apertura sintética), constituye en la actualidad una de las novedades más espectaculares que puede entrar con fuerza en nuestro trabajo cotidiano. Sus aplicaciones y los distintos equipos, RADARSAT, SIR-A, ERS, EOS, SAR montado en avión: AIRSAR, son un futuro que ya es presente. Completamos el trabajo con un repertorio bibliográfico útil, así como unos índices y anexos de artículos disponibles en el mercado para aplicación arqueológica basada en imágenes por satélite.

PALABRAS CLAVE: SAR= (Radar de apertura sintética), Aplicaciones en arqueología.

ABSTRACT: The search of techniques and instruments each time more powerful and efficient for the air research with archaeological application has reached levels which were unimaginable some decades ago. Now the old techniques of air research, which were admired by the pioneers of these observations during the first decades of the 20th century and above all since II World War in when they began

⁽¹⁾ Dpto de ciencias del espacio y tecnologías electrónicas. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Ctra. de Ajalvir, km.4. 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid).

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Antigüedad. Área de Arqueología. Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza. I.P. Grupo Consolidado URBS, CONAI+D, Gobierno de Aragón.

to spread, are nowadays almost memories of the past. The observation developed from the space navigation on and the production of new detection devices, capable of discovering remainders and evidences in images of optimum resolution ignored or unknown before, face us with a wide range of knowledge which outcome cannot be predicted.

For the archaeologist the possibility of gaining access to this information through sophisticated tools is based on the capacity of interrelation that our science has and on the endless curiosity that the archaeologist should develop to receive this huge quantity of information which springs on from scientific technicians apparently slightly linked with our space engineering. The equipments, which permit instruments as the ones that we have mentioned before and on which the remote sensing applied to the archaeology is based, come from scientific advances that were completely unknown to us before. They are also entering gradually in our investigation for its improvement and evolution.

A review from the simplest techniques which initiated this unstoppable career -seismic, electromagnetic, simple metal detectors, etc.- led to the so called radioactive clocks and gradually to the systems of remote sensing now so in vogue.

The description of the SAR (Synthetic Aperture Radar) constitutes now one of the most spectacular novelties that are able to collapse in our routine work. This applications and different equipments (RADARSAT, SIR-A, ERS, EOS, SAR -if installed in an airplane: AIRSAR-), are feasible nowadays. We complete the work with a useful bibliographical repertoire, as well as some indexes and appendixes of articles available in the market for archaeological application based on images by satellite.

KEYWORDS: SAR (Synthetic Aperture Radar), archaeological application.

INTRODUCCIÓN

La relación entre Tecnología y Arqueología ha existido desde el inicio de ambas disciplinas. Un gran número de campos, en principio sin conexión aparente alguna con la Arqueología, han desarrollado con el tiempo métodos y técnicas de amplia aplicación arqueológica: Biología, Física, Química, Medicina, Geología, Ciencias medio ambientales, Oceanografía... son algunas de ellas. Una de las más importantes, pertenecientes al campo de la Física, y, en concreto, del Electromagnetismo, ha sido la Teledetección¹. Dentro de

esta disciplina, los avances en poco tiempo han sido espectaculares, destacando la teledetección desde satélite, que saca partido del especial punto de vista que constituye el espacio. Se ha desarrollado gran variedad de instrumentos de teledetección para ser embarcados en satélites: desde instrumentos fotográficos, que constituyeron el primer paso en teledetección, hasta los últimos sistemas de teledetección activos. Entre estos últimos destaca el Radar de Apertura Sintética (SAR), con unas posibilidades mayores que los anteriores, y que ha empezado hace poco a emplearse también como auxiliar para la Arqueología.

¹ En 1973 exponía M. Martín-Bueno en: *El método arqueológico en la actualidad*, en ESTUDIOS del Seminario de Prehistoria, Arqueología e Historia Antigua de la Facultad de Filosofía y Letras de Zaragoza II, pp. 7-23, sus reflexiones sobre lo que en ese momento se perfilaba como un gran campo de colaboración entre algunas de las Ciencias como la Física o la Química y sus especializaciones y técnicas aplicadas que podían emplearse con provecho para resolver algunos problemas que la moderna Arqueología planteaba en ese momento, por lo general preguntas eternas para cualquier investigador, como cronologías, identificaciones seguras, etc. El descubrimiento del procedimiento de datación por el Carbono 14 incorporado por Libby en los años cincuenta parecía en ese momento la panacea universal para una Arqueología que se debatía en momentos de cambio importantes

con las propuestas de la New Archaeology entonces en boga. Entre las posibilidades de colaboración poníamos de manifiesto nuestra confianza en un futuro, éste, que en ese momento tan sólo se entreabría para cualquier investigador joven y con las inquietudes e inseguridades propias de la juventud. La enumeración de los campos de colaboración posibles, su simple selección, puede parecer hoy un poco inocente pero incrementada con las nuevas aportaciones y descubrimientos es válida.

Treinta años más tarde en: *El monumento como fuente documental: La materialidad útil*, SALDUÍE II, 2001-2002, pp. 247-266 volvimos a insistir en la necesidad, ahora imprescindible, de la cooperación científica, la interdisciplinariedad y la pluridisciplinariedad, tomando como referencia el estudio de los monumentos arquitectónicos.

Hablaremos aquí, en primer lugar, de los métodos técnicos de otras disciplinas usados hasta ahora en Arqueología, enfatizando los relacionados con la teoría electromagnética. Tras un estudio de la teledetección en general, nos ocuparemos del instrumento SAR y de sus aplicaciones. Hablaremos en capítulo aparte de su aplicación a la Arqueología, de algunos de los satélites que incluyen un SAR, sus características y resultados, como veremos, de gran utilidad arqueológica.

Para terminar, como anexo, se incluye una lista de recursos, tanto informáticos como de fuentes de imágenes, a los que puede recurrir cualquier arqueólogo.

RELACIÓN ARQUEOLOGÍA-TÉCNICA: MÉTODOS USADOS HASTA AHORA EN ARQUEOLOGÍA

Un gran número de técnicas que pertenecen a campos científicos distintos de la Arqueología (haciendo aquí hincapié en aquellos derivados de la teoría electromagnética), se han venido utilizando en algunos procesos del estudio arqueológico:

LOCALIZACIÓN DE YACIMIENTOS

Una de las tareas más importantes del arqueólogo consiste en localizar y registrar el paradero de yacimientos y estructuras. Podemos distinguir entre la localización de yacimientos realizada sobre la superficie del suelo (*prospección superficial*) y el descubrimiento a distancia (*reconocimiento aéreo o espacial*).

Prospección superficial

El método y técnicas de identificación de yacimientos incluyen la consulta de fuentes

documentales y la evidencia toponímica, además, sobre todo, del trabajo de campo.

Reconocimiento aéreo

El reconocimiento aéreo no sólo se utiliza para la localización de yacimientos; también para su registro e interpretación y para la supervisión de los cambios producidos en ellos a lo largo del tiempo.

La fotografía aérea:

Las primeras aplicaciones arqueológicas importantes de esta técnica se produjeron a principios de siglo, con las fotografías de la ciudad romana de Ostia tomadas desde un globo. La Primera Guerra Mundial impulsó la técnica cuando se descubrió que las fotografías aéreas tomadas desde aviones y globos podían ofrecer, por primera vez, una perspectiva general de los monumentos históricos. En 1925 se demostró que se podían localizar desde el aire los yacimientos subacuáticos, dando a conocer, por vez primera, el antiguo puerto sumergido de Tiro (Líbano).²

Existen dos tipos de fotografía aérea: la *oblicua* y la *vertical*. A grandes rasgos podemos decir que la fotografía oblicua (aquella que se toma desde un ángulo para revelar los contornos y proporcionar perspectivas) es la idónea para el descubrimiento de yacimientos, y la vertical para realizar planos de los mismos. También se puede utilizar la superposición de fotografías para crear un efecto estereoscópico, de modo que yacimientos y paisajes se vean en tres dimensiones. De forma similar, pueden explorarse áreas de gran tamaño con fotografías superpuestas³.

Las *nuevas tecnologías* han tenido un fuerte impacto sobre la fotografía aérea en diversas

² Corresponde al jesuita francés André Poidebard (1878-1955) la sagacidad de ver con rapidez las posibilidades que ofrecía la técnica de la fotografía aérea para investigación arqueológica tanto en tierra como en el campo subacuático. Este singular precursor sobrevoló en aparatos franceses y británicos todo Próximo Oriente en el periodo inmediato a la Primera Guerra Mundial y en años sucesivos descubriendo el limes romano de oriente entre los años 1925 y 1932, en el desierto de Siria, fotografiando el puerto sumergido de Tiro y otras ciudades de la costa fenicia entre 1934-1936 e incluso llevando a cabo las primeras comprobaciones mediante fotografía subacuática en Tiro con el auxilio de buzos clásicos y buceadores. Algunos de los materiales inéditos se han

expuesto por vez primera en una excelente exposición fotográfica en Beirut dedicada a tan excepcional figura.

³ La técnica del mosaico fotográfico es imprescindible para una buena cobertura de la zona deseada al mismo tiempo que para asegurar una buena visión estereoscópica mediante pares fotográficos. Los problemas derivados de la necesidad, antes imperiosa, de obtener fotografías desde un plano paralelo a tierra o al objeto a reproducir permite hoy, gracias a los avances en el campo de la informática corregir algunas desviaciones producidas por circunstancias como reducido campo de enfoque al objeto (caso de la fotogrametría terrestre) o movimientos involuntarios en el plano de referencia móvil.

formas. El realce de la fotografía mediante ordenadores mejora su intensidad y su contraste. También se han introducido las *imágenes digitales*: en las que las fotografías son cuantificadas digitalmente y la imagen puede así ser manipulada de modo que, por ejemplo, se resalten los detalles de mayor interés. Aunque la *película pancromática en blanco y negro* sigue siendo la más utilizada en la fotografía aérea (por su bajo costo y gran resolución), también se emplea, con buenos resultados, la *película infrarroja*. Las novedades introducidas recientemente incluyen *películas de color falso y de color microfotográfico*, la *holografía acústica* y el estudio de los negativos con el *filtrado óptico mediante láser*.

Desde sus comienzos, la fotografía aérea ha sido, y aún es hoy, la técnica de reconocimiento aéreo más común y rentable para la mayoría de los propósitos de la Arqueología.

La teledetección aerotransportada:

Otra técnica de teledetección aérea es el Radar Aerotransportado de Observación Lateral (SLAR). También se utiliza el Lidar (instrumento de detección láser) sobre todo como complemento a otras técnicas, y, por encima de las anteriores, el SAR, que se puede utilizar embarcado en avión además de en satélite.

Reconocimiento desde el espacio:

Las fotografías tomadas desde satélite tienen una aplicación limitada en Arqueología, dado que su escala es demasiado grande; sin embargo, las imágenes no ópticas procedentes de instrumentos embarcados en satélite que detectan otro tipo de radiación, reflejada por el terreno a observar, distinta de la visible, han demostrado su utilidad. Entre ellos, y últimamente una de las mejores ayudas para los arqueólogos en lo que se refiere a la observación desde el espacio, está el SAR, que utiliza una técnica relativamente nueva de reconocimiento desde satélite que combina un sistema activo con un procesado de señal especial. De este instrumento hablaremos con detalle mas adelante.

PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA

Existe un gran abanico de técnicas no intrusivas, ideales para el arqueólogo que pretenda

conocer mejor un yacimiento antes de excavarlo o sin excavación.

Prospección sísmica y acústica:

Dado que las ondas acústicas se propagan más rápidamente en los materiales duros y más lentamente en la arcilla o materias blandos, se pueden detectar estructuras tales como superficies de suelo sepultadas.

Una de las aplicaciones arqueológicas más importantes de las técnicas de sondeo acústico se lleva a cabo en proyectos subacuáticos, mediante el sónar.

La detección de las anomalías gravitacionales puede localizar huecos, como cuevas, cavidades, etc.

Prospección electromagnética:

El equipo medidor cuenta con un emisor de pulsos de señal electromagnética hacia el suelo y un receptor de la parte de la señal que es reflejada debido al encuentro de los pulsos emitidos con cualquier variación en las condiciones del suelo, como la interconexión de dos materiales o dos propiedades eléctricas distintas; por ejemplo, zanjas de relleno frente a muros, tierra frente a un objeto, etc. La medida del tiempo transcurrido entre la emisión y el reflejo de las señales ayuda a localizar la posición de los distintos niveles o de cualquier objeto presente.

Esta técnica funciona mejor en suelos arenosos secos y muy drenados, donde la penetración de la radiación electromagnética es mayor.

Medida de la resistividad eléctrica del suelo:

En esta técnica se mide la mayor o menor facilidad con la que atraviesa la tierra una corriente eléctrica. Cuanto más humedad contenga el suelo, será mejor conductor de electricidad, es decir, ofrecerá menos resistencia al paso de la corriente eléctrica. Esta técnica es especialmente efectiva en zanjas y canteras de creta y grava, así como en la mampostería de barro, ya que éstas retienen más la humedad que los muros o estructuras de piedra.

Es un complemento efectivo de otros procedimientos de sondeo. Incluso reemplaza a veces a los magnéticos, ya que, a diferencia de

muchos de éstos, puede ser utilizado en áreas urbanas, cerca de líneas de conducción eléctrica y en la proximidad de metales.

Prospección magnética:

La prospección magnética es uno de las técnicas de prospección más utilizados, que resultan útiles, sobre todo, en la localización de construcciones de arcilla cocida, como hogares y hornos de cerámica, de objetos de hierro, hoyos y zanjas. Todas estas estructuras sepultadas producen distorsiones débiles pero mensurables en el campo magnético terrestre. Las razones de estas distorsiones se fundamentan en la presencia de hierro, incluso en cantidades insignificantes. Por ejemplo, los granos de óxido de hierro de la arcilla, cuyo magnetismo se orienta al azar si la arcilla no está cocida, se alinearán y permanecerán fijos en la dirección del campo magnético terrestre cuando sean calentados a 700°C o más. La arcilla cocida se convierte, de este modo, en un débil imán permanente, produciendo una anomalía en el campo magnético circundante. Por otra parte, las anomalías originadas por fosos y zanjas se producen debido a que la llamada susceptibilidad magnética de sus contenidos es mayor que la del subsuelo circundante.

