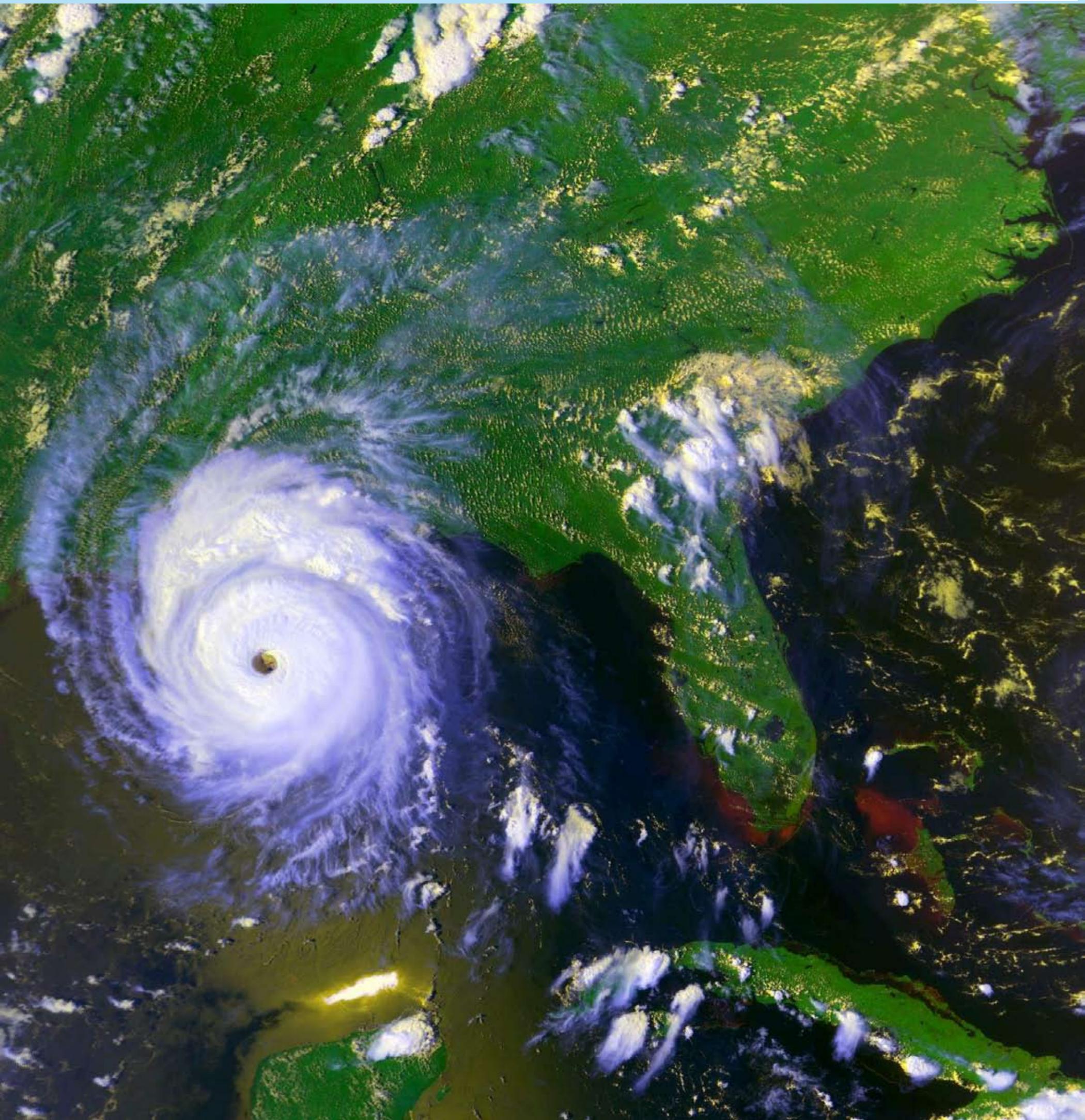


Guía Didáctica de  
**Teledetección y Medio Ambiente**

Red Nacional de Teledetección Ambiental



Javier Martínez Vega y M.Pilar Martín Isabel (Eds.)  
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)





*Esta Guía Didáctica ha sido elaborada en el marco de la Red Nacional de Teledetección Ambiental, financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de la Acción Complementaria CGL2008-03392-E/CLI.*

*La Unidad de Edición Digital y Diseño Gráfico del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas ha asesorado en el diseño y maquetación de la presente obra.*

*Los autores y editores de la guía agradecen a las personas e instituciones involucradas en su publicación, su inestimable colaboración.*

## Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente

## Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente

### **Editores:**

Javier Martínez Vega y M. Pilar Martín Isabel  
*Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)*

### **Autores colaboradores:**

Javier Martínez Vega  
*Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)*  
M. Pilar Martín Isabel  
*Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)*  
José Manuel Díaz Montejo  
*Colegio Concertado San Gabriel (Alcalá de Henares,  
Comunidad de Madrid)*  
Francisco Javier Muñoz Recio  
*Instituto de Enseñanza Secundaria Parque Aluche  
(Comunidad de Madrid)*

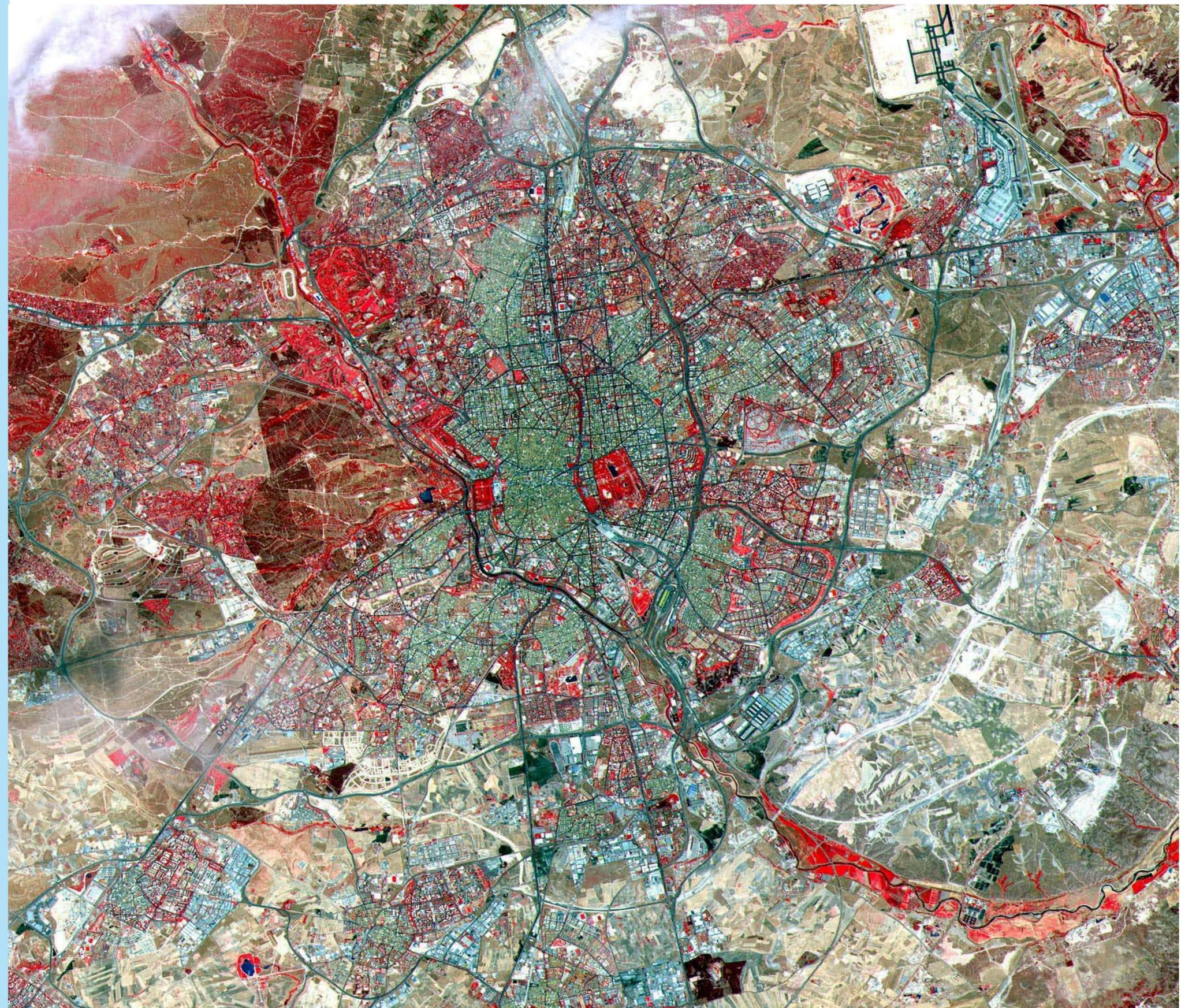
### **Maquetistas:**

Javier Martínez Vega  
Javier Pérez Gutiérrez

Copyright © 2010 Red Nacional de Teledetección  
Ambiental.

En portada: Imagen GOES del Huracán Andrew, cap-  
tada el 25 de agosto de 1992.

Fuente: [www.visibleearth.nasa.gov](http://www.visibleearth.nasa.gov)

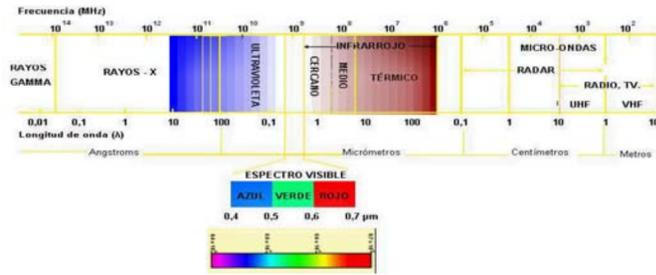


MADRID. 2000. Imagen ASTER de la ciudad de Madrid y de su área metropolitana

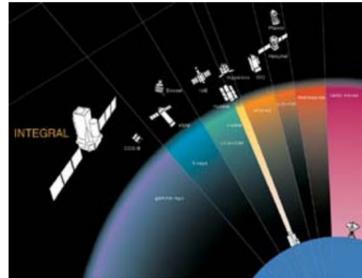
Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS  
and U.S./Japan ASTER Science Team

# TABLA DE CONTENIDOS

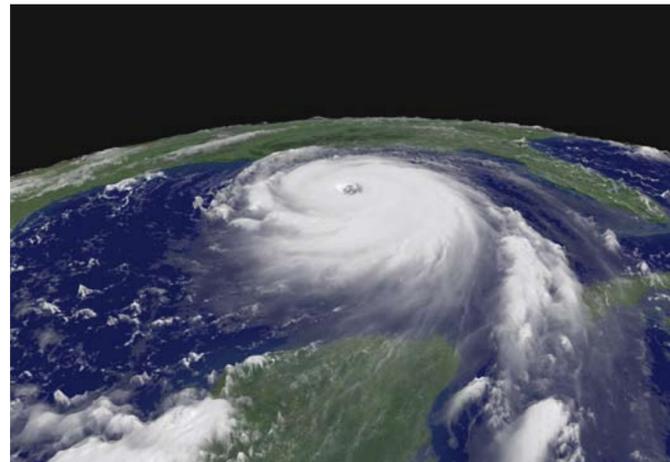
1.	Introducción .....	1
2.	Historia de la Teledetección.....	2
3.	Nociones básicas de Teledetección.....	4



4.	Teledetección: herramienta de información espacial.....	9
4.1.	Visión global .....	9
4.2.	Información sobre regiones no visibles del espectro .....	11
4.3.	Observación a distintas escalas .....	12
4.4.	Frecuencia de adquisición .....	14
4.5.	Homogeneidad en la adquisición .....	15
4.6.	Otras ventajas .....	15

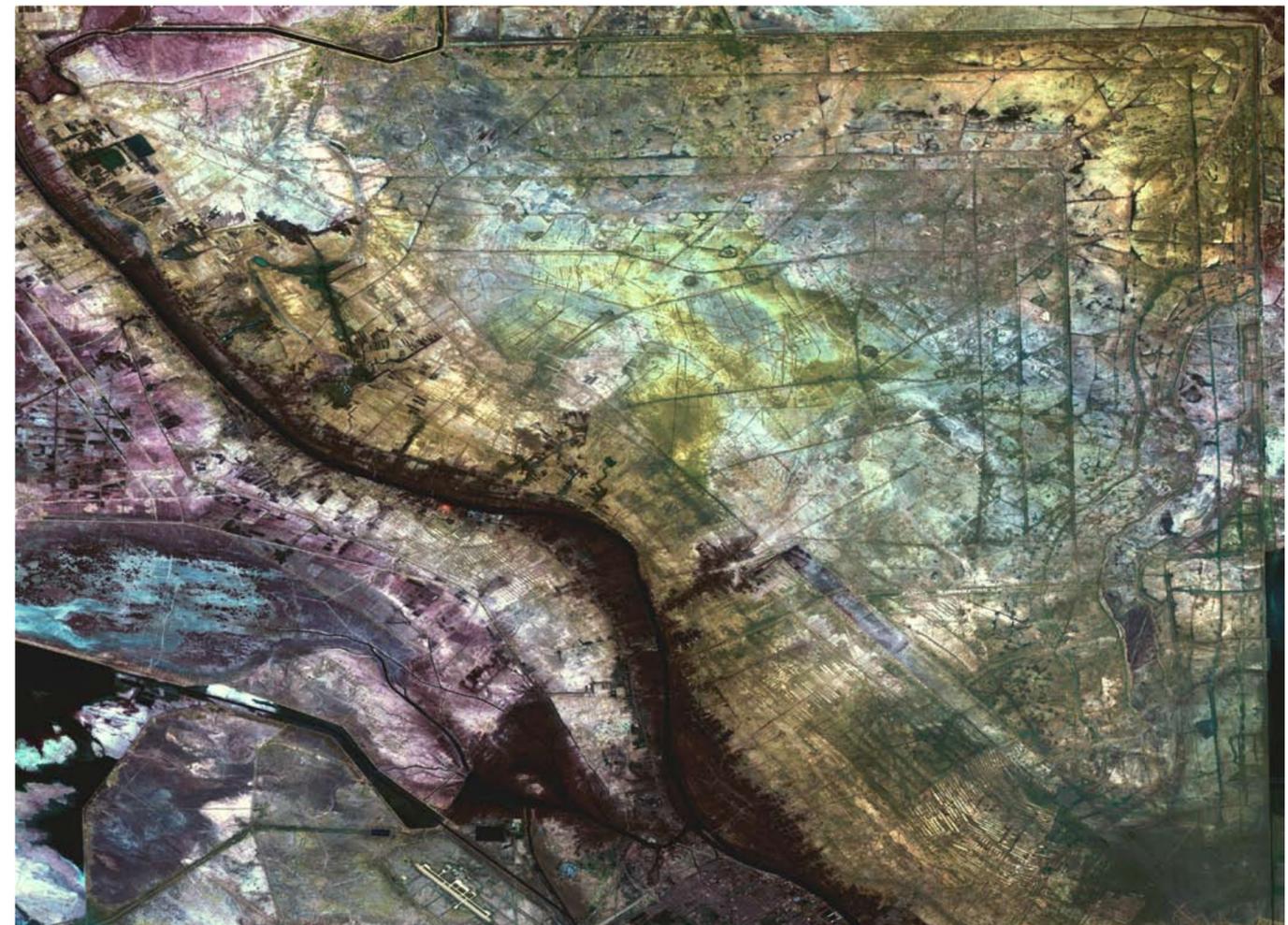


5.	Fenómenos naturales .....	16
5.1.	Riesgos naturales .....	16
5.1.1.	Huracanes .....	16
5.1.2.	Volcanes .....	29
5.1.3.	Inundaciones .....	46
5.1.4.	Terremotos .....	58
5.1.5.	Deslizamientos de ladera .....	66
5.2.	Otros fenómenos naturales .....	68
5.2.1.	Tormentas de arena .....	68
5.2.2.	Geoformas .....	72
5.2.3.	Ríos y masas de agua .....	83
5.2.4.	Glaciares .....	102



6.	Impactos ambientales .....	108
6.1.	Modelos de ocupación del suelo en el mundo .....	108
6.2.	Procesos de deforestación y avance de la frontera agrícola .....	116
6.3.	Incendios forestales .....	
6.4.	Desecación de masas de agua y de zonas húmedas .....	
6.5.	Eutrofización de masas de agua .....	
6.6.	El proceso de urbanización en el mundo. Modelos de ciudades .....	
6.7.	Vertidos de petróleo al mar .....	
6.8.	Impactos de las guerras y del terrorismo .....	
6.9.	Actividades mineras .....	
6.10.	Construcción de grandes infraestructuras .....	
6.11.	Deshielo de glaciares .....	

7.	Bibliografía y referencias .....	124
----	----------------------------------	-----





# 1. INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado, los ciudadanos están informados, a diario, sobre la presencia y los efectos de diversos fenómenos naturales tales como los terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, incendios forestales o inundaciones, entre otros.

Adicionalmente, los medios de comunicación prestan, cada día, más atención a otros fenómenos propiciados por los grupos humanos que generan, igualmente, impactos preocupantes sobre el medio ambiente. Se informa acerca de las últimas investigaciones focalizadas sobre las amenazas que preocupan, principalmente, a la humanidad como la fusión de las masas de hielo y la constante reducción de su volumen y superficie en distintas zonas del planeta como consecuencia del calentamiento global. Asimismo, el avance de la frontera agrícola y la deforestación de las selvas ecuatoriales y tropicales, ocasionados por un modelo insostenible de desarrollo, o las quemadas de extensas masas forestales y de áreas protegidas, debidas a negligencias humanas, son algunos ejemplos de las pérdidas ambientales ocasionadas por el hombre.

Lógicamente, estos acontecimientos generan preocupación en la sociedad y, a la vez, contribuyen a modelar su conciencia ambiental, de tal manera que aquella movilice recursos humanos y económicos para luchar contra estos eventos desde campos diversos como el político, jurídico e, incluso, desde el plano de la solidaridad y la cooperación.

Esta guía didáctica de Teledetección y Medio Ambiente pretende ser principalmente, como su nombre sugiere, una herramienta docente de utilidad para los profesores que imparten asignaturas relacionadas con las Ciencias de la Tierra en el Bachillerato y en el último ciclo de la Enseñanza Secundaria Obligatoria. Como señala el adagio popular, consideramos que una imagen vale más que mil palabras. Por ese motivo, en esta guía, las imágenes de satélite, junto a otras imágenes y fotografías, son las protagonistas. Se ha procurado seleccionar aquellas imágenes que ilustran hechos y procesos ambientales relevantes que preocupan a la sociedad, geformas características que llaman la atención del observador y que son claramente visibles e identificables desde el espacio y aquellas otras que, estéticamente, son atractivas.

Asimismo, se ha priorizado la selección de imágenes captadas por diversos instrumentos, desde variadas plataformas de observación de la Tierra, de tal forma que el docente y el lector puedan disponer de un amplio repertorio de imágenes, con características y resoluciones complementarias.

Las imágenes van acompañadas de un texto sencillo para facilitar la comprensión de los alumnos y de los lectores, en general. Los autores pretenden llamar la atención sobre los rasgos más llamativos de cada imagen y, en algunos casos, sugieren actividades docentes complementarias.

Además de esta función educativa, esta guía pretende ser un vehículo de concienciación ambiental con objeto de que nuestros jóvenes se sensibilicen ante las catástrofes naturales que ocurren todos los años y ante los impactos ambientales provocados por nuestro modelo de desarrollo económico. Quizás, algún día, sean artífices o contribuyan al cambio hacia un nuevo modelo de desarrollo sostenible.

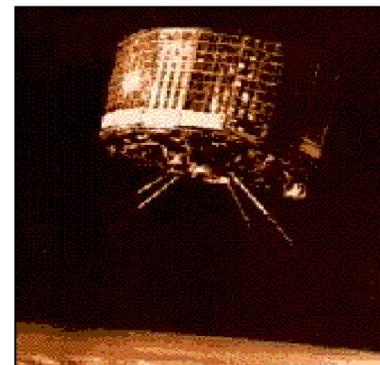
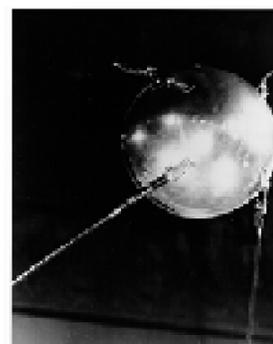
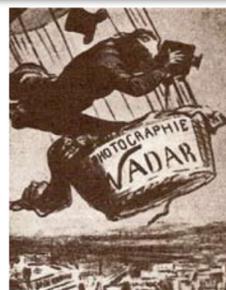
La estructura temática de la guía es sencilla. La primera parte se centra en hacer un repaso a la historia de la Teledetección, poniendo énfasis en los principales hitos que han marcado el progreso de esta tecnología de información geográfica. Incluye un capítulo introductorio sobre los principios físicos de la Teledetección, de forma que, de una manera muy gráfica, los alumnos comprendan cómo observan la Tierra los satélites y cómo se registran, visualizan e interpretan las imágenes captadas desde el espacio. Asimismo, se relacionan las principales ventajas de la Teledetección frente a otros sistemas de observación de la Tierra más convencionales como la fotografía aérea o la visión directa desde una perspectiva oblicua. El núcleo fundamental de la guía son los capítulos 5º y 6º, dedicados a ilustrar fenómenos naturales e impactos humanos de distinta naturaleza. Finalmente, se proporciona un repertorio de recursos didácticos a los profesores para facilitarles la enseñanza de la Teledetección y de asignaturas relacionadas con el Medio Ambiente.

Esperamos que esta obra sea provechosa para los profesores, alumnos y público, en general, interesados en la observación de la Tierra y en la conservación de sus más preciados recursos naturales.

*Izquierda: DUBAI. 2006. Imagen ASTER de DUBAI y de las nuevas áreas de ocio y recreativas en las islas artificiales con forma de palmera.*

*Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team*

# 2. HISTORIA DE LA TELEDETECCIÓN



1859

1909

1915

1945

1957

1960

1961

1969

En 1859, bajo el seudónimo de Nadar, Gaspard Felix Tournachon utilizó un globo para realizar las primeras fotografías aéreas sobre el bosque de Boulogne y el Arco del Triunfo. Intuyó que era posible la aplicación de la fotografía aérea a los levantamientos topográficos y catastrales.

De forma paralela, James Wallace Black registró una de las primeras fotografías aéreas sobre el distrito de negocios de Boston desde un globo, a una altitud aproximada de 365 metros.

En 1903 Orville Wright se convirtió en la primera persona en volar sobre una aeronave, el *Flyer*, más pesada que el aire. Otros especialistas consideraron a Alberto Santos Dumont el protagonista de esta hazaña, ya que voló, en septiembre de 1906, a bordo del *14-bis* sin ayudas externas.

En cualquier caso, poco más tarde, en 1909, Wilbur Wright adquirió la primera fotografía captada desde un avión, iniciando un largo y fructífero periodo de campañas y misiones fotográficas, que se prolongan hasta la actualidad, con fines militares y civiles y aplicaciones temáticas muy variadas.

En 1915, J.T.C. Moore-Brabazon desarrolló la primera cámara aérea de la historia, diseñada específicamente para ser accionada desde un avión.

Durante la I Guerra Mundial se registró gran número de misiones fotográficas de reconocimiento. Enseguida se comprendió la gran importancia estratégica de esta nueva información geográfica para los ejércitos contendientes. Los aviones de reconocimiento se convirtieron en objetivos prioritarios.

En el periodo de entreguerras aparecieron nuevas emulsiones que favorecieron nuevas aplicaciones.

La II Guerra Mundial fomentó definitivamente el empleo sistemático de la fotografía aérea gracias a los avances de la técnica fotográfica (óptica de las cámaras de reconocimientos y de las emulsiones utilizadas), de la aviación (plataformas más estables) y a la continua demanda de información geográfica. Los fotointérpretes fueron entrenados para realizar tareas complejas de identificación directa de los objetos o mediante deducción. En esta época se comenzaron a utilizar las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por Kodak. Asimismo, se introdujeron nuevos sensores como el radar y se utilizaron, habitualmente, los pares estereoscópicos.

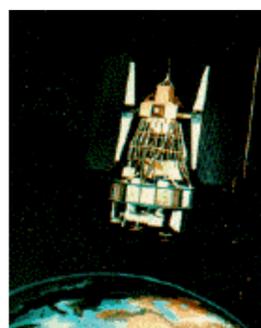
En 1957, la desaparecida URSS lanzó el primer satélite artificial, el *Sputnik*, en el contexto de lo que se ha denominado "carrera espacial". Se trata de un hito histórico de gran importancia para la Teledetección, ya que esta misión y esta plataforma inauguran una nueva época para la observación de la Tierra. Ha sido seguida de numerosas misiones civiles y militares. Se dice que en los últimos 50 años, la cartografía ha avanzado más que a lo largo de toda su historia, cumpliendo la intuición de Sócrates de que era necesario elevarse más allá de la atmósfera para conocer mejor nuestro planeta y disponer de un punto de vista más global.

En 1960, la NASA puso en órbita el primer satélite de observación de la Tierra, *TIROS-1*, pionero de la investigación meteorológica desde el espacio. Ésta es una de las aplicaciones claramente operativas desde la década de los años 70. Desde 1979, los satélites de esta familia pasaron a denominarse *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*, como la agencia meteorológica responsable de sus operaciones. Una de las principales ventajas de este satélite, de órbita polar, es su buena resolución temporal. Proporciona una imagen cada 6 horas, en nuestras latitudes, gracias a la sincronización de dos satélites.

En la década de los años 60, junto a los satélites artificiales, las misiones tripuladas aportaron más de 35.000 imágenes tomadas por los astronautas, conscientes del interés científico de las mismas. Las primeras fueron tomadas por Alan B. Shepard durante una de las misiones de la plataforma *Mercury*, en 1961. Entre 1965 y 1966, se desarrolló el programa *Gemini*. Sus investigaciones geológicas y oceanográficas permitieron obtener 2.400 fotografías desde el espacio. Los astronautas fueron adquiriendo un creciente entrenamiento en Ciencias de la Tierra, Meteorología y Oceanografía. Desarrollaron una sensibilidad especial para

captar megaformas, gracias a la visión global, junto a numerosos fenómenos naturales y humanos de interés, anticipando, en ocasiones, la aparición de desastres.

Más tarde, las misiones Apollo ensayaron nuevos experimentos científicos. Desde *Apollo-6* se obtuvieron 750 fotografías de alta resolución espacial, estereoscópicas, en color. En *Apollo-9* se embarcaron cuatro cámaras Hasselblad con filtros multispectrales y películas en blanco y negro sensibles a distintas longitudes de onda y en infrarrojo color.



1972

1981

1986

1991-1995

1999

1999-2002

2009

2009

Los éxitos acumulados por la NASA, hicieron concebir nuevos proyectos focalizados en la cartografía y evaluación de recursos naturales. El 23 de julio de 1972 se puso en órbita el primer satélite de la serie *ERTS (Earth Resources Technology Satellite)*, rebautizada *LANDSAT*, a partir de 1975. Esta familia de satélites ha sido la más fructífera en aplicaciones civiles de la teledetección. Los estudios han crecido de forma exponencial y han incidido en temáticas muy diversas.

En 1981, el lanzamiento del transbordador espacial *Space Shuttle* supuso un nuevo hito en la carrera espacial. A lo largo de las veinte misiones que se sucedieron entre 1981 y 1994 se obtuvieron 45.000 fotografías espaciales, de dominio público. Entre todas, merece la pena destacar las fotografías estereoscópicas obtenidas desde esta plataforma tripulada por las cámaras métricas RMK (Zeiss) y de gran formato (Itek) con objeto de probar sus aptitudes para generar cartografía topográfica básica de escalas medias, a bajo coste, en los países menos desarrollados.

En 1986, Francia, en colaboración con Bélgica y Suecia, lanza el satélite *SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre)*. Este satélite, de órbita heliosíncrona, tiene una repetitividad de 26 días. Se han lanzado otros cuatro satélites de la misma familia en 1990, 1993, 1998 y 2002. El sensor *HRV (Haute Résolution Visible)* dispone de una tecnología de exploración por empuje. Incorpora la posibilidad de captar escenas verticales y oblicuas en dos órbitas sucesivas, gracias a lo cual es posible disponer de imágenes estereoscópicas.

En 1991, la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzó su primer satélite de teledetección, el *ERS-1 (European Remote Sensing Satellite)*. En 1995, se lanzó el segundo satélite de esta serie, el *ERS-2*. Su objetivo era complementar a los sensores ópticos embarcados en *Landsat* y *SPOT*. Aunque sus aplicaciones han sido muy variadas, se orientaban al estudio de los océanos y de la criosfera. Junto a los sensores activos de tipo radar, se han embarcado otros dispositivos de barrido térmico, altímetros y medidores de ozono.

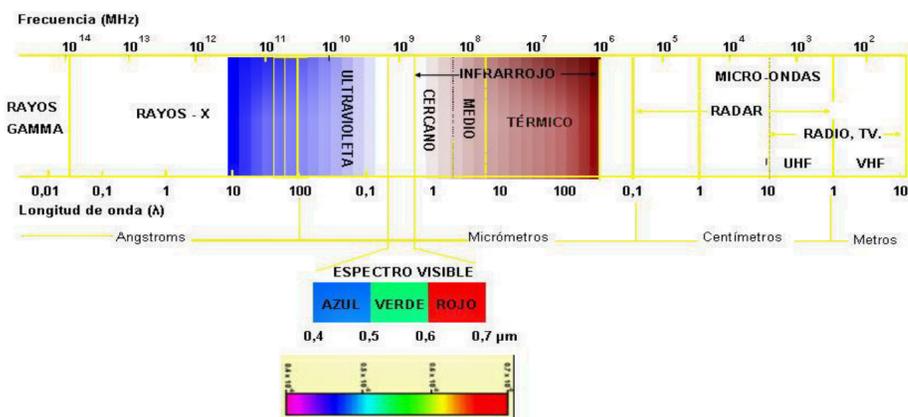
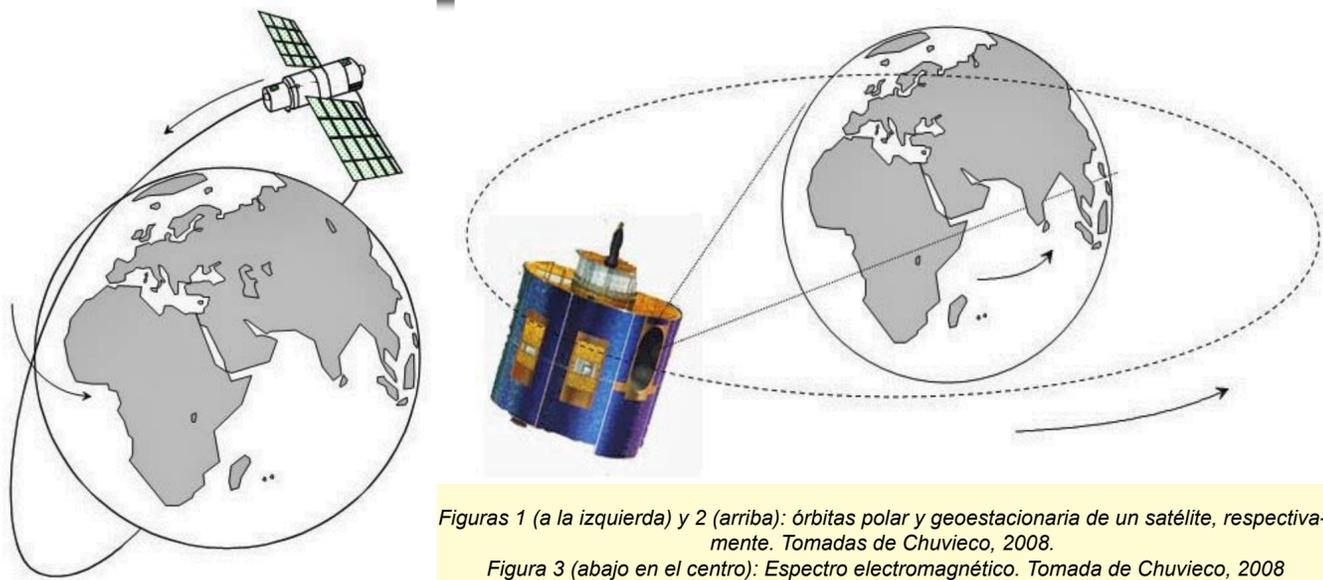
En septiembre de 1999, se lanza el satélite *IKONOS-2*, con 1 m. de resolución espacial. De esta manera, Space Imaging, ahora integrada en la empresa Geoeye, inaugura el mercado de los satélites comerciales de teledetección, ocupando un segmento comercial -el de las observaciones de alta resolución espacial- hasta entonces reservado a la fotografía aérea. En octubre de 2001, la empresa Digital Globe lanza el satélite *Quickbird*, con dos cámaras de alta resolución espacial, 61 cm. en modo pancromático y de 2,5 m., en modo multispectral.

En diciembre de 1999, la NASA lanza el satélite *TERRA*. Unos años más tarde, en mayo de 2002, se pone en órbita el satélite *AQUA*. Ambas plataformas forman parte del ambicioso programa EOS (Earth Observing System), un sistema de observación global de la Tierra que organiza los satélites participantes en torno a una constelación. Los sensores embarcados (*ASTER, MODIS, CERES, MISR, MOPITT*, entre otros) se complementan para generar variables de gran interés ambiental y estudiar procesos globales.

El 29 de julio de 2009, Deimos Imaging (DMI) lanza, con éxito, el primer satélite de observación de la Tierra, *DEIMOS-1*, explotado por una empresa española privada. Se trata de una plataforma de órbita heliosíncrona, a 680 km. de altitud. Dispone de 6 cámaras que captan información en las regiones espectrales del verde, rojo e infrarrojo próximo, con una resolución espacial de entre 20 y 22 m. Se espera que cubra múltiples aplicaciones desde los estudios de agricultura y ocupación del suelo hasta la gestión de recursos naturales y prevención de desastres.

La ESA (Agencia Espacial Europea) lanza, con éxito, el 2 de noviembre de 2009, el satélite *SMOS*. Para España es relevante esta misión porque el responsable científico de la misma es un investigador del CSIC. Además, el único instrumento de la carga útil (*MIRAS*) ha sido completamente fabricado por la industria española y el procesamiento de los datos se realizará desde la estación de Villafranca del Castillo. Su objetivo es medir la humedad del suelo y la salinidad de los océanos.