Detectores de metales:

Estos aparatos electromagnéticos también resultan útiles para detectar restos sepultados. Haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una bobina transmisora se genera un campo magnético alterno. Los objetos metálicos enterrados distorsionan este campo y son detectados mediante una señal eléctrica captada por una bobina receptora. En ocasiones, también se pueden detectar con estos instrumentos estructuras como fosos, zanjas, muros y hornos, debido a que su susceptibilidad magnética es distinta de la del suelo o subsuelo circundante.

Los detectores de metales sirven sobre todo para obtener en poco tiempo resultados genera-

les y para la localización de objetos de metal que se puedan encontrar cerca de la superficie. Los equipos más sofisticados están provistos de capacidad discriminadora para diferentes grupos de metales.⁴

Otras técnicas:

Tanto la radiactividad como la dispersión de neutrones han sido experimentadas en pruebas de teledetección, pero sólo funcionan si la capa de suelo es muy fina. La mayoría de los suelos y rocas tienen algún componente radiactivo y, en estas técnicas, al igual que en la resistividad y la prospección magnética, las lecturas miden la discontinuidad existente entre las zanjas y fosos subterráneos y la tierra circundante.

La prospección térmica (termografía) se basa en las débiles variaciones de temperatura que se producen sobre las estructuras enterradas cuyas propiedades térmicas difieran de las de su entorno. Es una técnica costosa y debe usarse desde avión. Hasta ahora, el método se ha aplicado principalmente a construcciones largas o macizas, como recintos prehistóricos o edificaciones y estructuras de época romana.

El estudio y elaboración de mapas de la vegetación de un yacimiento puede ofrecer mucha información relativa a intervenciones anteriores en el terreno: ciertas especies crecen donde el suelo ha sido alterado.

El análisis geoquímico consiste en la toma de muestras de tierra a intervalos regulares de la superficie de un yacimiento y sus alrededores, y en la medición de su contenido en fosfatos (fósforo). Existe una íntima relación entre los asentamientos antiguos y las elevadas concentraciones de fósforo en el suelo.

Un análisis sistemático de fosfatos puede ayudar a aclarar la función de las distintas partes de un yacimiento excavado: un elevado nivel de fósforo puede señalar la existencia de establos y hogares, entre otros.

⁴ Su uso en medios arqueológicos es poco frecuente y está muy desprestigiado por una reacción lógica ante un aparato que por el contrario en manos de desaprensivos puede causar y de hecho lo hace grandes estragos en el patrimonio por búsquedas incontra-

das fuera de la ley. No obstante puede ser útil en determinadas circunstancias como verificación de terreras procedentes de excavaciones arqueológicas, movimientos de tierras e incluso necesidad de verificar con rapidez la existencia o no de restos metálicos.

Este tipo de estudios son lentos, pero son cada vez más frecuentes en los proyectos arqueológicos, ya que pueden dar a conocer estructuras y evidencias que otras técnicas no detectan.

DATACIÓN

Relojes radiactivos:

Muchos de los avances más importantes en la datación absoluta, desde la segunda guerra mundial, proceden del empleo de lo que se puede llamar “relojes radiactivos”, basados en un fenómeno regular y muy difundido en la naturaleza, la desintegración radiactiva.

Datación radiocarbónica:

El radiocarbono ha proporcionado, sin duda, el método más útil de datación en Arqueología. Su mayor ventaja es que puede ser utilizado en cualquier parte y cualquier clima, mientras haya material de origen orgánico. La técnica nos traslada a 50.000 años atrás, y, potencialmente, hasta 80.000 utilizando la técnica específica de la Espectrometría del Acelerador de Partículas (AMS), que además puede datar muestras extremadamente pequeñas, en principio, de sólo 5-10 mg, permitiendo de este modo que se muestreen y fechen directamente materiales orgánicos valiosos. La datación radiocarbónica tiene el inconveniente, en cuanto al otro extremo de la escala temporal, de que es demasiado imprecisa para ser útil en los 400 años del pasado más reciente.

Posiblemente el radiocarbono seguirá conservando su puesto como la herramienta de datación más importante para los materiales orgánicos de los últimos 50.000 a 80.000 años. Sin embargo, para los materiales inorgánicos, la termoluminiscencia se ha convertido en una técnica muy útil y difundida.

Datación por Termoluminiscencia:

La Termoluminiscencia (TL) tiene dos ventajas sobre el radiocarbono: puede fechar cerámica, el material inorgánico más abundante en los yacimientos arqueológicos de los últimos 10.000 años; y puede, en principio, fechar materiales inorgánicos (como el sílex quemado) de hasta 50.000-80.000 años de antigüedad, el

límite del radiocarbono. Pero la TL es menos precisa que éste en sus fechas.

En fechas anteriores a 50.000 años (más allá del límite básico del radiocarbono) no aparece cerámica ni hay artefactos de arcilla cocida. Pero la técnica también se puede aplicar a los materiales líticos con una estructura cristalina, siempre que fuesen calentados, en el momento de su elaboración, a una temperatura en torno a los 500°C. Así, midiendo la cantidad de TL emitida al calentar una muestra a 500°C o más, se puede calcular la edad del objeto desde su elaboración. Por tanto, la medición de su edad en TL fecha en realidad su uso arqueológico. En la práctica, el sílex quemado ha resultado ser un material muy esclarecedor.

Como desventaja, decir que las fechas obtenidas por TL pocas veces tienen un margen de error inferior al 10%. Sin embargo, el método de la TL es, por lo general, el más útil en aquellas circunstancias en que no se puede aplicar la datación radiocarbónica.

Resonancia electrónica del “spin”:

En los últimos años se ha desarrollado como aplicación arqueológica la Resonancia Electrónica del “spin” (ESR), que permite determinar la edad de una muestra de hueso o concha sin el calentamiento que precisa la técnica de la termoluminiscencia. Por tanto, tiene la ventaja sobre la TL de que no es destructiva aunque es menos sensible que la TL y no tan asequible.

Es probable que la ESR se confirme en el futuro como una poderosa herramienta de datación, especialmente para las muestras de huesos y dientes que excedan del radio de acción de la datación radiocarbónica.

Datación mediante potasio-argón:

La datación mediante potasio-argón, como la radiocarbónica, se fundamenta en el principio de la desintegración radiactiva: en este caso, la lenta transformación del isótopo radiactivo potasio 40 en el gas inerte argón 40 dentro de las rocas volcánicas.

Felizmente, algunas de las zonas más importantes para el estudio del Paleolítico Inferior, como el “Rift Valley” del África Oriental, son zonas de gran actividad volcánica, y los restos arqueológicos están situados muchas veces en

estratos geológicos formados por la acción volcánica, lo que los hace idóneos para este tipo de datación, que funciona para fechas anteriores a los 100.000 años.

Las limitaciones más importantes de esta técnica son que sólo se puede utilizar para fechar yacimientos sepultados por coladas volcánicas y que no es posible casi nunca conseguir una precisión mayor del $\pm 10\%$.

Datación mediante las series de uranio:

Técnica basada en la desintegración radiactiva de los isótopos de uranio. Ha resultado ser especialmente útil para el período 500.000-50.000 BP, que queda fuera del ámbito del radiocarbono. En Europa, donde hay escasas rocas volcánicas adecuadas para la datación por la técnica del potasio-argón, las series del uranio pueden ser el mejor modo para precisar cuándo fue ocupado un yacimiento por el hombre prehistórico.

Se utiliza para fechar rocas con un alto contenido en carbonato cálcico, como las cavidades calizas. Como el hombre prehistórico utilizó grutas como refugio, los útiles y huesos quedaron incrustados a menudo entre dos niveles de depósitos calcáreos. La dificultad de determinar el orden correcto de deposición en una cueva es una de las razones por las que la técnica de las series de uranio tiende a dar resultados ambiguos.

Datación por huellas de fisión:

Ésta es otra técnica basada en el funcionamiento de un reloj radiactivo. En esta ocasión, es la fisión espontánea de un isótopo del uranio U^{238} existente en gran cantidad de rocas y minerales, en la obsidiana y otros cristales volcánicos, en los meteoritos vítreos, en los vidrios manufacturados y en las inclusiones minerales de la cerámica. Al igual que la datación mediante potasio-argón (con cuyo alcance temporal coincide) éste proporciona fechas útiles a partir de rocas adecuadas que contengan o estén próximas a restos arqueológicos.

Esta técnica es la más útil para los yacimientos prehistóricos de mayor antigüedad, especialmente donde no se puede aplicar el análisis del potasio-argón. El ámbito temporal que puede alcanzar es considerable: hasta los 300.000 años de antigüedad. En condiciones favorables, el error inherente al proceso es del orden del $\pm 10\%$.

Técnicas relativas calibradas:

La desintegración radiactiva es el único proceso temporal totalmente regular que se conoce; no sufre la influencia de la temperatura o de otras condiciones medio ambientales. Sin embargo, existen otros procesos naturales que, aunque no son completamente uniformes, son lo bastante estables a lo largo del tiempo como para ser de utilidad para los arqueólogos. No son técnicas fiables de datación absoluta, pero pueden resultar de utilidad como simple medio de ordenar las muestras en una secuencia relativa, en la que se diferencian las más antiguas de las más recientes.

La racemización de aminoácidos:

Se utiliza para fechar huesos, tanto de seres humanos como de animales (sólo se necesitan 10 gr.). Su especial importancia reside en que puede ser aplicado a materiales de incluso unos 100.000 años, es decir, más allá del alcance temporal de la datación radiocarbónica.

Las proteínas de los organismos vivos contienen sólo L-aminoácidos. Tras la muerte, éstos se transforman en D-aminoácidos (se racemizan) a un ritmo constante. Datando por radiocarbono muestras de hueso de un yacimiento concreto y midiendo las proporciones relativas de las formas L y D de las mismas, se puede calcular cuál es la tasa de racemización. Esta calibración se utiliza para fechar muestras de hueso de los niveles más antiguos del yacimiento, que están fuera del alcance temporal del radiocarbono.

Datación por la tasa de cationes:

Interesante técnica desarrollada en los últimos años. En condiciones desérticas, se forma una pátina en las superficies rocosas expuestas al polvo del desierto. Este sistema de datación se basa en el principio de que los cationes de ciertos elementos son más solubles que los de otros y desaparecen de la pátina superficial más rápidamente; su concentración disminuye con el tiempo. Sin embargo, no se puede decir que haya una tasa de disminución fija (como en los procesos de desintegración radiactiva); el proceso ha de ser corregido para cada área, utilizando otros medios de datación.

Los grabados en rocas (petroglifos) ofrecen un ejemplo de datación por la tasa de cationes,

analizando sus pátinas. También es aplicable en potencia a los útiles paleolíticos que tengan una pátina gruesa causada por su exposición al polvo del desierto.

Datación arqueomagnética

El campo magnético terrestre cambia constantemente tanto en dirección como en intensidad. Se han reconstruido los cambios de dirección del norte magnético terrestre en el pasado en varias regiones estudiando la magnetización de las estructuras de arcilla cocida de períodos antiguos, que han sido fechadas independientemente, por ejemplo, por radiocarbono. (Siempre que la arcilla haya sido cocida a 650-700°C y no se haya vuelto a calentar, las partículas de hierro que contiene adoptan definitivamente la dirección e intensidad del campo magnético terrestre en el momento de la cocción (TRM)). De este modo se puede elaborar un esquema de las variaciones temporales de la dirección magnética en cada región, que se puede utilizar para fechar otras estructuras de arcilla cocida de edad desconocida, cuyo TRM se mide y se compara con una fecha concreta de la secuencia directora local.

Una chimenea u horno de arcilla cocida, medida in situ en un yacimiento de una de estas regiones, puede ser fechado con bastante precisión mediante el análisis de la dirección magnética. Sin embargo, una vez que se haya movido la estructura, no se podrá volver a comparar la dirección magnética antigua con la actual. A diferencia de la técnica direccional, la intensidad magnética se puede medir cuando la arcilla cocida está descontextualizada, pero la técnica de la intensidad es intrínsecamente menos exacta que la direccional.

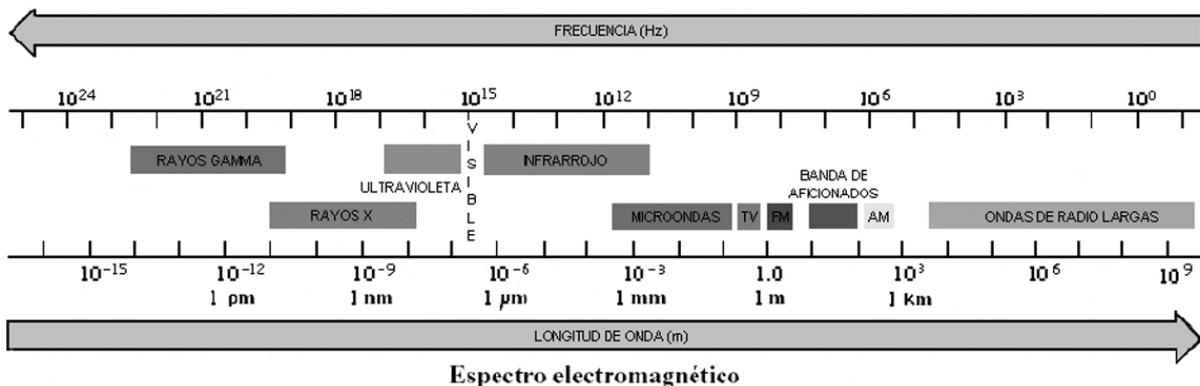
Otros aspectos del arqueomagnetismo, importante para la datación de la Prehistoria mas antigua, es el fenómeno de las inversiones del campo magnético terrestre. La inversión más reciente se produjo hace unos 700.000 años y se ha elaborado una secuencia de este tipo de fenómenos que se remonta a varios millones de años, con ayuda de otras técnicas de datación. El descubrimiento de parte de esta secuencia de inversiones en los estratos rocosos de los yacimientos africanos del hombre prehistórico ha resultado ser un buen sistema de verificación de los otros medios de datación utilizados en esos yacimientos.

LA TELEDETECCIÓN COMO TÉCNICA DE OBSERVACIÓN TERRESTRE

La teledetección es la especialidad científica que se ocupa de la adquisición e interpretación de información sobre un entorno a partir de medidas realizadas sin establecer contacto físico con él. Los instrumentos de teledetección existentes pueden ser utilizados embarcados en avión y/o en satélite.