# 3. NOCIONES BÁSICAS DE TELEDETECCIÓN



Los satélites de observación de la Tierra describen dos tipos de órbitas, heliosíncronas (figura 1) y geostacionarias (figura 2). Las primeras suelen ser casi polares, estando inclinadas 90° respecto al plano del Ecuador. La órbita es perpendicular al movimiento de rotación de la Tierra por lo que es posible observar zonas distintas del planeta en cada pasada. Suelen sobrevolar el Ecuador a la misma hora, de tal manera que registran imágenes en condiciones de iluminación homogéneas en las mismas épocas. Suelen orbitar a altitudes comprendidas entre 600 y 900 km. Esta órbita es la más habitual en los satélites de recursos naturales de media y alta resolución espacial como Landsat, SPOT, IRS, IKONOS,

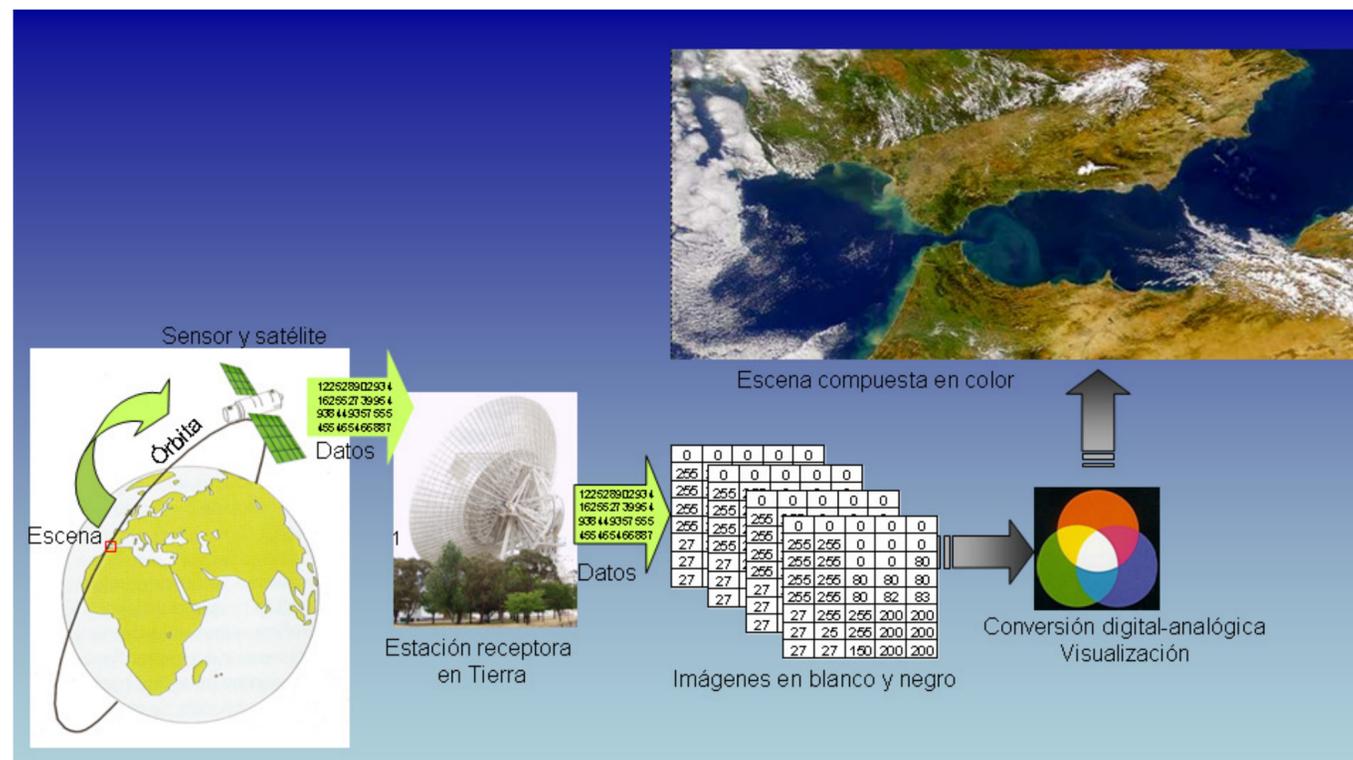
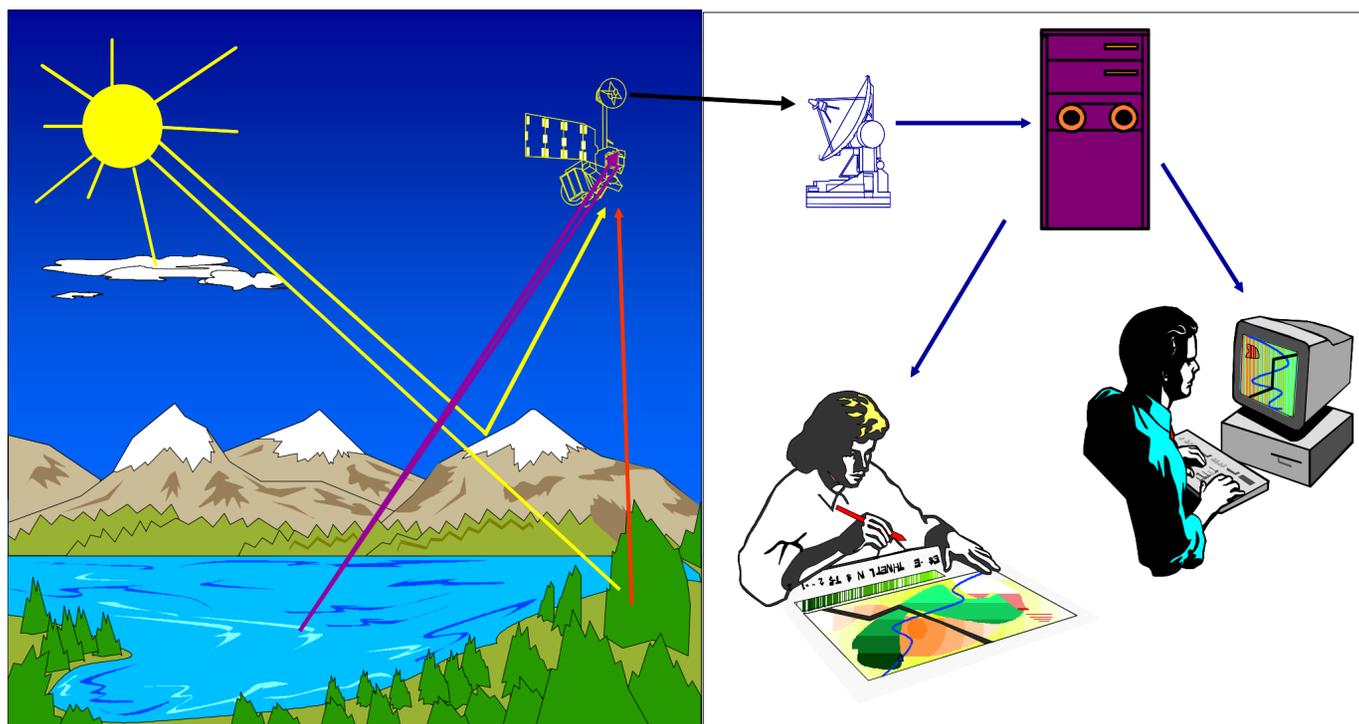


Figura 5: Flujo de trabajo desde la recogida de información hasta su procesado.

Terra y Aqua, aunque existen otros satélites meteorológicos de órbita polar y media resolución espacial como NOAA.

Las órbitas geostacionarias son ecuatoriales, a una altura de 36.000 km. Su periodo orbital es similar a la velocidad de rotación de la Tierra por lo que su posición relativa respecto a nuestro planeta siempre es la misma, registrando imágenes sobre la misma porción de superficie terrestre. La mayor parte de satélites de comunicaciones y meteorológicos son geostacionarios. Suelen complementarse en constelaciones, de tal manera que un conjunto de satélites cubran toda la superficie terrestre. Por ejemplo, Meteosat está posicionado sobre el meridiano 0°, observando Europa y África y GOES sobre los meridianos 70 y 140° W, registrando los meteoros de las costas Este y Oeste de América del Norte, respectivamente. A pesar de su escasa resolución espacial, como consecuencia de su elevada altura orbital, disponen de gran resolución temporal. Son capaces de ofrecer imágenes cada media hora, permitiendo un seguimiento temporal de fenómenos que ocurren muy rápidamente.

El ojo humano es el sensor natural con el que percibimos la información de la superficie terrestre. Sin embargo, éste se encuentra limitado a la región espectral del visible (figura 3). Por el contrario, los sensores que viajan a bordo de los satélites artificiales suelen ser multispectrales e, incluso, hiperespectrales. Ello significa que son capaces de registrar el comportamiento de los objetos de la superficie terrestre en diversas longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético, desde la región del visible hasta las distintas bandas del infrarrojo (próximo, medio y térmico) y de las microondas.

En la figura 4 se muestran los componentes de un sistema de Teledetección. El primer componente es la fuente de energía. La más habitual es el sol, en cuyo caso se habla de Teledetección pasiva ya que los sensores dependen de esta fuente de energía externa.

El segundo componente es la cubierta terrestre. Cada grupo de objetos de la cubierta (masas de vegetación, mantos de nieve, cuerpos de agua, suelos o superficies urbanas), dependiendo de sus características y naturaleza reaccionan de forma distinta ante el flujo de energía incidente. Una parte de este flujo es absorbido por los objetos, otra es transmitida a los objetos vecinos y, finalmente, otra parte del flujo es reflejada.

Esta energía reflejada es captada por el sensor (tercer componente) y codificada digitalmente en un rango cuyos valores dependen de la resolución radiométrica del sensor (256 niveles-ETM-Landsat-, 1.024 niveles -AVHRR-NOAA-, 2.048 niveles -IKONOS, Quickbird- y hasta 65.536

valores en algunos sensores, como MODIS y los radares de ERS y Radarsat). Si los cuerpos absorben o transmiten mucha energía y reflejan poca, los valores registrados por el sensor serán bajos. Es el caso de las masas de agua en algunas regiones espectrales del visible (verde y rojo) y del infrarrojo cercano y medio. Por el contrario, si los cuerpos son muy reflectivos el sensor registrará valores elevados. Es el caso de las masas vegetales en el infrarrojo cercano, de los mantos nivales o de los suelos descubiertos, de origen calizo, en la región espectral del visible.

En ocasiones, la energía emitida por los objetos de la superficie terrestre es la fuente de energía captada por el sensor, especialmente en algunas regiones del espectro electromagnético como el infrarrojo térmico. En la misma línea, algunos sistemas activos de Teledetección, como el radar, no dependen de una fuente de energía externa, como la solar. Incorporan sus propias fuentes energéticas. Emiten un haz incidente cuya señal registran, más tarde, cuando ésta es reflejada.

Los datos digitales almacenados a bordo son enviados, periódicamente, a las estaciones receptoras (cuarto componente), distribuidas convenientemente en la superficie terrestre. Allí se graban los datos y, tras diversos procesos, las imágenes son distribuidas a los usuarios mediante diferentes políticas y canales de comercialización.

Las imágenes son tratadas visual o digitalmente, mediante programas informáticos de tratamiento digital, por el intérprete (quinto componente) para derivar cartografía temática y otros productos (variables biofísicas tales como humedad del suelo o de la vegetación, temperatura de superficie terrestre y marina o salinidad entre otras) que pueden ser integrados con otra información geográfica.

Finalmente, el usuario final (último componente) es el que recibe las imágenes originales y la información derivada de las mismas, con objeto de tomar decisiones en materias diversas como la planificación del territorio, la ordenación de los recursos naturales, la conservación de la diversidad biológica o la prevención y lucha contra incendios forestales.

Las reflectividades de los objetos de la superficie terrestre en cada banda espectral son grabadas en bandas distintas pudiendo realizar composiciones en color, combinando tres bandas, a las cuales se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo (figura 5).

Así pues, para crear una composición en color se requiere seleccionar tres bandas de una imagen y asignar a cada una de ellas un color primario (azul, verde o rojo). En la figura 6 se han seleccionado las bandas 2 (región espectral del verde, de 0,52 a 0,60 μm), 3 (región espectral

del rojo, de 0,63 a 0,69  $\mu\text{m}$ ) y 4 (infrarrojo cercano, de 0,76 a 0,90  $\mu\text{m}$ ) de una imagen de Madrid, captada el 2 de agosto de 1984 por el sensor Thematic Mapper de Landsat-5. A cada una de ellas se le ha asignado un color primario. La banda 2 (arriba a la izquierda en la figura 6) ha sido coloreada de azul. La banda 3 (arriba en el centro) se ha coloreado de verde y la banda del infrarrojo próximo o cercano (a la derecha) ha sido teñida de color rojo. El resultado de la composición se observa en la parte inferior. En este caso, se trata de una composición en falso color convencional, frecuentemente empleada en el análisis visual o fotointerpretación de imágenes de satélite y de fotografías aéreas.

Como podrá apreciar el lector, se llama así porque el color resultante es diferente al que el ojo humano percibe. La vegetación natural se observa en color rojo. Veáanse el Parque del Retiro, en el centro de la

imagen inferior o los campos de golf de Puerta de Hierro, en el cuadrante noroeste de esa imagen compuesta. En rojo menos intenso (de rojo oscuro a pardo) se observan las masas forestales perennifolias (pinos y encinares) de la Casa de Campo, en el sector occidental de la imagen. El color rojo se debe a que la vegetación sana, debido a la estructura celular de las hojas y a los pigmentos contenidos, es muy reflectiva en el infrarrojo cercano y absorbe gran parte del flujo incidente en las bandas del visible, especialmente en el verde.

A pesar del interés de esta combinación de color por parte de los expertos, ya que estas bandas aportan un gran volumen de información no redundante y guardan escasa correlación entre sí, a los lectores sin entrenamiento previo les cuesta interpretar adecuadamente este tipo de imágenes. Para adquirir este entrenamiento, conviene adjuntar claves

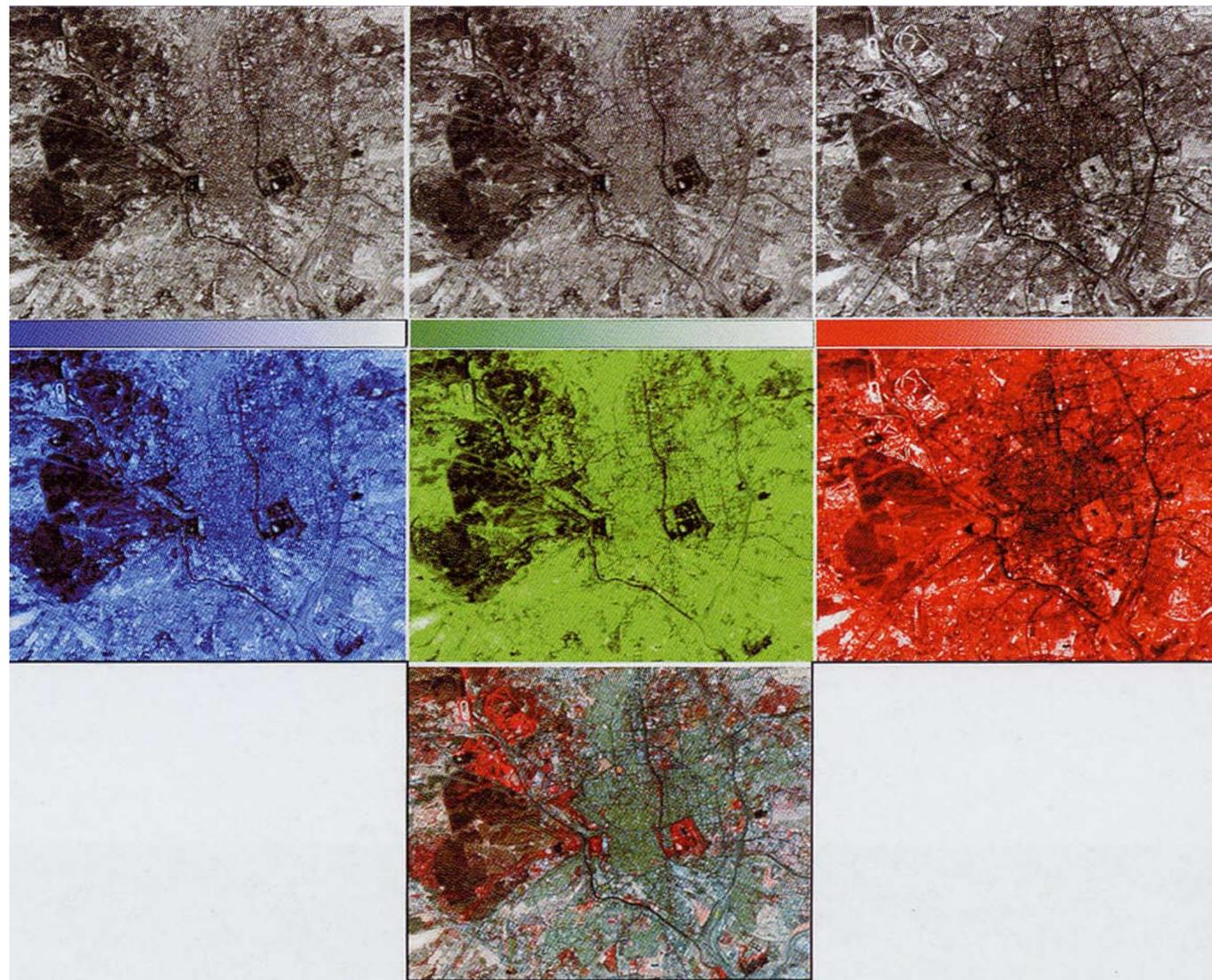


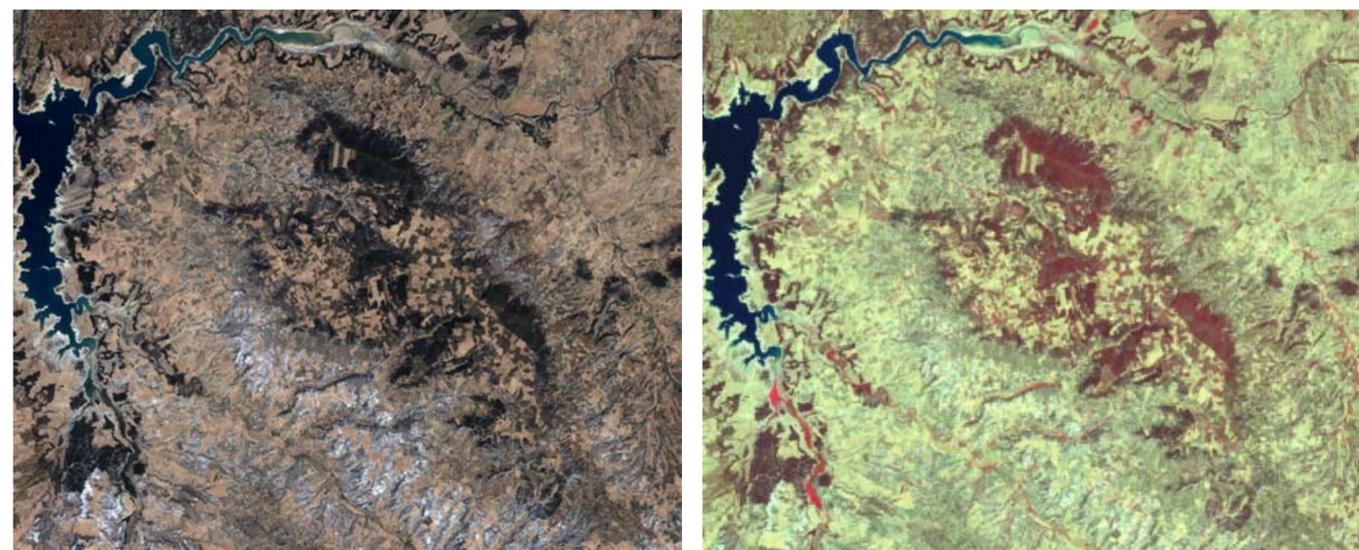
Figura 6: Proceso de formación de las composiciones en color. Tomado de Chuvieco, 2008

gráficas y mixtas para establecer correspondencias entre los objetos reales y su apariencia en la imagen en falso color. En función del orden de asignación de los colores primarios y de las bandas elegidas resultan imágenes compuestas, realizadas con distintas combinaciones de color. Normalmente, suelen designarse con el número de las bandas, del sensor del que se trate, que entran en la composición, en el orden de asignación de los colores primarios RGB (del inglés *Red, Green, Blue*).

Las más frecuentes en fotografía aérea son las composiciones en color natural. Con imágenes espaciales no es tan frecuente porque pocos sensores incluyen un canal sensible al azul. Los sensores TM y ETM del programa Landsat sí permiten construir este tipo de combinaciones. En la figura 7, a cada banda del espectro visible -azul (banda 1 del sensor ETM, en este caso), verde (banda 2) y rojo (banda 3)- se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo, en el mismo orden). También se la conoce como composición ETM321 (RGB).

En Teledetección espacial, tal vez la combinación más frecuente es la conocida como falso color convencional. Una buena parte de los sensores de los satélites de observación de la Tierra relacionados con los recursos naturales disponen de canales sensibles a una parte del espectro visible y del infrarrojo próximo (Landsat-MSS, SPOT-HRV, IRS-LISS, DMC). En la figura 8, se eligen tres bandas, una del infrarrojo cercano (banda 4, en el caso del sensor ETM), a la que se le asigna el color rojo, y otras dos del visible -rojo (banda 3) y verde (banda 2)- a las que se les asignan los colores primarios verde y azul, respectivamente (ETM432, RGB).

Una variante de esta última composición coloreada es la denominada falso color mejorado. En este caso, se sustituye un canal del visible por el infrarrojo medio, que aporta información sobre las variaciones de humedad. En la figura 9 se muestra un ejemplo, combinando las bandas



Composiciones en color natural ETM321 (figura 7, izquierda) y en falso color convencional ETM432 (figura 8, derecha) de una imagen Landsat-7 ETM, tomada sobre el Embalse de Buendía y La Alcarria Conquense, el día 5 de agosto de 2002.

#### CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

Según algunos autores (Strandberg, 1975; Short, 1982; Campbell, 1987), las claves de identificación son herramientas que ayudan al intérprete a identificar e interpretar información, de manera organizada y consistente. Según su formato, las claves de identificación pueden ser gráficas o textuales y según su nivel se distingue entre las técnicas y no técnicas.

Las claves gráficas de identificación son útiles de primera magnitud y proporcionan un amplio cuerpo de experiencias indirectas a los intérpretes noveles.

En esta lámina se muestran las claves gráficas de una serie de cubiertas de ocupación del suelo básicas. Como puede observar el lector, algunas cubiertas apenas cambian el color con el que son representadas en las distintas combinaciones de color. Sin embargo, los colores con los que son representadas las masas forestales de especies perennifolias (encinares y pinares) y, especialmente, los cultivos en regadío varían sustancialmente, del rojo al verde intenso, en los ejemplos mostrados, como consecuencia del color asignado a la banda del infrarrojo próximo, canal en el que es máxima la reflectividad de esta cubierta. Las masas acuáticas (embalse de Buendía) son poco reflectivas en todas las bandas, por eso se muestra en color negro. Tan sólo aparece de color azul oscuro en la composición en color natural.

#### CLAVES GRÁFICAS

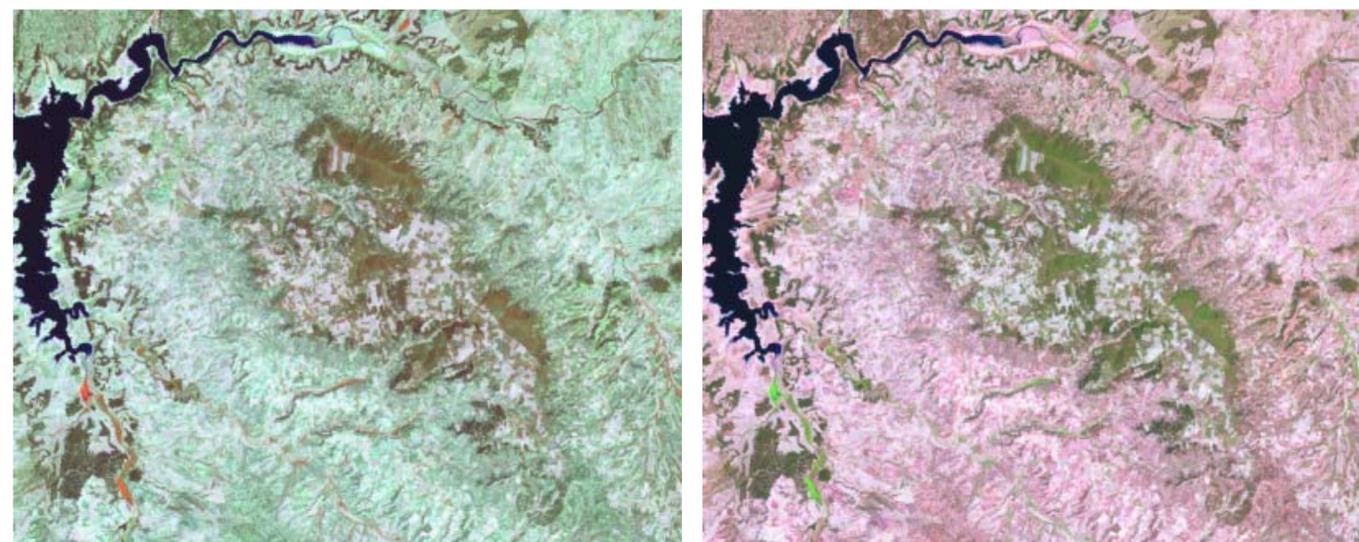
- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

#### CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

#### CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias



Composiciones en falso color mejorado ETM453 (figura 9, izquierda) y en pseudo color natural ETM543 (figura 10, derecha) de una imagen Landsat-7 ETM, tomada sobre el Embalse de Buendía y La Alcarria Conquense, el día 5 de agosto de 2002.

453 del sensor ETM de Landsat-7. Esta es la composición utilizada en el análisis de imágenes Landsat para el proyecto CORINE-Land Cover, cuyo objetivo es la cartografía de la ocupación del suelo de todos los países miembros de la Unión Europea, a escala 1:100.000.

Cuando se pretende acercar las imágenes de satélite al gran público, las agencias cartográficas suelen emplear una composición en pseudo-color natural. La figura 10 muestra un ejemplo. Las bandas elegidas pueden ser las mismas que las utilizadas en el falso color mejorado pero se asignan los colores primarios en un orden diferente. En este caso, al infrarrojo cercano se le asigna el color verde, en vez del rojo. En este ejemplo, el resultado es la composición ETM543 (RGB). Como puede apreciarse, las masas forestales se observan en un color verde, más familiar para el observador. Por ese motivo, el Instituto Geográfico Nacional ha elegido esta combinación para reproducir la serie de cartogramas de España, a distintas escalas (1:100.000 y 1:250.000).

Obviamente, las claves gráficas de color, que habitualmente auxilian a los lectores de las imágenes y a los fotointérpretes noveles, varían en función de la combinación de color empleada. Adheridas a las figuras 7 a 10, se muestran las claves gráficas de color, correspondientes a cada una de ellas, con objeto de ilustrar cómo algunas clases temáticas apenas sufren variaciones de color (suelos desnudos, agua) mientras que

otras (vegetación sana vigorosa) experimentan cambios muy significativos. Un adecuado entrenamiento previo es aconsejable para aquellos que quieran extraer valiosa información espacial de las imágenes de satélite en sus variadas aplicaciones temáticas.

Con los sensores multispectrales e hiperespectrales, las combinaciones para formar imágenes compuestas en color son múltiples. Por ejemplo, el sensor hiperespectral MODIS dispone de 29 bandas en distintas regiones espectrales, con la misma resolución espacial de 1.000 m. Con esta información podrían formarse tantas combinaciones de color como 29 elementos (bandas) tomados de 3 en 3 (colores primarios), es decir 3.654 combinaciones. Con los sensores TM y ETM de Landsat, si consideramos las 6 bandas de similar resolución espacial de 30 m., se podrían realizar 20 combinaciones distintas. Además, podría ampliarse el número de composiciones si se mezclan bandas de distintas resoluciones espaciales mediante técnicas de fusión de imágenes.

A pesar de que cada aplicación temática tiene características específicas, los especialistas en el tema, tras realizar estudios empíricos y estadísticos, concluyen que las mejores combinaciones son aquellas que registran datos en el infrarrojo medio, cercano y en un canal del visible o en el infrarrojo cercano y dos canales del visible. Estas son las bandas que menos correlación presentan, entre sí.

## 4. TELEDETECCIÓN: HERRAMIENTA DE INFORMACIÓN ESPACIAL

La Teledetección espacial dispone de una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas convencionales de observación de la Tierra como la fotografía aérea o la observación directa, a través de trabajos de campo. Entre las principales ventajas, se resaltan las siguientes: (i) visión global, (ii) observación de información en regiones no visibles del espectro, (iii) observación a distintas escalas, (iv)

frecuencia y (v) homogeneidad en la adquisición.

Gracias a estas aptitudes, la Teledetección espacial se convierte en una herramienta de información espacial de gran interés para la producción y actualización cartográfica, como fuente de entrada en Sistemas de Información Geográfica de carácter multipropósito, para los estudios ambientales y para las Ciencias de la Tierra, en general.

### 4.1. VISIÓN GLOBAL

Tanto los satélites geoestacionarios como los que describen una órbita heliosíncrona tienen la capacidad de aportar imágenes globales de la Tierra. Los primeros, gracias a su posición elevada y a su amplio campo de observación, captan imágenes del disco completo de la Tierra en un solo registro. Los segundos permiten construir mosaicos de imágenes que cubren el planisferio completo.

inédita hasta hace pocas décadas. Como se decía en el apartado 2, los satélites permiten cumplir la intuición de Sócrates de que era necesario elevarse más allá de la atmósfera para disponer de una visión global y comprender mejor los procesos que se desencadenan en la Tierra.

En la figura 13 se observa, claramente, la distribución geográfica de las masas nubosas. Gracias a la repetitividad de las imágenes registradas por los satélites y de las animaciones realizadas con ellas, puede

En ambos casos, las imágenes aportan una visión global de la Tierra,

Figura 13: Compuesto de imágenes, en color natural. Vista del sector euroasiático-africano del hemisferio Norte.  
Fuente: [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BlueMarble/BlueMarble\\_history.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BlueMarble/BlueMarble_history.php)

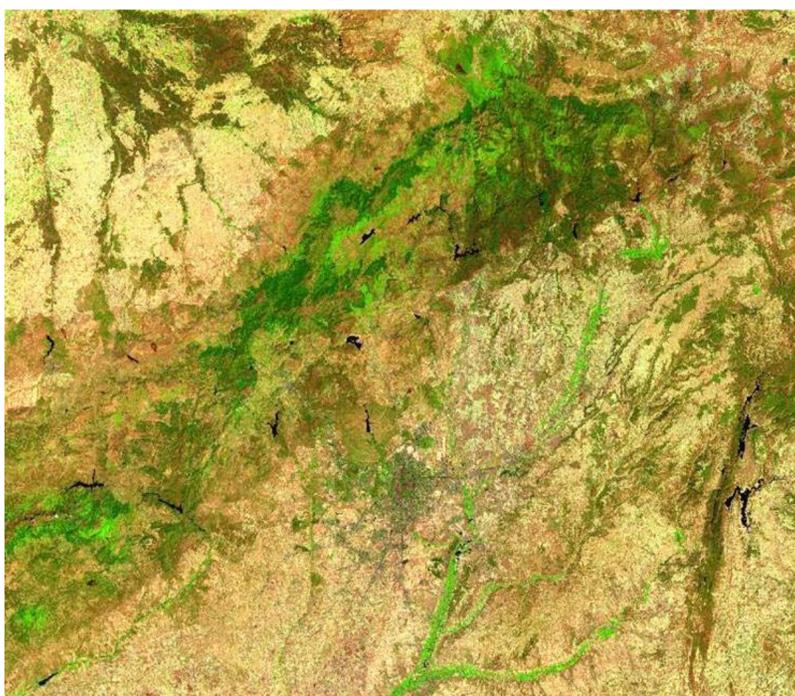


Figura 11 (arriba): Fragmento del mosaico, en pseudo-color natural (ETM543), de ortoimágenes Landsat 7, utilizadas por el Instituto Geográfico Nacional para el proyecto europeo CORINE-Land Cover. Se observa la zona de la Comunidad de Madrid y una porción de la submeseta norte (tierra de pinares de Segovia), en la esquina noroeste de la imagen.

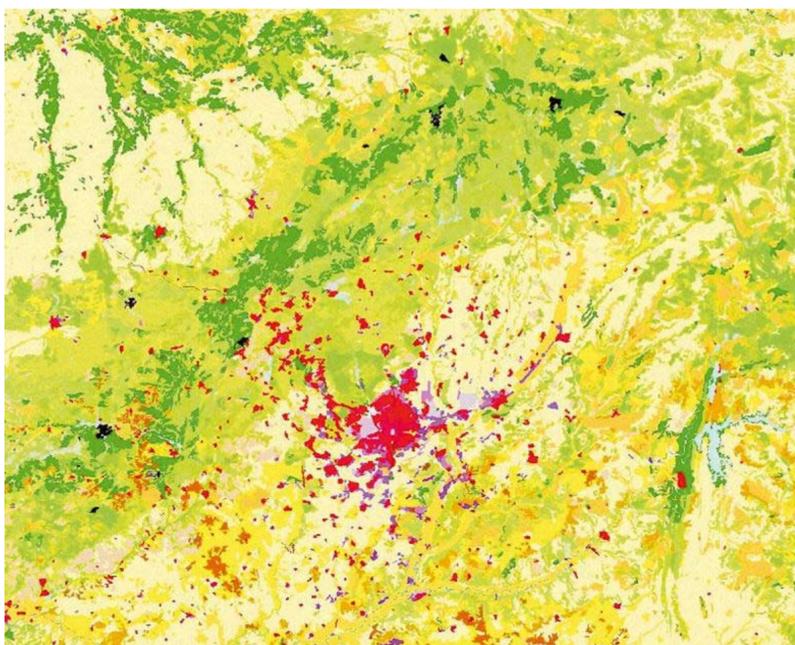


Figura 12 (abajo): Fragmento del mapa de ocupación del suelo de España, a escala 1:100.000 y 3 niveles, del proyecto CORINE-Land Cover. El mapa ha sido derivado de la imagen superior mediante análisis visual y apoyo de técnicas de tratamiento digital de la imagen (<http://www.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html>)

LEYENDA CORINE LAND COVER	
111	Tejido urbano continuo
112	Tejido urbano discontinuo
121	Zonas industriales, comerciales y de transporte
122	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados
123	Zonas portuarias
124	Aeropuertos
131	Zona de extracción minera
132	Escombreras y vertederos
133	Zonas en construcción
141	Zonas verdes urbanas
142	Instalaciones deportivas y recreativas
211	Tierras de labor en secano
212	Terrenos regados permanentemente
213	Arrozales
221	Viveros
222	Frutales
223	Oliveros
231	Prados
241	Cultivos
242	Mosaicos de cultivos
243	Terrenos agrícolas con vegetación natural
244	Sistemas agroforestales (dehesa)
311	Bosques de frondosas
312	Bosques de coníferas
313	Bosques mixtos
321	Pantanos naturales
322	Llanuras y matorrales mesófilos
323	Matorrales esclerófilos
324	Matorral boscoso de transición
331	Playas, dunas y arenales
332	Roquedo
333	Espacios con vegetación escasa
334	Zonas quemadas
335	Glaciares y nieves permanentes
411	Humedales y zonas pantanosas
412	Turberas y prados turbosos
421	Marismas
422	Salinas
423	Zonas llanas internacionales
511	Cursos de agua
512	Láminas de agua
521	Lagunas costeras
522	Estuarios
523	Mares y océanos
	Zonas sin clasificar

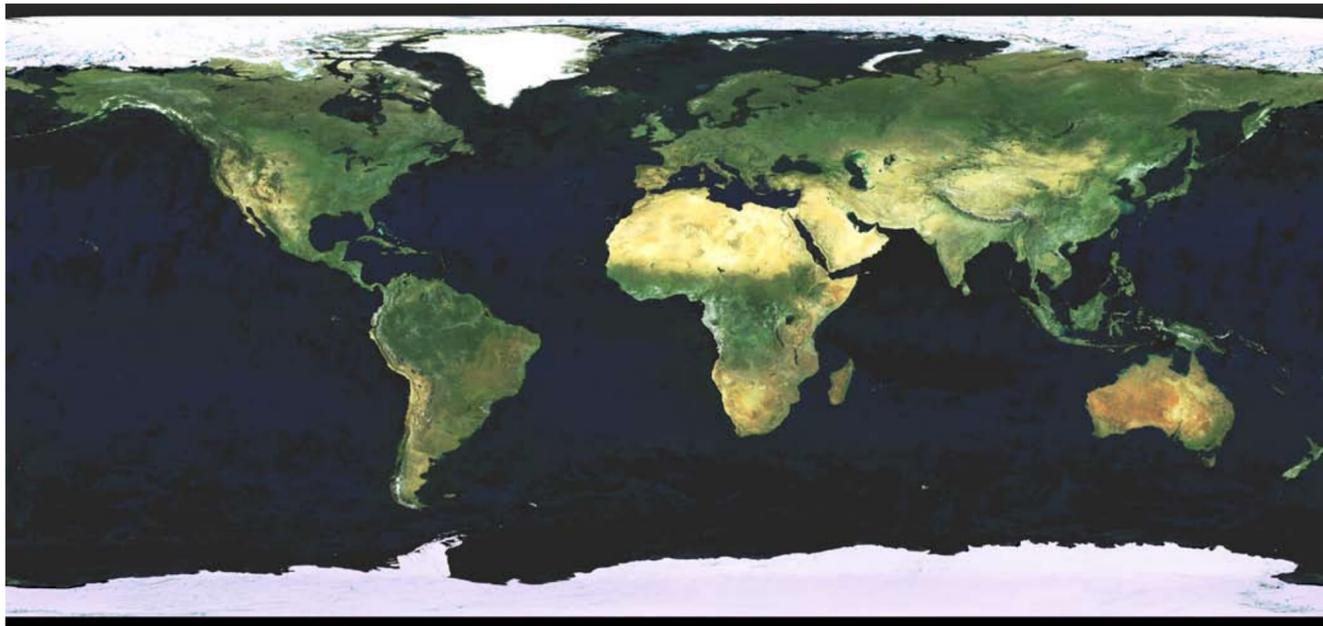


Figura 14: Mosaico de imágenes captadas, entre mayo y noviembre de 2004, por el sensor MERIS, a bordo del satélite europeo ENVISAT.  
Fuente: [http://www.esa.int/esaCP/SEMF2ZY5D8E\\_Spain\\_1.html](http://www.esa.int/esaCP/SEMF2ZY5D8E_Spain_1.html)

hacerse un seguimiento, casi en tiempo real, de las masas nubosas y comprender mejor los modelos generales de circulación atmosférica. En la visión estática de la figura 13, se aprecia la compacidad de las masas nubosas en las latitudes medias del hemisferio norte, intuyendo el lector los vientos dominantes del oeste en esa franja latitudinal. Igualmente, se aprecia la presencia permanente de las masas nubosas que cubren la zona ecuatorial.

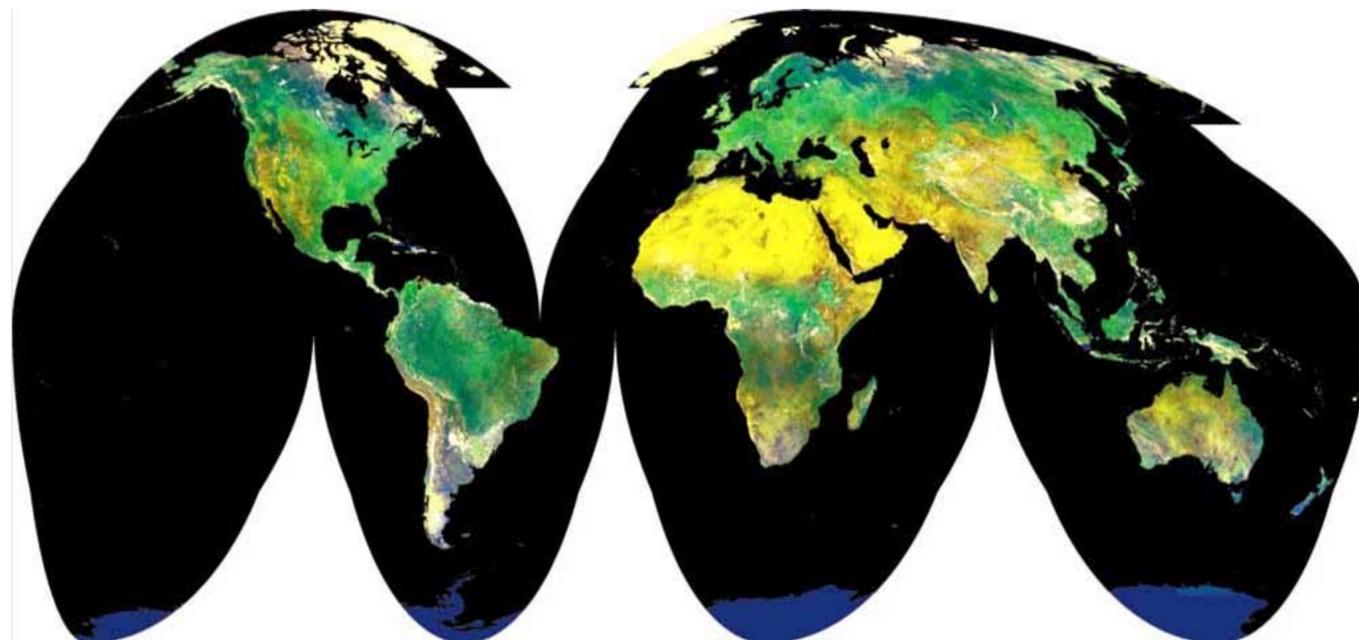
En las figuras 14 y 15 se observa dos mosaicos de imágenes que cubren todo el planisferio, compuestos con imágenes de dos satélites distintos, Envisat, en el primer caso, y NOAA, en el segundo. En ambos casos, el lector puede percibir la distribución geográfica de los principales ecosistemas terrestres y apreciar la influencia que los factores zonales y azonales imponen a esta distribución. Pueden apreciarse las grandes extensiones de la pluvisilva y de los bosques tropicales en torno al Ecuador y en las zonas intertropicales de África, de la Amazonía, de América del Sur, y de Indonesia y de otras áreas del sureste asiático. Frente a estos ecosistemas, se encuentran los grandes desiertos del planeta, los del Sahara y Kalahari, al norte y sur de África, respecti-

vamente, los situados en la península arábiga, los del centro y sur de Asia, los grandes desiertos australianos y los situados en las fachadas occidentales de América (California, Mohave, Atacama), motivados por la presencia de las corrientes frías de California y de Humboldt.

En las latitudes septentrionales del hemisferio norte, se observa la extensión de la taigá y de los bosques boreales de Europa y Rusia, en el continente euroasiático, y de Canadá, en América del Norte. En la Península Ibérica, se aprecia el contraste entre la zona septentrional, cubierta por los bosques húmedos atlántico-cantábricos, y la zona centro-meridional, dominada por cultivos y por superficies forestales propias del monte mediterráneo, adaptadas al estrés hídrico del verano.

En los años 90, el IGBP (*International Geosphere & Biosphere Program*) desarrolló una cobertura global de ocupación del suelo basada en imágenes de satélite, denominada IGBP-Land Cover (Brown *et al.*, 1993; Townshend *et al.*, 1991). Recientemente, se han realizado otras coberturas globales, como MODIS Land Cover, y europeas (CORINE).

Figura 15: Mosaico de imágenes captadas desde el satélite NOAA-AVHRR en una proyección homolosa de Goode.  
Fuente: <http://landcover.usgs.gov/glcc/index.php>



## 4.2. INFORMACIÓN SOBRE REGIONES NO VISIBLES DEL ESPECTRO

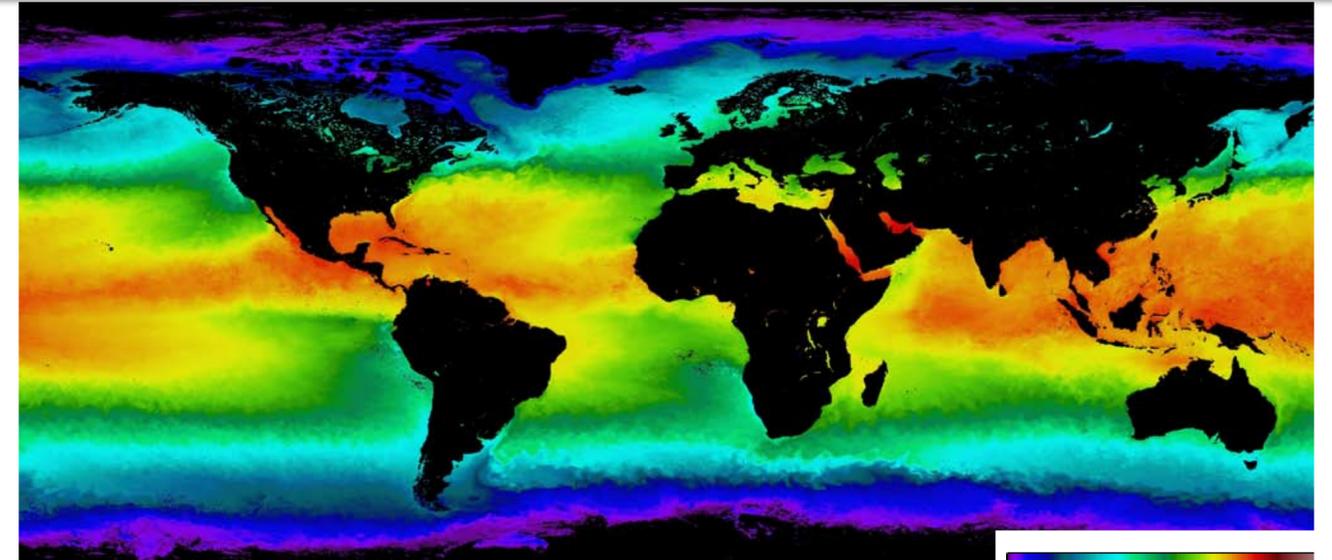


Figura 16: Mapa de temperaturas medias mensuales de la superficie marina a partir de un compuesto de imágenes AQUA-MODIS captadas entre el 1 de septiembre y el 1 de octubre de 2009.  
Fuente: <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/Search.html?group=10>

Gracias a su resolución espectral, la mayoría de los sensores que viajan a bordo de los satélites registran información tanto del espectro visible como del espectro no visible. Ésta es una de las grandes ventajas de la Teledetección frente a otros sistemas de observación de la Tierra como la fotografía aérea y la observación directa. En regiones no visibles del espectro es posible diferenciar objetos cuya respuesta espectral es similar en el rango del visible y calcular determinadas variables biofísicas.

Así por ejemplo, en la figura 16 se han determinado las temperaturas medias de la superficie de los mares y océanos del planeta a partir de un conjunto de imágenes MODIS, gracias a su capacidad de registrar las emisividades de los cuerpos en la región del infrarrojo térmico. La distribución espacial de esta variable es muy elocuente. Se evidencia un gradiente térmico zonal entre las cálidas aguas ecuatoriales y las gélidas aguas polares. Asimismo, se aprecian los factores azonales que distorsionan este esquema latitudinal. Se observa la distribución de la corriente cálida del Golfo de México (Gulf stream) y su deriva nordatlántica que influye en la suavización del clima de Noruega y parte de Suecia. En el sentido contrario, también pueden identificarse, en colo-

res azules, las corrientes frías de las fachadas occidentales de América (California y Humboldt), de África (Canarias y Namibia). A nivel regional, esta variable tiene gran influencia en la formación de huracanes y tifones en el Atlántico y Pacífico. Las anomalías térmicas del Pacífico, relacionadas con el fenómeno del Niño, ocasionan cambios bruscos de temperaturas y de precipitaciones a nivel global.

En la figura 17, se observa nítidamente el incendio forestal de Arenas de San Pedro (mancha oscura del centro de la imagen), gracias al registro de información en bandas del espectro visible y de la región del infrarrojo cercano. La vegetación quemada modifica su comportamiento frente a la vegetación sana (figura 18). La primera (a la izquierda), como consecuencia de la pérdida de los pigmentos y de la destrucción de la estructura celular de las hojas, refleja más luz visible y menos luz en el infrarrojo que la vegetación sana (a la derecha). Composiciones en color que emplean las bandas del visible, infrarrojo cercano y del infrarrojo medio, sensible al contenido de humedad, son las más utilizadas por los expertos para llevar a cabo, cada año, la cartografía de las áreas quemadas tras la finalización de la temporada de riesgo.

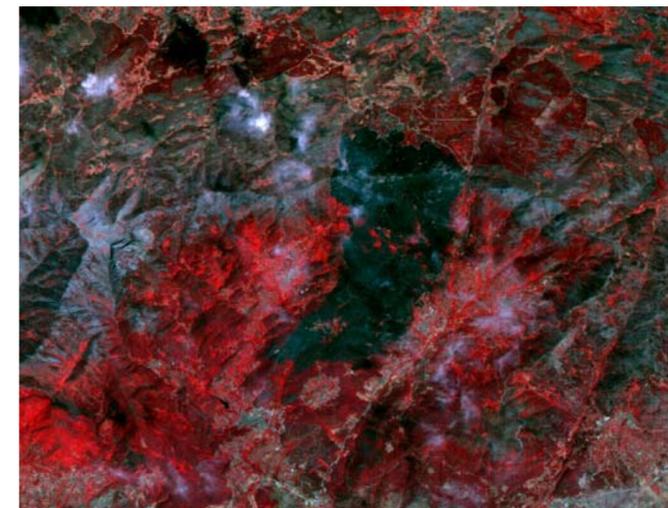


Figura 17: Imagen en falso color convencional captada por el satélite español Deimos-1 sobre la Sierra de Gredos. En el centro de la imagen, en color oscuro, se percibe la zona afectada por el incendio de Arenas de San Pedro que se inició el día 28 de julio de 2009 y afectó a una superficie de 5.000 ha y un perímetro de 40 km.  
Fuente: <http://www.deimos-imaging.com/imagenes-deimos-1>

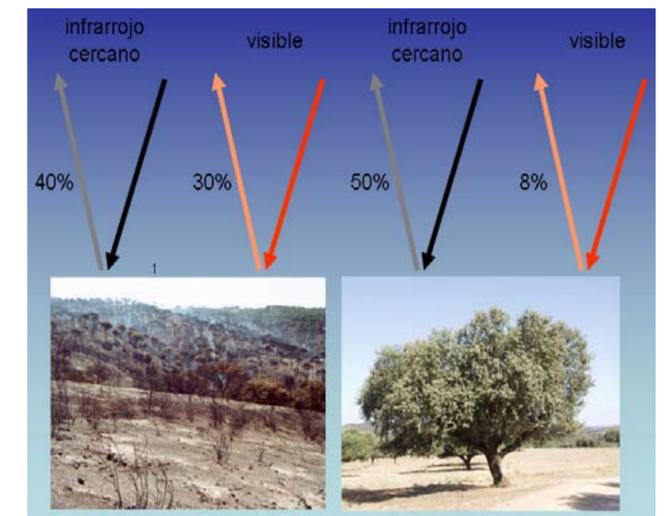


Figura 18: Variación del comportamiento espectral de la vegetación quemada (a la izquierda) frente a la vegetación sana (a la derecha) en las regiones del visible y del infrarrojo cercano (Adaptado de Simmon, 2009).

### 4.3. OBSERVACIÓN A DISTINTAS ESCALAS

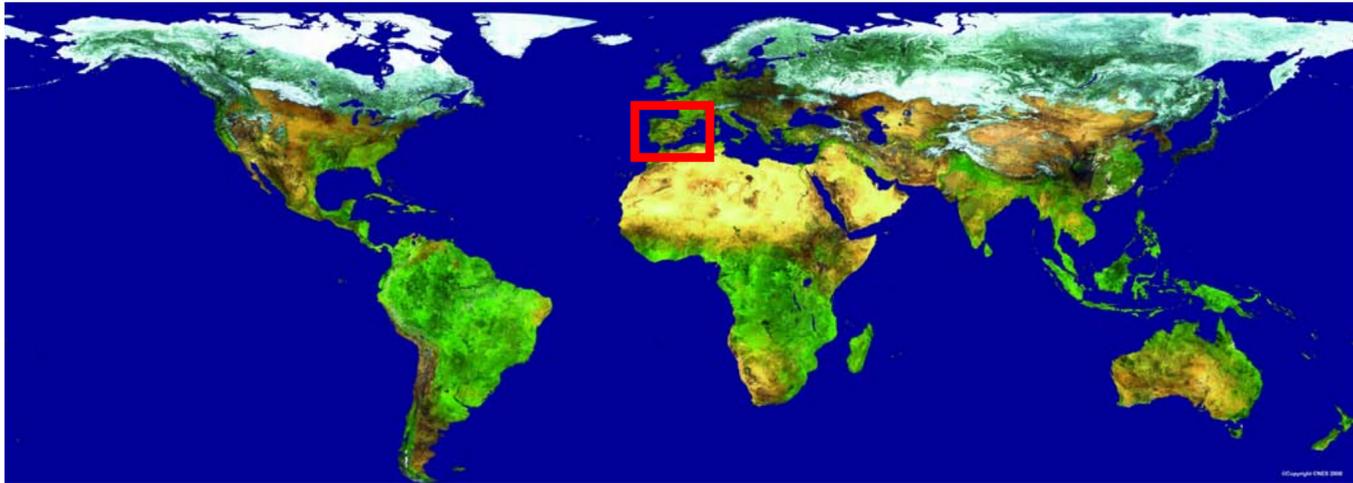
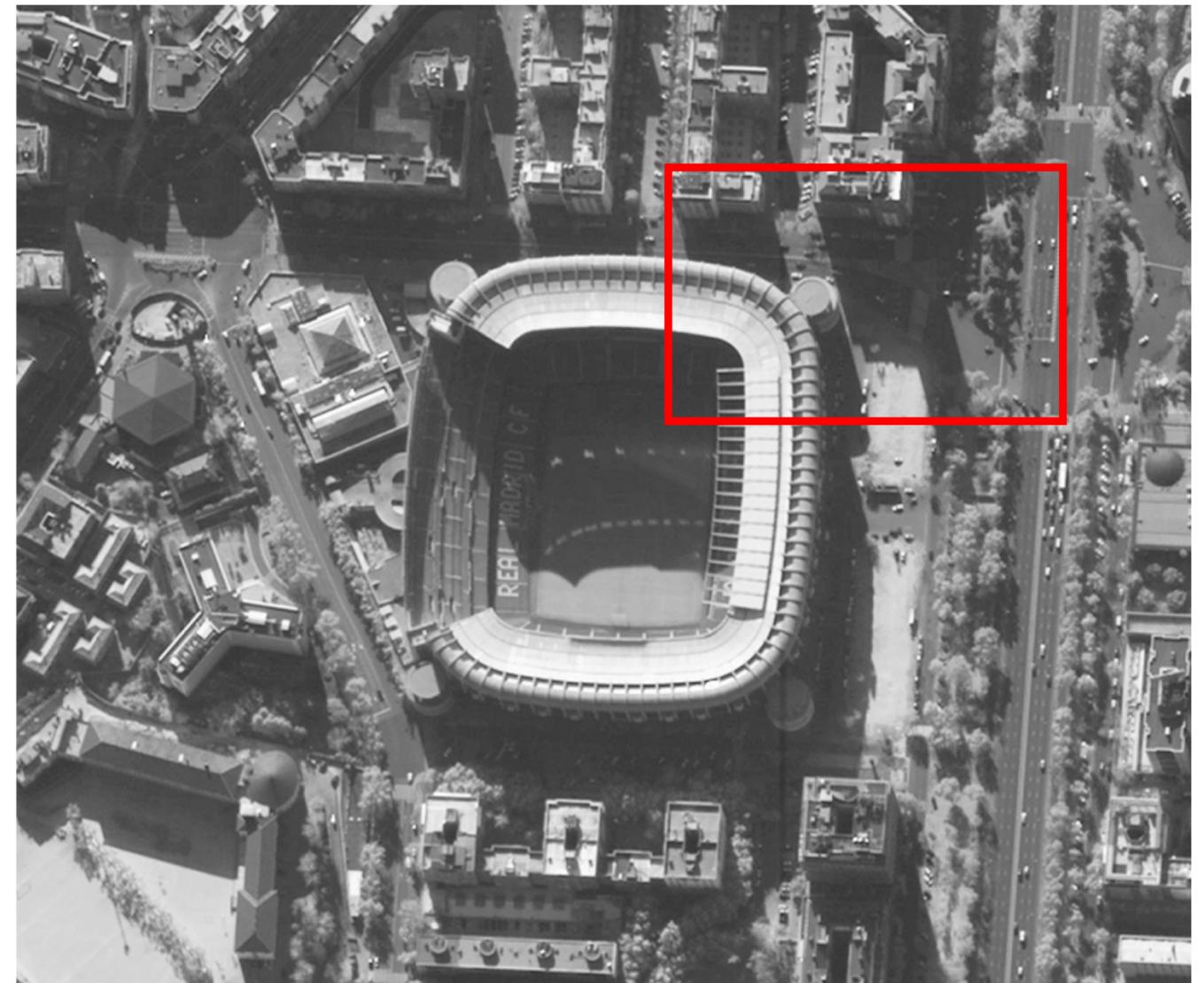


Figura 19: Mosaico de imágenes captadas, entre el 21 y el 31 de marzo de 1999, por el sensor VEGETATION, a bordo del satélite francés SPOT. Se selecciona el valor máximo de NDVI del periodo analizado.  
Fuente: <http://www.spot-vegetation.com/vegetationprogramme/index.htm>

Gracias a las distintas órbitas que describen los satélites, a las diversas alturas a las que orbitan y a sus diferentes campos de visión y resolución espacial, las imágenes captadas permiten realizar análisis de la superficie terrestre a distintas escalas y con distintos niveles de detalle. Desde la escala local hasta la global es posible realizar investigaciones multiescalares. En la figura 19 se observa un mosaico de imágenes tomadas por el sensor Vegetation del satélite francés SPOT con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>, siendo posible una observación global de la distribución de los ecosistemas terrestres en función de un índice de vegetación. Se aprecian, con mayor verdor, los bosques ecuatoriales, tropicales y templados junto a las extensas praderas de distintas latitudes. En amarillo, se representan los ecosistemas desérticos y subdesérticos junto a zonas esteparias de los interiores de los continentes, es decir las zonas que registran valores más bajos del índice de vegetación de diferencias normalizadas. Si centramos nuestra atención en la Península Ibérica podemos observarla con mayor detalle (figura 20) gracias

Figura 20: Imagen SeaWiFS de España, captada el 10 de septiembre de 2001.  
Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center y ORBIMAGE.



Figuras 21 (arriba): Imagen QuickBird de 2001, sobre el estadio de fútbol Santiago Bernabeu y sobre el distrito madrileño de Chamartín.

a otros sensores, como el SeaWiFS, diseñado originalmente para estudiar el color de los océanos. En esta imagen se perciben claramente las grandes unidades morfoestructurales de la península, desde el escudo galaico hasta las depresiones del Ebro y del Guadalquivir junto a las dos mesetas y a los principales sistemas montañosos. Otros accidentes geográficos son claramente discernibles como el Estrecho de Gibraltar, la costa gallega, recortada por las rías, y el delta del Ebro, rodeado por una orla de color azul verdoso que se corresponde con los sedimentos aportados al mar por el río.

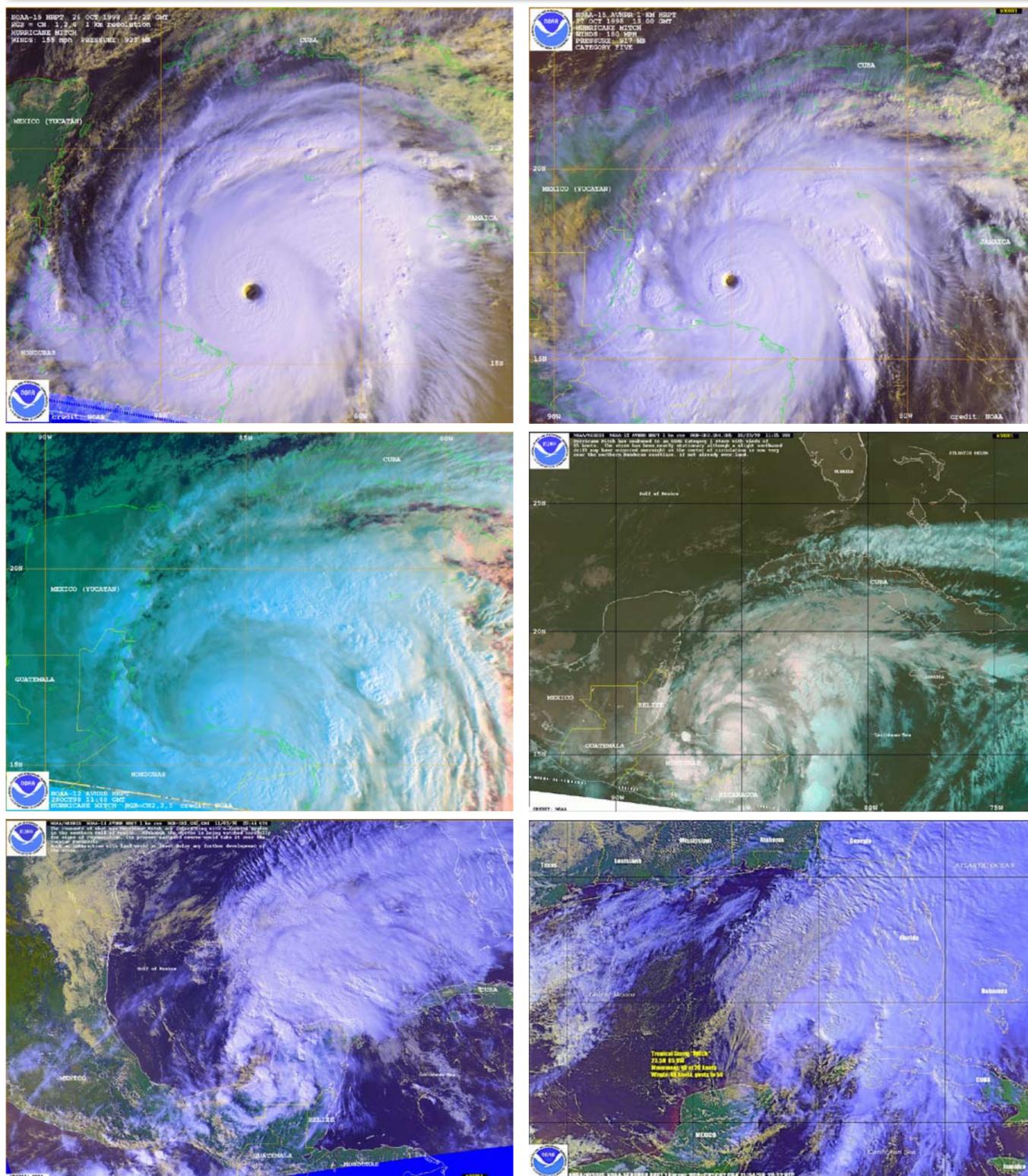
Si se realiza un zoom figurado sobre el centro de la península, podríamos observar una zona urbana de la ciudad de Madrid con mucho más detalle, gracias a la muy alta resolución espacial de los actuales satélites comerciales como Quickbird, que dispone de un tamaño de pixel de 61 cm. en terreno, en modo pancromático. En la figura 21, se observa una imagen del distrito de Chamartín y del estadio Santiago Bernabeu. Pueden apreciarse, con detalle, los vehículos y las copas de los árboles, de forma individual. Este tipo de imágenes son similares a las fotografías aéreas e, igualmente, pueden utilizarse para estudios de morfología urbana, para el cálculo de las alturas de los edificios y de las densidades de las manzanas y barrios y facilitan información sobre los equipamientos y servicios de la ciudad.

En resumen, desde las órbitas geoestacionarias, situadas a 36.000 km, hasta las órbitas polares más próximas a la Tierra, las variadas plataformas de Teledetección son capaces de proporcionar imágenes globales o de muy alta resolución espacial para abordar, con éxito, estudios multiescalares de la superficie terrestre con objetivos multipropósito y centrados en temas y variables muy diferentes. Esta capacidad es muy apreciada por los usuarios.

Figura 22 (abajo): Vista oblicua de la esquina superior derecha del estadio, en la imagen anterior, desde la Plaza de Lima, Madrid



## 4.4. FRECUENCIA DE ADQUISICIÓN



Figuras 23 (arriba a la izquierda), 24 (arriba a la derecha), 25 (centro a la izquierda), 26 (centro a la derecha), 27 (abajo a la izquierda) y 28 (abajo a la derecha): Secuencia de seis imágenes AVHRR sobre el Golfo de México, captadas los días 26, 27, 28 y 29 de octubre y 3 y 4 de noviembre de 1998, respectivamente, por los satélites NOAA 15, NOAA12 y NOAA 14.

Fuente: <http://www.osei.noaa.gov/mitch.html>

En función de las características de las órbitas de los satélites, éstos tienen una capacidad de revisitar un mismo territorio con una frecuencia temporal determinada. SPOT pasa cada 26 días por el mismo lugar y Landsat cada 16 días. Los satélites meteorológicos geostacionarios están diseñados para tener una buena resolución temporal, proporcionando una imagen cada poco tiempo. Meteosat, GOES y GMS aportan una imagen cada media hora y si se combinan varios satélites NOAA se puede obtener una imagen cada seis horas. De esta manera, es posible hacer un seguimiento multitemporal de procesos dinámicos que ocurren muy rápidamente sobre la Tierra, como los fenómenos meteorológicos, o multianual de procesos que ocurren a lo largo de años como los procesos de deforestación o el avance de la frontera agrícola.

Además, tienen una cualidad muy apreciada. La hora de paso por el mismo lugar, para los satélites heliosíncronos, es la misma, de forma que se asegura unas condiciones de iluminación homogéneas en los distintos pasos a lo largo de una misma estación.

En la secuencia de las figuras 23 a 28 se observa la evolución del huracán Mitch, de categoría 5, que afectó al Golfo de México y, especialmente, a Honduras y Nicaragua en 1998. En las figuras 23 y 24 se aprecia, además de la masa nubosa de forma circular, el ojo del huracán, claramente visible los días 26 y 27 de octubre de 1998.

La velocidad de los vientos llegó a alcanzar los 290 km/h. Ha sido uno

de los peores huracanes registrados en las últimas décadas. Las consecuencias y las pérdidas fueron importantes. Causó miles de millones de dólares en pérdidas materiales y una cifra estimada superior a 9.000 personas muertas y otros 9.000 desaparecidos, como consecuencia de las inundaciones y de los deslizamientos de laderas (Guiney y Lawrence, 1999).

En las imágenes siguientes, desde los días 28 de octubre hasta el 4 de noviembre, se observa el debilitamiento del huracán y su transformación en una tormenta tropical. Este tipo de imágenes son herramientas de gran utilidad para los servicios de emergencia y protección civil con objeto de evacuar a la población antes de que ocurra una catástrofe.

## 4.5. HOMOGENEIDAD EN LA ADQUISICIÓN

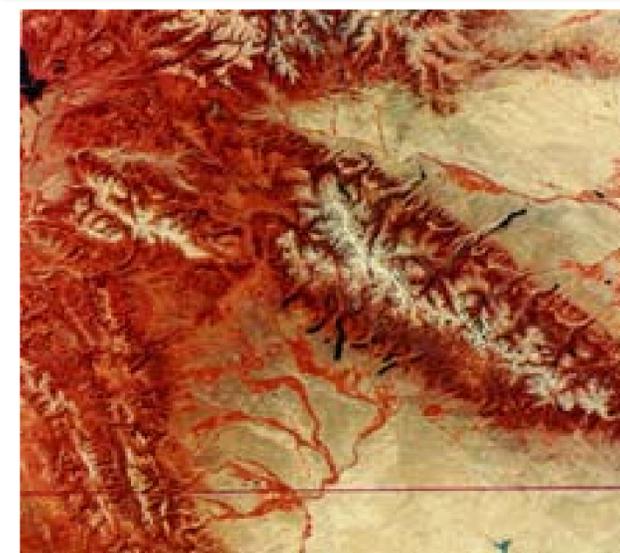


Figura 29: Imagen Landsat TM, en falso color, de la zona montañosa de Wind River, Wyoming, USA. Las condiciones de iluminación son homogéneas.

Las imágenes de satélite (figura 29) son registradas en poco tiempo y, en el caso de los satélites heliosíncronos, a una hora de paso similar, de forma que las condiciones de adquisición (hora, altura del sol sobre el horizonte, acimut) son homogéneas. De esta forma, la fotointerpretación o análisis visual de la imagen e, incluso, el tratamiento digital de la misma, se simplifica.