ALGUNAS DEFINICIONES ÚTILES

La radiación electromagnética se puede definir por su frecuencia o su longitud de onda. La extensión de longitudes de onda que abarca toda la radiación electromagnética conocida se denomina espectro electromagnético, que comprende desde los rayos cósmicos, los rayos gamma, los rayos X hasta la radiación ultravioleta, visible e infrarroja, pasando por la energía de microondas. El espectro electromagnético está dividido en secciones según la longitud de onda (bandas).



Cuando las ondas electromagnéticas encuentran un obstáculo en su camino, parte de la radiación puede ser reflejada por el objeto, parte absorbida y emitida por él y parte transmitida a través suyo. La teledetección utiliza esa radiación reflejada y emitida. La idea básica es que los objetos responden, según sus características, de forma distinta a la radiación electromagnética que incide en ellos, dependiendo de la longitud de onda de dicha radiación. Características diferentes de un objeto producen la emisión y reflexión de cantidades diferentes de ciertas longitudes de onda. Por ello, cuanto mayor sea el rango de longitudes de onda que utilizemos para observar un objeto, más exactamente podremos caracterizarlo. Así, suelen utilizarse varios instrumentos que funcionan a distintas bandas para el mismo objetivo, con el fin de describirlo lo más precisamente posible.

Podemos distinguir dos tipos de sistemas de teledetección: *teledetección pasiva* y *teledetección activa*.

En la teledetección pasiva, la fuente primaria de radiación es el sol. Los detectores utilizados trabajan en la región del visible y diversas partes del infrarrojo, incluido el térmico. Tras la interacción de esta radiación (visible o infrarroja) con la superficie terrestre, parte de la energía reflejada o emitida vuelve en dirección al detector y es recogida por él.

En la teledetección activa, el entorno terrestre que se pretende observar se irradia con una fuente artificial instalada en el propio satélite, registrando el detector la radiación devuelta en su dirección por la superficie terrestre. Esta es la forma habitual de funcionamiento de los radares. En este caso, los detectores trabajan en la región del espectro correspondiente a las microondas; esto les hace operativos en cualquier condición meteorológica. Por su independencia de cualquier fuente de energía externa, pueden operar tanto de día como de noche. Bajo ciertas condiciones, pueden además penetrar en las primeras capas del subsuelo terrestre.

Un parámetro fundamental que caracteriza a los diferentes instrumentos de teledetección es la resolución, entendiéndose por tal la capacidad que posee de diferenciar señales que están espacialmente próximas o que son

espectralmente similares. Hay que considerar cuatro tipos de resolución para estos detectores: espectral, espacial, temporal y radiométrica. De ellas, las dos primeras son importantes en la aplicación de la teledetección a la Arqueología.

La resolución espectral se refiere al número y anchura de las bandas del espectro electromagnético para los que un determinado detector es sensible. Los detectores activos son los que poseen menor resolución espectral ya que suelen trabajar, por lo general, en una sola banda. Los detectores pasivos poseen resoluciones espectrales mejores.

La resolución espacial es una medida de la menor separación angular o lineal entre dos objetos que puede detectar el instrumento. Esta distancia corresponde al tamaño de cada punto de la imagen digital obtenida (=píxel), y depende de la altura a la que se encuentra el satélite y su velocidad, entre otros parámetros.

La resolución temporal corresponde a la periodicidad orbital del satélite y define el número de días u horas que transcurren entre dos observaciones consecutivas de la misma porción de la superficie terrestre.

Por último, la resolución radiométrica es la capacidad del instrumento para detectar variaciones en la intensidad de radiación recibida.

UN POCO DE HISTORIA. APLICACIONES

En las décadas 60 y 70 el modo más natural, versátil y económico de trabajar en teledetección fue la fotografía aérea. Además de la luz visible, el rango fotográfico de longitudes de onda se puede extender hasta el infrarrojo cercano y el ultravioleta con película y lentes altamente especializadas.

El uso primario de una película infrarroja a color (CIR) es especialmente útil en los estudios relativos a la vegetación, tal como el cartografiado de humedales o el seguimiento de ecosistemas. La vegetación verde y sana es una fuerte reflectora de radiación infrarroja y habitualmente aparece en rojo brillante.

Como fruto de la intensa investigación en los sistemas de navegación surgen las primeras imágenes espaciales, y la teledetección como

técnica avanza cubriendo nuevos objetivos. Por un lado permite observar nuevas zonas del espectro, como la región de la energía de microondas, y por otro introduce el concepto de imagen digital en teledetección (representación numérica de la radiación reflejada o emitida por una parte de la superficie terrestre).

La energía de microondas, debido a su mayor longitud de onda, atraviesa la atmósfera, las nubes, la lluvia, la nieve, el humo... lo que constituye una ventaja sobre otras bandas del espectro electromagnético. El radar de microondas, como radar que es, tiene su propia iluminación (sistema activo), lo que le permite operar día y noche. Bajo ciertas condiciones favorables, consigue además un cierto nivel de penetración en zonas arenosas de regiones áridas y semiáridas, lo cual le permite identificar ciertas estructuras internas en estos medios; también, con la adecuada longitud de onda y ángulo de incidencia, puede profundizar hasta 3 metros en medios subacuáticos. Estas características hacen al radar de microondas un instrumento clave en teledetección.

Se desarrollan así sistemas de teledetección para ser embarcados en satélites que se dedicaron a la observación de la tierra, registrando información de la atmósfera, el medio terrestre y los océanos.

Las características que hacen de esta teledetección desde el espacio una herramienta imprescindible para abordar el estudio de fenómenos terrestres son: la multiespectralidad, la periodicidad y la visión sinóptica.

El carácter multiespectral de los datos (visible, infrarrojo, térmico, microondas...) aporta un abanico informativo muy valioso para la distinción temática y la caracterización de las distintas estructuras detectadas.

La periodicidad en la adquisición de las imágenes permite el seguimiento multitemporal de la dinámica de los diferentes fenómenos observados.

La visión sinóptica facilita el estudio simultáneo de grandes extensiones para una misma situación climática terrestre u oceánica.

Las aplicaciones más interesantes son:

Atmósfera: estudios meteorológicos; caracterización atmosférica; control de la capa de ozono, etc,

Terreno:

- Geología y minería: explotación de yacimientos minerales y petrolíferos, cartografía litológica (discriminación de tipos de rocas), cartografía estructural (detección de alineamientos), cartografía hidrotermica,
- Agricultura y montes: predicción de cosechas, identificación y evaluación de cultivos, detección de enfermedades y plagas,
- Uso de suelo y medio ambiente: detección de contaminantes químicos, térmicos y biológicos, estudios sobre el estado de la vegetación, determinación de masas de agua y de su contenido en biomasa, seguimiento de fenómenos dinámicos, evaluación de daños causados por catástrofes naturales
- Cartografía: elaboración de mapas topográficos, catastros urbanos y municipales, cartografía temática a gran escala. En este apartado se incluyen los estudios de catastros antiguos desde época romana.⁵

Océanos: Topografía marina, corrientes y mareas, velocidad y dirección del viento, altura de olas....

Especial mención merece en teledetección el satélite de la Agencia Espacial Europea ERS-1, lanzado en 1991. Fue el precursor de un ambicioso programa medio ambiental y adquirió a lo largo de sus años de vida útil imágenes todo-tiempo absolutamente inéditas de la superficie del océano y las regiones costeras y terrestres.

⁵ Esta aplicación en la identificación de catastros de época romana sobre todo ha demostrado ya su eficacia y es mucha la bibliografía específica existente. Se iniciaron los estudios a partir de fotografías aéreas pero la alta resolución que permite en estos

momentos la fotografía satelital y la manipulación mediante los programas adecuados para resaltar detalles, filtrar imágenes, etc. Abren nuevas posibilidades de estudio.

Las aplicaciones más características del ERS-1 han sido:

Topografía y circulación oceánica

Monitorización de los fenómenos de erosión

Meteorología, modelos predictivos

Geoide marino

Dinámica de la corteza terrestre: interferometría y topografía.

Europa está al frente de la Observación Terrestre desde el espacio en el dominio de la toma de imágenes ópticas/multiespectrales gracias a los altímetros radar del ERS-1/2, Topex-Poseidón, Envisat y Jasón. La extraordinaria precisión conseguida con esta técnica ha sido heredada de la experiencia desarrollada en geodesia/orbitografía. También ha ganado un liderazgo indiscutible en todo el mundo tanto en tecnologías como en aplicaciones del SAR (banda C en ESA y Canadá, banda X en Alemania e Italia).

En la observación terrestre, la nueva orientación se dirige hacia un concepto global, esto es, a un estudio de la interacción de todos los componentes medio ambientales, aire, agua, tierra y vida que se desarrollan en el planeta. Hoy en día contamos para ello con una nueva generación de satélites experimentales que operan bajo el marco de diferentes Programas de Observación de la Tierra (EOS).

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN A LA ARQUEOLOGÍA

Ahora más que nunca, la investigación arqueológica es una actividad interdisciplinar. En lo que se refiere al campo del electromagnetismo, las técnicas de teledetección constituyen una valiosa herramienta en el trabajo cotidiano del arqueólogo, sobre todo en la localización y la prospección arqueológica. Estas técnicas permiten obtener información sin alterar los yacimientos.

La fotografía embarcada en avión ha sido la técnica más versátil y económica de que han dispuesto los arqueólogos hasta hoy. Pero la posibilidad de embarcar sistemas de teledetección en satélites, con el privilegiado punto de vista que representa el espacio, la construcción

de detectores en otros rangos del espectro electromagnético distintos del visible, y de ordenadores que transforman esta información a nuestro rango de visión, en imágenes fotográficas, ha permitido grandes avances. El espectro de la radiación reflejada por la superficie terrestre contiene información acerca de la composición de dicha superficie, y su observación en distintas bandas electromagnéticas, como la de la radiación infrarroja o la de microondas, proporciona información adicional de un número mayor de sus características.

Un ejemplo es la discriminación de posibles elementos arqueológicos mediante la detección de la radiación infrarroja térmica emitida. Ya que los distintos terrenos y texturas tienen temperaturas características particulares, resulta posible identificar así el terreno suelto que pudo haber sido en el pasado campos de cultivo desde la antigüedad, o haber estado cubriendo restos enterrados. Una calzada maya fue detectada porque emitía radiación infrarroja a una longitud de onda diferente de la vegetación que la rodeaba. También se pueden detectar acequias o canales de irrigación rellenas con sedimentos, puesto que éstas concentran una mayor humedad y por tanto tienen una temperatura mayor que el resto del suelo. La tierra situada encima de un muro de piedra enterrada, por ejemplo, puede estar un poco más caliente que el terreno circundante, debido a que la piedra absorbe más calor.

Por lo tanto, la teledetección puede ser una técnica de descubrimiento en Arqueología, ya que puede operar en áreas donde no se puede llevar a cabo una prospección mediante inspección sobre el terreno. Detectar en el suelo la elevación, distancia al agua, distancia entre emplazamientos o ciudades, corredores y rutas de transporte, puede ayudar a predecir la posición de potenciales yacimientos arqueológicos. También se puede utilizar como técnica de prospección, estudiando las características de la energía reflejada o emitida por un emplazamiento conocido.

TELEDETECCIÓN ESPACIAL APLICADA A LA ARQUEOLOGÍA

Aunque las técnicas de teledetección pueden obtener imágenes desde diferentes plataformas de observación, aviones o satélites artificiales,

son estos últimos las plataformas más adecuadas para obtener una visión de regiones de gran extensión. Además, los satélites presentan la gran ventaja de poder permanecer mucho tiempo en una órbita específica, lo que permite una observación continua de la Tierra. Desafortunadamente, las fotografías convencionales tomadas desde satélite tienen una aplicación limitada en Arqueología, dado que su escala es demasiado grande; sin embargo, las imágenes no ópticas tomadas desde satélite sí han demostrado su utilidad.

Con los satélites LANDSAT comenzó la observación de la Tierra desde el espacio. Sus escáneres registran la intensidad de la energía infrarroja reflejada por la superficie de la Tierra, que se transforma posteriormente en imágenes fotográficas. A fines de los 70 los arqueólogos descubrieron el valor que podía tener para ellos estas imágenes, y empezaron a utilizarlas para localizar estructuras de gran tamaño, como los antiguos sistemas de riego de Mesopotamia.

Utilizando imágenes del LANDSAT de color falso, en el que los colores naturales se han transformado en tonos de mayor contraste, científicos de la NASA en colaboración con arqueólogos encontraron, en 1983, una extensa red de campos y asentamientos agrícolas mayas en la península mexicana del Yucatán. Aquí se pudieron localizar hasta 112 yacimientos. El resultado más notable fue la detección de una amplia red (que cubría un área de 65 km de longitud y 4'8 km de anchura) de campos cercados y montículos de viviendas, lo que destruye por completo la ya desacreditada teoría de que la civilización maya se basaba en un tipo de agricultura itinerante, sin campos estables.

Desde entonces la teledetección espacial ha ido integrándose tímidamente al conjunto de herramientas que utilizan los arqueólogos. En un principio su aplicación estaba muy limitada por la escasa resolución de las imágenes obtenidas (unos 80 m.), pero hoy se dispone ya de satélites cuyas imágenes, de uso civil, pueden competir con la fotografía aérea, ya que alcanzan hasta 1 m. de resolución espacial.

Conceptos generales de teledetección espacial

Se entiende por teledetección espacial la tecnología que consiste en la adquisición de infor-

mación de la superficie terrestre mediante detectores situados en plataformas espaciales (satélites) y el posterior análisis de dicha información por medio de procesado digital e interpretación de imágenes.

En teledetección espacial se puede utilizar tanto sistemas de teledetección pasiva como activa, aunque los sistemas activos tienen la extraordinaria ventaja, desde el punto de vista de la Arqueología, de su capacidad para penetrar, bajo ciertas condiciones (de longitud de onda, de ángulo de inclinación..) en el subsuelo terrestre.

Los distintos tipos y estado de coberturas terrestres (bosques, suelos cultivados, láminas de agua, suelos con escasa vegetación, nieve, etc) se distinguen por la energía que reflejan y emiten. Pero la atmósfera distorsiona esta radiación reflejada y emitida ya que absorbe energía en determinadas bandas del espectro, dispersa la radiación en otras bandas o incluso emite, como todo cuerpo "caliente", en el infrarrojo térmico. Todo ello convierte a la atmósfera en un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas regiones del espectro se hace prácticamente imposible la observación, por lo que, en teledetección espacial, sólo se construyen dispositivos en las regiones del espectro en las que la atmósfera es transparente (ventanas atmosféricas).