Por el contrario, las fotografías aéreas son registradas a lo largo de días, meses y años diferentes cuando se programa la cobertura de una zona de grandes dimensiones, como por ejemplo una cuenca hidrográfica (figura 30), o el territorio de todo un país, en el caso de un vuelo de cobertura nacional. Para tener un ejemplo significativo, pongamos el caso de los vuelos nacionales de nuestro país. El vuelo americano fue realizado a lo largo de dos años, 1956 y 1957. El siguiente vuelo nacional fue realizado entre 1983 y 1985. En la actualidad, el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) está registrando el territorio, a lo largo de los últimos años, con una resolución espacial de 0,5 m.

Las campañas de vuelo se programan para cubrir largas franjas del territorio en sentido latitudinal, de W a E, cubriendo la siguiente franja meridional en sentido inverso, de E a W. En la zona de traslape (solape transversal) entre una franja y su adyacente por el N o por el S, el mismo territorio puede haber sido registrado con diferencia de días o meses, de tal forma que las condiciones de iluminación pueden haber variado de forma significativa. Estas circunstancias se traducen en un tono o color diferente, de manera que el intérprete puede asignar un objeto o zona determinada a una categoría temática diferente en función de la franja analizada. Estas dificultades en la fotointerpretación pueden reducirse si el analista se ciñe a la parte útil de la fotografía aérea, desechando las zonas periféricas de la misma que, por otra parte, son las que tienen mayores deformaciones geométricas, al estar más alejadas del nadir. También es frecuente construir mosaicos continuos con las fotografías aéreas, eliminando las zonas de solape.

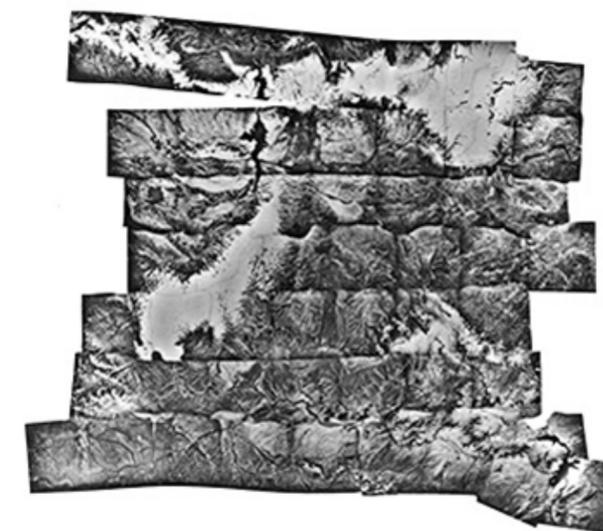


Figura 30: Mosaico de fotografías aéreas de la cuenca del Wind River, Wyoming, USA.

## 4.6. OTRAS VENTAJAS

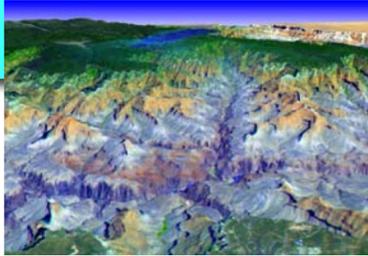
Por último, conviene insistir en que la mayor parte de los sistemas de teledetección registran las imágenes en un formato digital. Los satélites, cuyas misiones tienen objetivos globales, pueden enviar la información en tiempo real. Gracias a esta capacidad de transmisión inmediata de los datos (Chuvieco, 2008), estos sistemas son muy apreciados por los servicios de emergencia y de alerta temprana internacionales y nacionales.

Como se ha dicho anteriormente, la información proporcionada puntualmente por los satélites meteorológicos mitiga los impactos de las catástrofes naturales. Igualmente, puede orientar a los directores de extinción de grandes incendios forestales en el seguimiento de los mismos y en las tomas de decisiones correspondientes en la lucha contra ellos.

Por otra parte, el formato digital de las imágenes facilita el tratamiento de los datos mediante sistemas informáticos, de manera que se agilizan las tareas de interpretación (Chuvieco, 2008), la obtención de variables biofísicas, de modelos cuantitativos y la integración de los datos derivados con otra información temática en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica, facilitando los análisis relacionales y de causalidad entre variables.

El formato numérico de las imágenes de satélite y de los modelos derivados de ellas facilita su tratamiento para ser integrados en los servidores de mapas en Internet, en los Geoportales y en las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) que proporcionan información cartográfica y espacial a los ciudadanos a través de las Tecnologías de Información y la Comunicación (TIC).

# 5. FENÓMENOS NATURALES



Gracias a las características de la Teledetección, que se han descrito en el capítulo anterior (frecuencia de adquisición o repetitividad de las imágenes, cobertura global y registro de la información en regiones no visibles del espectro), esta herramienta es capaz de proporcionar información espacial relevante y útil para el seguimiento de múltiples fenómenos naturales que interesan y preocupan al hombre y, de forma colectiva, a las sociedades.

En este capítulo, se han elegido una serie de imágenes captadas por diversos satélites con el objetivo de mostrar un catálogo, que no pretende ser exhaustivo ni completo, de diversos fenómenos naturales. Entre ellos, se han destacado la ocurrencia de huracanes y tormentas tropicales, de volcanes y de inundaciones. Asimismo, se presta atención a otro tipo de fenómenos naturales que llaman la atención por las dimensiones que poseen y por sus efectos sobre la salud o sobre los sistemas de navegación aérea y marítima, como las tormentas de arena relacionadas

con los grandes desiertos del mundo. Por último, se ha reservado un espacio a las grandes geoformas o megaformas, que son claramente visibles desde el espacio. Desde esta perspectiva global, se comprenden mejor sus formas y sus estructuras.

Los incendios forestales se van a comentar en el siguiente capítulo porque, aunque una parte de los mismos están vinculados a determinados fenómenos naturales, como las lavas y materiales volcánicos incandescentes o la caída de rayos, la mayor parte de ellos están asociados al riesgo humano como consecuencia, entre otras muchas causas, de las diversas actividades y negligencias humanas tales como las quemaduras de residuos agrícolas y de masas forestales, por las chispas o focos de ignición causados por las máquinas que trabajan o atraviesan zonas forestales o generados desde las carreteras, caminos y vías férreas, además de la intencionalidad relacionada con motivos de venganza o con patrones de conducta anómalos.

## 5.1. RIESGOS NATURALES

Los riesgos naturales pueden definirse como la probabilidad de que ocurra un desastre natural, de origen geológico o geomorfológico, meteorológico, hidrológico o biológico, en una zona determinada, afectando a la población asentada sobre ella y a las infraestructuras, bienes y propiedades. Aunque se denominan naturales, no significa que el riesgo se refiera, exclusivamente, a algún fenómeno natural. Puede ocurrir que en el origen del riesgo esté involucrado el hombre, aquél sea consecuencia de la acción antrópica o que sus efectos se agraven por la acción directa o indirecta de las actividades humanas. Los riesgos naturales tienen una dimensión multiescalar, de forma que pueden ocurrir a escala local, regional o global.

Toda la literatura escrita sobre los riesgos se muestra de acuerdo en señalar que éstos son el resultado del producto de dos componentes, el peligro y la vulnerabilidad. El peligro se mide mediante una función probabilística de la ocurrencia de un fenómeno natural con consecuencias negativas debidas a su extensión, intensidad y duración. Se suelen tener en cuenta los periodos de recurrencia de estos fenómenos. La vulnerabilidad está relacionada con el impacto de un fenómeno natural determinado sobre las vidas humanas, propiedades, la fauna, flora y el resto de los recursos naturales. Puede medirse en función del valor de los recursos dañados o las pérdidas producidas por la ocurrencia de dicho fenómeno natural. La vulnerabilidad depende de la respuesta de la población frente al riesgo y, por tanto, de la eficacia de los planes de prevención y lucha contra los diversos desastres naturales de una

sociedad.

Aunque el hombre y las sociedades no pueden evitar la ocurrencia de estos fenómenos y los desastres naturales que ocasionan, sin embargo sí tienen capacidad para comprender los mecanismos que los originan y para prevenirlos, mitigando sus efectos. Los servicios de prevención, de alerta temprana, de emergencias y de protección civil centran su atención en estos objetivos.

El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha definido un Índice de Riesgo de Desastre (IRD), definido con un nivel mundial de observación y un nivel nacional de resolución. Su objetivo es comparar los países en función de los efectos que producen las tres principales amenazas naturales: los terremotos, los ciclones tropicales y las inundaciones. Estos tres fenómenos son los responsables del 39% de las víctimas mortales que se cobran los desastres naturales de mediana o gran escala en todo el mundo.

En 2008, los desastres naturales ocasionaron unas pérdidas económicas estimadas en 181.000 millones de dólares y la muerte de 235.816 personas en todo el mundo (González, 2009). En el primer caso, las pérdidas estuvieron explicadas por los efectos del terremoto en China y del huracán Ike en Estados Unidos. En el segundo caso, el ciclón Nargis y el terremoto de Sichuán fueron los dos fenómenos naturales que ocasionaron el mayor número de muertos.

### 5.1.1. HURACANES

Según la mitología maya, "Hurakan" es el nombre de un dios relacionado con el viento y las tormentas.

Huracán es uno de los sustantivos con los que se designan los ciclones tropicales en el Atlántico Norte. Otros términos como tifón, ciclón tropical o depresión tropical son igualmente usados o preferidos en otras zonas del mundo.

Los ciclones tropicales son sistemas de tormentas que circulan alrededor de centros de baja presión atmosférica y que producen fuertes vientos y abundantes lluvias. Su estructura está compuesta por tres elementos:

un ojo, la pared del ojo y las bandas lluviosas.

El ojo del huracán es el área central del mismo que se encuentra libre de nubes. Por él, descienden los vientos de retorno del huracán hacia la superficie del océano para retroalimentar el ciclón tropical. Tiene una forma circular y su tamaño es variable, oscilando entre 3 y 370 kilómetros de diámetro.

La pared del ojo es una banda que se sitúa alrededor del ojo. A través de la pared, los vientos húmedos, en contacto con las cálidas aguas oceánicas, ascienden a gran velocidad, condensándose rápidamente.

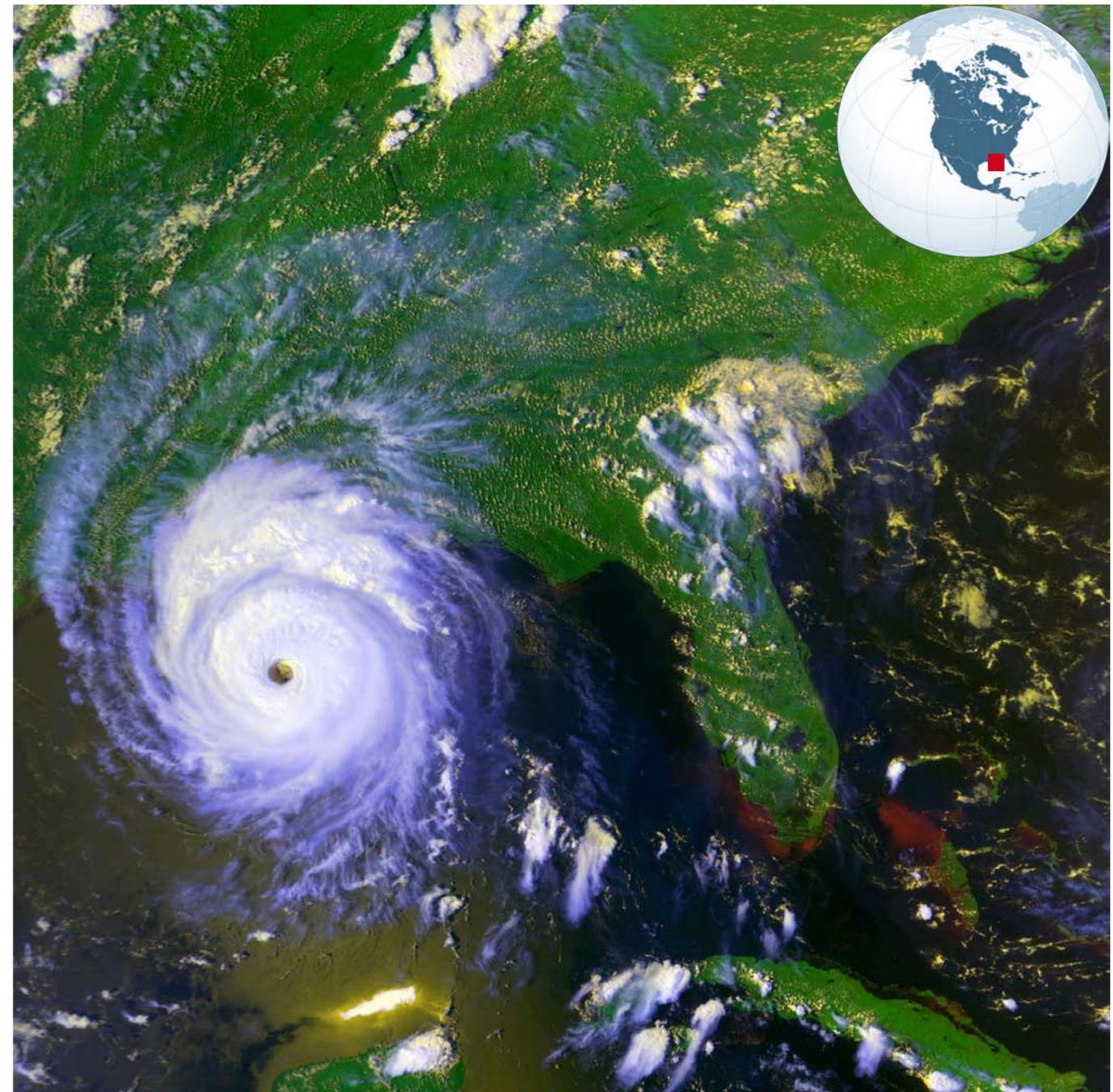


Figura 31: Imagen del huracán Andrew tomada, por el satélite geoestacionario GOES, el 25 de agosto de 1992 sobre el Golfo de México. Fuente: [www.visibleearth.nasa.gov](http://www.visibleearth.nasa.gov)

Se trata de grandes fenómenos convectivos. Las nubes formadas alcanzan las máximas alturas y se producen lluvias muy intensas. La condensación imprime mayor velocidad a los vientos ya que una parte de la energía liberada se transforma en energía mecánica.

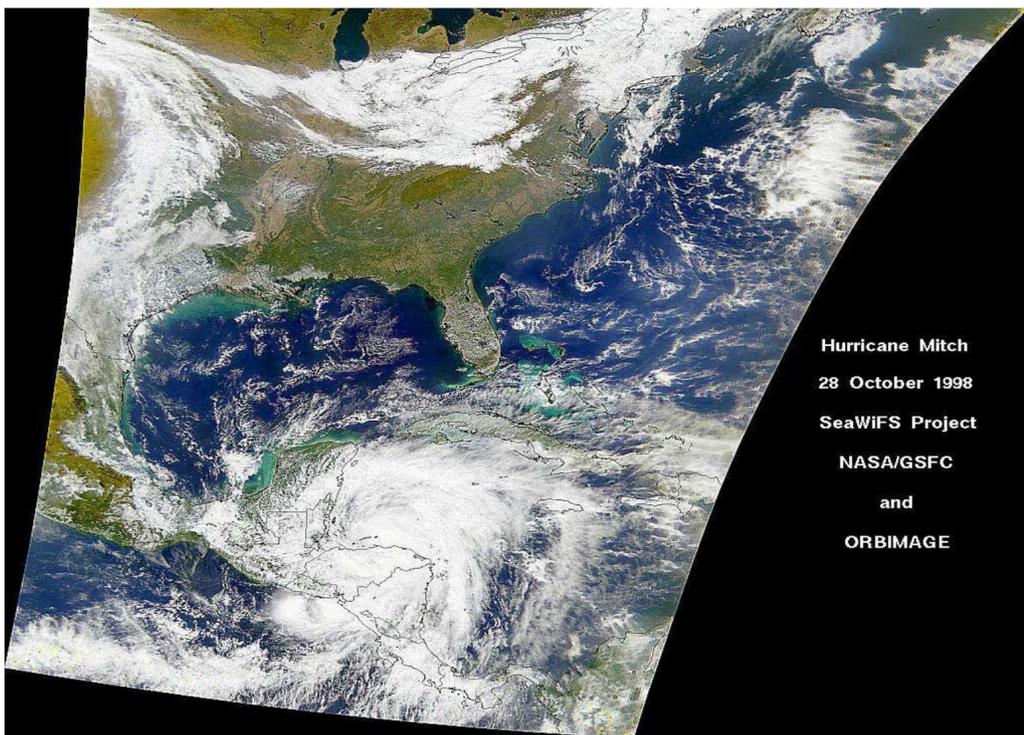
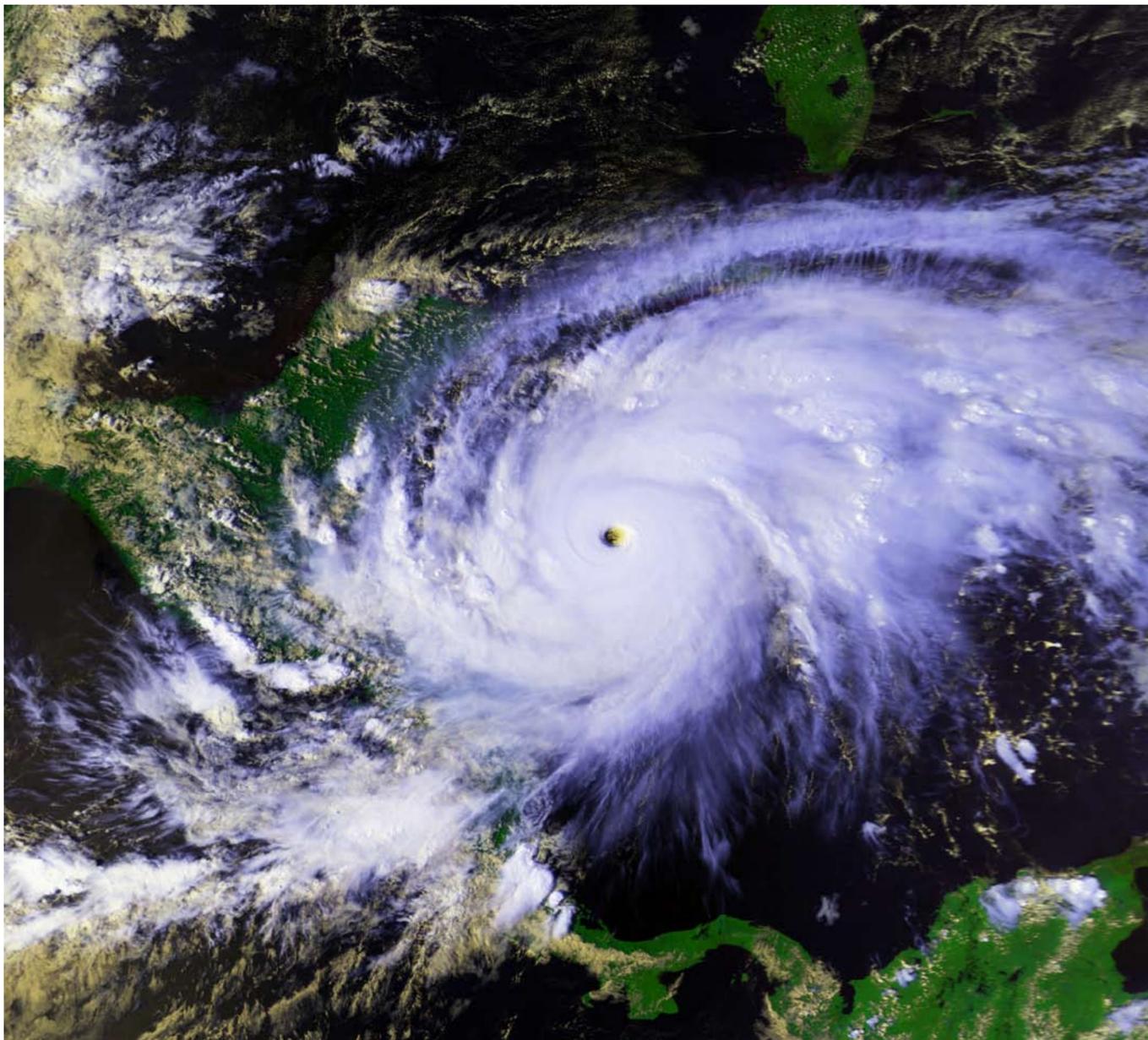
Las bandas lluviosas son las masas de nubes que rodean al ojo y a su vez, giran, de forma ciclónica, en torno a la depresión como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, también conocido como efecto de Coriolis. En el hemisferio norte giran en sentido contrario a las agujas del reloj mientras que en el hemisferio sur lo hacen en el sentido de las agujas del reloj. Las masas nubosas son divergentes, en todas las direcciones, desde el centro del ciclón hacia la periferia, de forma centrífuga. En altura, los vientos ascendentes giran de forma anticiclónica. Estos vientos retornan a la superficie a través del centro del ojo, en sentido descendente, para retroalimentar este sistema ciclónico. Los huracanes se forman cuando concurren una serie de circunstancias. Entre ellas, es importante señalar la temperatura de las aguas oceánicas que deben ser superiores a 26,5° hasta una profundidad de, al menos, 50 m. La humedad que conlleva esta temperatura del agua es fundamental para sostener el fenómeno de convección, clave para el origen y funciona-

miento de los huracanes. Además, se debe producir un enfriamiento rápido, en altura, de las masas de aire ascendentes, de tal manera que se produzca la expulsión del calor latente, fuente de energía de los huracanes. Por norma general, los ciclones tropicales se producen en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y, de forma especial, en una franja comprendida entre los 5 y 20° de latitud norte o sur, allí donde la fuerza de Coriolis es más intensa y desvía las masas nubosas hacia los centros de bajas presiones. Aunque cada zona tiene un patrón específico de ocurrencia, puede decirse que, a nivel mundial, los huracanes se forman principalmente a finales del verano. El mes de mayor probabilidad de ocurrencia es septiembre.



Figura 32: Estructura de un huracán.

Tomado de <http://www.snet.gob.sv/ver/seccion+educativa/meteorologia/huracanes/estructura/>



Hurricane Mitch  
28 October 1998  
SeaWiFS Project  
NASA/GSFC  
and  
ORBIMAGE

Figura 33 (arriba): Imagen, en color natural, del huracán Mitch sobre el Golfo de México, tomada por el satélite GOES, el 26 de octubre de 1998.

Figura 34 (izquierda): Imagen, en color natural, del huracán Mitch tomada el 28 de octubre de 1998 por el sensor oceanográfico SeaWiFS, a bordo del satélite Orbview-2.

Figura 35 (derecha, en página siguiente): Imagen, en color natural, del huracán Hernán, al sur de la península de Baja California, en el Pacífico Noreste. Ha sido captada el 3 de septiembre de 2002 por el sensor hiperspectral MODIS, a bordo del satélite TERRA. Los huracanes que tocan California son extremadamente raros.  
Fuente: Jacques Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team at NASA GSFC.



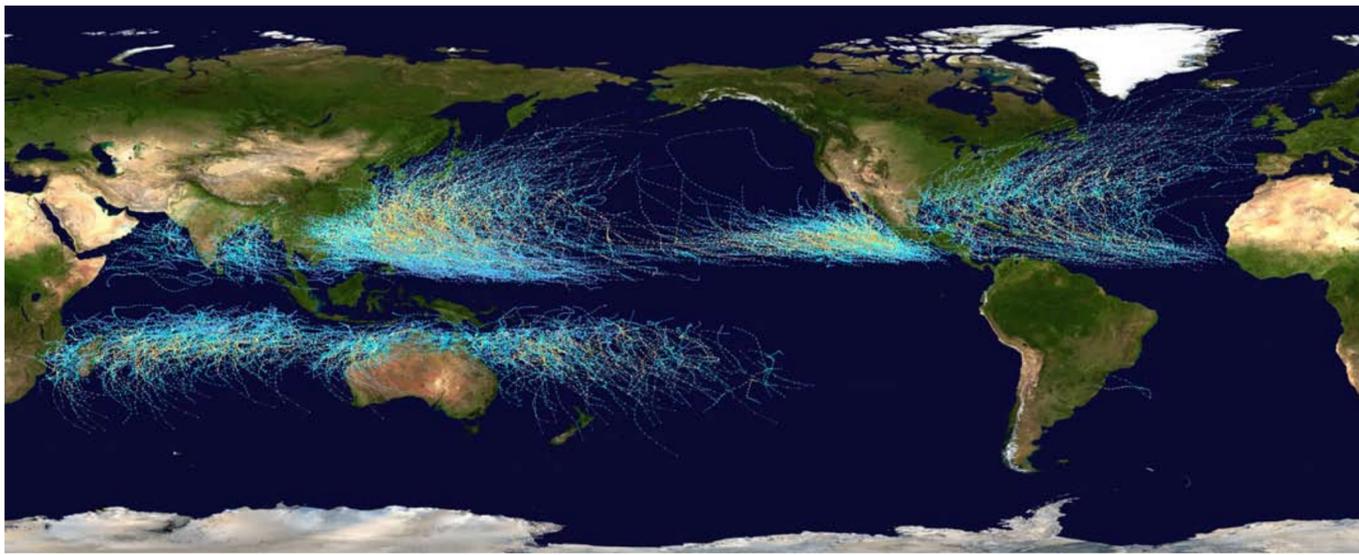


Figura 36: Distribución geográfica de la ocurrencia de huracanes entre 1985 y 2005.  
Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Global\\_tropical\\_cyclone\\_tracks-edit2.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Global_tropical_cyclone_tracks-edit2.jpg)

A nivel mundial, aunque hay algunas zonas atípicas, puede decirse que existen siete zonas donde, habitualmente, ocurren los ciclones tropicales (figura 36). Estas regiones son el Atlántico Norte, Pacífico Noreste, Pacífico Noroeste, Pacífico Suroeste, Índico Norte, Índico Sureste e Índico Suroeste. Siguiendo el mismo orden, las zonas emergidas más afectadas son las siguientes: en el Atlántico Norte, la costa sureste de Estados Unidos, México, América Central y las islas caribeñas (grandes y pequeñas Antillas). En el Pacífico Noreste, las costas occidentales de México y de América Central, Hawai y, ocasionalmente, las costas de California. En el Pacífico Noroeste, las zonas costeras de China, Japón,

Taiwan, Corea del Sur, Vietnam e Indonesia, además de numerosas islas de Oceanía y Filipinas. En el Pacífico Suroeste, las costas australianas de Queensland, Papúa Nueva Guinea y la Polinesia, Micronesia y Melanesia. En el Índico Norte, las costas del Golfo de Bengala (Sri Lanka, India, Bangladesh, Birmania y Tailandia) y, ocasionalmente, las zonas costeras del Mar Arábigo. En el Índico Sureste, las costas occidentales de Indonesia y de Australia. Finalmente, en el Índico Suroeste, los huracanes afectan a las costas de Madagascar, Mozambique, Isla Mauricio y Kenia.

La Organización Meteorológica Mundial asigna a cada ciclón tropical un

Figura 37: Imagen del huracán Katrina tomada, por el satélite NOAA en color natural, el 28 de agosto de 2005.

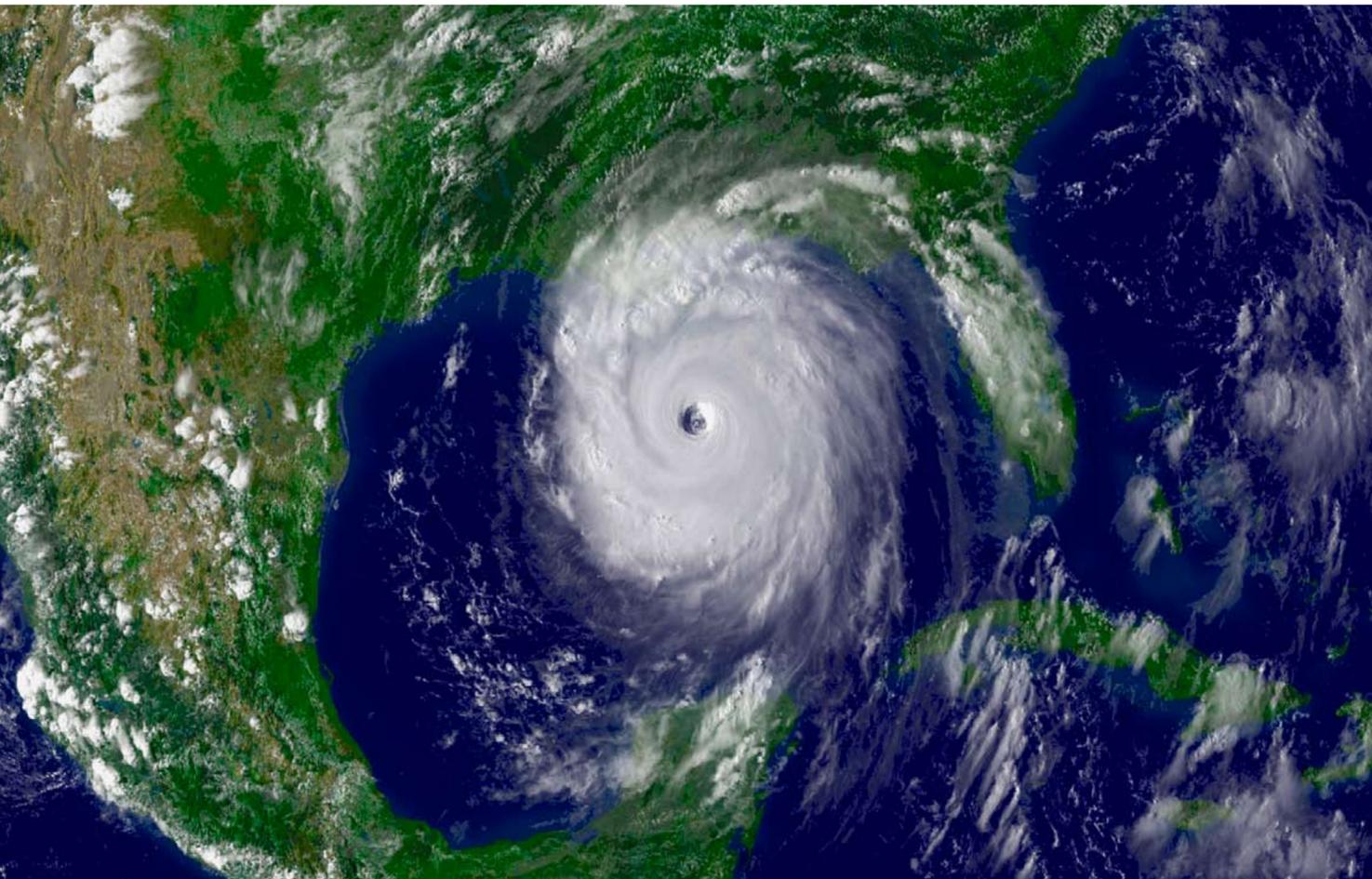


Figura 38: Vista oblicua del huracán Katrina.

nombre propio, con objeto de facilitar su identificación a los servicios de emergencia, a las compañías de seguros y a la población. Los comités regionales de esta organización preparan listas de nombres en las que se alternan los nombres masculinos y femeninos de los huracanes. Una vez que comienza la temporada de huracanes se van asignando nombres de la lista a cada uno de ellos, por orden alfabético. Estas listas se renuevan cada ciertos años. Si algún tifón ha tenido una fuerza devastadora y ha ocasionado daños importante, su nombre es eliminado de la lista de la región donde ha ocurrido.

Los huracanes son clasificados en cinco categorías según la escala de Saffir-Simpson. Esta escala la diseñaron, en 1969, el ingeniero civil Herbert Saffir, que trabajaba para Naciones Unidas, y el director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, Bob Simpson. Esta escala se basa en la velocidad de los vientos, en la presión atmosférica del ojo del huracán, en los daños potenciales sobre los edificios y en los efectos del oleaje y de las inundaciones. La velocidad del viento está medida como la velocidad media en un minuto.



Figura 39 (izquierda): Imagen Landsat 7- ETM de New Orleans, captada el 26 de abril de 2000. La ciudad se observa en tonos de gris, al sur del lago Pontchartrain, la masa azulada del centro de la imagen. En el tercio meridional de la ciudad, el río Mississippi la atraviesa de oeste a este, describiendo meandros pronunciados. La ciudad está rodeada por grandes masas y corrientes de agua, además de la densa red de canales que atraviesan sus calles. Topográficamente, el 70% de la ciudad está localizado por debajo del nivel del mar. Su situación entraña un elevado riesgo de inundación, resultando, además, altamente vulnerable ante el paso de un huracán de máxima intensidad, como Katrina.

Fuente: [http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/2000/2158/landsat\\_new\\_orleans\\_nfl\\_lrg.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/2000/2158/landsat_new_orleans_nfl_lrg.jpg)  
Cortesía de Robert Simmon.

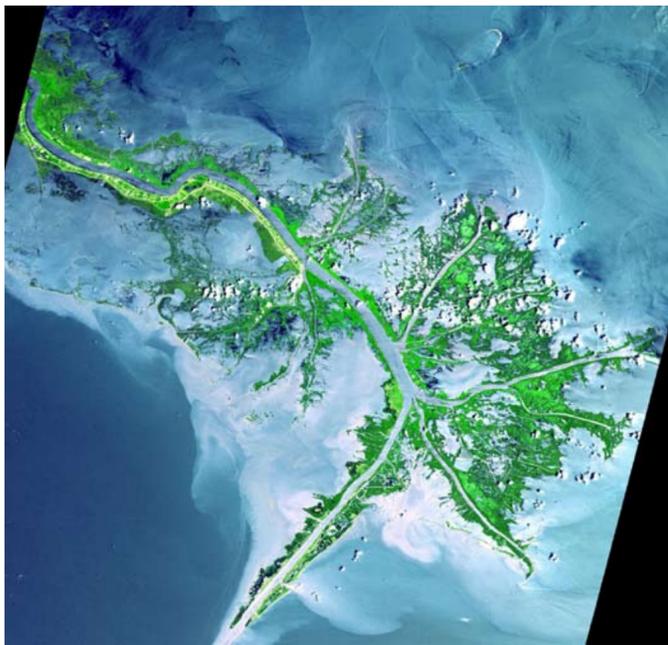


Figura 40: Imagen ASTER, captada el día 24 de mayo de 2001 sobre el delta del Mississippi, una de las áreas afectadas, años después, por el paso del huracán Katrina. Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team

Otro sistema para designar su tamaño consiste en medir su radio, es decir la distancia entre el ojo del huracán y la isobara externa más cercana. Si el radio es inferior a 2° de latitud (222 km), el huracán se considera muy pequeño. Por el contrario, los ciclones tropicales muy grandes tienen radios superiores a 8°.

Los efectos producidos por los huracanes son conocidos y temidos. Entre otros, se destacan los fuertes vientos que ocasionan daños sobre los edificios, infraestructuras y vehículos. Igualmente, las marejadas, el elevamiento del nivel del mar y las intensas lluvias asociadas ocasionan inundaciones y deslizamientos de laderas. Otros efectos secundarios son la aparición de enfermedades y los cortes en las redes energéticas y de transporte.

El huracán Katrina ocasionó, en 2005, la muerte de 1.836 personas, la desaparición de otras 705 personas y unas pérdidas valoradas en 81.200 millones de \$. Katrina ha sido uno de los ciclones tropicales más mortíferos, destructivos y costosos de los últimos años. Se formó el día 24 de agosto de 2005 sobre las Bahamas y tocó tierra en Florida, aunque entonces estaba clasificado en la categoría 1. Sobre las cálidas aguas del Golfo de México se reactivó, convirtiéndose en un huracán de categoría 5. La presión atmosférica en el ojo del huracán era muy baja, de 902 mb. Alcanzó vientos sostenidos de 280 km/h. El 29 de agosto de 2005 tocó, de nuevo tierra en la frontera entre los estados de Louisiana y Mississippi. Las autoridades de New Orleans ordenaron la evacuación completa de la ciudad. Los diques que separan la ciudad del lago Pontchartrain se rompieron y, el 30 de agosto de 2005, el 80% de la ciudad se encuentra inundada y el 85%, tres días más tarde. Otras áreas afectadas fueron Bahamas, Cuba, Florida, Alabama y otros estados orientales de Estados Unidos. Además, Katrina obligó a interrumpir la actividad petrolífera del Golfo de México. Consta que una veintena de plataformas petrolíferas se perdieron o fueron dañadas por el temporal. Debido a los daños producidos y a las muertes ocasionadas, el nombre de Katrina ha sido retirado, en la primavera de 2006, de la lista de nombres a asignar a los huracanes de la región. Su nombre será reemplazado por Katia en la temporada de 2011.

Igualmente, otros huracanes han ocasionado pérdidas importantes. El paso del huracán Andrew, de categoría 5, generó, entre el 16 y el 28 de agosto de 1992, unas pérdidas de 40.700 millones de \$ y el fallecimiento de 26 personas, de forma directa, y de otras 39 personas, de forma indirecta. Se trata del segundo huracán más costoso de la historia, después de Katrina. Recientemente, el tifón Ketsana, de categoría 4, se ha formado sobre el Pacífico Noroeste y se ha desplazado hacia las costas surentales de Asia, afectando, principalmente, a Filipinas, Vietnam, Camboya y Tailandia.

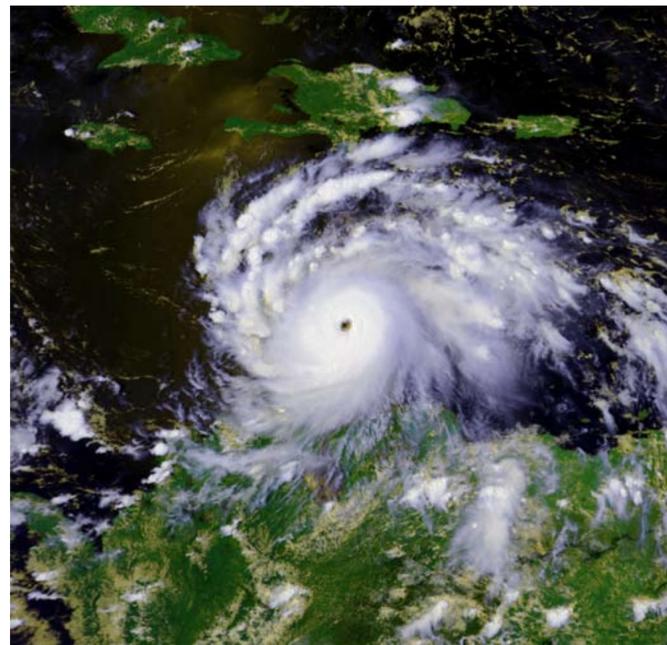


Figura 41: Imagen, en color natural, del huracán Félix, tomada por NOAA-18, el 2 de septiembre de 2007 sobre el Mar Caribe. Adquirió categoría 5. Fallecieron 133 personas.

Fuente: <http://www.class.noaa.gov/>

Figura 42: Vista oblicua de la ciudad de New Orleans, tomada el 29 de agosto de 2005. Se observan los efectos del huracán Katrina. El bulevar West End se encuentra inundado así como su confluencia con la autopista interestatal 10. Además de las intensas precipitaciones caídas, la rotura del dique del canal de la calle 17, al oeste, fue la causa principal de la inundación de gran parte de la ciudad, situada por debajo del nivel del mar.



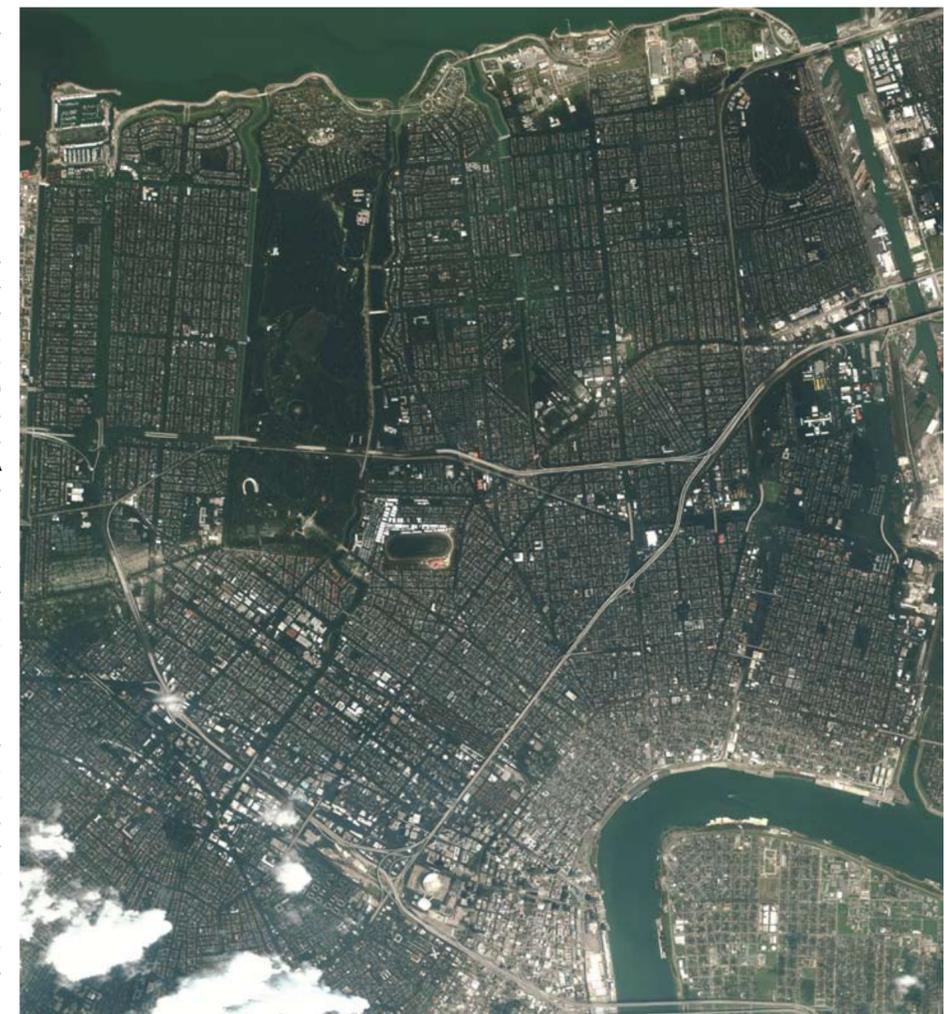
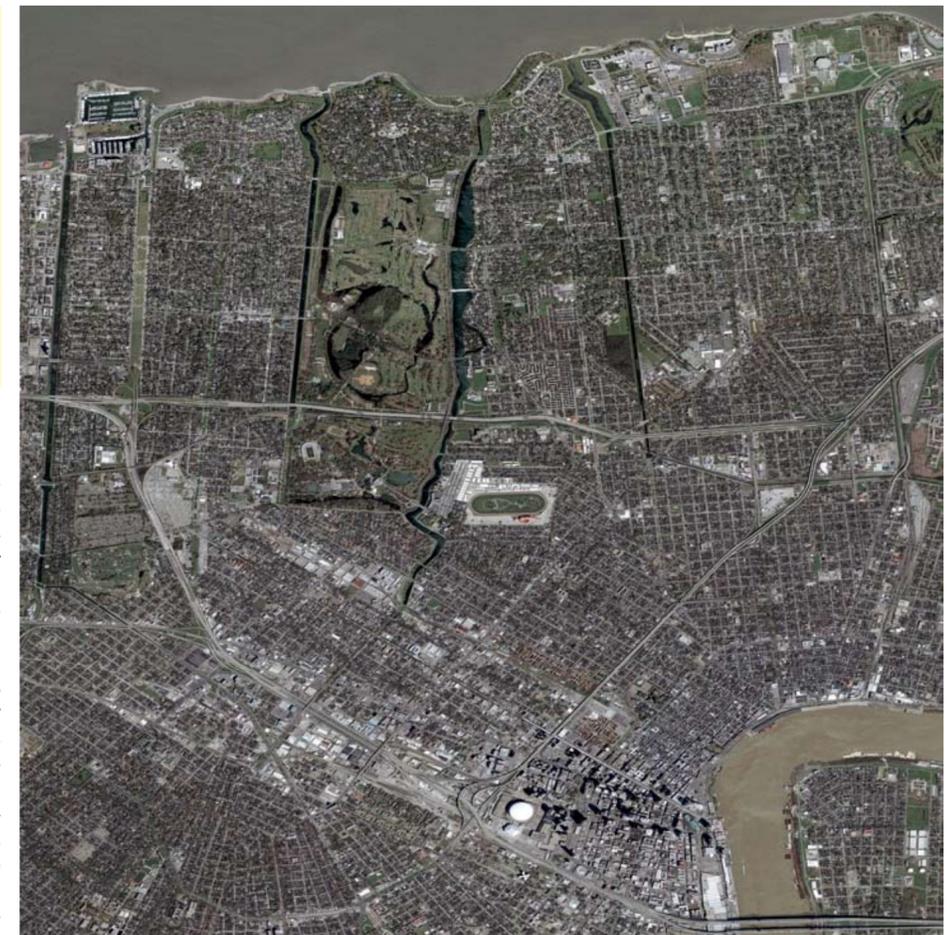
Figuras 43 (derecha) y 44 (abajo a la derecha): Imágenes Quickbird sobre New Orleans, tomadas el 9 de marzo de 2004 y el 31 de agosto de 2005, respectivamente. Comparando ambas, puede observarse el impacto de Katrina sobre la ciudad. El sector comprendido entre el puerto y el lago, al norte, y el Mississippi, al sureste, se encuentra completamente inundado. Viviendas, infraestructuras y equipamientos se han visto afectados por las inundaciones provocadas por las intensas lluvias asociadas a Katrina. Fuente: Digital Globe

La depresión tropical denominada 17W, inicialmente y conocida en Filipinas con el nombre local de Ondoy, cambia su nombre a Ketsana. Comienza el 23 de septiembre de 2009 como una depresión tropical de pequeña intensidad, en el centro-oeste del Mar de Filipinas. Toca tierra en la costa oriental de la isla de Luzón, por la tarde del día 26 de septiembre.

La razón de la intensificación de las lluvias provocadas por Ketsana al llegar a Manila y a la costa occidental de la isla de Luzón es la interacción entre el nivel inferior de circulación del tifón y el monzón estacional del suroeste. Estos vientos suelen ser dominantes entre junio y septiembre, aportando aires cálidos y húmedos, tras recorrer el Mar de China Meridional. Los vientos se encuentran con los relieves de las islas. El sentido de circulación de los vientos asociados a Ketsana, en el sentido de las agujas del reloj, realiza el efecto del monzón, provocando lluvias torrenciales. En las primeras 6 horas que toca tierra, se registran 341 mm, superando el récord de 334 mm en 24 horas que se registró en junio de 1967 en Manila. Este volumen de precipitaciones equivale a la cantidad que, habitualmente por estas fechas, se registra en un mes completo.

Según la Administración de Servicios Atmosféricos, Geofísicos y Astronómicos de Filipinas (PAGASA), durante el sábado 26 de septiembre, Manila registra unas precipitaciones de 455 mm en tan sólo 24 horas. El satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) es utilizado para hacer el seguimiento de las lluvias tropicales provocadas por huracanes y tifones. Es una misión conjunta de NASA y de la agencia japonesa de exploración aeroespacial. Los datos captados por TRMM, en el periodo semanal comprendido entre el 21 y el 28 de septiembre, verifican los registros obtenidos a través de fuentes convencionales. Estos datos han sido empleados para construir un mapa tridimensional de las lluvias caídas en Filipinas a lo largo de esa semana.

Además de los 400 fallecimientos provocados por Ketsana, de los centenares de miles de personas evacuadas y de los más de dos millones de hogares afectados, los daños materiales ascienden a 101 millones de dólares en Filipinas y a 168 millones de dólares en Vietnam, según las valoraciones iniciales. La presidenta de Filipinas, Gloria Macapagal Arroyo, ha declarado el estado de catástrofe en la capital y en otras 25 provincias más, situadas, principalmente, en la isla de Luzón.



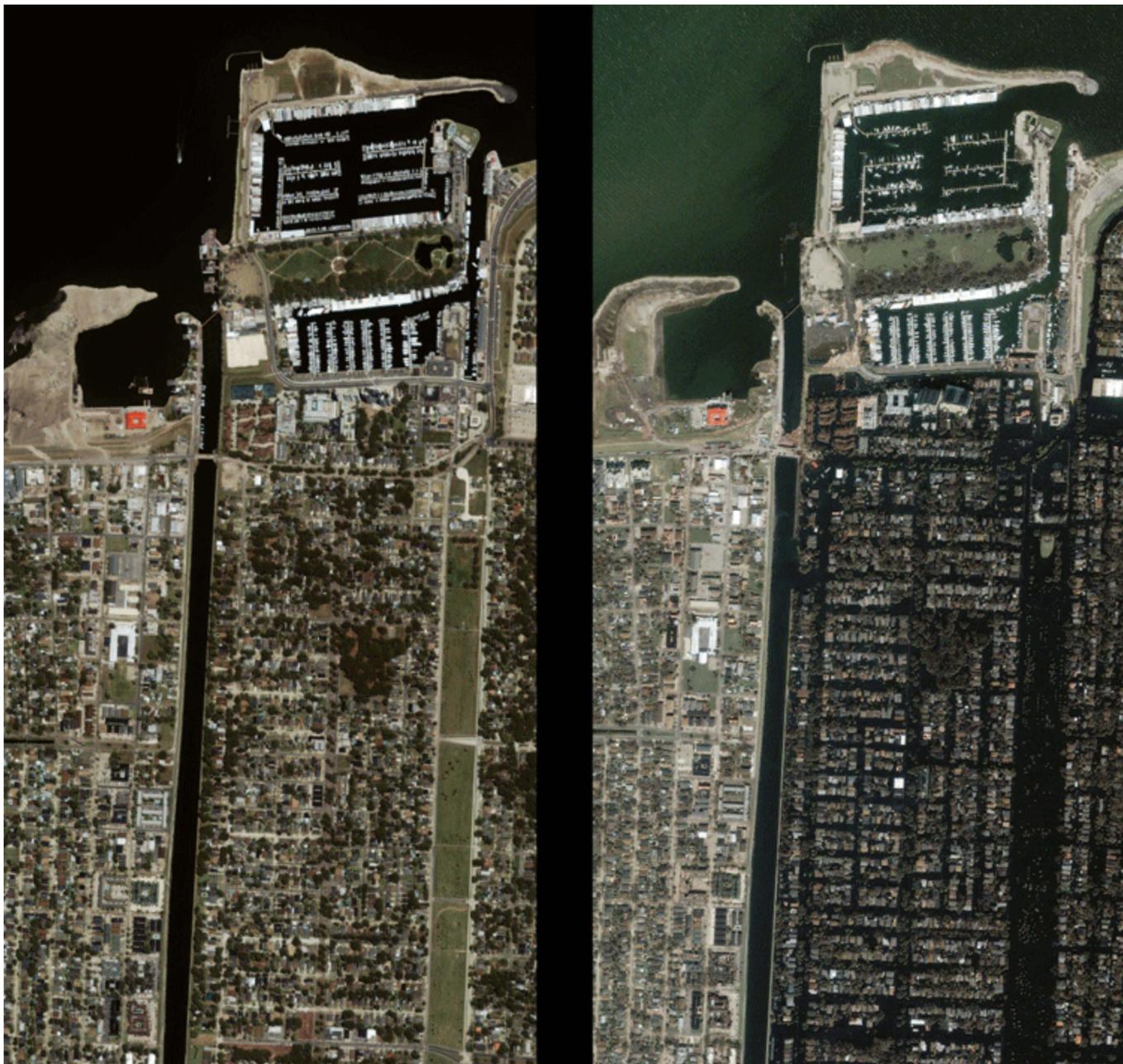


Figura 44: Imágenes de New Orleans, captadas por el satélite IKONOS. A la izquierda, vista tomada el 13 de mayo de 2001. A la derecha, imagen registrada el 2 de septiembre de 2005. Los efectos de las inundaciones son evidentes en esta última. El sector urbano situado al este del canal de la calle 17 y al sur del puerto sobre el lago Pontchartrain está completamente anegado. El 2 de septiembre de 2005, el 85% de la ciudad se encontraba inundada, alcanzando la lámina de agua un espesor de hasta 7 m. en algunos sectores.



Figuras 45 (izquierda) y 46 (abajo): Imágenes de las inundaciones provocadas, en Filipinas, por el tifón Ketsana de 2009. Fuentes: News-CN-AFP y EFE.



Figura 47: Efectos de las inundaciones ocasionadas por el huracán Katrina sobre la ciudad estadounidense de New Orleans. Imagen tomada por Landsat 7, el 15 de septiembre de 2005.



Figura 48: Secuencia de imágenes, captadas por ENVISAT, que muestra la evolución del huracán Gustav desde el 25 de agosto (imagen de la derecha) hasta el 1 de septiembre de 2008 (imagen de la izquierda). El huracán se formó a 400 km. al sureste de Puerto Príncipe (Haití) y, como puede observarse, el huracán recorre el Mar Caribe, afectando a las islas Caimán, Jamaica, República Dominicana, Haití, Cuba, la península de Florida y se adentra en el Golfo de México y en los estados de Louisiana, Alabama y Mississippi. En su evolución, este huracán tuvo distintas intensidades, debilitándose y reactivándose en distintos momentos, llegando a alcanzar la categoría 5. Ocasionó 138 fallecidos y unos daños materiales valorados en 20.000 millones de \$. Los vientos alcanzaron velocidades de 220 km/h. Se suspendió el 78% de la producción de crudo en el Golfo de México y el 37% de la producción de gas natural.

Fuente: ESA. <http://www.esa.int/esa-mm/mmg.pl?b=b&keyword=gustav&single=y&start=2>

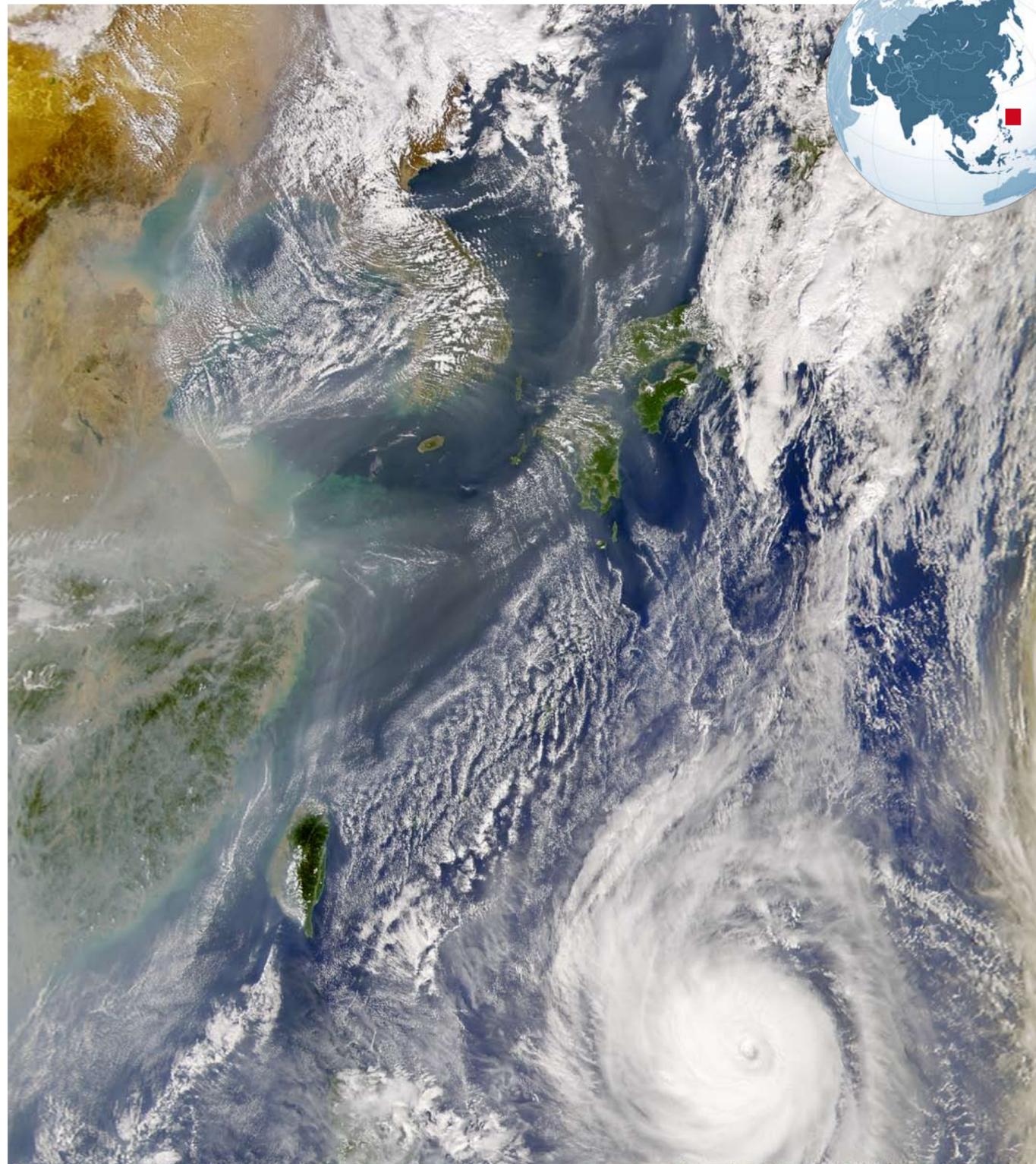
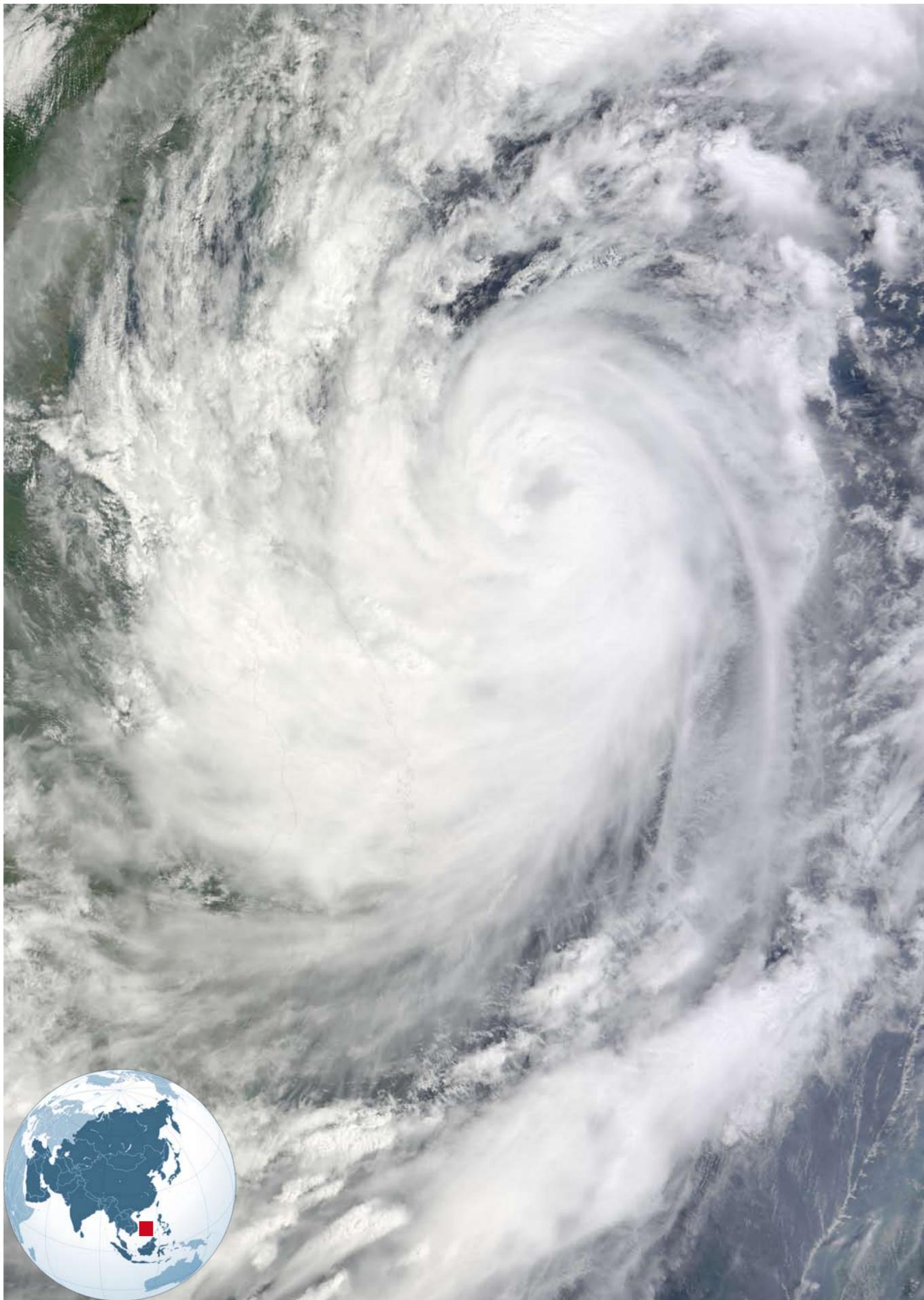


Figura 49 (izquierda): imagen del tifón Ketsana, de categoría 4, tomada por el sensor MODIS, a bordo del satélite TERRA, el día 28 de septiembre de 2009, aproximándose a las costas de Vietnam. Este tifón se ha formado en el Pacífico Noroeste y ha seguido una trayectoria de oeste a este, afectando, principalmente, a las islas septentrionales de Filipinas. Más tarde, se ha desplazado a través del Mar de China Meridional, ocasionando daños en los estados de China, Vietnam, Camboya y Tailandia. En Filipinas ha ocasionado la muerte de 246 personas y el desplazamiento de más de 450.000 afectados por las inundaciones, deslizamientos de laderas y derrumbe de edificios. Ha alcanzado vientos de 165 km/h. Contando los efectos del tifón en el sureste asiático, la cifra de muertos ha llegado a 400.  
 Fuente: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2009271-0928/Ketsana.A2009271.0330.250m.jpg>

Figura 50 (arriba): A algunos tifones o huracanes se les asignan nombres repetidos en las distintas regiones del mundo, de acuerdo a las listas confeccionadas por los comités regionales. Este es el caso del tifón Ketsana. Además del recientemente ocurrido en 2009, Ketsana fue otro tifón formado en el Pacífico Noroeste el 18 de octubre de 2003 y afectó a las mismas zonas hasta el día 22 de octubre. En la figura superior se observa una imagen de este huracán, tomada el día 22 de octubre de 2003 por el sensor oceanográfico SeaWiFS, a bordo del satélite OrbView-2. En ese momento, Ketsana se encontraba a 600 km, al sureste de Taiwan. Se registraron vientos con una velocidad de 230 km/h.  
 Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center, and ORBIMAGE

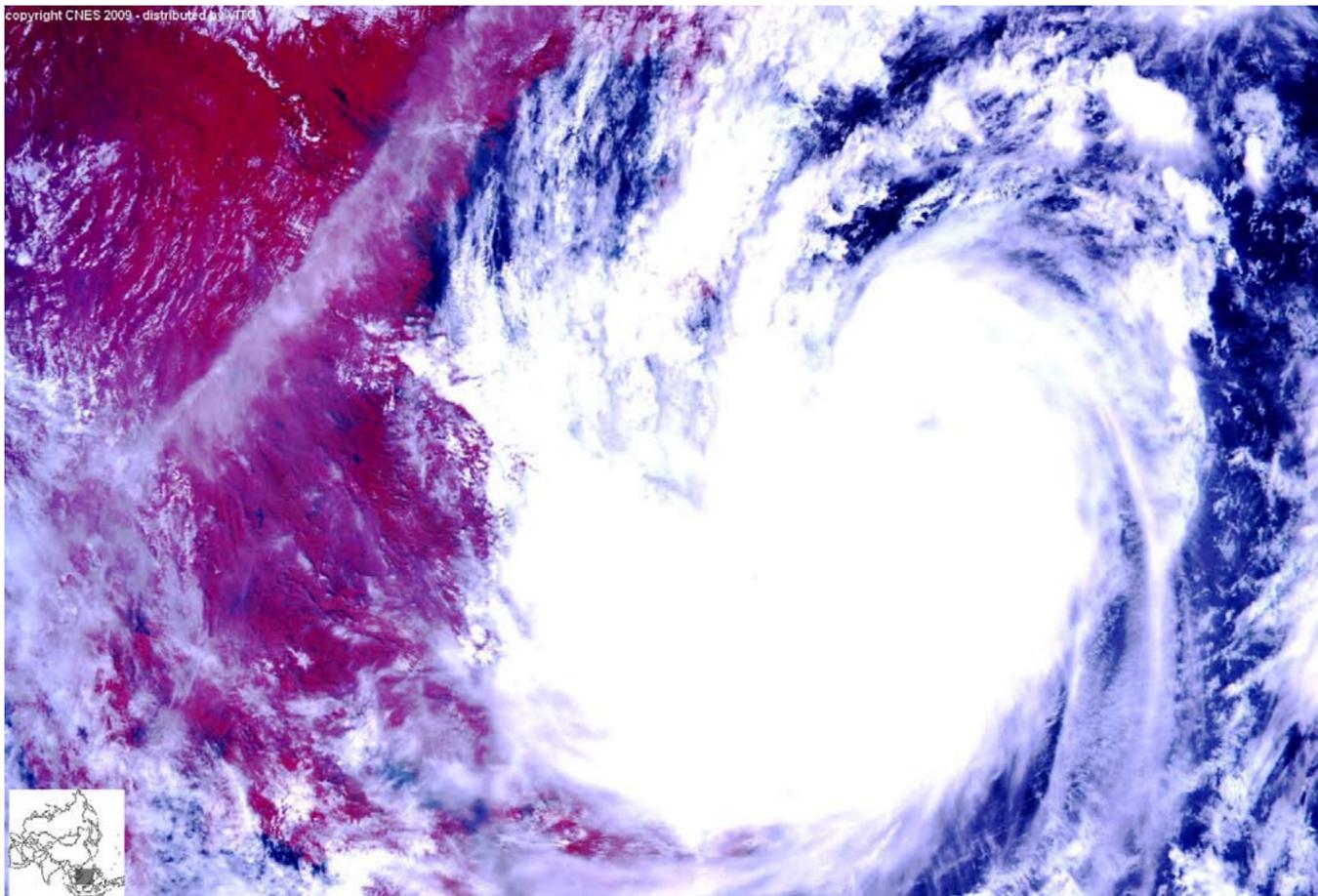
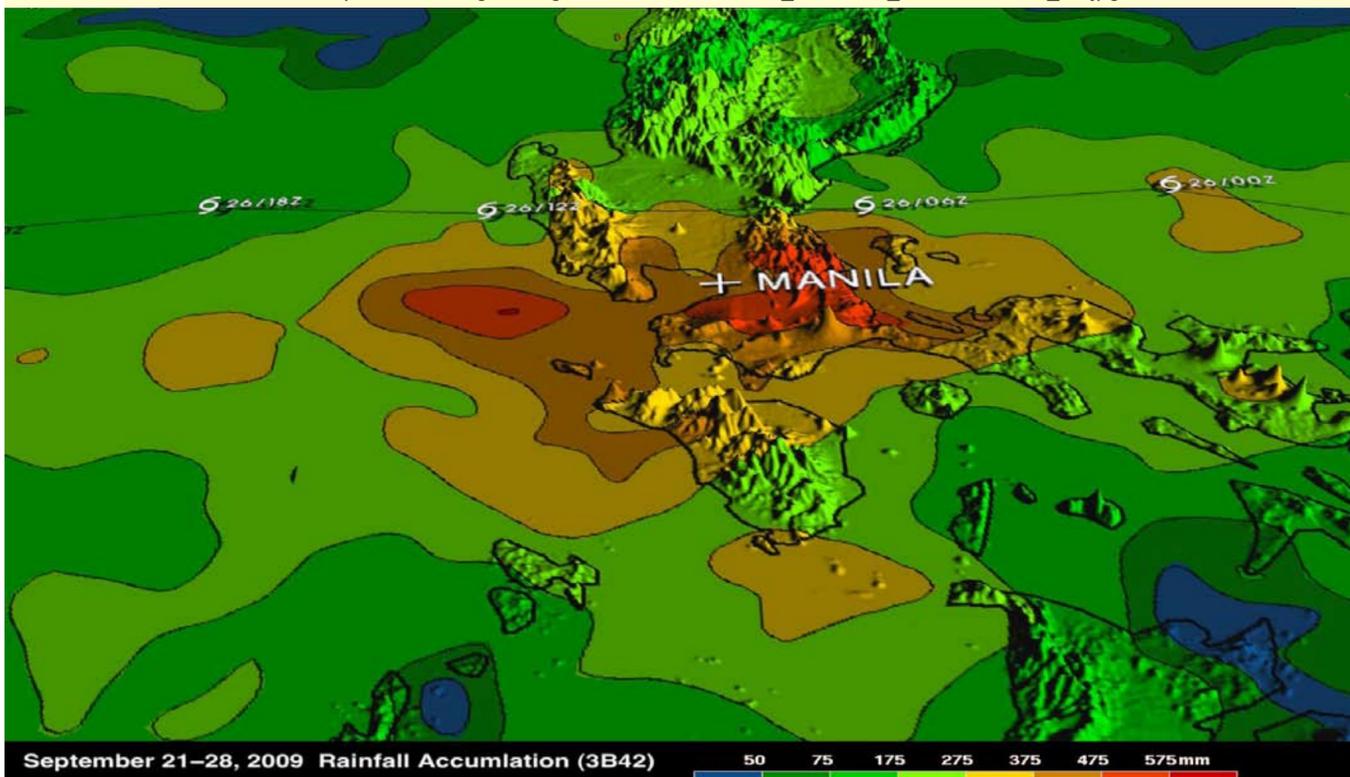


Figura 49 (arriba): Imagen, en falso color, del tifón Ketsana, captada por el sensor Vegetation, a bordo del satélite francés SPOT-5, el día 28 de septiembre de 2009 sobre el sur de China. El tifón se localiza a 910 km, al sureste de la ciudad de Sanya, en la provincia china de Hainan y se desplaza hacia el noroeste, a una velocidad de 20 km/h.