La energía reflejada o emitida por la superficie terrestre y recogida por el detector que porta el satélite es digitalizada y codificada como un número, para que pueda ser manipulada con un ordenador. Así se obtiene una imagen digital, una representación de la superficie de la Tierra mediante una matriz numérica, de tal manera que cada componente de esa matriz es un punto imagen o píxel y su valor numérico representa la intensidad de radiación recibida por el detector procedente de la correspondiente porción de superficie terrestre.

Esta representación posibilita que las imágenes puedan ser sometidas a diferentes algoritmos matemáticos, generando nuevas imágenes, con distintos tipos de información, según el proceso realizado. En este sentido, la teledetección constituye una técnica más de información territorial, que unida a otros datos cartográficos o

estadísticos, facilita un conocimiento más preciso de un determinado área y su sub-superficie, imprescindible en Arqueología.

Sistemas de teledetección espacial utilizados en Arqueología

Detectores fotográficos:

CORONA: Pertenece a la primera generación de satélites de foto-reconocimiento de los EEUU. Las imágenes se tomaron entre 1960 y 1972, y fueron desclasificadas y puestas a disposición del público a principios de los 90. Son imágenes fotográficas en blanco y negro con una resolución espacial desde 2 m. a 150 m.

KVR-1000: Serie de satélites soviéticos con detectores que pueden tomar fotografías con 1'5-3 m. ó 10 m. de resolución espacial. Estas fotografías son imágenes en blanco y negro. Las imágenes obtenidas con este sistema son desde el punto de vista arqueológico más útiles debido a su mejor resolución y a sus opciones de ortorrectificación y georreferenciación.

Los detectores fotográficos tienen, como mayores inconvenientes, su inoperatividad en la oscuridad y su incapacidad para traspasar nubes, niebla, bruma atmosférica, vegetación, superficie del suelo o agua. Su principal ventaja es su coste y su facilidad de implementación. Los que más se utilizan en investigación arqueológica son los que obtienen imágenes pancromáticas e infrarrojas.

Sistemas de toma de imágenes pasivos:

LANDSAT: Las imágenes de este sistema se obtienen mediante una serie de 5 satélites de los EEUU puestos en órbita en el periodo de 1972-84. Combinando estos satélites se tiene un detector multispectral ("Multispectral Sensor", MSS) con una resolución de 80 m., y un cartografiador temático ("Thematic Mapper", TM) con una resolución de 30 m. Estos pueden detectar las diferencias en la cubierta vegetal, tipos de vegetación, y tipos de terreno, diferencias que en Arqueología se pueden relacionar en un gran número de ocasiones con la posición de posibles yacimientos.

SPOT: Sistema francés compuesto por 3 satélites comerciales. Cada uno de ellos lleva un XS, escáner multispectral con una resolución

espacial de 20 m., y un detector pancromático con una resolución de 10 m. Este sistema puede estimar además la humedad. Este parámetro es de gran utilidad arqueológica, puesto que, por ejemplo, una antigua carretera contiene tierra más comprimida que su entorno, y, por tanto, menos húmeda. Así, midiendo la humedad del terreno se detectaría dicha carretera.

IKONOS: El IKONOS es el mejor sistema de teledetección pasivo disponible en la actualidad. Este satélite comercial tiene una cámara pancromática con una resolución de 1 m. y un detector multispectral con una resolución de 4 m. Proporciona, por tanto, imágenes muy precisas con las que se pueden confeccionar mapas muy detallados, imprescindibles en Arqueología. Su resolución espectral mejora espectacularmente todas las aplicaciones que tenían los anteriores detectores pasivos. Es sin duda el mejor y más útil sistema de detección pasivo del que puede disponer un arqueólogo.

Los sistemas de toma de imágenes pasivos proporcionan mucha más información y son mucho más útiles en Arqueología que los detectores fotográficos. Sin embargo, algunos de ellos tienen los mismos inconvenientes que estos últimos: no todos pueden atravesar las nubes, niebla, bruma atmosférica, vegetación, cubierta vegetal o agua.

Radares de imágenes (activos):

SIR-A/B/C: Detectores radar embarcados en trasbordador espacial. Una de sus capacidades es la penetración en la sub-superficie terrestre, a ciertas frecuencias, lo que le hace muy útil para investigadores dedicados a los recursos del subsuelo, y también para los arqueólogos. Como ejemplo, el SIR-A sondeó el Sahara descubriendo el viejo lecho de un río enterrado bajo la arena. Esto impulsó una excavación que halló útiles prehistóricos.

Satélites con sensores SAR: El SAR es el más avanzado de los radares de imágenes desarrollados hasta hoy. Entre los sistemas que incluyen un SAR destacan el JERS, el ERS, el SIR-C/X-SAR, y el EOS. Los tratamos más adelante.

La principal ventaja de estos detectores activos es su versatilidad ya que son instrumentos que pueden operar en cualquier condición cli-

mática e independientemente de la luz solar, por lo que trabajan todo-tiempo, día y noche.

Los últimos en llegar:

Los últimos sistemas de teledetección espacial desarrollados proporcionan herramientas aún más precisas y versátiles, de uso en una gran variedad de campos, incluyendo la Arqueología. Podemos destacar el Quickbird, Orbview-3, Orbview-4, Hyperion... , aunque todos ellos son sistemas pasivos, con las desventajas implícitas que ya hemos descrito.

TECNOLOGÍA DE TELEDETECCIÓN EMBARCADA EN AVIÓN USADA EN ARQUEOLOGÍA

Para ofrecer una más completa información, incluimos aquí algunos sistemas de teledetección embarcados en avión, no en satélite, que también han conseguido buenos resultados. Alguno de ellos ha sido la base de sistemas embarcados en satélite.

“Thermal Infrared Multispectral Scanner” (TIMS):

Escáner embarcado en avión que mide la radiación térmica infrarroja que emite el suelo, con precisión de 0.1 grados centígrados. Los píxeles de las imágenes obtenidas con los datos de un TIMS miden del orden de un par de metros de lado. Un éxito de este instrumento en investigación arqueológica fue la detección de antiguas carreteras Anasazi en Chaco Canyon, Nuevo Méjico (EEUU).

“Airborne-Oceanographic-Lidar” (ADI): Es un dispositivo láser que obtiene “perfiles” de la superficie terrestre. El haz de este láser emite pulsos hacia el terreno. La diferencia entre los ecos del pulso recibidos de su reflexión en la parte superior de la cubierta vegetal y en la superficie del terreno nos da información sobre la altura de la capa vegetal. Se puede usar igualmente para penetrar en medio subacuático: el lapso de tiempo entre la señal reflejada en la superficie del agua y en el fondo marino permite la determinación de la profundidad y de la topografía de dicho fondo, datos de vital importancia en Arqueología subacuática. Aún más, cuando el Lidar pasa por encima de un sendero erosionado que todavía afecta a la topografía, la hendidura de la tra-

yectoria del sendero es grabada por el haz del láser, proporcionando información de valor arqueológico.

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO SAR Y SUS APLICACIONES MÁS COMUNES

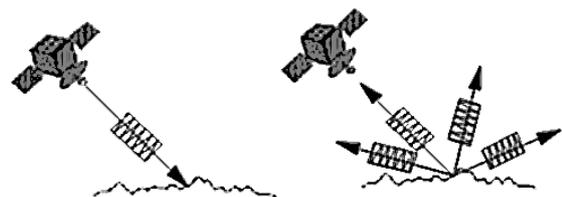
DESCRIPCIÓN

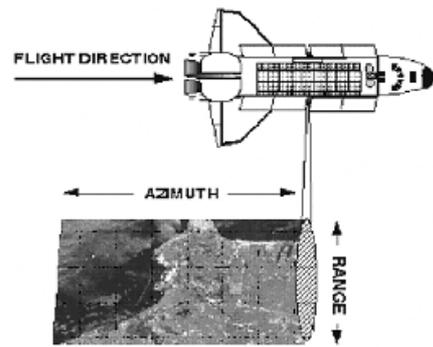
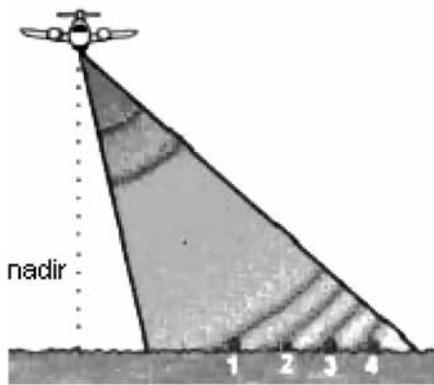
La más avanzada tecnología desarrollada en teledetección activa es el Radar de Apertura Sintética (SAR). Mantiene su formato de funcionamiento como radar de microondas, al que añade un procesado de la señal que permite una mejora espectacular de las posibilidades de un radar convencional en cuanto a resolución, entre otras cosas, por lo que se ha vuelto imprescindible en el cartografiado terrestre.

Un radar típico mide la intensidad y el tiempo que tarda en ir y volver la señal de microondas que emite la antena del radar y que ha sido reflejada por una superficie o un objeto distante. La antena del radar emite y recibe alternadamente pulsos a unas determinadas frecuencias de microondas y polarizaciones (la señal puede estar polarizada en un plano vertical u horizontal). Cada pulso no transmite en realidad una sola frecuencia, sino que tiene un ancho de banda determinado.

En la superficie terrestre, la energía del pulso emitido es dispersada en todas las direcciones, volviendo parte de ella hacia la antena. Esta dispersión devuelve al radar un débil eco que se recibe en la antena con una determinada polarización (horizontal o vertical, no necesariamente la misma que la del pulso emitido). Estos ecos se convierten en datos digitales y pasan a un grabador de datos para su posterior procesado y su presentación como imagen.

Con el tiempo de ida y vuelta de un pulso se calcula la distancia o rango del radar a la zona que reflejó dicho pulso. Para obtener una mejor





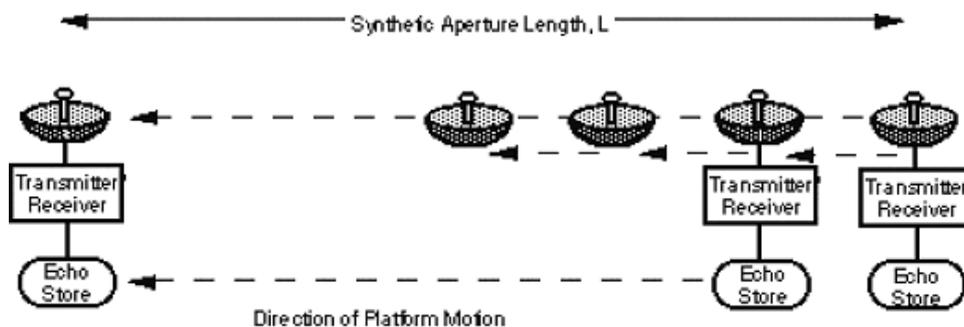
Construcción de una imagen radar usando el movimiento de la plataforma

resolución en la determinación de esa distancia, el SAR es un radar de visión lateral, ya que esta perspectiva lateral es la que hace que exista un retardo entre las zonas del pulso de retorno que están más cerca de la antena y las zonas del pulso de retorno que están más lejos, pudiendo discriminarse distintos puntos aún dentro del mismo pulso. En el ejemplo de la figura, los puntos 1, 2, 3 y 4 podrían ser discriminados y observados separadamente por el sistema, ya que, aun dentro del mismo pulso, llegarían al receptor del radar en momentos distintos. Este pequeñísimo retardo se mide con una gran precisión, las medidas son filtradas usando complejos algoritmos para eliminar el ruido y finalmente esta medida de tiempo se convierte en medida de distancia para cada punto de la zona de observación del radar: así obtenemos un mapa de la topografía de la superficie.

El radar de imágenes se mueve a lo largo de una determinada trayectoria de vuelo y el área iluminada por el radar se mueve con él a lo largo de la superficie terrestre, construyendo la imagen según se desplaza.

La resolución espacial del radar tiene dos componentes, la resolución en rango y la resolución en azimuth. El ancho de banda del pulso determina, entre otros factores (como la inclinación con la que el radar observa la zona), la resolución en la dirección perpendicular a la de vuelo (dirección en rango). A mayor ancho de banda, mejor resolución en esta dirección.

La longitud de la antena del radar determina la resolución de la imagen en la dirección de la trayectoria de vuelo (dirección azimuthal): cuanto más larga sea la antena, mejor es la resolución en esta dimensión. El término "Radar de Apertura Sintética" hace referencia a la técnica utilizada para sintetizar una antena muy larga a partir de una antena real más pequeña por medio de la combinación de las señales (ecos) recibidos por el radar mientras se mueve a lo largo de su trayectoria de vuelo. La "apertura" es la entrada usada para recopilar la energía reflejada que se empleará para formar la imagen (=antena). Una "apertura sintética" se construye



Construcción de una "apertura sintética"

moviendo una apertura real o antena una serie de posiciones a lo largo de la trayectoria de vuelo; así obtenemos una antena virtual de longitud mayor.

Mientras el radar se mueve, se transmite un pulso en cada posición; el eco pasa a través del receptor y se almacena. Debido a que el radar se está moviendo en relación al suelo, los ecos llegan al receptor con una desviación en frecuencia (Doppler), negativa cuando el radar se aproxima al objeto y positiva cuando se aleja de él. Comparando esta diferencia de frecuencia o “desplazamiento Doppler” con una frecuencia de referencia podemos “enfocar” muchos ecos en un único punto, incrementando así virtualmente la longitud de la antena que está tomando una imagen de ese punto en particular, y, por tanto, la resolución de la imagen.

Esta operación de enfocado comúnmente conocida como Procesado SAR, se realiza digitalmente en ordenadores. La dificultad en el procesado SAR está en ajustar correctamente la variación en frecuencia Doppler para cada punto de la imagen: esto requiere un conocimiento muy exacto del movimiento relativo entre la plataforma de vuelo y los objetos cuya imagen se quiere obtener.

El SAR es hoy en día una técnica ampliamente probada que se usa para generar imágenes radar en las que se puede discernir pequeños detalles. Los primeros prototipos se desarrollaron en los años 50. El primer sistema radar de imágenes, embarcado en avión, que aún no utilizaba la síntesis de apertura, fue el SLAR (“Side-looking airborne radar”), y se usó para mejorar la resolución de los radares de reconocimiento militar utilizando la observación lateral del terreno; sin embargo, estaban limitados por el tamaño físico de la antena. Para solventar esta dificultad es para lo que se desarrolló la técnica SAR, que ahora se utiliza en muchos países para aplicaciones civiles.