Fuente: VEGETATION Programme. Producido por VITO; [http://www.vgt.vito.be/AShtml/c173\\_china\\_typhoon\\_ketsana.html](http://www.vgt.vito.be/AShtml/c173_china_typhoon_ketsana.html)

Figura 50 (abajo): El satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) mide el volumen de precipitaciones provocadas por huracanes y tifones. En la imagen inferior se observa un mapa tridimensional sobre la zona de Manila y sus inmediaciones en el que se representa, mediante intervalos, el volumen acumulado de lluvia, registrado durante el periodo comprendido entre el 21 y el 28 de septiembre de 2009. Como puede apreciarse, en la capital filipina se recogieron por encima de 575 mm en una semana (zonas coloreadas en rojo intenso).

Fuente: [http://www.nasa.gov/images/content/390538main\\_20091001\\_Ketsana-TRMM\\_full.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/390538main_20091001_Ketsana-TRMM_full.jpg)



September 21–28, 2009 Rainfall Accumulation (3B42) 50 75 175 275 375 475 575 mm

## 5.1.2. VOLCANES

Los volcanes son elementos del relieve que ponen en comunicación la superficie terrestre con la parte superior del manto, a través de los cuales sale el magma, que es una mezcla de silicatos fundidos y elementos volátiles ( $\text{CO}_2$ , agua, etc.), que se encuentra a temperaturas que oscilan entre  $700^\circ\text{C}$  y  $1500^\circ\text{C}$ .

Los volcanes, junto con los terremotos, son los principales agentes geológicos internos que tienen los siguientes efectos:

1. Petrológico, a través del cual se forman rocas magmáticas.
2. Topográfico, por el que se generan relieves.

Los volcanes son estructuras geológicas, con forma cónica, más o menos extensas, generalmente de dimensiones kilométricas y que pueden alcanzar una altura variable, desde unos cientos de metros hasta varios kilómetros.

La estructura fundamental de un volcán típico (estratovolcán) es la siguiente:

1. Cámara magmática, que constituye la reserva de magma.
2. Chimenea: es el conducto que comunica la cámara magmática con el exterior.
3. Cráter, es la fractura o depresión de la superficie terrestre en la que termina la chimenea y el volcán.

Los volcanes pueden presentar conos, cráteres y chimeneas adventicias o secundarias. Los episodios de actividad volcánica se denominan erupciones y pueden ser más o menos violentos y acontecer de forma ocasional o continuada.

Las sucesivas erupciones volcánicas forman estratos de materiales volcánicos que se disponen de forma paralela y que contribuyen al crecimiento en altura y extensión de su estructura.

Los productos expulsados por los volcanes son muy variados y pueden ser:

1. Sólidos: productos piroclásticos, de mayor o menor tamaño, desde bombas volcánicas, de dimensiones métricas, a lapillo, de dimensiones centimétricas o milimétricas y cenizas.
2. Líquidos: coladas que son grandes masas de lava (se han perdido los componentes gaseosos) que discurren como ríos siguiendo la pendiente del terreno. El enfriamiento aumenta la viscosidad de la lava hasta que la colada se detiene.
3. Gaseosos: vapor de agua, dióxido de carbono, etc.

Según su estructura externa, los volcanes pueden ser:

1. Escudo volcánico. Tienen forma de cono rebajado con pendientes suaves y se forman a partir de lavas muy fluidas que se derraman y fluyen desde de la depresión que forma el cráter. Los volcanes de las islas Hawai son de este tipo, por ejemplo, Mauna Loa y Kilauea.
2. Estratovolcán o volcán compuesto. Tienen forma de cono con pendientes más acusadas en las que se alternan coladas de lava con capas de productos piroclásticos (cenizas, etc). Se forman a partir de lavas más viscosas. Algunos ejemplos de este tipo de volcanes son el Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), el Etna en la isla de Sicilia (Italia), el Teide en las islas Canarias (España) y el Fuji (Japón).
3. Caldera volcánica. Estructura volcánica de grandes dimensiones (el cráter mide más de un kilómetro) formada por el hundimiento del techo de una cámara magmática o a partir de escudos volcánicos. Algunos ejemplos son la caldera de Aniakchak, en Alaska, la caldera de las Cañadas del Teide (España) y la caldera de Taburiente, en la isla de la Palma (España).
4. Cono de escorias. Tienen forma cónica, sus dimensiones son inferiores y está formado por productos piroclásticos, exclusivamente.
5. Domo. Estructura rocosa que se consolida en el cráter o en la chimenea de un volcán a partir de lava muy viscosa.

Según su actividad o según las características de las erupciones, los volcanes se agrupan, de acuerdo a los siguientes modelos:

1. Modelo islandés. Las erupciones se producen a través de fisuras en el terreno. Son erupciones tranquilas y las lavas que se producen son muy fluidas y recubren amplias extensiones. Este tipo de erupciones es poco frecuente, en la actualidad, en la superficie terrestre y más frecuente en zonas de dorsal, sobre todo submarinas.
2. Modelo hawaiano. Las erupciones se producen a través de escudos volcánicos. Son tranquilas, sin explosiones y las lavas que se producen son muy fluidas y forman coladas muy extensas. Algunos ejemplos de volcanes que producen erupciones de este tipo son el Maula Loa y el Kilauea (islas Hawai).
3. Modelo estromboliano. Las erupciones se producen a través de estratovolcanes y de conos de escorias. Son algo menos tranquilas que las anteriores y se pueden observar algunas explosiones. Las coladas de lava se alternan con erupciones de abundantes productos piroclásticos. Algunos ejemplos de volcanes que producen este tipo de erupciones son el Stromboli, en las islas Lipari, próximas a Sicilia (Italia) o el Teide (España).
4. Modelo vulcaniano o vesubiano. Las erupciones se producen a través de estratovolcanes pero, en este caso, son más violentas y con explosiones más abundantes y las lavas que se producen son más viscosas. También se pueden formar nubes de ceniza. Algunos ejemplos de volcanes que producen este tipo de erupciones son el Vulcano, en las islas Lipari (Italia), el Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), el Etna en la isla de Sicilia (Italia) o el Teide (España).
5. Modelo peleano o krakatoano. Las erupciones se producen en estratovolcanes, son muy violentas y con frecuentes explosiones, las lavas son muy viscosas y se pueden formar domos que pueden taponar la chimenea y el cráter del volcán y explotar posteriormente. También se pueden formar nubes ardientes. Algunos ejemplos de volcanes que producen erupciones de este tipo son Mont Pelee, en la isla Martinica (Antillas francesas) y Krakatoa (Indonesia).

El Índice de Explosividad Volcánica (IEV) es una escala de 8 grados que se utiliza para medir la magnitud de una erupción volcánica. El índice resulta de la combinación de varios factores como son el volumen total de los productos expulsados por el volcán, la altura alcanzada por las nubes de origen volcánico y la duración de la erupción.

Las erupciones volcánicas no son predecibles. A veces, están precedidas por la aparición de pequeñas grietas y fallas en el terreno, por pequeñas explosiones en el cráter, terremotos de baja intensidad, aumento en las emisiones de gases y de los fenómenos hidrotermales o por variaciones locales del campo pero no hay una relación causa – efecto clara.

Las erupciones volcánicas se producen, en último lugar, por el aumento de la presión y la temperatura en la cámara magmática. La magnitud de las erupciones volcánicas está relacionada con el pH de las lavas. Una lava ácida es más viscosa y más explosiva mientras que una lava básica es menos viscosa y menos explosiva. El aumento de la viscosidad supone un aumento de la peligrosidad ya que se dificulta la salida del magma y se origina un vulcanismo más explosivo. Las lavas básicas liberan, más fácilmente, los gases y, por tanto, explotan menos y vencen, más fácilmente, las resistencias que pudieran aparecer en su recorrido por la chimenea volcánica. Las lavas básicas fluyen mejor que las lavas ácidas y pueden hacerlo de forma más continuada.

La mayor parte de los volcanes activos en el planeta son submarinos y resulta curioso observar la coincidencia entre la situación de los volcanes activos y la localización de las zonas de actividad sísmica más notable y de los terremotos, así como la coincidencia con los bordes de las placas litosféricas (figura 51).

Los riesgos volcánicos se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios están asociados directamente con las erupciones volcánicas mientras que los secundarios están asociados a procesos volcánicos aunque no están producidos por ellos.

Los principales riesgos volcánicos primarios son los siguientes:

1. Coladas y lluvias de piroclastos que son masas de rocas, fragmentos y cenizas que son arrojadas a altas velocidades y temperaturas y que tienen gran poder destructivo. El riesgo aumenta en función del

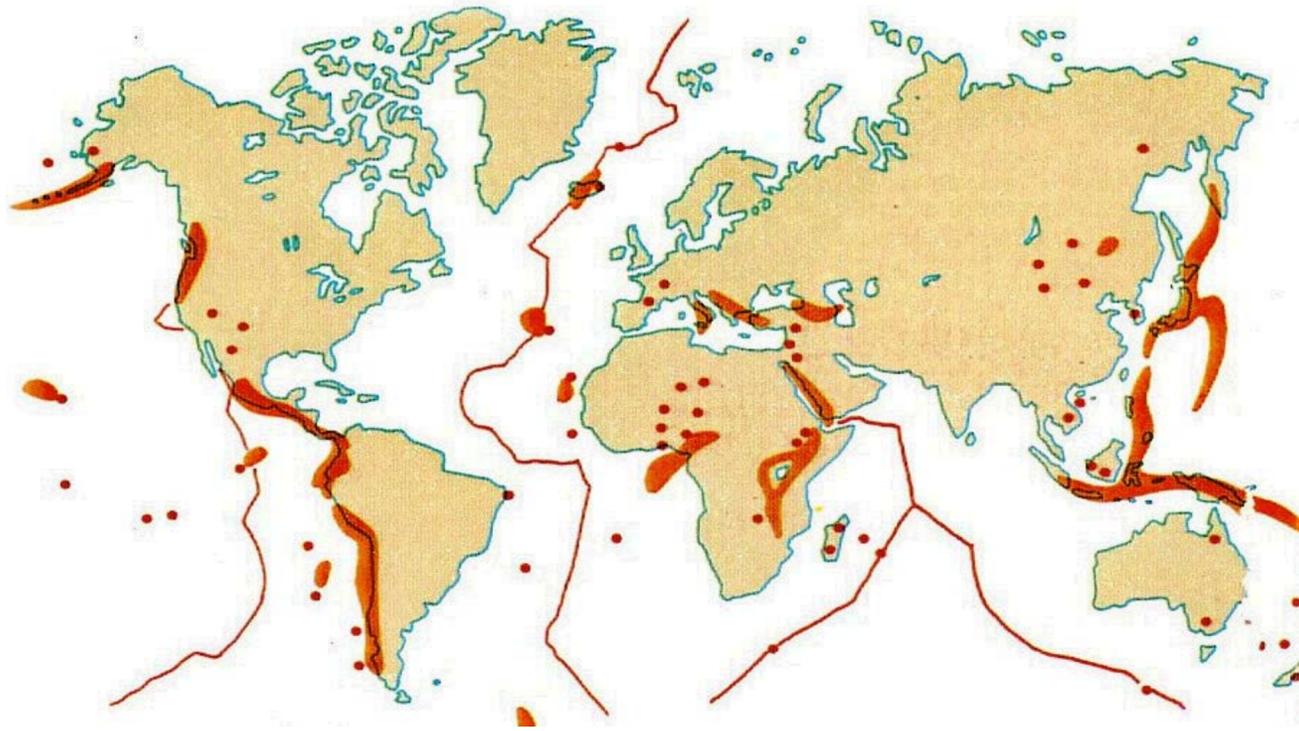


Figura 51: Distribución de los cinturones de fuego en el mundo. Las manchas de color naranja representan las zonas de mayor actividad sísmica en el mundo, asociadas a la tectónica de placas. Son zonas de subducción. Las líneas se corresponden con las dorsales oceánicas, áreas donde se crea corteza. Ambas contienen la mayoría de los volcanes en el mundo (puntos rojos).  
Fuente: Atlas El País-Aguilar

- tamaño de los fragmentos arrojados. Las cenizas plantean problemas de visibilidad y producen problemas respiratorios.
2. Coladas de lava que pueden descender más rápidamente en función de su baja viscosidad. La lava inutiliza el terreno por muchos años y su recuperación depende del clima.
  3. Emisiones de gases que, generalmente, se liberan lentamente. El peligro aumenta cuando se acumulan y liberan repentinamente. Hay que tener en cuenta la toxicidad de las emisiones.

Los principales riesgos volcánicos secundarios son los siguientes:

1. Lahares o coladas de barro muy denso y veloz (hasta 100 km/h) que se producen en zonas con nieve o hielo o si las cenizas se hinchan de agua.
2. Tsunamis u olas gigantes que, normalmente, están asociados a terremotos aunque también a erupciones importantes.

Algunas de las erupciones volcánicas más importantes acontecidas a lo largo de la historia son las siguientes:

1. Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), en el año 79 que sepultó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano.
2. Tambora, en Indonesia, en el año 1815. La gran cantidad de cenizas emitidas pudieron afectar al clima de la zona.
3. Krakatoa, en Indonesia, en el año 1883, que se considera el mayor cataclismo de la historia. Produjo 36.800 víctimas mortales por la explosión del cráter y por los tsunamis posteriores.
4. Mont Pelee, en la isla Martinica de las Antillas francesas, en 1902. Produjo 30.000 víctimas mortales por nube ardiente.
5. Parícutin, en México, en 1943. Constituye la primera oportunidad de observar la aparición y desarrollo de un volcán en un terreno donde, anteriormente, no había indicios de vulcanismo.
6. Santa Helena, en EE.UU., en 1980. Se considera otra de las erupciones más violentas de la historia.
7. Pinatubo, en Filipinas, en 1991. Igualmente, es considerada como una de las erupciones más violentas y que, también, influyó en el clima de la zona.



Figura 52: Imagen tomada, con una cámara Hasselblad en color natural, por la tripulación del Space Shuttle el día 9 de abril de 2002 sobre el Monte Egmont. Se trata de un volcán que se encuentra al suroeste de la isla septentrional de Nueva Zelanda. Este nombre le fue asignado por el Capitán Cook.

Fuente: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory at Johnson Space Center. NASA-JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 53 (arriba): Imagen ASTER, en pseudocolor natural, tomada el 27 de mayo de 2001 sobre el monte Egmont o monte Taranaki. Es un volcán inactivo situado en el Parque Nacional Egmont. Se encuentra en la isla Norte de Nueva Zelanda. Entró en erupción, por última vez, en el año 1755. La imagen muestra una llamativa forma circular que se corresponde con los límites del parque nacional, de unos 330 km<sup>2</sup>, de extensión. En 1881 se inicia la protección y se acuerda que los límites estarán fijados por una circunferencia con un radio de 9,6 km desde la cumbre del volcán. El contraste entre el bosque lluvioso denso y las tierras de cultivo y pastizales que lo rodean es evidente, incluso desde el espacio. El volcán alcanza una altura de 2.518 m, cerca del mar de Tasmania, al oeste. En sus abruptas laderas se desarrolla una interesante sucesión de ecosistemas, desde zonas de bosque lluvioso (en verde oscuro) hasta las zonas de cumbres, cubiertas por nieve (en color blanco), pasando por ecosistemas arbustivos subalpinos y alpinos (en verde intenso rodeando la orla blanca del cono volcánico). La imagen cubre un área de más de 2000 km<sup>2</sup>.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 54 (arriba): Imagen captada por los astronautas de la Estación Espacial Internacional (ISS), el 8 de junio de 2006, con una cámara digital Kodak 760C y una lente de 800 mm. Enfocando hacia el sureste, la imagen muestra la caldera volcánica de las Cañadas. Sus límites se aprecian perfectamente rodeando al Teide, cuyo cono se encuentra en el centro de la caldera. Aún en junio, posee restos de nieve. Al SW del Teide, es decir a su derecha en la imagen, se encuentra otro cono volcánico, el Pico Viejo. La caldera tiene una superficie de 170 km<sup>2</sup> y se formó por el hundimiento del techo de una cámara magmática, posiblemente después de una erupción masiva. En el centro de la caldera se observan distintas coladas de lava, en tonos ocres, marrones y rojizos. Como ya se ha dicho, el Teide es un estratovolcán. Los flancos del cono están cubiertas por capas alternantes de densos flujos de lava y fragmentos rocosos expulsados durante las erupciones. Al norte, es decir, en la parte inferior de la imagen, en primer plano, pueden apreciarse las densas masas forestales de pino canario, en color verde oscuro.  
Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

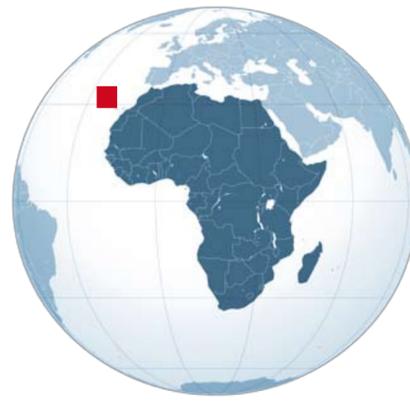


Figura 56 (arriba): Imagen de la isla de Tenerife, captada desde el Space Shuttle, el día 10 de noviembre de 1994.

El Teide es el pico de mayor altura de España (3.718 m) y se encuentra en la isla canaria de Tenerife, integrado en el Parque Nacional del mismo nombre. Las islas Canarias tienen un origen volcánico y su formación empieza hace 30 millones de años. La última erupción del Teide data del año 1909. Canarias es un archipiélago volcánico muy reciente. Sus grandes edificios volcánicos se apoyan sobre grandes bloques de la corteza oceánica. Las coladas de lavas originan un típico relieve volcánico.

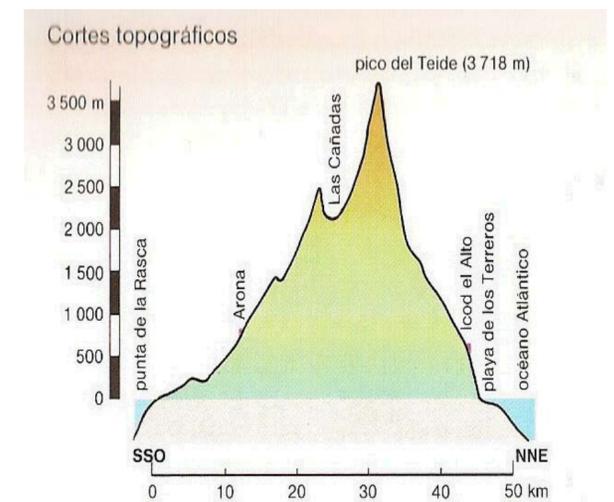
Fuente: [www.visibleearth.nasa.gov](http://www.visibleearth.nasa.gov)

Figura 55 (izquierda): Imagen captada por los astronautas de la Estación Espacial Internacional (ISS), el 15 de julio de 2009, con una cámara digital Nikon D3 y una lente de 800 mm. La imagen muestra, igual que la figura anterior, la gran estructura volcánica conocida como la caldera de Las Cañadas, dentro de la cual se encuentran los dos estratovolcanes, el Teide y el Pico Viejo. De forma radial a ambos conos volcánicos se disponen, entrelazadamente, los flujos de lava que cubren las laderas de ambos edificios volcánicos. Son especialmente visibles en la imagen las coladas del Teide.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 57 (derecha): Corte topográfico de la isla de Tenerife, en dirección SSO-NNE, atravesando el Teide. Obsérvese el pronunciado desnivel de la isla, especialmente en la vertiente norte del Teide. En menos de 20 km, existe un desnivel de más de 3.700 m. En esta sección se aprecia, con claridad, la depresión que forma la caldera de Las Cañadas, en la vertiente meridional.

Fuente: Gran Atlas de España, Planeta, 1989



Tenerife: sección SSO-NNE: de la punta de la Rasca a la playa de los Terreros

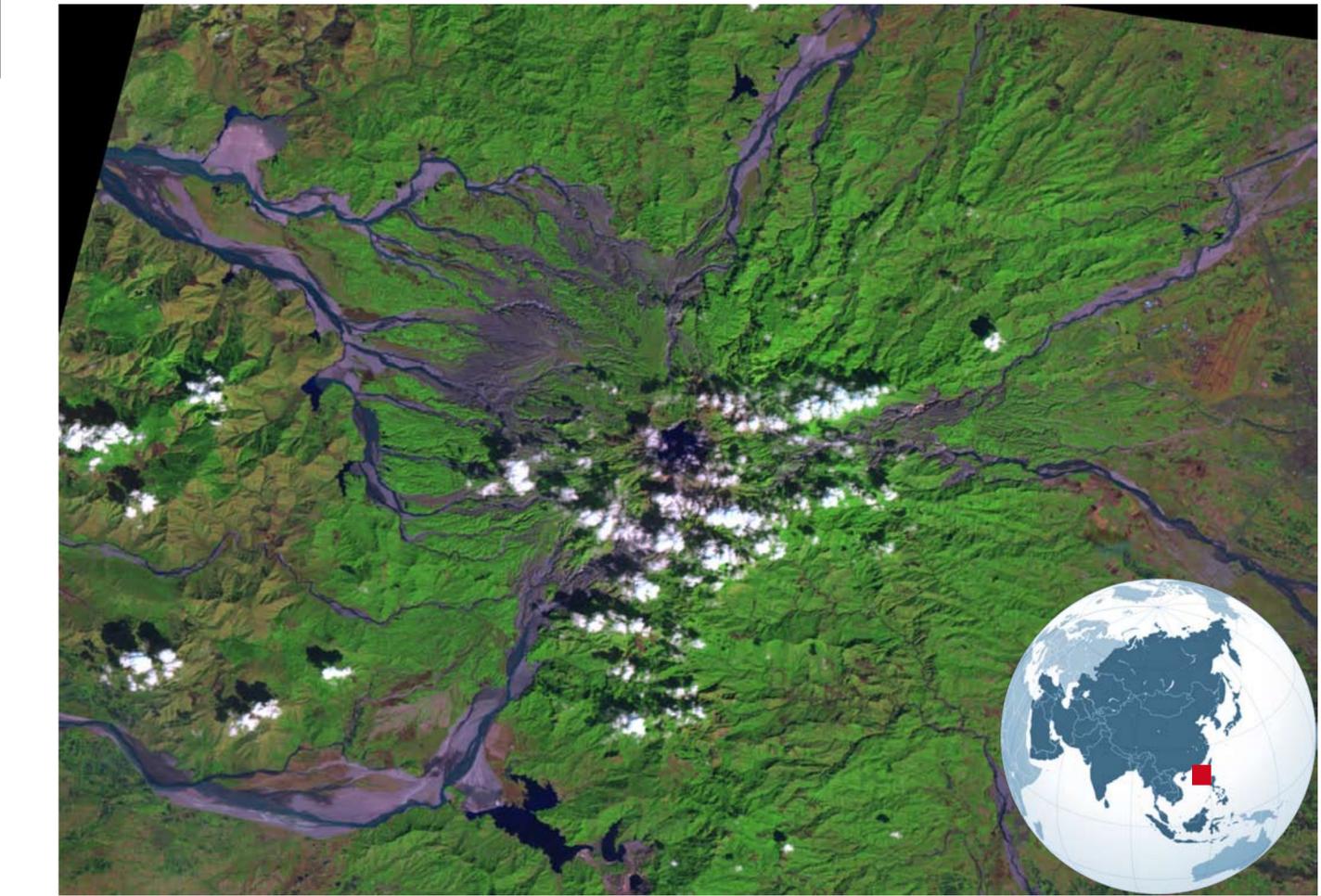
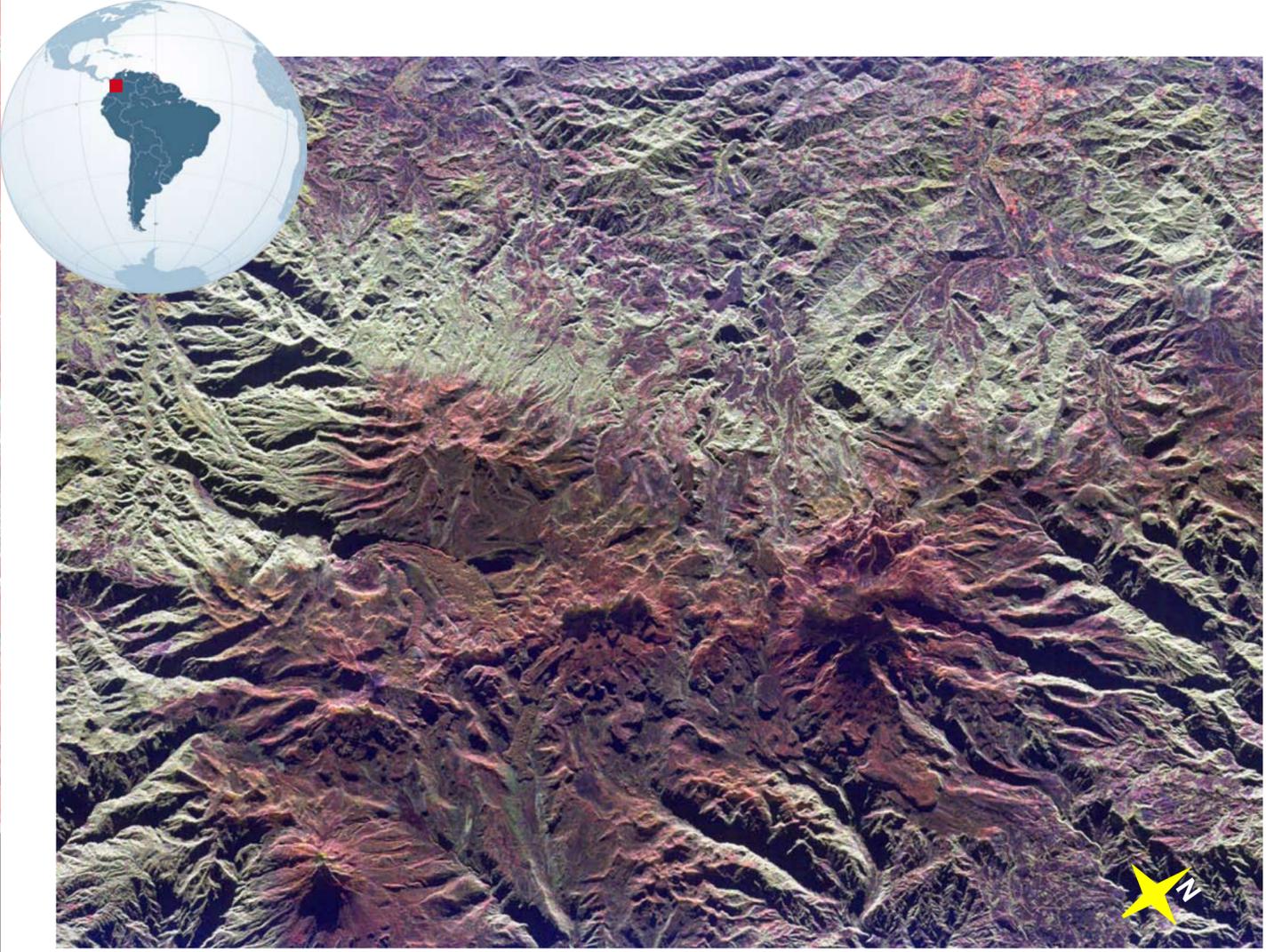
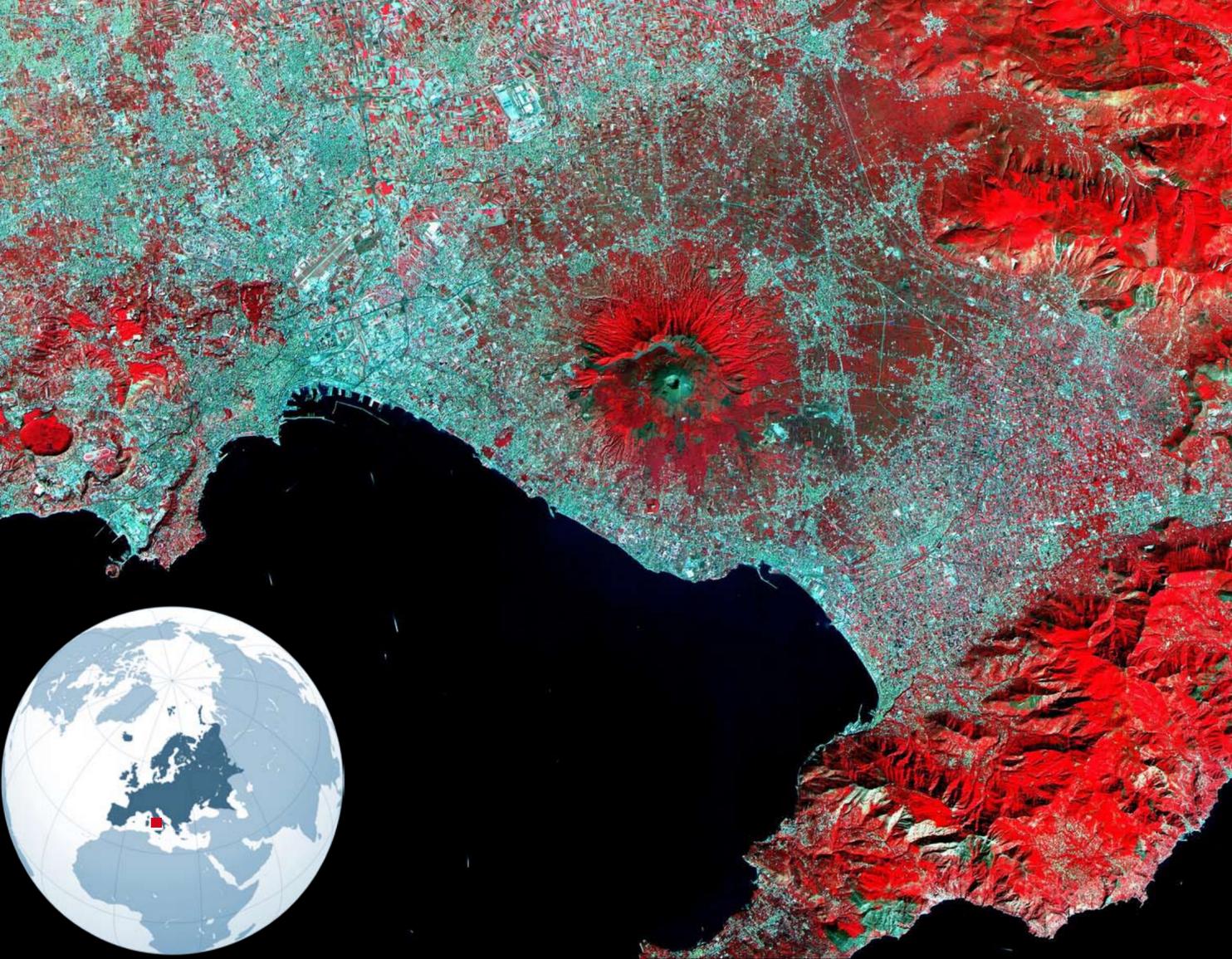


Figura 58 (arriba): Imagen ASTER, en falso color, del Vesubio y de la ciudad de Nápoles, adquirida el día 26 de septiembre de 2000. Uno de los factores de riesgo asociado a los volcanes es la existencia de núcleos de población e, incluso, de ciudades en sus inmediaciones. La imagen muestra el volcán Vesubio, que se encuentra en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), aunque abundan otros ejemplos similares por todo el mundo: Etna en Sicilia (Italia), Fuji en Japón o Popocatepetl en México. El Vesubio, en el año 79, entró en erupción y sepultó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano que cayeron en el olvido hasta que, en el siglo XVIII, fueron redescubiertas cuando se realizaban unas obras. Las excavaciones continúan en la actualidad. En el centro de la imagen se observa la forma característica del cono volcánico del Vesubio, en color azul-verdoso, rodeado de una masa radioconcéntrica de vegetación (en color rojo) que cubre las laderas del volcán. Éste se alza dominando la bahía de Nápoles, en color negro en la parte inferior de la imagen, y sobre la península de Sorrento, en el sureste.

Cortesía de NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 59 (en página siguiente, arriba): Imagen adquirida por el radar de apertura sintética SIR-C/X-SAR desde el Space Shuttle Endeavour, el día 14 de abril de 1994. La escena está centrada en la región volcánica de Colombia, en la cordillera central andina, a unos 150 km. al oeste de Bogotá. Se visualiza el volcán Nevado del Ruiz (5.399 m.), con forma cónica en color rojo oscuro, algo más abajo y a la derecha del centro de la imagen. El volcán Nevado del Tolima (5.215 m.), de pendientes más escarpadas, se localiza en la parte inferior izquierda de la imagen. El color rojo de las partes inferiores central y derecha se debe a la abundante cobertura de nieve y a la ausencia de vegetación. El Nevado del Ruiz está cubierto por glaciares. En noviembre de 1985, tras una violenta erupción, se originó un lahar. Como es sabido, este tipo de actividad volcánica es la que tiene uno de los efectos más catastróficos. Se trata de coladas de barro muy denso que discurren por las laderas de un volcán, generalmente estratovolcán, a gran velocidad. Aunque la actividad volcánica sea mínima, en un volcán basta muy poco calor para producir la fusión del hielo y la nieve. En esos casos, la gran cantidad de agua que desciende por las laderas del volcán arrasa ciudades, cultivos e infraestructuras, incrementando su poder destructivo cuando el agua arrastra materiales de erupciones anteriores. El lahar arrasó la ciudad de Armero, fuera de la imagen, a la derecha del Nevado del Ruiz, y produjo cerca de 25.000 víctimas mortales.