El SAR proporciona capacidades únicas como herramienta para la obtención de imágenes. Debido a que tiene su propio sistema de iluminación (los pulsos del radar), puede trabajar

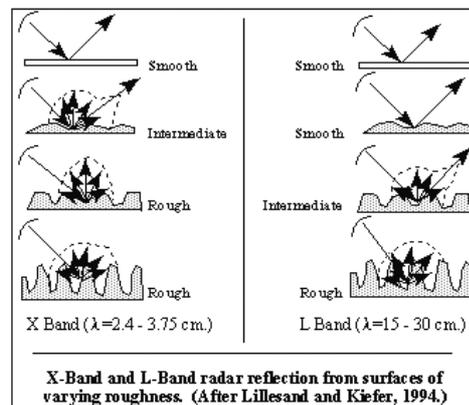
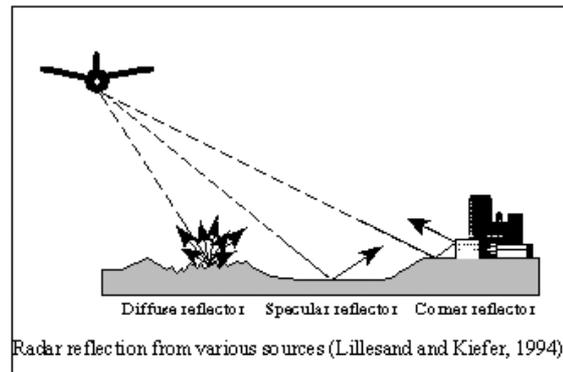
en cualquier momento del día o de la noche, independientemente de la luz solar. Y puesto que las longitudes de onda que utiliza este radar son mucho más largas que las de la radiación visible o infrarroja, el SAR puede también “ver” a través de nubes y polvo etc, circunstancia imposible para los instrumentos que trabajan en el rango visible o infrarrojo.

LA IMAGEN RADAR

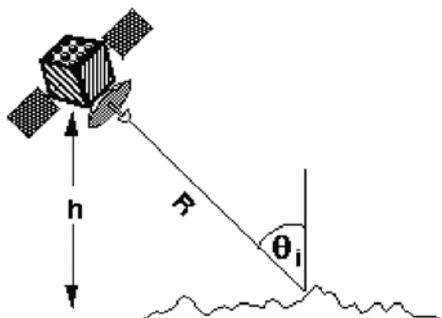
Como ya hemos visto, las imágenes radar están compuestas de una serie de puntos o “píxeles”. Cada “píxel” de la imagen radar representa la intensidad de energía reflejada que el radar ha recogido de esa zona del suelo: las zonas más oscuras de la imagen indican baja energía del eco que vuelve en la dirección del radar; las más brillantes, una gran energía de retorno en esa misma dirección.

La intensidad de la reflexión recibida en el radar, procedente de un área-objetivo, varía según una amplia gama de factores:

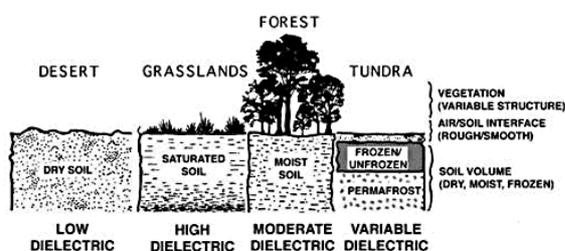
- geometría y rugosidad de la superficie que refleja la radiación dentro del área-objetivo:



- ángulo de observación del radar (θ_i):



- contenido en humedad de dicha área (constante dieléctrica compleja):

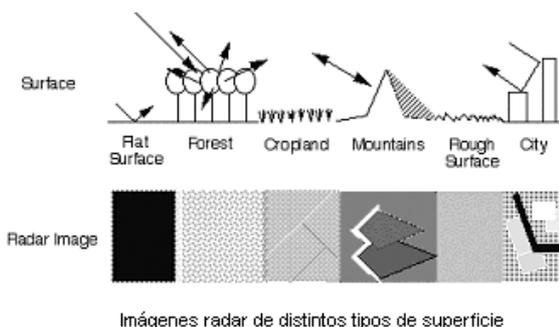


- longitud de onda utilizada.
- polarización de los pulsos emitidos por el radar,

En general:

- Las superficies planas que reflejan poca o ninguna radiación electromagnética en dirección al radar (p. ej., lagos helados o manchas de aceite en el océano) aparecerán oscuras en las imágenes.
- La vegetación es habitualmente moderadamente rugosa en la escala de la mayoría de las longitudes de onda de los radares, y aparece en grises en una imagen radar.
- Las superficies inclinadas hacia el radar tendrán una reflexión mayor que las superficies de pendiente inversa y aparecerán más brillantes en la imagen radar.
- Algunas áreas no iluminadas por el radar, como el lado oculto al radar de las montañas, están en sombra, y aparecerán oscuras.

- Cuando las calles o edificios de una ciudad están alineados de modo que los pulsos emitidos por el radar reboten en las calles y después reboten de nuevo en los edificios (doble-reflexión), volviendo directamente hacia el radar, aparecerán muy brillantes en las imágenes radar.
- Carreteras y autopistas son superficies planas, así que aparecerán oscuras.
- Los edificios que no estén alineados de forma que los pulsos no se reflejen directamente hacia el radar aparecerán en gris claro, como las superficies muy rugosas.
- Los objetos más húmedos aparecerán brillantes, y los más secos oscuros. La excepción a esto son las masas de agua en calma, que actúan como superficies planas y reflejan los pulsos lejos del radar.



La reflexión varía según la polarización de la señal que se emplee. Los SAR pueden configurarse para emitir pulsos en polarización horizontal (H) o vertical (V), y recibir también en H o V, lo que da lugar a cuatro combinaciones posibles: HH (horizontal emitida, horizontal recibida), VV, HV o VH. Además, pueden medir la fase del pulso recibido, y por tanto medir la diferencia de fase entre los ecos de las señales HH y VV. Esta diferencia se traduce en la diferencia entre tiempos ida y vuelta empleados por cada una de estas señales y es habitualmente el resultado de las características estructurales de los objetos reflectores.

Distintos ángulos de observación (o incidencia) proporcionan reflexiones distintas. Este ángulo es el que forma el eje del haz de radiación emitido por el radar con la superficie terrestre (?). Pequeños ángulos de incidencia

(emisión perpendicular a la superficie) producen una gran reflexión; ésta disminuye cuando el ángulo de incidencia aumenta. Como contrapartida, cuanto mayor sea el ángulo de incidencia, el sistema tendrá mejor resolución espacial en rango.

APLICACIONES SAR

El SAR para satélite más avanzado construido hasta ese momento para aplicaciones civiles fue embarcado en un trasbordador espacial en abril y octubre de 1994: es el "Spaceborne Imaging Radar-C and X-Band Synthetic Aperture Radar" (SIR-C/X-SAR) que ha permitido la exploración del planeta de un modo hasta ese momento impensable. Los datos del SIR-C/X-SAR y otros sistemas SAR internacionales como los satélites de teledetección de la Agencia Espacial Europea ERS-1/2, el satélite para recursos terrestres japonés JERS-1, y el canadiense RADARSAT se utilizan en la actualidad para estudios de ecología, hidrología, oceanografía, geología, capas de hielo y glaciares. Estos detectores no sólo han proporcionado a los científicos una ingente cantidad de información sobre el siempre cambiante medio ambiente terrestre, sino que han abierto nuevas áreas de aplicación potencial como la Arqueología y la planetología comparada.

Las aplicaciones ecológicas del SAR incluyen la clasificación de la cubierta del suelo, la medida de la biomasa en zonas de vegetación, y la delimitación de áreas inundadas. Estas medidas son esenciales para nuestra comprensión del incremento del dióxido de carbono y del calentamiento global terrestre, ya que se necesita comparar cuánto carbono está siendo consumido por los bosques con cuánto está siendo liberado a la atmósfera a través de desmontes y combustión de fueles fósiles. Los datos del SAR también se han usado para evaluar el riesgo de malaria en regiones tropicales, mediante la información espacial y temporal de la distribución y el estado de anegamiento de los lugares de reproducción del "anopheles". Entre las aplicaciones hidrológicas están la medida de la nieve y de la humedad del suelo, que nos ayudan a conocer mejor dónde se almacena la humedad y cómo se redistribuye. Esto es crítico para el correcto modelado del clima global y

para la gestión de los recursos de agua. También se pueden obtener previsiones del tiempo a corto plazo más rigurosas utilizando información real de la humedad del suelo en vez de valores estimados.

Riesgos naturales

El SAR ha resultado ser un instrumento de gran utilidad en la predicción y seguimiento de desastres naturales. Con este fin, los datos SAR son utilizados por los geólogos en estudios de climas pasados y riesgos volcánicos y de terremotos, entre otros.

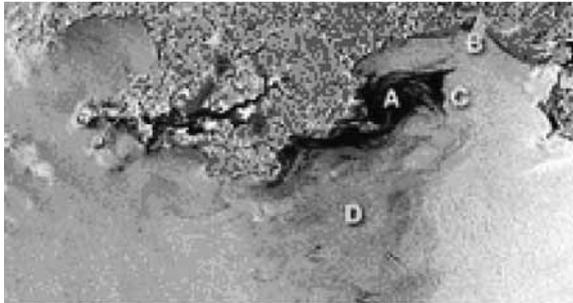


El SIR-C/X-SAR ha obtenido datos del subsuelo del desierto del Sahara que muestran canales entrecruzados y paleodrenajes. La existencia de canales de un río hasta ahora oculto indica que parte del Sahara ha experimentado un cambio climático y ha pasado de ser un área de corrientes de agua a un árido desierto. La figura muestra un ejemplo de un canal de un río, enterrado bajo miles de años de arena traída por el viento, en una región del norte del Sahara cerca del oasis de Kufra, en el sureste de Libia.

El SAR se utiliza para el estudio de volcanes que pueden ser demasiado peligrosos o inacce-

sibles usando otros medios. La capacidad del radar para operar en cualquier condición climática permite estudiar volcanes en regiones tropicales u otras áreas habitualmente cubiertas de nubes. El radar también atraviesa las nubes de cenizas volcánicas, permitiendo así el estudio de los cambios en su superficie durante las erupciones. El SIR-C/X-SAR tomó imágenes de 13 volcanes de gran peligrosidad. Uno de ellos es el Taal (Filipinas), activo con frecuencia, alrededor del que viven, dentro de un radio de 20 km. de su cráter, varios millones de personas.

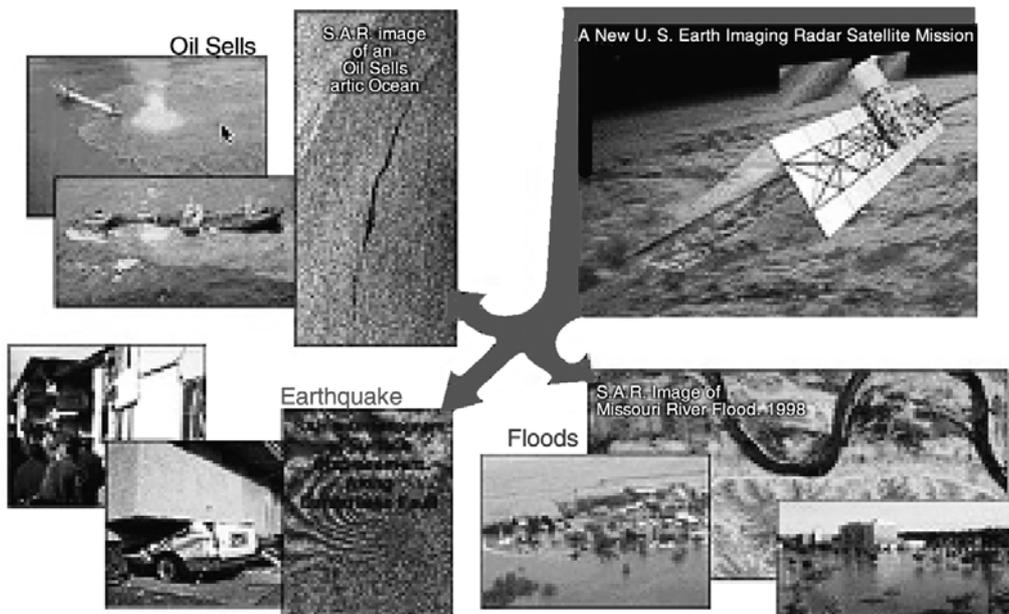
El SAR también detecta con gran precisión manchas de vertidos de combustibles en el océano, permitiendo su seguimiento y el control de vertidos tóxicos en general.

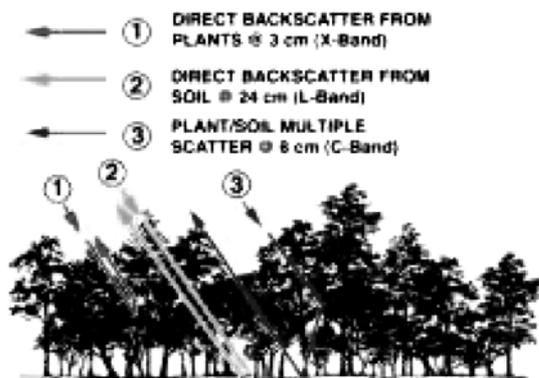


La investigación de volcanes, terremotos y otras fuentes de riesgos naturales, se beneficia enormemente de una capacidad especial del SAR llamada interferometría, en la que dos medidas obtenidas a ángulos ligeramente diferentes se combinan para conseguir una medida de la altura de la superficie. Combinando un par de datos interferométricos con una tercera medida, obtenida en un instante distinto, permite medir pequeños cambios en la superficie de la Tierra a lo largo del tiempo. Esta técnica, conocida como interferometría diferencial, tiene un enorme potencial para incluir cambios en los mapas topográficos del orden de un centímetro.

Medida de la biomasa

La señal de un radar de corta longitud de onda (siempre dentro del rango de las microondas) (? 3 cm), se refleja en las cimas de los árboles. La de un radar de longitud de onda más larga (? 24 cm) normalmente llega hasta el suelo, reflejándose allí. Longitudes de onda intermedias experimentan a veces fenómenos de reflexión múltiple desde la cubierta vegetal, las ramas y el suelo. Recogiendo ecos de una señal con múltiples longitudes de onda, se puede obtener la imagen radar de una zona





SIR-CX-SAR
MAMMOTH, CALIFORNIA
LAND COVER MAP
APRIL 13 1994

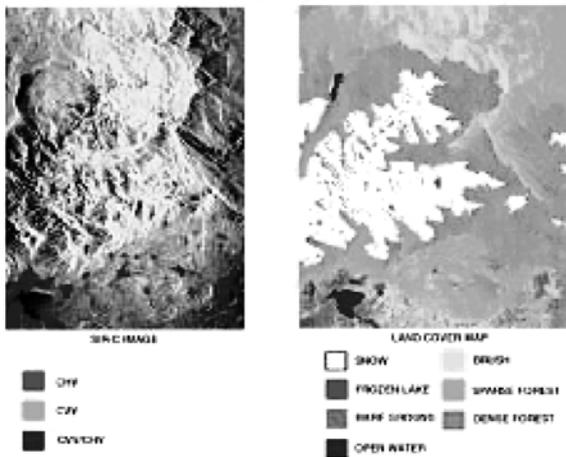


Imagen radar de Yellowstone

boscosa para conseguir información sobre la estructura de la cubierta vegetal y estimar la biomasa del suelo.

Oceanografía

Los oceanógrafos utilizan los datos SAR en el estudio de las olas internas y de superficie, la interacción olas/corrientes y el movimiento del hielo marino, para entender mejor cómo el océano suaviza el clima terrestre.

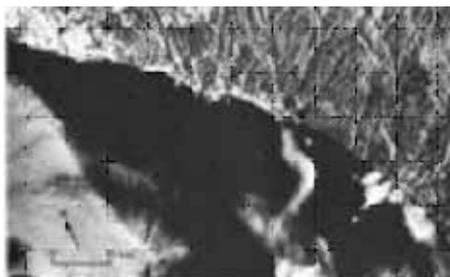
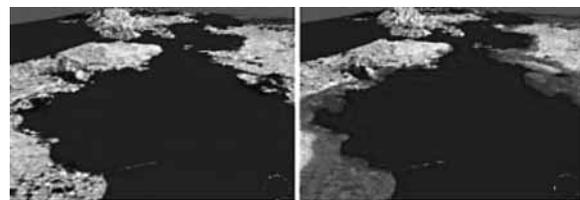


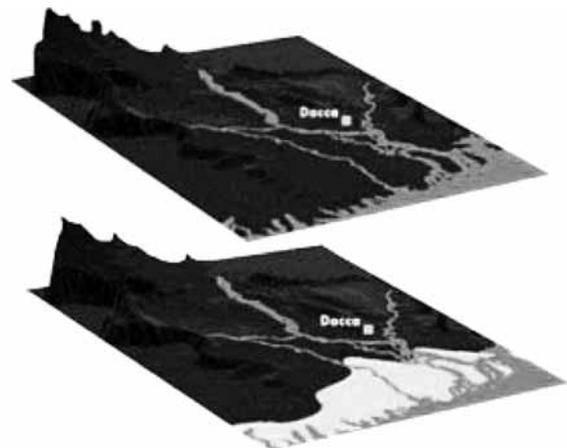
Imagen Seasat de oleaje en la costa de California

Hielo

Los mapas topográficos de alta resolución y el seguimiento de los cambios topográficos que proporciona la interferometría SAR son muy valiosos para el estudio de las capas de hielo y los glaciares. Más del 75% del agua del planeta está encerrada en estas reservas heladas. Los cambios en el volumen de hielo modulan el nivel del mar, incluso a corto plazo (unos pocos años). Esto es hoy en día más importante que nunca, pues el aumento del nivel del mar afecta a las zonas costeras, áreas de gran desarrollo económico en general.



Mapa del aumento del nivel del mar en San Francisco (EEUU)



Mapa del aumento del nivel del mar en Bangladesh

Mientras la retirada general de los glaciares se cree que es responsable de entre un 25% y un 50% del actual aumento en 2 milímetros por año del nivel del mar, la mayor parte del resto seguramente sea el resultado de desequilibrios aún no descubiertos en las grandes capas de hielo polares. Con los datos de interferometría SAR es posible monitorizar la topografía y velocidad de glaciares y capas de hielo, parámetros críticos para comprender el balance de masa glacial.

Planetología

Los datos SAR han probado también su utilidad en estudios de planetología comparada.

Los datos radar de Venus obtenidos por la astronave Magallanes han proporcionado una vista detallada de un planeta que se ha formado mediante muchos de los mismos procesos que afectan a la Tierra. La comparación entre características tectónicas y volcánicas de Venus y de la Tierra permiten entender mejor los principios físicos básicos que gobiernan procesos tales como la aparición de montañas, emplazamientos de flujos de lava y cráteres producidos por impactos.

Varias imágenes de estos cráteres en la tierra se tomaron durante la misión del SIR-C/X-SAR, incluido uno de los cráteres enterrados del Chicxulub en la península del Yucatán, México. Este cráter se formó por el impacto de un asteroide o un cometa contra la Tierra hace más de 65 millones de años, y se piensa que está relacionado con la extinción de los dinosaurios. El cráter, de 180 a 300 kilómetros, está enterrado por 300 a 1.000 metros de caliza. Aunque los patrones de fractura y la hidrología de esta región húmeda están controlados por la estructura del cráter enterrado, puede ser posible el uso de los datos SAR como ayuda para determinar el tamaño del cráter, algo que aún es fuente de un considerable debate.

APLICACIÓN DEL SAR A LA ARQUEOLOGÍA

Un importante área emergente para su estudio con SAR es la Arqueología. Las características del sistema SAR son de gran utilidad en este campo, pues permiten la operación en cualquier momento y clima sobre zonas que pueden no ser accesibles fácilmente desde el suelo, localizando con seguridad objetivos sin tener que utilizar técnicas intrusivas sobre el terreno.



A continuación se presentan una serie de resultados obtenidos con SAR embarcado en satélite o en avión en su uso arqueológico. Estas imágenes hablan por sí solas de la utilidad del SAR en la localización y prospección no intrusiva de yacimientos arqueológicos.

RADARSAT

El RADARSAT es un satélite avanzado de observación terrestre desarrollado por Canadá para el seguimiento del cambio medio ambiental. Fue lanzado en noviembre de 1995. El RADARSAT utiliza un SAR en banda C, con polarización HH, e incluye una serie de ángulos de observación posibles que permiten cumplir en la observación terrestre un amplio rango de requisitos, observar una gran cantidad de condiciones del terreno y cubrir un importante número de aplicaciones.

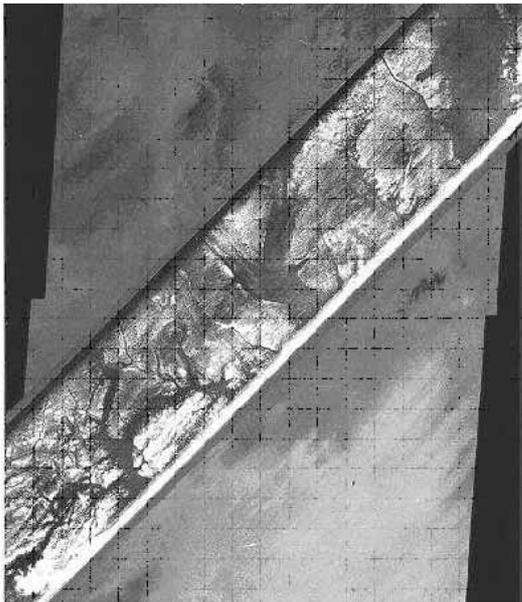


Pirámides de Gizeh. Construidas entre c. 2500 y 2000 a.C., las tres pirámides y los complejos asociados de pirámides subsidiarias, templos y mastabas se ven con facilidad. La más al norte es la Gran Pirámide de Khufu, de 147 m. de alto, que proyecta una gran sombra hacia el oeste. Al este y al oeste podemos ver complejos de mastabas que pertenecieron a los parientes cercanos y oficiales del faraón. Al sur de la Gran Pirámide están los complejos piramidales de Khefren (144 m. de alto) y Menkaure (66 m.

de alto). Cada una tiene un templo mortuorio al este y muros en los lados norte, oeste y sur. Desde la pirámide de Menkaure, dirigiéndose hacia el este, se observa la calzada por la que el cadáver real pudo viajar desde un templo del valle situado al este hasta la pirámide. Una calzada similar sale de la pirámide de Khefre. Imagen tomada en el 2002.

SIR A

Una banda de 50 km de ancho tomada con el SAR del “Shuttle Imaging Radar” (SIR-A) sobre el este del Sahara se muestra aquí superpuesta a una imagen LANDSAT (sistema pasivo) del mismo área. El radar atravesó entre 1 y 4 m. la arena del desierto y mostró sistemas de ríos prehistóricos en la sub-superficie que no son visibles en la imagen LANDSAT.

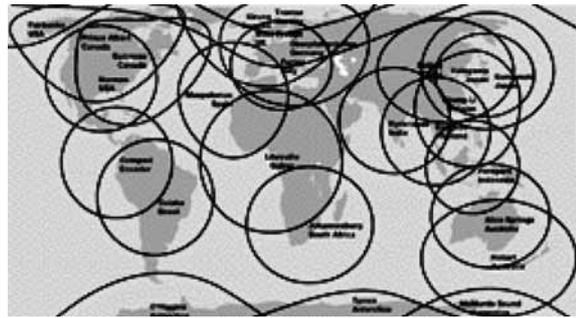


Las excavaciones sacaron a la luz útiles humanos que datan del Paleolítico junto con conchas de “*Zootecus insularis*”, un caracol de tierra indicador de la existencia de un antiguo suelo húmedo y de vegetación.

ERS

Dentro del programa ERS se han lanzado dos satélites distintos, el ERS-1 y el ERS-2.

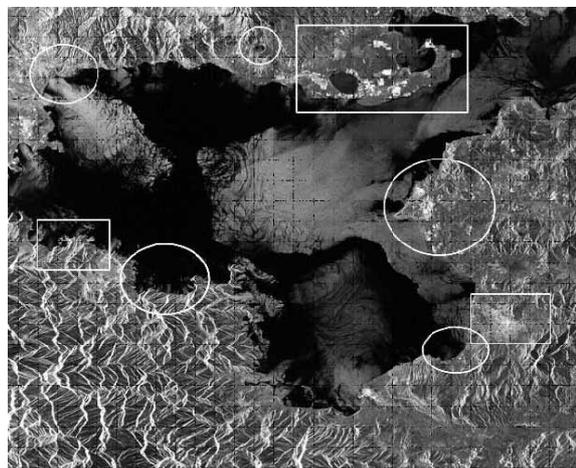
El ERS-1, satélite puesto en órbita en 1991, fue diseñado y construido por la Agencia Espa-



cial Europea (ESA) para el estudio de los recursos naturales terrestres desde una órbita polar. Fue retirado en marzo del 2000.

Las imágenes SAR de alta resolución del satélite ERS-1 cubrieron buena parte de la superficie terrestre y los océanos. Las imágenes fotográficas obtenidas a partir de sus datos cubren un área de 100 x 100 km., con una resolución espacial de entre 25 y 30 m. y un tamaño de píxel de 12'5 x 12'5 m. Las imágenes están calibradas, y corregidas las deformaciones debidas al relieve del terreno. Cada punto de una imagen se tomaba varias veces (“multi-look”) por la antena SAR, que obtenía una media de las diferentes vistas. Los datos SAR obtenidos en Modo Imagen son recibidos por estaciones terrenas repartidas por todo el mundo. En el mapa anexo aparecen dichas estaciones y su cobertura geográfica.

El ERS-2 fue lanzado en 1995, y es similar a su antecesor, volando también en órbita polar, pero incluye (además del SAR) otros instrumentos de medida de los que el primero no disponía.



La imagen anexa fue tomada por el ERS-2 en marzo de 2002, y pertenece a la zona del lago Van, en Turquía. Este lago tiene un origen volcánico: en algún momento del Pleistoceno (hace entre 2.000.000 y 10.000 años), fluyeron ríos de lava desde los volcanes Nemrut y Sipan extendiéndose unos 60 km. hacia el suroeste, bloqueando el drenaje del río Murat y transformando como consecuencia la depresión en la cuenca de un lago sin salida.

Centro-derecha: el yacimiento arqueológico de Van, de casi 3000 años de antigüedad. A la izquierda, en la costa oeste: Ahlat y sus ruinas. En la superficie del lago: el SAR ha detectado la rugosidad producida por los fríos vientos nocturnos que soplan desde los valles que rodean el lago.

Estos datos pueden obtenerse de los archivos de la ESA, a través del consorcio Eurimage vía el NPOC. Asimismo, los usuarios pueden solicitar adquisiciones futuras programadas, ya que la operación del satélite desde las estaciones terrenas se planea con tres a cinco semanas de antelación.

El SIR-C/X-SAR

El SIR-C/X-SAR es un sistema de radar de imágenes lanzado en trasbordador espacial de la NASA en 1994.

Su capacidad de multi-polarización produce información más detallada de la estructura geométrica de la superficie, la cubierta vegetal, y discontinuidades superficiales, que la simple intensidad de la imagen. Debido a que la reflexión radar está influida principalmente por objetos de tamaño comparable a la longitud de onda del radar, su capacidad de multi-frecuencia proporciona información sobre la superficie de la Tierra en un rango amplio de escalas no discernibles con experimentos anteriores hechos con una única longitud de onda.

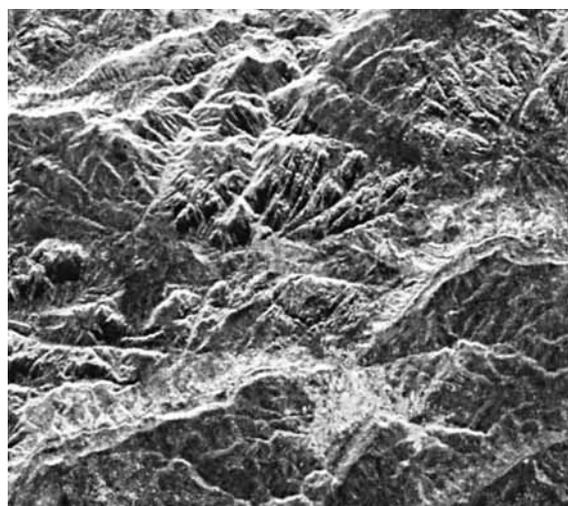
Desde los vuelos de 1994, más de una docena de países están utilizando los datos del SIR-C/X-SAR en Arqueología, uso del suelo y gestión de recursos. Las imágenes radar generadas a partir de sus datos sirven como ayuda para la comprensión de algunos de los procesos que afectan al medio ambiente de la Tierra, como la deforestación del Amazonas o la desertificación

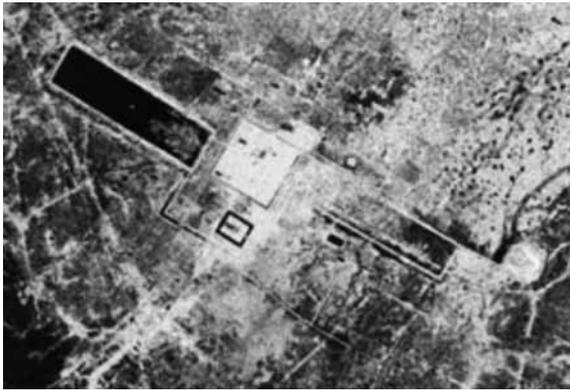
del sur del Sahara, proporcionando información única para estudiar la salud del planeta y su biodiversidad, junto a datos vitales para la evaluación de recursos y riesgos naturales.