Fuente: NASA/JPL.

Figura 60 (en página siguiente, abajo): Imagen en falso color, captada por el satélite LANDSAT 7, en enero de 2001. En el centro de la imagen, bajo las nubes, se visualiza la caldera del volcán Pinatubo (1.739 m.), localizado al noroeste de Manila, en Filipinas. Tras 10 años de su última erupción, se observa que las laderas del volcán han sido, de nuevo, colonizadas por la vegetación, en color verde. Las cenizas y materiales expulsados se mezclaron con agua, dando lugar a densas coladas de barro (en colores violeta) que fluyeron hacia el Mar de China, fuera de la escena, en su lado izquierdo.

Cortesía: NASA/USGS/University of Hawaii



Figura 61: Imagen ASTER, en falso color, del volcán Chaitén, captada desde el satélite TERRA, el día 19 de enero de 2009.

Este volcán se encuentra en el sur de Chile, dominando el Golfo de Ancud, enfrente de la isla de Chiloé.

Tras 9.000 años de inactividad, el día 2 de mayo de 2008 el Chaitén entra en erupción. Durante los meses siguientes, el volcán muestra distintos signos de actividad. Emite densas plumas de vapor y de cenizas a la atmósfera, cubriendo la vegetación de las inmediaciones del cono, dificultando el drenaje de las corrientes de agua y ocasionando inundaciones en la ciudad cercana del mismo nombre. El 19 de enero de 2009, una violenta explosión ocasiona el colapso de la bóveda del volcán. Una espesa nube de vapor y de cenizas se extiende hasta una distancia de 70 km., hacia el noreste del volcán. Se aprecia claramente, con un color blanco que asciende desde la boca del cono, en el centro de la imagen, hasta la parte superior derecha de la misma. Al sureste del volcán, en sus proximidades, se aprecia una extensa mancha de color marrón. Se trata de la zona más afectada por la colada de barro y cenizas ocasionadas por la erupción. Sin embargo, en el extremo oriental de la imagen se aprecia una zona natural, menos afectada, con una combinación de colores gris, blanco y azul claro. Es una zona de suelo desnudo, vegetación alpina y glaciares (azul claro), distribuidos en distintos valles. Hacia el suroeste del volcán, el río Blanco ha transportado lahares hacia la ciudad, situada en su desembocadura. Los sedimentos arrastrados y depositados han producido daños en una infraestructura portuaria y generan turbidez en la bahía.

Cortesía de Jesse Allen, NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team.



Figura 62: Imagen, en color natural, adquirida por Formosat-2, el día 19 de mayo de 2008.

Se observa la ciudad y la bahía de Chaitén, localizadas 10 km al suroeste del volcán del mismo nombre. Los 4.000 residentes de esta pequeña ciudad pesquera hubieron de ser desalojados como consecuencia de la erupción volcánica, de la caída de cenizas y del arrastre de lavas y coladas de barro a través de los ríos de las inmediaciones. El río Blanco llega a la ciudad, por el noreste. Desciende desde la ladera sur del volcán. La gran cantidad de materiales volcánicos arrastrados fueron depositados en el litoral, formando nuevos y espontáneos deltas que taponaron las infraestructuras portuarias. En la imagen se aprecia bien su magnitud, considerando que fue captada en un momento de bajamar. Parte de los materiales volcánicos y del fango atraviesan las calles de la ciudad, ocasionando daños materiales e inundaciones.

Cortesía del Dr. Cheng-Chien Liu (National Cheng-Kung University) y del Dr. An-Ming Wu (National Space Organization, Taiwan).

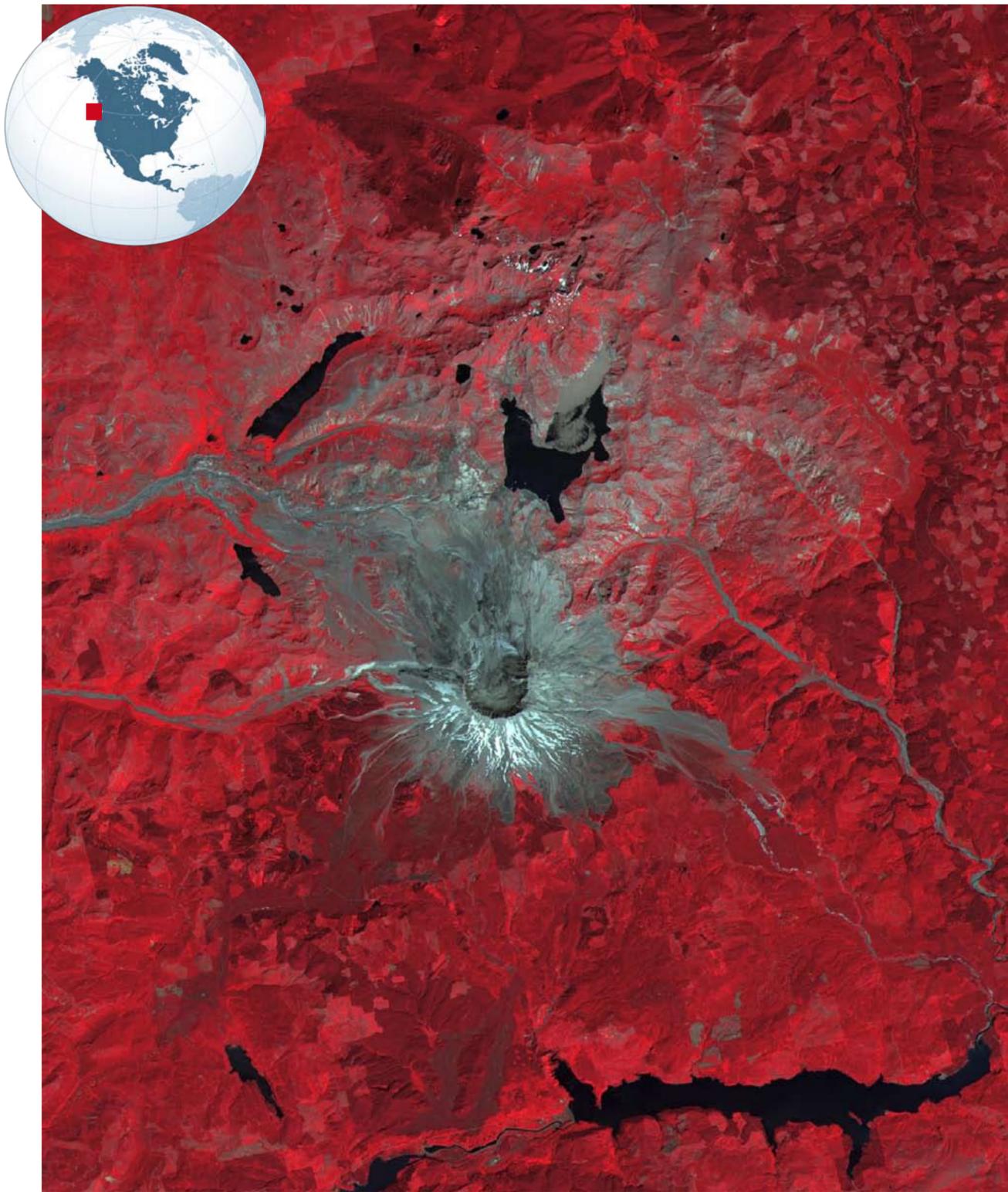


Figura 63: Imagen ASTER, en falso color, del Monte St. Helens, adquirida el día 8 de agosto de 2000.

La imagen muestra el estratovolcán Saint Helens que se localiza en el estado de Washington, al noroeste de Estados Unidos. Se encuentra a 154 km al sur de Seattle y a 85 km al noreste de Portland. El volcán entró en erupción el 18 de mayo de 1980, después de 123 años de inactividad. Constituyó una de las erupciones más catastróficas de la historia ya que alcanzó un grado 5 en la escala IEV, de 8 niveles. Ello supuso la expulsión de unos 4 km<sup>3</sup> de materiales. La chimenea estaba bloqueada en la parte superior del cráter. La presión del magma provocó el abombamiento y fractura de la ladera de la montaña. Un deslizamiento de tierras y el posterior colapso de la ladera norte liberó la presión de la lava. Este arrastre de materiales cambió la topografía del cono volcánico, provocando la reducción de la altura del mismo desde 2950 m a 2550 m. Asimismo, se produjo la emisión de grandes cantidades de cenizas y gases a altas temperaturas y un inmenso lahar que alcanzó el río Columbia y afectó a la ciudad de Portland. Actualmente el cráter tiene forma de herradura y mide 1'5 km de radio. Las cenizas afectaron a 11 estados del noroeste de EE.UU. y se extendieron por un área de 60.000 km<sup>2</sup>. La erupción también produjo la muerte de 57 personas, miles de animales y daños en tierras de cultivo, granjas e infraestructuras en una superficie de 600 km<sup>2</sup>. Los daños se estimaron, en un primer momento, en una cantidad situada entre 2.000 y 3.000 millones de dólares, cifra que aumentó a medida que se evaluaron otros efectos secundarios.

Fuente: MET/ERSDAC

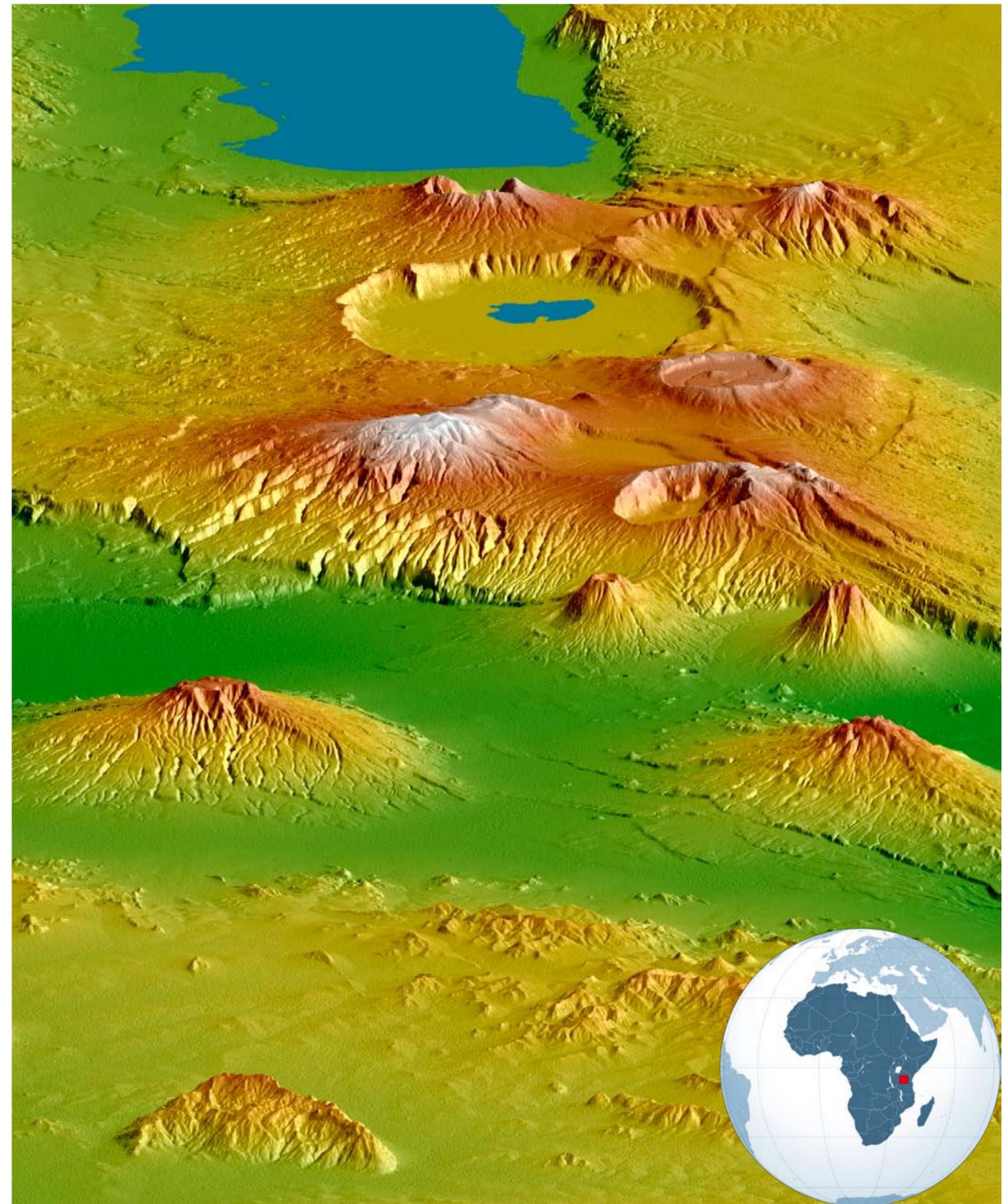


Figura 64: Imagen SRTM adquirida en febrero de 2000 desde el Space Shuttle. SRTM es un sensor activo, de tipo radar que se montó en esta plataforma espacial tripulada, en algunas misiones, con el objetivo de medir alturas. La imagen muestra una sección del Rift Valley oriental, en Tanzania. Está tomada desde el noreste hacia el suroeste, enfocando hacia el cráter del Ngorongoro y el lago Eyasi, en color azul al fondo de la escena, en la parte superior de la imagen. Las tintas están asignadas por intervalos hipsométricos, desde los colores verdes de las zonas topográficamente más bajas hasta los sienas y blanco de las zonas más elevadas. Además, se ha empleado un sombreado para resaltar las zonas de mayor pendiente. La escala vertical se ha exagerado dos veces con objeto de reforzar la plasticidad del relieve. En el centro de la imagen, emergiendo sobre el rift o fractura transversal, se visualizan los montes Kitumbeine (a la izquierda) y Gelai (a la derecha). Entre el rift y el cráter del Ngorongoro, se alza el Monte Loolmalasin, hasta los 3.648 m. En esta zona del continente africano interactúan distintos procesos como la tectónica de placas, el vulcanismo, los deslizamientos de laderas, la profunda erosión de las empinadas laderas de los volcanes y la deposición de materiales.

Cortesía de NASA/JPL/NGA Shuttle Radar Topography team

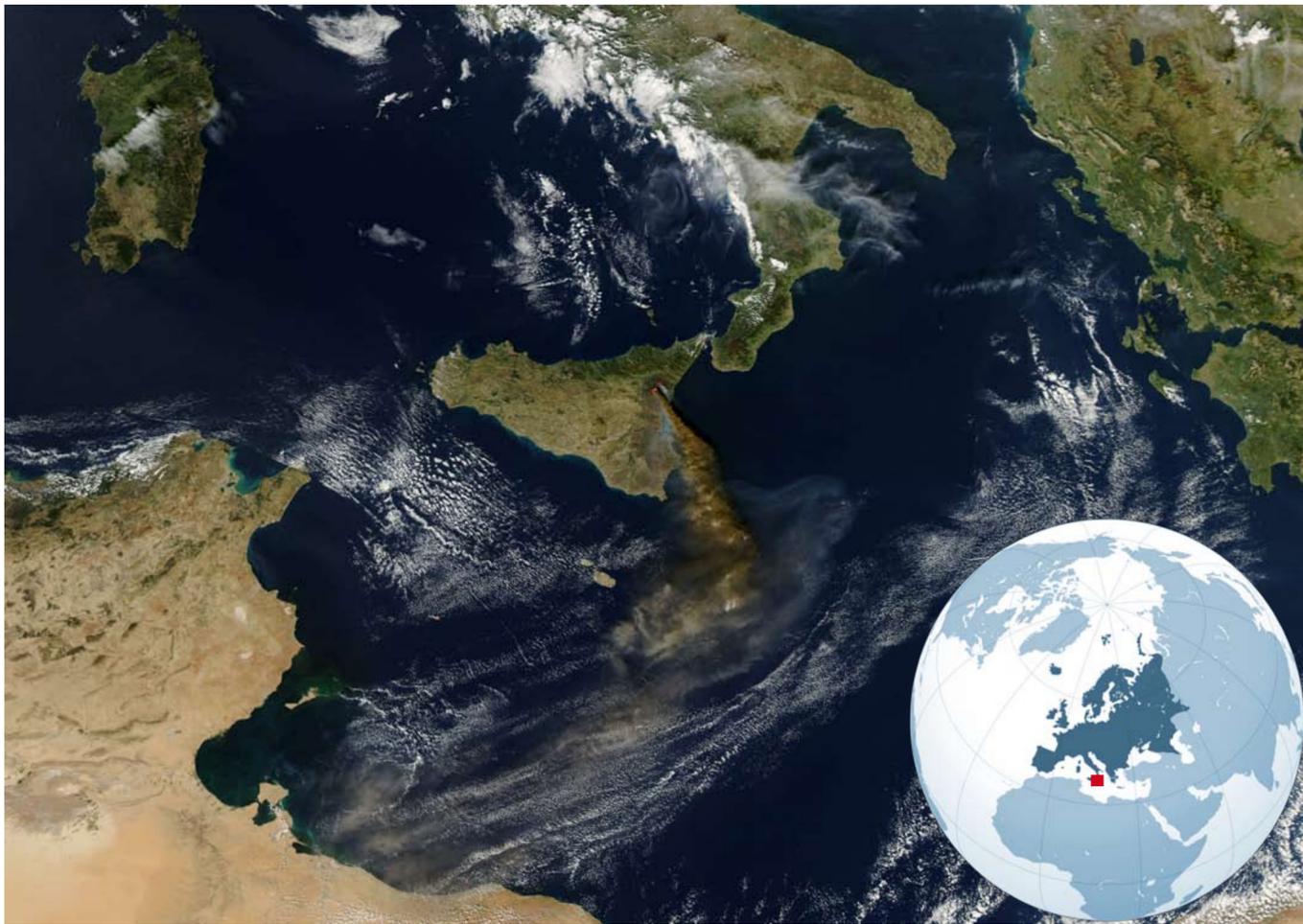


Figura 65 (arriba): Imagen MODIS, en color natural, adquirida desde el satélite TERRA sobre el Mediterráneo central. Uno de los efectos de las erupciones volcánicas que más perduran en el tiempo y que afectan a mayor superficie son las nubes de ceniza. La imagen muestra la columna de cenizas y materiales volcánicos que se emitió a la atmósfera el día 28 de octubre de 2002 tras una erupción del Etna (3.370 m.), localizado en Sicilia (Italia), el volcán más activo y grande de Europa. Se puede apreciar la considerable extensión que alcanza por el Mediterráneo centro-oriental. Los puntos rojos de la imagen, en la cara norte del volcán, representan los puntos calientes relacionados con la respuesta espectral, en el infrarrojo térmico, del magma y, probablemente, de un incendio forestal originado por la erupción.  
Fuente: MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC.

Figura 66 (abajo a la izquierda): Imagen MERIS captada el día 28 de octubre de 2002, el mismo día que la imagen anterior, desde el satélite europeo ENVISAT. Se estima que las cenizas y los materiales volcánicos fueron expedidos a una velocidad comprendida entre 350 y 450 m/s. La pluma de humo y cenizas se extiende hacia el sur y alcanza la costa de África. Las partículas grandes de ceniza se dispersaron pronto. Sin embargo, otros aerosoles, producidos por el dióxido de sulfuro, persistieron durante varios años. Es conocido el impacto de este tipo de aerosoles sobre el cambio climático, tanto a escala regional como global. Al contener grafito y partículas de carbón, de color oscuro, absorben más luz solar, contribuyendo al calentamiento de la atmósfera. El sensor MERIS es idóneo para observar la distribución espacial de estos aerosoles y para evaluar su importancia e impacto sobre el ciclo del agua.  
Fuente: ESA.



Figura 68 (derecha): Imagen Landsat, en color natural, adquirida el día 11 de diciembre de 2001. Ha sido fusionada con un modelo digital de elevaciones, derivado de la imagen captada, desde el Space Shuttle, el día 11 de febrero de 2000, en el marco de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Se observan los volcanes Nyamuragira (a la izquierda) y Nyiragongo (3.470 m), a la derecha que dominan el congolés lago Kivu y la ciudad de Goma, en el frente. El Nyiragongo entró en erupción el 17 de enero de 2002.

Fuente: NASA/JPL/NIMA

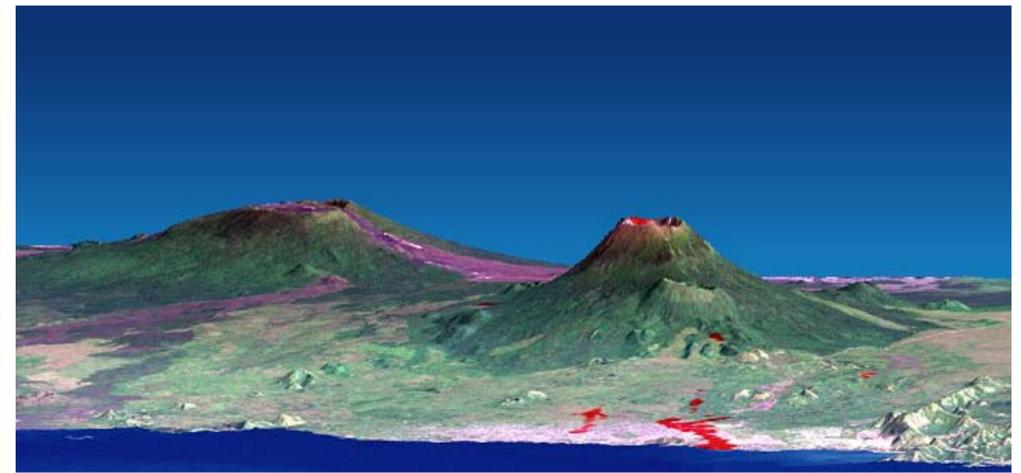


Figura 67 (página anterior, abajo a la derecha): Vista, en color natural, de la isla de Sicilia y de la erupción del volcán Etna, en octubre de 2002, desde la Estación Espacial Internacional.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 69 (arriba): Imagen Quickbird, captada el día 31 de octubre de 2002, sobre la erupción del Etna, Sicilia, Italia.

Fuente: www.digitalglobe.com

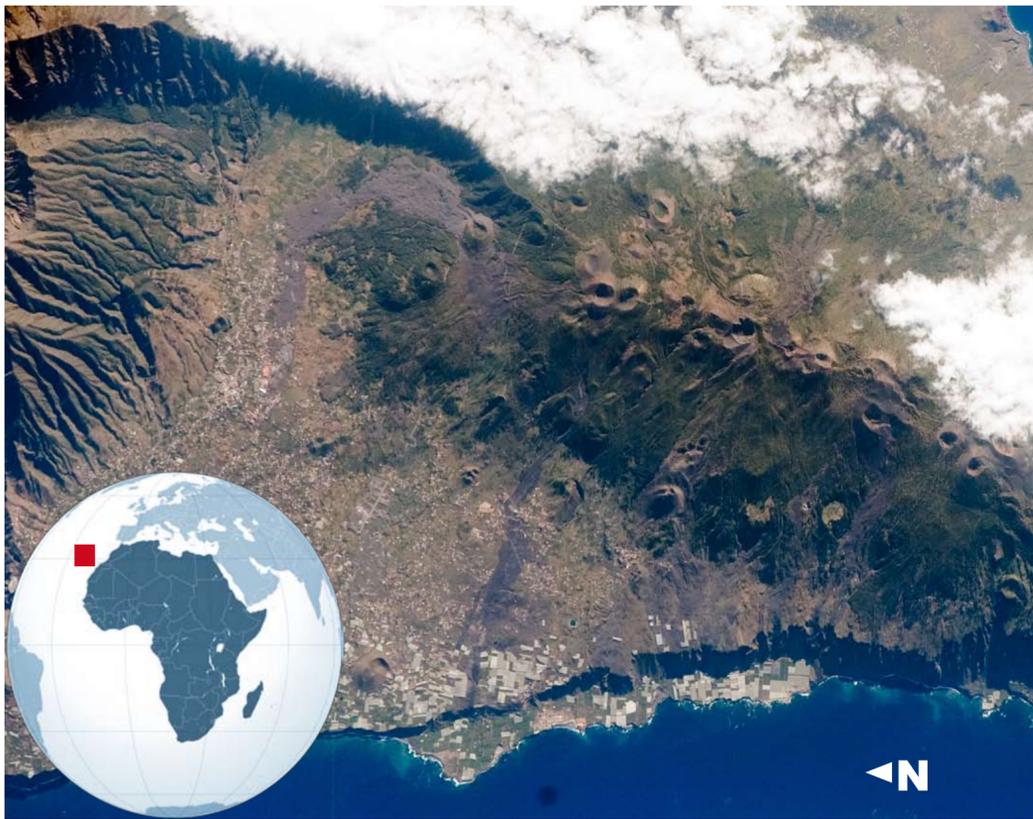


Figura 70: Fotografía, en color natural, de la isla de La Palma (Canarias, España), tomada por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional, el día 13 de mayo de 2008.

En la parte inferior derecha de la imagen, se observa la llamada Cumbre Vieja (1.949 m), una elevación alargada en sentido noreste-suroeste que presenta numerosas geoformas volcánicas. Llamam la atención los conos volcánicos y cráteres formados en la divisoria de esta zona montañosa. Asimismo, son visibles las coladas de lava (en colores grises y morados), que tapizan las laderas y partes bajas. En la zona central, se aprecia la planicie donde se localizan las localidades de El Paso y Los Llanos de Aridane.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 72: Imagen Landsat ETM+, en color natural, adquirida el día 4 de enero de 1999. En el centro de la imagen se aprecia el volcán Popocatepetl (5.465 m). Por encima del estrato arbóreo (mancha de color verde oscuro que tapiza parte de las laderas superiores), se observa una mancha circular de color gris que se corresponde con el nivel supraforestal, sin cobertura vegetal, cubierto de materiales volcánicos. En el centro de ella, destaca el cráter principal.

En la esquina superior izquierda de la imagen, a unos 65 km del Popocatepetl en dirección noroeste, se encuentra la megalópolis de Ciudad de México. Es destacable su color gris y su textura rugosa provocada por la heterogeneidad de los elementos urbanos, de naturalezas muy diversas.

La última actividad volcánica del Popocatepetl se registró el 18 de diciembre de 2000. Emitió a la atmósfera cenizas, humo y rocas volcánicas. Ante el riesgo de fusión de la nieve y el hielo y del deslizamiento de coladas de barro, las autoridades desalojaron a un sector de la población del valle de México con objeto de evitar una tragedia o, al menos, de mitigar su impacto.

La erupción más importante se registró en el año 800 de nuestra era. Las coladas de lava rellenaron buena parte de los valles de alrededor. Desde entonces, se han documentado otras cinco erupciones moderadas, dos de las cuales han ocurrido en el s.XX.

Cortesía de Ron Beck, EROS Data Center.



Figura 71: Volcán Kliuchevskaia (4.750 m), en plena erupción, fotografiado desde el transbordador Endeavour, en septiembre de 1994. Las cumbres de este volcán, situado a orillas del río Kamchatka en la península rusa de su mismo nombre, se encuentran nevadas. En la parte inferior derecha de la imagen se aprecia, nítidamente, la forma circular de otro cono volcánico.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 73 (arriba): Fotografía oblicua del Monte Fuji (3.776 m), en Japón. La imagen, en color natural, ha sido tomada el día 8 de abril de 2009 por los astronautas de la Estación Espacial Internacional. Se observa el manto de nieve, en color blanco, que cubre la parte superior del cono volcánico.

El Fuji es un ejemplo clásico de estratovolcán. Su perfil cónico y sus pendientes empinadas son el resultado de las continuas deposiciones de materiales volcánicos, coladas de lava y cenizas en sus laderas.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 74 (izquierda): Imagen, en color natural, sobre el Monte Fuji, Japón, tomada el 28 de febrero de 2004. Fuente: NASA

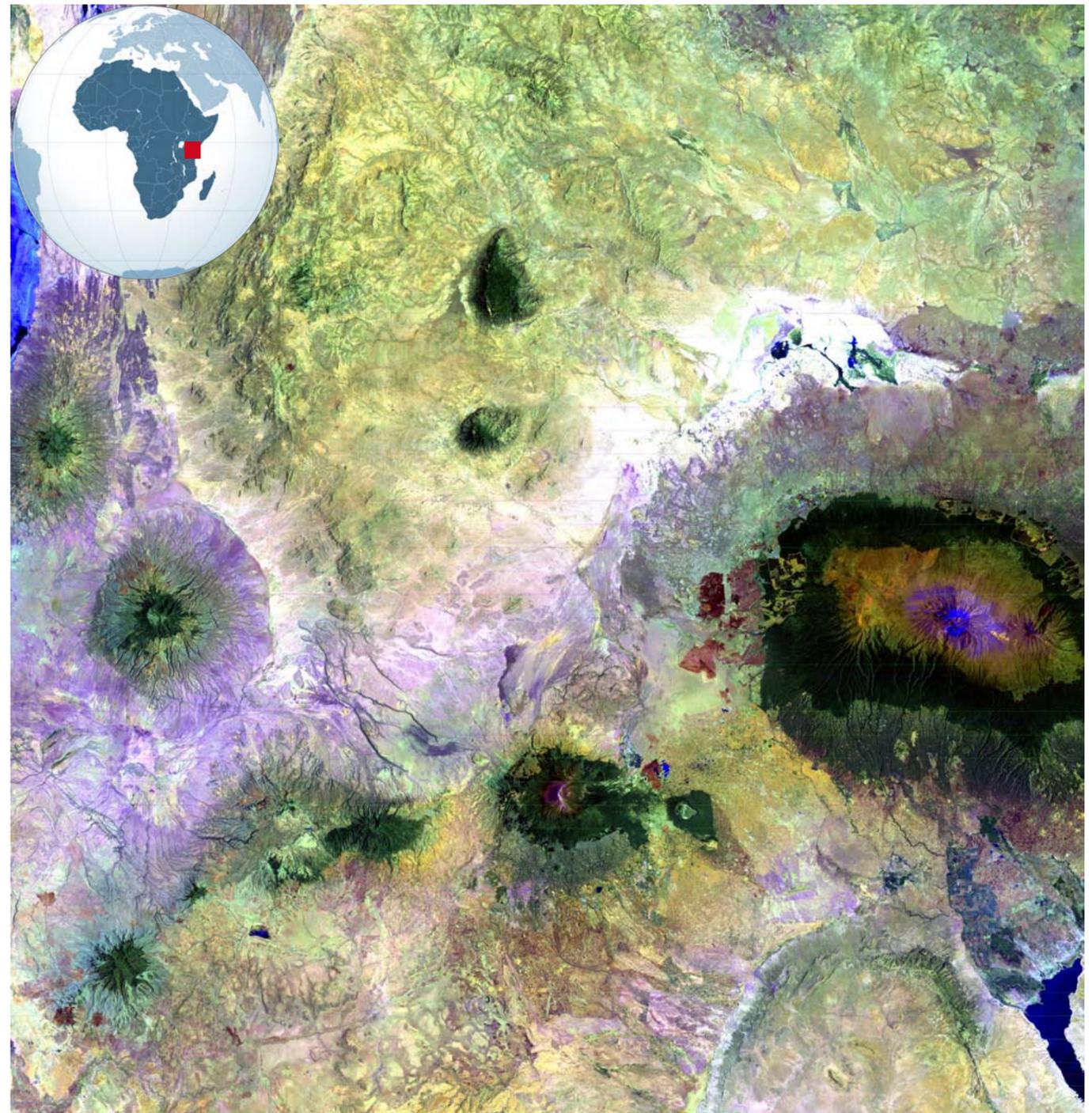


Figura 75 (arriba): Imagen en falso color adquirida el 21 de febrero de 2000 por el sensor ETM+, a bordo de Landsat 7. El Kilimanjaro (5.898 m) se aprecia en el extremo centro derecha de la imagen. Se ubica próximo a la frontera entre Tanzania y Kenia. El volcán se encuentra flanqueado por las llanuras del Parque Nacional Amboseli, al norte, y por las inclinadas tierras del Parque Nacional de Arusha, al sur y oeste. Fuente: USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch.

Figura 76 (abajo): Perspectiva tridimensional resultante de la fusión de una imagen Landsat, en pseudocolor natural, adquirida el día 21 de febrero de 2000 y un modelo digital de elevaciones, derivado de la imagen captada, desde el Space Shuttle, en febrero de 2000, en el marco de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). El Kilimanjaro, a la derecha, es un conjunto de tres volcanes. Es el punto más alto de África. A pesar de estar situado a 330 km al sur del Ecuador, gracias a su altura, su cumbre posee nieves perpetuas. Está rodeado de otros volcanes. Fuente: NASA/JPL/NIMA



### 5.1.3. INUNDACIONES

Una inundación se produce cuando el agua ocupa una zona que habitualmente se encuentra libre de ella. Se trata de un fenómeno natural y recurrente aunque, en ocasiones, las actividades humanas son directamente responsables de estos episodios o los magnifican.