Además, los datos interferométricos del SIR-C/X-SAR se emplean en cartografiado topográfico y seguimiento de los cambios de la superficie relacionados con tectónica, vulcanismo, movimiento del hielo en los glaciares y Arqueología. Se pueden esperar nuevos descubrimientos de este rico y variado conjunto de datos durante muchos años más.

Los datos recogidos por el SIR-C/X-SAR se procesan y convierten en imágenes con una resolución seleccionable de 10 a 50 m., dependiendo de la geometría y la configuración de la toma de datos. La gran antena del radar puede cambiar su enfoque electrónicamente, sin tener que moverse físicamente, en el rango de +/-23 grados desde la posición nominal de 40 grados desde el nadir. Esta característica permite adquirir imágenes sobre un rango más grande de ángulos de incidencia que otros instrumentos. El ancho del área cartografiada por el radar varía de 15 a 90 km., dependiendo de cómo está operando el radar y de la dirección a la que están apuntando los haces de la antena.

El SIR-C/X-SAR es un proyecto conjunto de la NASA, la Agencia Espacial Alemana (DARA) y la Agencia Espacial Italiana (ASI). Es el precursor del sistema radar de imágenes Earth Observing System (EOS).

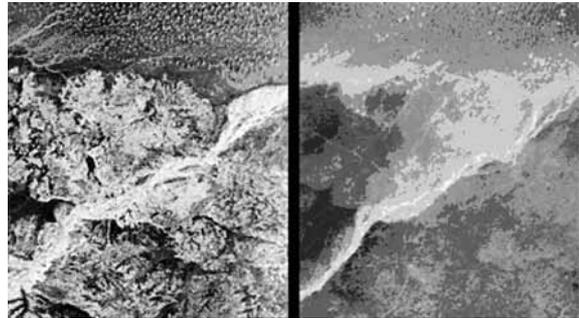




Esta imagen radar muestra la región que rodea Petra, Jordania. La línea brillante que atraviesa el centro de la imagen es un límite geológico entre la sierra de piedra caliza de Jebel Shabal (área púrpura en la imagen) y la estepa de arenisca profundamente erosionada (área verde y naranja). Durante miles de años han brotado manantiales a lo largo de este límite que han provisto de agua a los ocupantes de lo que hoy es uno de los más conocidos yacimientos arqueológicos del mundo. El área de color verde más brillante por encima de la línea, cerca del centro de la imagen, marca la zona central de la antigua ciudad caravanera de Petra, construida en los cañones de arenisca por los nabateos. La moderna ciudad de Wadi Musa se ve en la zona por debajo de esa línea. Esta imagen se obtuvo con el SIR-C/X-SAR embarcado en el transbordador espacial Endeavour en abril de 1994. Los colores de la imagen se han impuesto artificialmente para distinguir aquí la frecuencia y polarización usada: el rojo es banda L, HH; el verde es banda L, HV; el azul es banda C, HH.

La ciudad de Angkor, Camboya. Imagen del radar de imágenes SIR-C/X-SAR tomada desde el transbordador espacial Endeavour, en septiembre de 1994. La ciudad alberga un antiguo com-

plejo de más de 60 templos que datan del siglo IX. Angkor Wat es el cuadrado brillante justo a la izquierda del centro de la imagen. Está rodeado por un embalse que aparece en la imagen como una gruesa línea negra. El brillante cuadrado mayor por encima de Angkor Wat es otro complejo templario llamado Angkor Thom. Los arqueólogos que estudiaron la imagen creen que el área azul púrpura que aparece ligeramente al norte de Angkor Thom pueden ser estructuras todavía por descubrir.



Esta pareja de imágenes tomadas desde el espacio muestran la región de la mítica ciudad de Ubar, en el sur de Omán, en la península arábiga, descubierta en 1992 con la ayuda de datos de teledetección SAR. Desde que datos como estos fueron clave para el reconocimiento de un emplazamiento como Ubar, han pasado a ser de especial interés en esta zona y en la actualidad están siendo contrastados sobre el terreno para verificar su importancia arqueológica. Los arqueólogos piensan que Ubar existió desde el 2800 a.C. al 300 d.C., aproximadamente y que fue un remoto puesto avanzado donde las caravanas se reunían para el transporte del incienso a través del desierto.

A la izquierda vemos una imagen radar de esta región, tomada por el SIR-C/X-SAR en agosto de 1995. La imagen cubre un área de 50 x 100 km. Igual que hemos visto en la imagen anterior, el rojo es banda L, HH; el verde es banda L, HV y el azul es banda C, HH. El emplazamiento real de la fortaleza de Ubar es demasiado pequeño para ser detectado en la imagen; sin embargo, los caminos que conducían al lugar, y caminos de los alrededores, aparecen como líneas marcadas, aunque difusas. A la derecha una imagen óptica mejorada de la

misma región tomada por los astronautas del trasbordador, en la que lo que vemos es la capa de nubes, que impide una visión adecuada de la zona.

Las imágenes radar y las investigaciones de campo que se llevan a cabo ayudarán a arrojar luz sobre una temprana civilización de la que se conoce muy poco en una zona poco accesible.

EOS

El “Earth Observing System” (EOS) es el programa principal de la “Earth Science Enterprise” (ESE) de la NASA. Se compone de una serie de satélites en órbita polar y baja inclinación para observación global a largo plazo de la superficie terrestre, biosfera, atmósfera y océanos. El EOS proporciona un mejor conocimiento de la Tierra como sistema integrado.

Dentro de este programa, se lanzó, en diciembre de 1999, el primer satélite EOS, llamado Terra.

La banda de longitudes de onda más larga que posee el EOS SAR es especialmente útil para penetrar en las capas de arena de regiones muy áridas y desvelar depósitos aluviales, así como otras estructuras sub-superficiales (hasta profundidades de 2 a 6 m.). Imágenes de regiones áridas obtenidas con este canal en banda L del EOS SAR proporcionan pistas importantes para conocer los cambios climáticos del Cenozoico, la desertización, las aguas subterráneas y otros recursos minerales.

Con este instrumento se pueden tomar datos en un amplio rango de ángulos de incidencia (entre 15° y 60°) y para distintas polarizaciones (HH,VV,HV,VH). Tanto las polarizaciones HH como VV proporcionan imágenes SAR muy útiles para la mayoría de los terrenos. Sin embargo, la polarización HH es ligeramente

mejor que la VV, simplemente por su mejor habilidad para penetrar en delgadas, y de pocas pérdidas, capas de arena, nieve y hielo, y la preferencia, en general, de la naturaleza a las superficies predominantemente horizontales a la escala de la longitud de onda. Usaremos de todos modos tanto HH como VV, junto a HV y VH, para obtener la mayor cantidad de información posible.

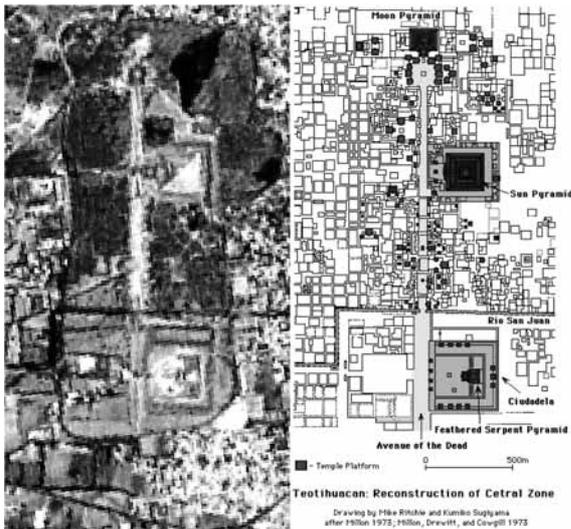
La diferencia entre la fase eléctrica de los ecos HH y VV del radar puede ser grabada y procesada también en forma de imagen. Estas imágenes de diferencia de fase son muy útiles, al ser muy sensibles a la morfología de la superficie del terreno y a la cubierta de vegetación, así como a las características de la superficie oceánica.

Combinando todos los datos obtenidos con las distintas configuraciones posibles del sistema se puede realizar un cartografiado geológico de gran precisión, con lo que se puede discriminar mejor distintos tipos de elementos de valor arqueológico, manufacturados o no, que se encuentren en la superficie o sub-superficie terrestre.

Uno de los instrumentos del satélite Terra es el ASTER (“Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer”). Con este instrumento se han tomado imágenes del área de México Central, como ésta de Teotihuacán.

La primera gran cultura del México central del periodo clásico tuvo su capital en Teotihuacán, la “Ciudad de los Dioses”, situada unos 50 km. al noreste de México D.C. En su momento de mayor esplendor, alrededor del siglo IV, fue una populosa metrópolis de más de 100.000 habitantes. La ciudad se construyó en forma de retícula, con la Avenida de los Muertos formando el principal eje norte-sur. Monumentales pirámi-

Frecuencia	Polarización	Ángulos en azimut	Ángulos de incidencia	Resolución	Ancho de franja	Tiempo de adquisición de datos	Cobertura estéreo	Inclinación orbital
P, L (1) C, X (2)	HH, HV (1) VV (2)	2 no ortogonales mínimo	Variable 15°-60°	15-20 metros	50-100 km.	Estación más seca y más húmeda	Sí, <2%	Casi polar
Parámetros SAR para cartografiado de la sub-superficie terrestre (regiones áridas). (1, 2, prioridades)								



des ceremoniales, incluyendo las pirámides del Sol, de la Luna y de la Serpiente Emplumada se alinean en la avenida. Teotihuacán extendió su influencia a lo largo de toda Mesoamérica hasta que en el siglo IX la ciudad fue abandonada.

Esta imagen, tomada con el ASTER en marzo de 2002, cubre un área de 5.1 x 9.4 km.

SAR montado en avión: AIRSAR

En paralelo al desarrollo de radares de imágenes para espacio, NASA/JPL ha construido y explotado una serie de sistemas de radares de imágenes a bordo de avión. En la actualidad, NASA/JPL mantienen y explotan un sistema SAR montado en avión, conocido como “Airborne Synthetic Aperture Radar” (AIRSAR), (que puede operar con el SAR topográfico TOPSAR), embarcado en un reactor de la NASA. En uno de sus modos de operación, este sistema es capaz de recopilar simultáneamente las cuatro polarizaciones (HH, HV, VH y VV) a tres frecuencias: banda L, banda C y banda P. En otro modo de operación, el sistema AIRSAR/TOPSAR recopila las cuatro polarizaciones (HH, HV, VH y VV) a dos frecuencias (banda L y banda P), mientras que opera como interferómetro en banda C generando datos topográficos de altura del terreno.

El tamaño típico de imagen de los productos del AIRSAR/TOPSAR es de 12 km.x12 km., con 10 m. de resolución en ambas dimensiones. Los productos de cartografía topográfica generados por el sistema TOPSAR tiene una precisión en altura de 1 m. en zonas relativamente planas, y de 5 m. en zonas montañosas. El AIR-

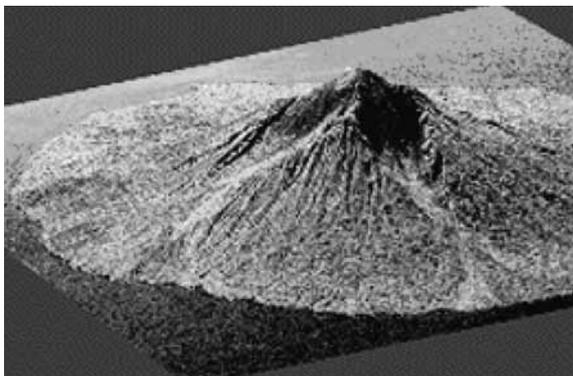
SAR también se utiliza para probar tecnología para misiones de radar embarcado en satélite. Su primer vuelo fue en 1988 y continúa realizando al menos una campaña cada año, en cualquier lugar del mundo que se requiera.

Una de las misiones llevadas a cabo por el AIRSAR fue la recogida de imágenes de la región volcánica más activa del mundo, los países de la costa del Pacífico, desde 1996. Entre los objetivos científicos de esta misión están la recogida de datos atmosféricos y geográficos para análisis de costas y para oceanografía, silvicultura, geología, hidrología, Arqueología y vulcanología: determinar la relación entre cambios en el entorno del bosque y producción de gases de efecto invernadero; reconocimiento de yacimientos arqueológicos; medida del crecimiento urbano.... Como ya hemos visto, la capacidad del SAR para adquirir datos bajo cualquier condición climática le hace particularmente valioso en las áreas tropicales de la costa del Pacífico, que están habitualmente cubiertas de nubes. Las longitudes de onda más largas de este instrumento pueden penetrar la cubierta vegetal, proporcionando datos de diferentes niveles del bosque. Además, tras el procesado de datos se pueden obtener modelos de elevación digitales de alta resolución, mapas topográficos en tres dimensiones de la superficie. Estos mapas, además de como soporte arqueológico, sirven aquí también para el desarrollo de planes que respondan a riesgos naturales tales como tifones, terremotos y erupciones volcánicas, que afectan a la mayoría de los países de la costa del Pacífico.

El yacimiento prehistórico de las Marquesas: lugar tribal para banquetes y fiestas (tohua) del valle Ta’aoa (isla Hiva Oa) en la Polinesia francesa fue documentado por este medio por la misión AIRSAR de 1996.



Esta vista perspectiva tridimensional de la isla volcánica de Manam, Papua Nueva Guinea, fue obtenida por el sistema AIRSAR de la NASA en su modo topográfico (TOPSAR) en noviembre de 1996.



CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo hemos visto la posibilidad que nos ofrecen las técnicas de teledetección en general para el estudio más detallado de áreas geográficas de interés, tanto en su superficie como en la zona subsuperficial del terreno. Esto constituye una herramienta importante para un arqueólogo, sobre todo en áreas que no resultan de fácil acceso desde tierra o en las que no se tiene una idea muy clara de si puede existir algo de interés o no, localizando yacimientos desde el aire o desde el espacio. Del mismo modo, mediante la teledetección se pueden cartografiar emplazamientos arqueológicos ya conocidos, obteniendo información adicional de ellos de forma no destructiva.

Entre los instrumentos de teledetección más avanzados y cuyo uso arqueológico es más interesante y cada vez más extendido, está el Radar de Apertura Sintética (SAR), del que hemos realizado una descripción como sistema y ofrecido resultados obtenidos por él en el campo de la Arqueología.

En general, las imágenes arqueológicas más útiles son las de mejor resolución y en particular aquellas que dan información de las diferentes características de los elementos que aparecen en la zona observada, de forma que podamos discriminar así posibles entes de interés arqueológico en su entorno.

Las características del SAR lo hacen especialmente útil en un número de áreas de conocimiento frente al resto de los instrumentos de teledetección; también en Arqueología. Las que más benefician al arqueólogo son:

- Capacidad para atravesar nubes, vegetación, superficie del terreno;
- Capacidad para operar independientemente de la luz solar, día y noche.
- Excelente resolución debido a su técnica de procesado de una antena virtual de gran tamaño a partir de una antena física de pequeña dimensión (apta para ser embarcada en avión o satélite) (procesado SAR)
- Posibilidad de ser utilizado tanto desde avión como desde satélite.
- A partir de sus datos se obtienen imágenes digitales, que se pueden tratar mediante programas de ordenador (GIS) para conseguir información adicional: simulaciones y predicciones entre otras posibilidades.
- Capacidad para realizar interferometría, obteniendo imágenes con información sobre la altura del terreno, y, por tanto, mapas en 3D.
- Visión del terreno en una región distinta del espectro, la región de las microondas, con lo que se obtiene información adicional que complementa a la de otros instrumentos que funcionan en otras regiones espectrales.
- Capacidad de multipolarización, lo que le permite discriminar distintas características sensibles a cada una de las cuatro posibilidades de polarización, y otras más sensibles a la diferencia de fase entre polarizaciones.
- Instrumento disponible en una gran cantidad de satélites de observación terrestre, por tanto, se pueden tener imágenes SAR de cualquier parte del mundo, incluso monitorizar cambios de las distintas zonas observadas.

Los datos e imágenes SAR están hoy en día ampliamente difundidos por las agencias que

desarrollan los proyectos en los que participa este instrumento y pueden contemplarse a través de páginas de Internet especializadas activadas para mostrar esta información. También se pueden comprar productos SAR, en versión datos, para aplicarles nuestros propios algoritmos matemáticos mediante GIS, o como imágenes fotográficas. En algunos casos, como en los productos del ERS, las agencias propietarias de la información, en este caso la ESA y el consorcio ERS, han desarrollado para la adquisición de sus productos una categoría de usuarios-investigadores que pueden obtenerlos a precios reducidos, para estimular el desarrollo de nuevos campos de aplicación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- (1985): "Conference on Remote Sensing: Potential for the Future. NASA", *Stennis Space Center, Science and Technology Laboratory, SSC, MS*.
- (1988): "Remote Sensing", *Benchmarks In Time and Culture: Introductory Essays in the Methodology of Syro-Palestinian Archeology*. Scholars Press.
- (1995): "Remote Sensing", *American Journal of Archeology*, 99, p. 83-84.
- Earth Observing System SAR. Instrument Pannel Report*. NASA.
- CAMPANA, S. y FORTE, M. (2002): *Remote sensing in Archaeology*. Siena.
- EBERT, J. I. (1984): "Remote sensing applications in archaeology". *Adv. Arch. Methods & Theory* 7, p. 293-362.
- EBERT, J. Y. & LYONS, T. R. (1980): "Prehistoric irrigation canals identified from Skylab III and Landsat imagery in Phoenix, Arizona", *Cultural Resources Remote Sensing*, T. R. Lyons y F. S. Mathieu, p. 209-228.
- EL-BAZ, F. (1997): "Space Age Archaeology". *Scientific American* 277 (2), p. 40-45.
- FOWLER, M. J. F. (1991): "Satellite archaeology". *Spaceflight* 33, p. 281-283.
- FOWLER, M. J. F. (1996): "Declassified intelligence satellite photographs", *AARGnews* 13, p. 30-35.
- GIBBONS, A. (1991): "A new look for archaeology". *Science* 252, p. 918-920.
- GROSS, D. y SHANKMAN, P. (1988): *Cultural and Ecological Applications of Remote Sensing*. Universidad de Boulder, Colorado.
- JOYCE, C. (1992): "Archaeology takes to the skies". *New Scientist* 133, p. 42-46.
- KRUCKMAN, L. J. (1987): "The role of remote sensing in ethnohistorical research". *Field Arch.* 14, p. 343-351.
- KRUCKMAN, L. J. (1988): "Sources for remote sensing data". *Field Arch.* 15, p. 483.
- LYONS, T. R. y EBERT, J. I. (1978): *Remote sensing and non-destructive archeology*.
- MCALREER, N. (1987): "Archaeology from above". *Space World*, p. 21-25. McCAULEY, J. F., *et al.* (1982): "Subsurface valleys and geoarcheology of the Eastern Sahara revealed by Shuttle radar". *Science* 218, p. 1004-1020.
- McCAULEY, J. F. *et al.* (1986): "Palaeodrainages of the Eastern Sahara - The radar rivers revisited (SIR-A/B implications for a Mid-Tertiary Trans-African Drainage System)". *IEEE Trans Geoscience & Remote Sensing* GE-24, p. 624-648.
- MILLER, F. y LEE, D. (1991): "Applications of Ecological Concepts and Remote Sensing Technologies in Archeological Site Reconnaissance", *Applications of Space-Age Technology in Anthropology*, Clifford Behrens y Thomas Sever (Eds.). NASA, *Stennis Space Center, MS*.
- PALMER, R. (1993): "Remote sensing and archaeology". *AARGnews* 7, p. 18-19.
- PARRINGTON, M. (1983): "Remote sensing". *An. Rev. Antropol.*, 12, p. 105-124.
- RENFREW, C. y BAHN, P.: *Arqueología: teorías, métodos y prácticas*. Ed. Akal.
- SCARRE, C. (Ed.) (1991): *Past Worlds: The Times Atlas of Archaeology*. Londres, Times Books, p. 128-129.
- SEVER, T. L. (1988): "Remote Sensing", *Benchmarks in time and culture: An introduction to Palestinian archaeology*, p. 279-305.
- SHEETS, P. & SEVER, T. (1988): "High-tech wizardry". *Archaeology* 41, p. 28-35.
- WILLIAMSON, R. (Ed.): "Remote Sensing Methods", *Advances in Science and Technology for Historic Preservation*, Plenum Press.

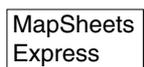
ANEXO I:

PRODUCTOS DISPONIBLES EN EL MERCADO PARA ARQUEOLOGÍA SOBRE LA BASE DE IMÁGENES POR SATÉLITE

RECURSOS INFORMÁTICOS

Una colección de recursos informáticos para los arqueólogos que utilizan imágenes por satélite.

Productos de libre uso

 Herramienta gratuita de cartografiado y visualización de ERDAS, para el trabajo con imágenes y datos de mapas vectoriales.

 Visor de imágenes de uso sencillo que realiza ampliaciones y barridos interactivos con grandes ficheros de imágenes. Puede tratar un amplio rango de formatos de imágenes.

 Visor básico gratuito de distintos ficheros de imágenes, incluyendo los tipos estándar de imágenes como BMP, GIF, TIFF y JPEG. Tiene la capacidad única de mostrar imágenes de sistemas SAR polarimétricos avanzados, el JPL AIRSAR y el SIR-C.

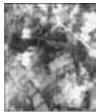
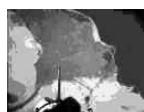
Productos de uso restringido

 **MapMaker Pro**
Sistema de información geográfica (GIS) y cartógrafo para Windows barato y fácil de usar. Una versión gratuita, *MapMaker Basic*, está también disponible.

 **Rubber Map™**
Permite ajustar una fotografía aérea a las coordenadas de nuestro mapa vectorial rápida y fácilmente.

FUENTES DE IMÁGENES POR SATÉLITE

Sensores fotográficos

<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Breve descripción</i>	<i>Fuentes de imágenes</i>
CORONA 	Sus fotografías desde satélite desclasificadas datan de los 60 y principios de los 70. Las mejores imágenes del CORONA tienen una resolución de 2-3 m.	Hay mapas disponibles en la <i>Global Land Information System (GLIS)</i> .
KVR-1000 	La cámara pancromática KVR-1000 montada en los satélites rusos Cosmos tiene una resolución sobre el terreno de 1'5-3 metros.	Hay mapas disponibles en Microsoft TerraServer
<i>Fotografía desde trasbordador espacial</i>		
	Las fotografías de baja resolución obtenidas en las misiones de trasbordadores espaciales proporcionan una visión general de áreas de la superficie terrestre.	Hay mapas disponibles en la <i>NASA JSC's Earth Observation Collection</i>

Sensores pasivos

<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Breve descripción</i>	<i>Fuentes de imágenes</i>
<p>LANDSAT</p> 	<p>Esta serie USA de satélites proporciona datos multiespectrales desde 1972. Los Landsat 1-3 llevaban un detector multiespectral (MSS) con una resolución de 80 m. Los Landsat 4 y 5 tienen un MSS y un detector TM con una resolución de 30 m.</p>	<p>Hay mapas disponibles en el <i>Global Land Information System (GLIS)</i></p>
<p>SPOT</p> 	<p>Se han lanzado 3 satélites franceses SPOT desde 1986. Cada uno llevó un detector multiespectral (XS) con una resolución de 20 m. y un detector pancromático con una resolución de 10 m.</p>	<p>Hay mapas disponibles en el <i>Global Land Information System (GLIS)</i></p>
<p>IKONOS</p> 	<p>El satélite de imágenes IKONOS-1 es el primer satélite de teledetección comercial de 1 m. de resolución, en datos pancromáticos. Ikonos-1 recoge a la vez datos multiespectrales de 4 m., excelentes para variedad de aplicaciones.</p>	<p>Más información en la página de Internet <i>Space Imaging</i>.</p>

Radars de imágenes

<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Breve descripción</i>	<i>Fuentes de imágenes</i>
<p>SIR-A/B</p> 	<p>Embarcado en misiones de trasbordadores espaciales, tomó imágenes de diversos terrenos y superficies oceánicas. El SIR-B fue capaz de adquirir imagen digital desde diferentes ángulos de incidencia.</p>	<p>Hay mapas disponibles en NASA/JPL.</p>
<p>SIR-C</p> 	<p>El SIR-C tomó imágenes de aproximadamente el 10% de la superficie terrestre a bordo del trasbordador espacial Endeavour en abril y octubre de 1994.</p>	<p>Hay mapas disponibles en NASA/JPL.</p>
<p>X-SAR</p> 	<p>El X-SAR voló en las mismas misiones del trasbordador espacial que el SIR-C.</p>	<p>El <i>X-SAR User Kit</i> está disponible desde el DLR. Hay mapas disponibles en DLR y NASA/JPL</p>

Sistemas de desarrollo más reciente.

<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Breve descripción</i>	<i>Fuentes de imágenes</i>
<p>QuickBird</p> 	<p>Proporciona 1 m. de resolución en productos pancromáticos y 4 m. de resolución en productos XS (pasivo).</p>	<p>Más información en la página Internet del Earth Watch Incorporated.</p>
<p>Orbview-3</p> 	<p>Sistema pasivo que incorpora 1-2 m de resolución en productos pancromáticos y 4 m. de resolución en productos XS.</p>	<p>Más información en la página Internet de Orbimage.</p>
<p>Orbview-4</p> 	<p>Sistema pasivo que proporciona 1-2 m. de resolución en productos pancromáticos y 4 m. de resolución en productos XS.</p>	<p>Más información en la página Internet de Orbimage.</p>
<p>EO-1 Hyperion imager</p>	<p>HYPERION es el primer instrumento (pasivo) de toma de imágenes hiperespectral que orbita la Tierra. Sus 242 bandas proporcionan un incremento de más del triple sobre la capacidad multiespectral anterior.</p>	<p>Más información en las páginas Internet de TRW y de NASA Goddard Spaceflight Centre.</p>

ANEXO 2: ACRÓNIMOS

AIRSAR: Airborne Synthetic Aperture Radar.
AMS: Espectrometría del acelerador de partículas.
ASI: Agencia Espacial Italiana.
ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
BC: Before Present.
CIR: Película infrarroja a color.
DARA: Agencia Espacial Alemana.
EOS: Sistema de Observación de la Tierra.
ERS: European Remote Sensing Satellite.
ESA: European Space Agency.
ESR: Resonancia electrónica del “spin”.
GIS: Sistemas de Información Geográfica.
H: Polarización horizontal.
HH: Polarización horizontal emitida, polarización horizontal recibida.
HV: Polarización horizontal emitida, polarización vertical recibida.
IR: Infrarrojo.
JERS: Japan’s Earth Resources Satellite.
JPL: Jet Propulsion Laboratory.
LIDAR: Light detection and ranging.
MSS: Multi-Spectral Scanner.
NASA: Agencia Nacional de Aeronáutica y Espacio de EE.UU..
NMP: New Millennium Program
NPOC: Swiss National Point of Contact for Satellite Images.
SAR: Radar de apertura sintética.
SIR: Spaceborne Imaging Radar.
SIR-C/X-SAR: Spaceborne Imaging Radar-C and X-Band Synthetic Aperture Radar.
SLAR: Radar aerotransportado de observación lateral.
TIMS: Thermal Infrared Multispectral Scanner.
TL: Termoluminiscencia.
TM: Thematic Mapper.
TOPSAR: Radar de apertura sintética topográfico.
TRM: Magnetismo termorremanente.
V: Polarización vertical.
VH: Polarización vertical emitida, polarización horizontal recibida.
VV: Polarización vertical emitida, polarización vertical recibida.
XS: Sensor multiespectral.