Las causas más frecuentes de la ocurrencia de inundaciones son:

1. Intensas y persistentes precipitaciones, durante un periodo determinado. Las intensas lluvias pueden estar asociadas a otros fenómenos meteorológicos que ocurren estacionalmente. Algunos ejemplos de estos eventos son la formación de gotas frías, en la región mediterránea, o la formación de huracanes, tifones o ciclones en la zona tropical o la sucesión de frentes fríos y de borrascas asociadas que recorren la zona templada. Cuando el suelo está saturado y no absorbe más agua, ésta escurre a lo largo de la cuenca, ocasionando el desbordamiento de los ríos y ramblas y, en algunos casos, el anegamiento de las zonas bajas litorales. En España es frecuente que se registren precipitaciones de 200 mm, e incluso superiores, en 24 horas. Así, por ejemplo, se registraron precipitaciones superiores a 800 mm en Jávea, el 2 de octubre de 1957, y en Oliva, el 3 de noviembre de 1987.
2. La subida anormal de las mareas o las elevaciones repentinas en el nivel del mar, provocadas por un tsunami. El ejemplo más reciente es el del tsunami de diciembre de 2004, ocasionado por un sismo bajo el océano. La magnitud del mismo provocó la elevación repentina del nivel del mar y una ola de grandes dimensiones que asoló las zonas costeras de Indonesia y de otros países bañados por el Índico.
3. Los deshielos de primavera: cuando se funden la nieve y el hielo, el agua en estado líquido alimenta la escorrentía a lo largo de la cuenca. En algunos países, como Estados Unidos, las tormentas de primavera, junto al fenómeno del deshielo, ocasionan inundaciones.
4. Las coladas de barro que se forman cuando se mezclan los materiales volcánicos, tras una erupción, con el agua y nieve acumuladas en las laderas del cono. Según Echarri (2009), estas coladas fueron las responsables de las más de 23.000 víctimas ocasionadas por la erupción del Nevado del Ruiz, en Colombia, el 13 de noviembre de 1985.
5. La rotura de diques, balsas y represas. Estas infraestructuras están diseñadas para proporcionar una protección contra un cierto nivel de inundación calculada por los expertos. Sin embargo, en determinadas situaciones adversas relacionadas con intensas lluvias, estas barreras pueden fracturarse, ocasionando más daños que si no existieran. Éste fue el caso de la rotura de uno de los diques principales de la ciudad de New Orleans como consecuencia de las fuertes lluvias asociadas a Katrina. En España, se recordará los daños ambientales ocasionados por el vertido de residuos mineros metálicos sobre la cuenca del Guadiamar y en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, tras la rotura, en 1998, de la balsa de Aznalcóllar, con una capacidad de 8 hm<sup>3</sup>. Este episodio está catalogado como una de las mayores catástrofes ambientales ocurridas en nuestro país. Asimismo, se recordará la rotura de la presa de Tous, en octubre de 1982, como consecuencia del incremento del caudal del Júcar motivado por las intensas lluvias caídas asociadas a una gota fría. En esos días se registraron 600 mm de precipitaciones en un área de 700 km<sup>2</sup>, en la cuenca media del Júcar. Tras el fallo del sistema de apertura de las compuertas del embalse, con una capacidad de 80 hm<sup>3</sup>, se produjo la rotura de la presa. La crecida súbita causó importantes inundaciones y cuantiosas pérdidas aguas abajo. En Alcira se registró un caudal de 16.000 m<sup>3</sup>/s.
6. Las dificultades de drenaje o infiltración del agua acumulada: algunas veces, los deslizamientos de laderas, ocasionados por las intensas precipitaciones, provocan la obstrucción del cauce formando diques espontáneos que retienen las aguas. Cuando la fuerza del agua rompe estos diques se produce una crecida súbita del caudal que causan graves inundaciones.
7. La construcción de nuevas áreas artificiales. Es posible observar la ocupación de las llanuras de inundación de ramblas, que habitualmente no llevan caudal permanente, e, incluso, de las corrientes permanentes. Se implantan determinados cultivos anuales y se construyen infraestructuras, equipamientos (cámpings) y hasta industrias o viviendas, en ocasiones ilegales, ocupando el dominio público hidráulico. Por otra parte, el incremento de las superficies artificiales en una cuenca como consecuencia de un intenso proceso de urba-

nización, por ejemplo, y los procesos de deforestación disminuyen la capacidad natural de absorción del agua por el suelo y el incremento de la escorrentía. Asimismo, aumenta el riesgo de erosión y el arrastre de materiales que son transportados en suspensión por las corrientes de agua, de manera que agravan el efecto de las inundaciones. Según Echarri (2009), la ocupación de los cauces por construcciones reduce la sección útil para evacuar el agua y reduce la capacidad de la llanura de inundación del río, de manera que las aguas crecen a un nivel más alto. Además, en estos lugares, el riesgo de pérdidas de vida es muy alto. Cuando se produce una crecida, el impacto sobre estas ocupaciones es evidente y se producen pérdidas cuantiosas. En otros casos, se realizan ocupaciones autorizadas por las propias administraciones, considerando que las actuaciones de restauración hidrológico-forestal y de mitigación de los impactos de potenciales inundaciones ofrecen seguridad. Éste fue el caso de la riada de Biescas (Huesca) que afectó, el 7 de agosto de 1996, al camping de Las Nieves, instalado sobre el cono de deyección del torrente de Arás, en su desembocadura sobre el río Gállego. Una intensa tormenta ocasionó lluvias calculadas en 100 mm en tan sólo 10 minutos, en la cabecera del barranco. A pesar de que el bosque maduro de pinos, que cubre las laderas reforestadas a principios del s.XX, redujo la escorrentía, se estima que la riada alcanzó los 500 m<sup>3</sup>/s, arrastrando una gran carga de rocas y troncos. Esta catástrofe produjo la muerte de 87 personas y heridas a otras 183.

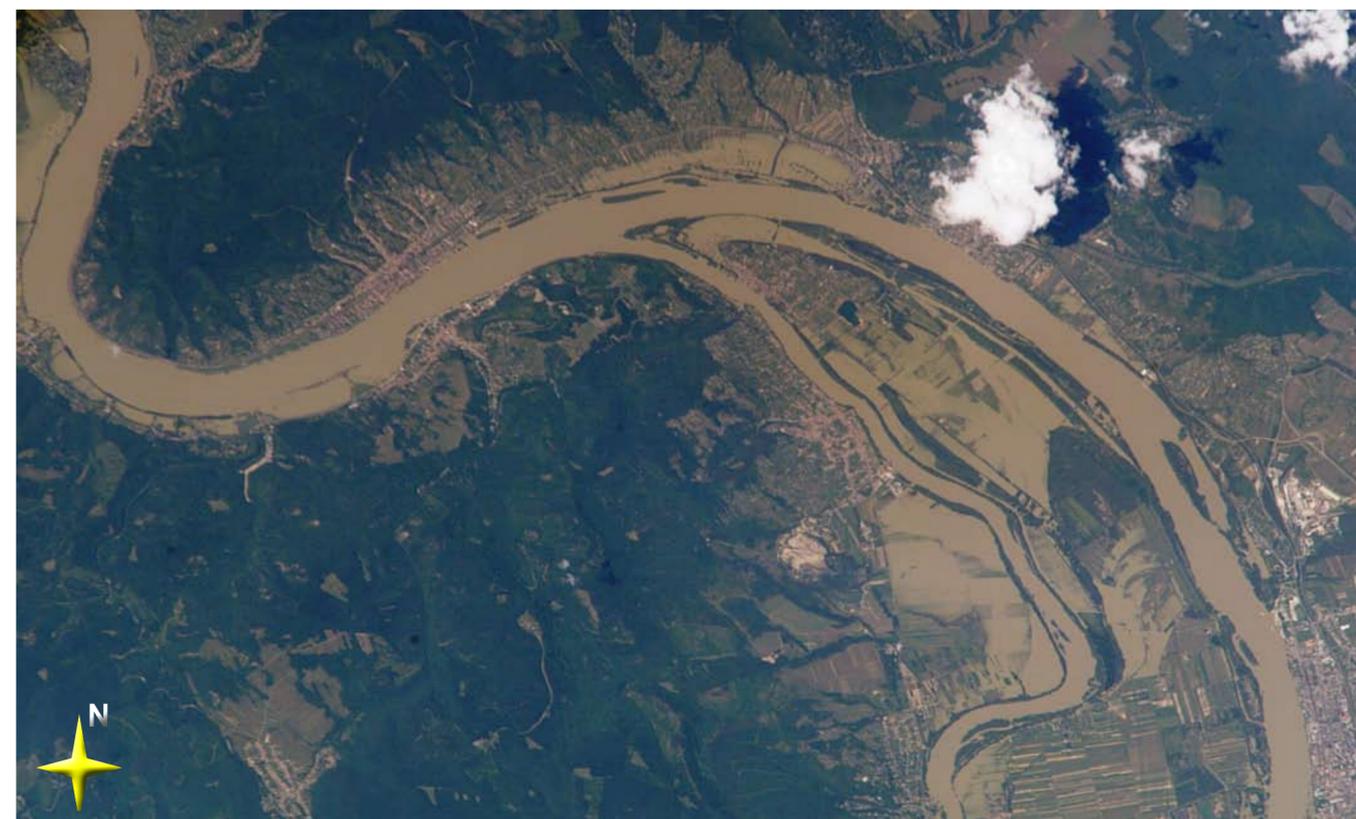
Según un informe de Naciones Unidas, entre 1980 y 2000, las inundaciones produjeron unas 170.000 muertes en todo el mundo. Bangladesh e India son los países que tienen el número más elevado de personas expuestas en términos absolutos y relativos. Se trata de poblaciones que viven en zonas inundables en las llanuras aluviales y costeras. Casi 200 millones de personas, distribuidas en más de 90 países, están expuestas, anualmente, a inundaciones catastróficas.

En España, las inundaciones constituyen el riesgo natural más importante del país. Mateu y Camarasa (2000) han estudiado el problema de las inundaciones en España durante las dos últimas décadas del s.XX. A su vez, estos autores indican que el MOPU ha catalogado más de 2.400 episodios catastróficos durante los últimos 500 años, lo que significa una media de 4,9 inundaciones por cada 1.000 km<sup>2</sup> (Baltanás, 1999). Estos datos evidencian la gran vulnerabilidad histórica de la fachada mediterránea y, en concreto, de la cuenca del Segura. Ésta presenta una media de 11,2 inundaciones por 1.000 km<sup>2</sup> frente a las cuencas internas catalanas que rondan las 9,8 y la del Sur, que alcanzan los 9 episodios.

A juicio de estos autores, el incremento del riesgo en España obedece, fundamentalmente, a un aumento de la vulnerabilidad. La ocupación, cada vez más intensiva, de las zonas inundables se sucede desde fines del s. XIX. Desde entonces, se ha producido una enorme expansión urbana e industrial, fruto de un desarrollismo caótico y escasamente planificado. Las áreas metropolitanas de la mayor parte de nuestras ciudades constituyen un claro ejemplo de la invasión indiscriminada de vegas y llanuras fluviales. Esta ocupación apenas ha tenido en cuenta el riesgo de inundación y cuando lo ha hecho se ha limitado a intervenciones estructurales sobre los cauces para la defensa de emplazamientos inundables. Estas actuaciones de defensa han distorsionado la percepción del riesgo, creando un sentimiento falso de seguridad, amparado en la técnica, relajando la conciencia del peligro y animando a seguir ocupando las llanuras aluviales. Así pues, puede decirse que el hombre juega un doble papel ya que, por una parte, aumenta su exposición al peligro y, por otra, interviene en la dinámica fluvial, modificando las pautas hidrológicas naturales.

Aunque el fenómeno permanece latente, desde el punto de vista hidrológico destaca una menor recurrencia de las crecidas catastróficas desde mediados de los 60 y los 70.

En el Libro Blanco del Agua (Ministerio de Medio Ambiente, 1998) se han catalogado 1.036 áreas de riesgo, a nivel nacional. El mayor número de estas zonas se encuentra en la cuenca del Ebro (828), seguida de la del Júcar (132), la del Norte (123) y la del Guadalquivir (104). Si distinguimos entre diferentes grados de riesgo, las cuencas con mayor proporción de zonas de riesgo alto son las del Ebro (26,5%), Norte (23%) y Júcar (19,1%).



Figuras 77 (arriba) y 78 (abajo): Imágenes de las inundaciones provocadas por el Danubio, en las inmediaciones de la ciudad de Vac, situada unos 50 km al norte de Budapest. Ambas han sido captadas por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional. La superior fue tomada el día 18 de agosto de 2002. Se observa cómo la lámina de agua estaba inundando numerosas parcelas agrícolas situadas en ambas márgenes del río y, especialmente, en la isla del centro de la imagen. Asimismo, la crecida amenazaba la ciudad de Vac, en la margen izquierda del río, al sureste de la imagen superior. La imagen inferior fue tomada el día 23 de agosto de 2002, cuando el caudal del río ya estaba descendiendo. Obsérvese que la orientación de las dos fotografías no es la misma.

Fuentes: <http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop/photo.pl?mission=ISS005&roll=E&frame=10000> y <http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop/photo.pl?mission=ISS005&roll=E&frame=10926>





August 14, 2000



August 20, 2002

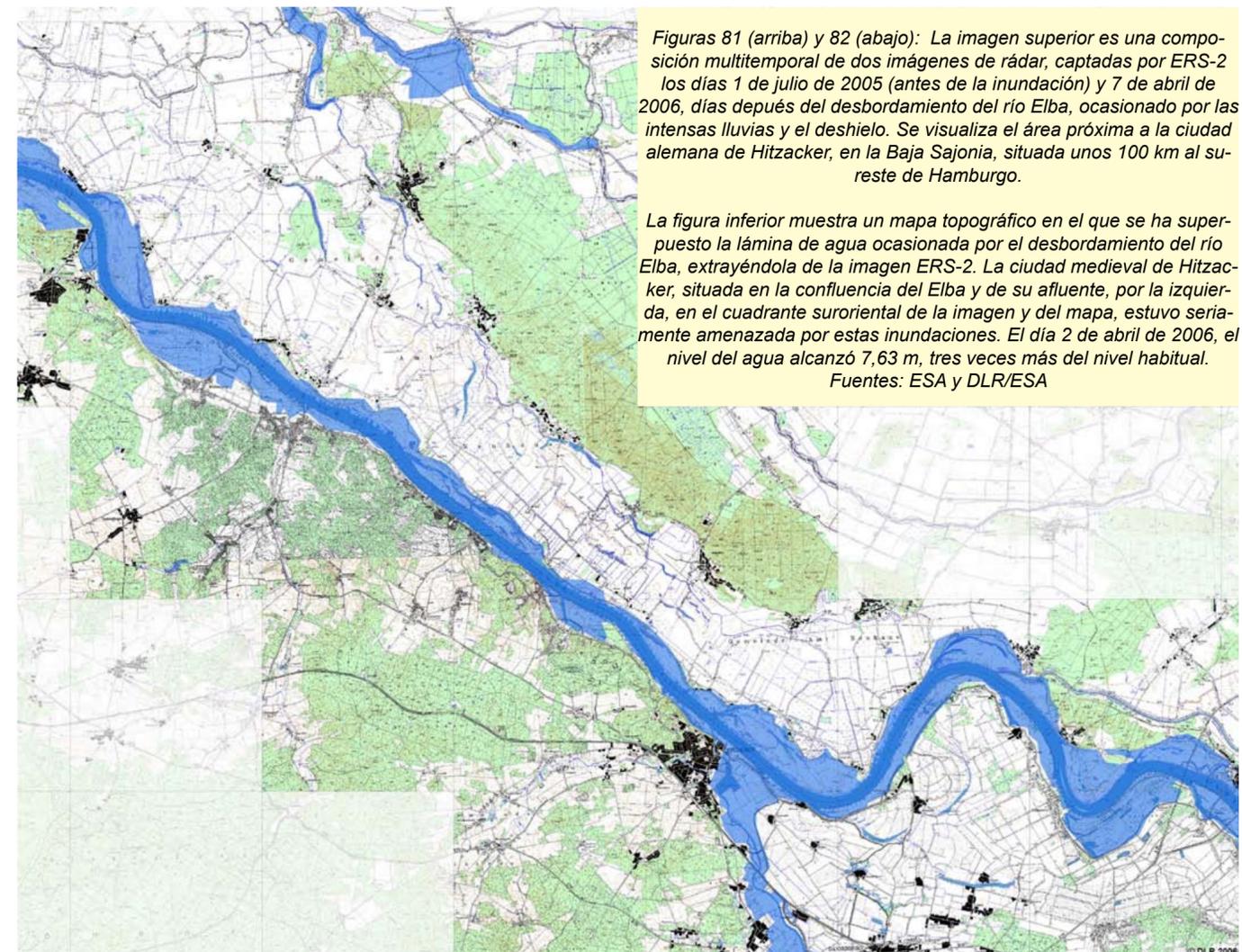
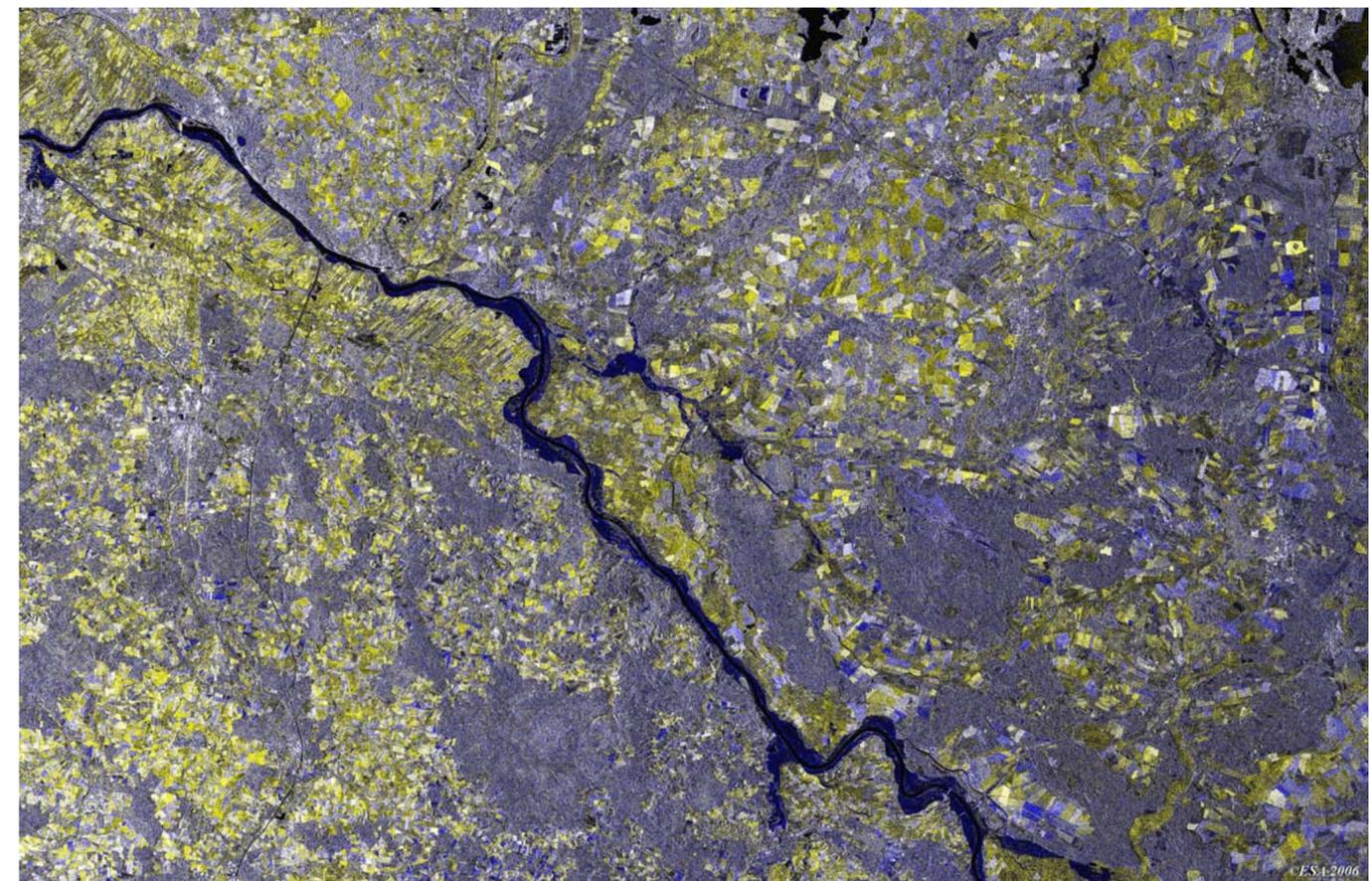


Figuras 79 (arriba) y 80 (abajo): Imágenes Landsat ETM+, en pseudocolor natural, tomadas desde Landsat-7 los días 14 de agosto de 2000 y 20 de agosto de 2002, respectivamente. Comparando ambas, se aprecia la extensa lámina de agua (en color negro) que cubre buena parte de las tierras agrícolas y forestales de ambas márgenes del río Elba, en el sector comprendido entre las ciudades alemanas de Wittenberg (en el centro norte de la imagen) y Dresde (en el sureste de la imagen).

Estas inundaciones se produjeron como consecuencia de las intensas y prolongadas lluvias que se iniciaron en el mes de agosto de 2002 y que afectaron a Europa Central y Oriental. En Dresde, la inundación amenazó el centro histórico de la ciudad y el nivel de agua alcanzó el récord anterior, registrado en 1845. En Praga el río Moldava, afluente del Elba, llegó al máximo histórico de 5.000 m<sup>3</sup>/s inundando buena parte del centro histórico.

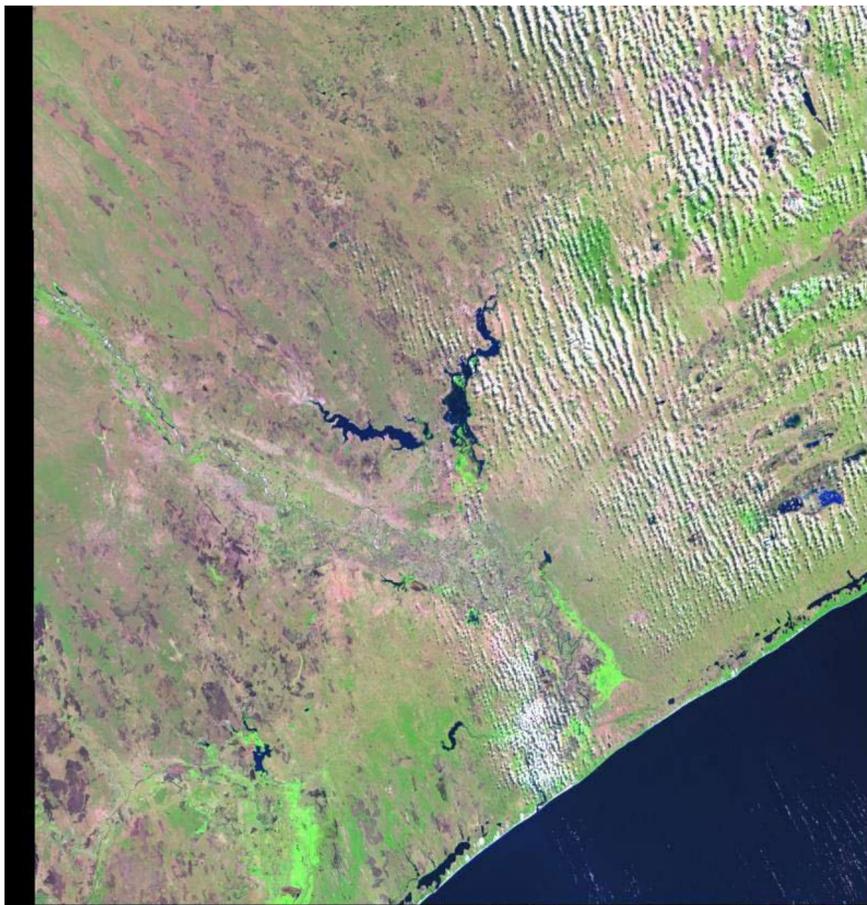
Decenas de miles de personas fueron evacuadas de sus hogares en Alemania. Se movilizaron 50.000 efectivos de los servicios de emergencia y de seguridad junto a 100.000 voluntarios que trabajaron para minimizar el impacto de las inundaciones sobre las zonas urbanas y otras infraestructuras vulnerables. Las inundaciones causaron 100 muertos en Alemania, República Checa, Austria, Hungría y Rusia y una pérdidas materiales estimadas de 20 billones de \$.

Fuente: Cortesía de Jesse Allen, NASA Earth Observatory; datos proporcionados por USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch.



Figuras 81 (arriba) y 82 (abajo): La imagen superior es una composición multitemporal de dos imágenes de radar, captadas por ERS-2 los días 1 de julio de 2005 (antes de la inundación) y 7 de abril de 2006, días después del desbordamiento del río Elba, ocasionado por las intensas lluvias y el deshielo. Se visualiza el área próxima a la ciudad alemana de Hitzacker, en la Baja Sajonia, situada unos 100 km al suroeste de Hamburgo.

La figura inferior muestra un mapa topográfico en el que se ha superpuesto la lámina de agua ocasionada por el desbordamiento del río Elba, extrayéndola de la imagen ERS-2. La ciudad medieval de Hitzacker, situada en la confluencia del Elba y de su afluente, por la izquierda, en el cuadrante suroriental de la imagen y del mapa, estuvo seriamente amenazada por estas inundaciones. El día 2 de abril de 2006, el nivel del agua alcanzó 7,63 m, tres veces más del nivel habitual. Fuentes: ESA y DLR/ESA



Figuras 83 (izquierda) y 84 (abajo): La figura izquierda es una imagen Landsat-TM, en pseudocolor natural, captada el 22 de agosto de 1999, seis meses antes de las inundaciones de Mozambique motivadas por el desbordamiento del río Limpopo.

La figura inferior es una composición multitemporal de dos imágenes radar, registradas, los días 16 y 27 de marzo de 2000, por el satélite ERS-1. Se aprecian las inundaciones ocasionadas por el río Limpopo, cerca de su desembocadura en el Océano Índico. Al tratarse de un sensor activo, las nubes no obstaculizan la visión de la lámina de agua, convirtiéndose en una herramienta eficaz para realizar una cartografía precisa del área afectada.

El río Limpopo tiene una cuenca de 413.000 km<sup>2</sup>. La zona de captación de aguas, en la parte superior de la cuenca, se adentra en el desierto de Kalahari. La parte inferior está formada por ecosistemas más húmedos. A pesar de ello, después de la temporada lluviosa, las inundaciones son un problema esporádico en el tramo bajo del río. El desbordamiento más notable ocurrió en febrero de 2000, causado por las intensas lluvias caídas desde principios del mes y agravadas, más tarde, por la llegada del ciclón Eline. En la confluencia de los ríos Limpopo, que proviene del oeste, y Changane, que fluye desde el noreste, las aguas ocupan toda la llanura aluvial.

Fuentes: [www.alernet.org](http://www.alernet.org) y ESA

Entre las 46 áreas inundables de primer orden se encuentran 25 capitales de provincia (incluidas todas las mediterráneas), las áreas metropolitanas de las siete ciudades de mayor población, gran parte de las ciudades mediterráneas y sus zonas turísticas y los valles industriales del norte de España.

De forma similar, Protección Civil ha catalogado 1.398 puntos conflictivos en España en los que, periódicamente, suelen registrarse importantes inundaciones. Según este organismo, las grandes áreas en las que se concentran estos puntos son las cuencas norte y mediterránea. En la primera se localizan 300 puntos conflictivos. Los valles son estrechos y profundos y contienen importantes núcleos de población y complejos industriales. En el área mediterránea se concentra el mayor número de puntos conflictivos, repartidos a lo largo de las cuencas del Júcar, Segura y en las cuencas catalanas y andaluzas. En este caso, el origen de las inundaciones son las precipitaciones torrenciales de finales de verano y principios de otoño. La intensidad de las lluvias junto a la menor densidad de cobertura vegetal y las pronunciadas pendientes favorecen el arrastre de suelo y la acumulación de sedimentos en suspensión, condiciones hidrodinámicas que agravan los efectos de las inundaciones.

Para combatir o minimizar el impacto de las inundaciones se diseñan distintas medidas de mitigación o de defensa. Desde la Antigüedad, en Egipto, Mesopotamia, Grecia y Roma se diseñaron distintos tipos de diques y canales para contener y desviar las aguas y defender, a los asentamientos ubicados en zonas vulnerables, de eventuales inundaciones. Aunque distintas, en general pueden clasificarse estas medidas como estructurales que tienden a actuar sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de las avenidas y a construir infraestructuras de defensa.

Actualmente, se considera importante combinar los sistemas de prevención y de alerta temprana. Los sistemas de prevención se basan en diques, motas, barreras metálicas, embalses reguladores y mejora de la capacidad de desagüe de los cauces fluviales. Los sistemas de alerta ante situaciones peligrosas están muy desarrollados por medio de la predicción meteorológica, la observación de los aforos fluviales y los sistemas de detección

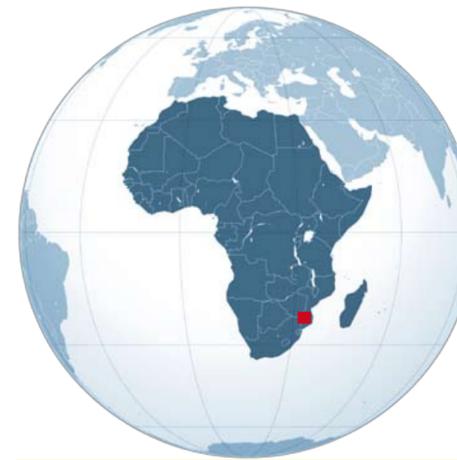
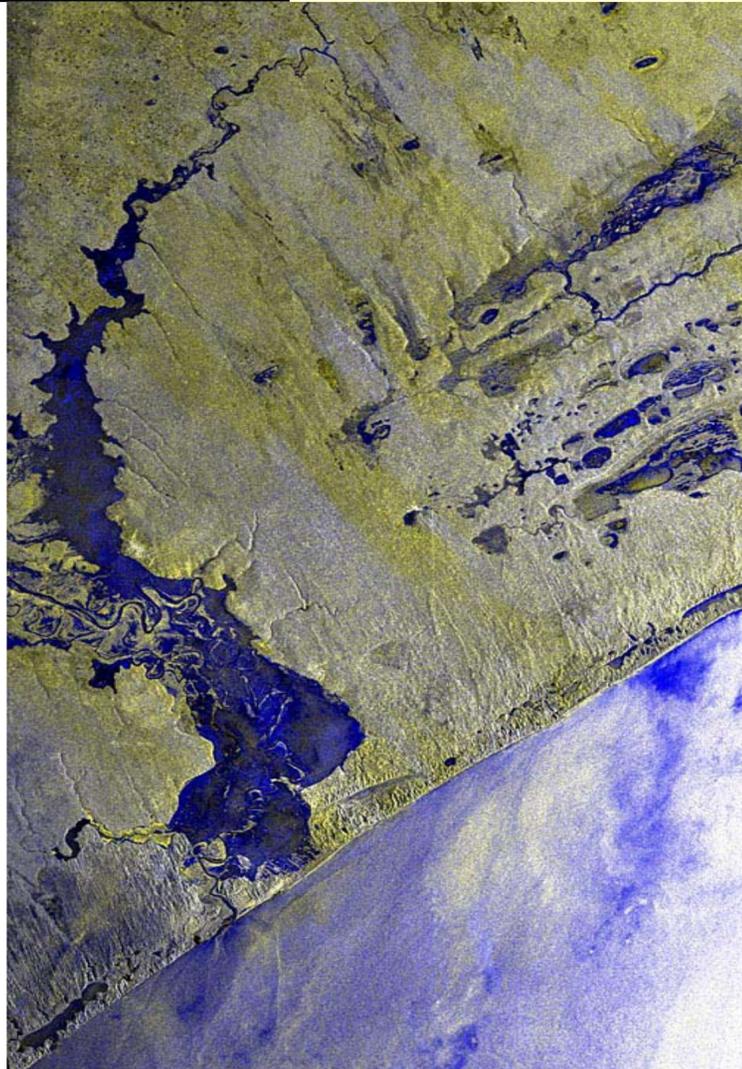
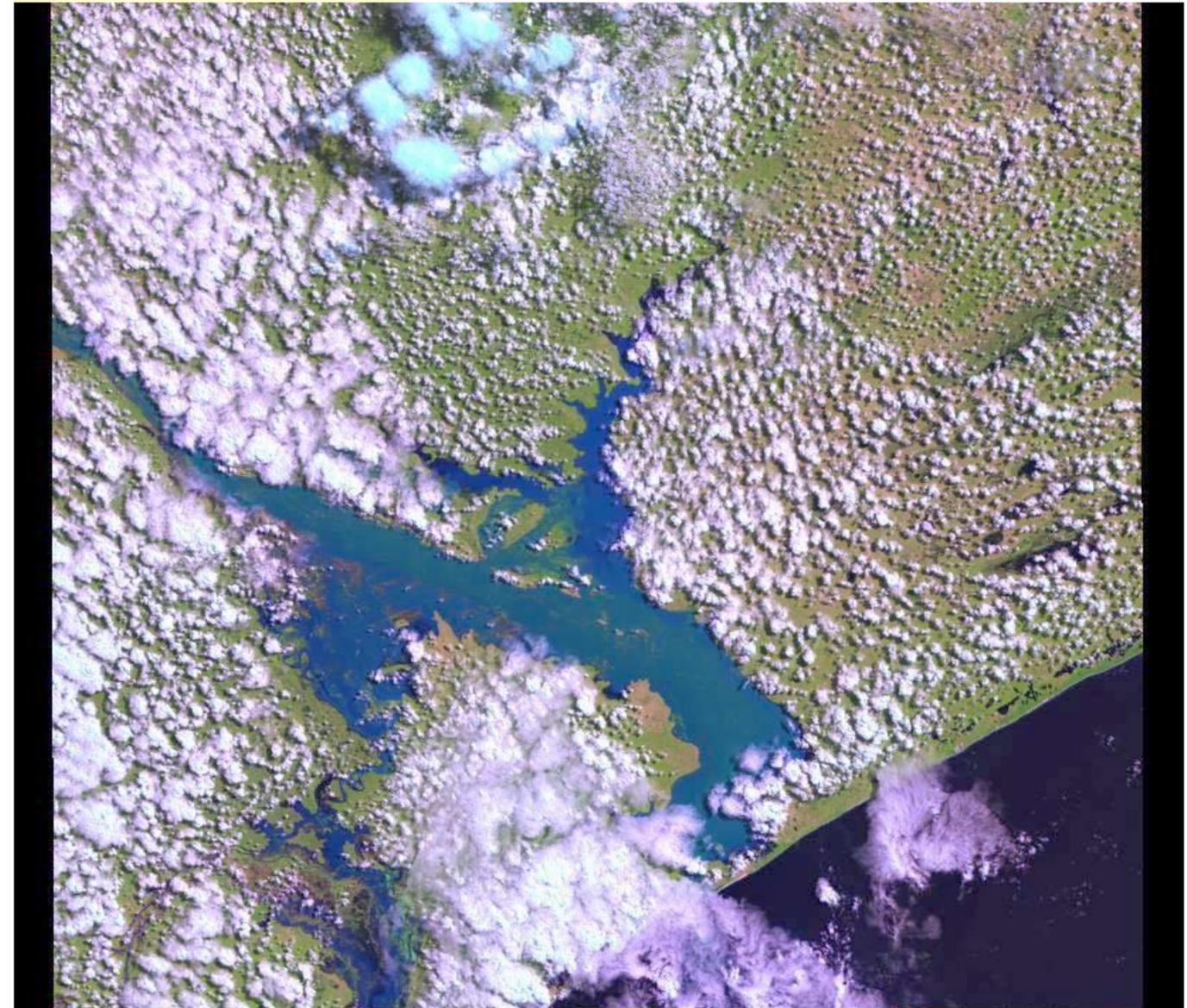


Figura 85: Imagen óptica Landsat-TM, en pseudocolor natural, registrada el 1 de marzo de 2000. En comparación con la figura anterior, esta imagen se ve afectada por la cobertura nubosa, frecuente en estas latitudes tropicales, que dificulta una observación nítida y un seguimiento del fenómeno. Una de las zonas más afectadas fue la pequeña ciudad y el aeropuerto de Xai Xai, situados en la llanura aluvial del río Limpopo, cerca de su desembocadura.

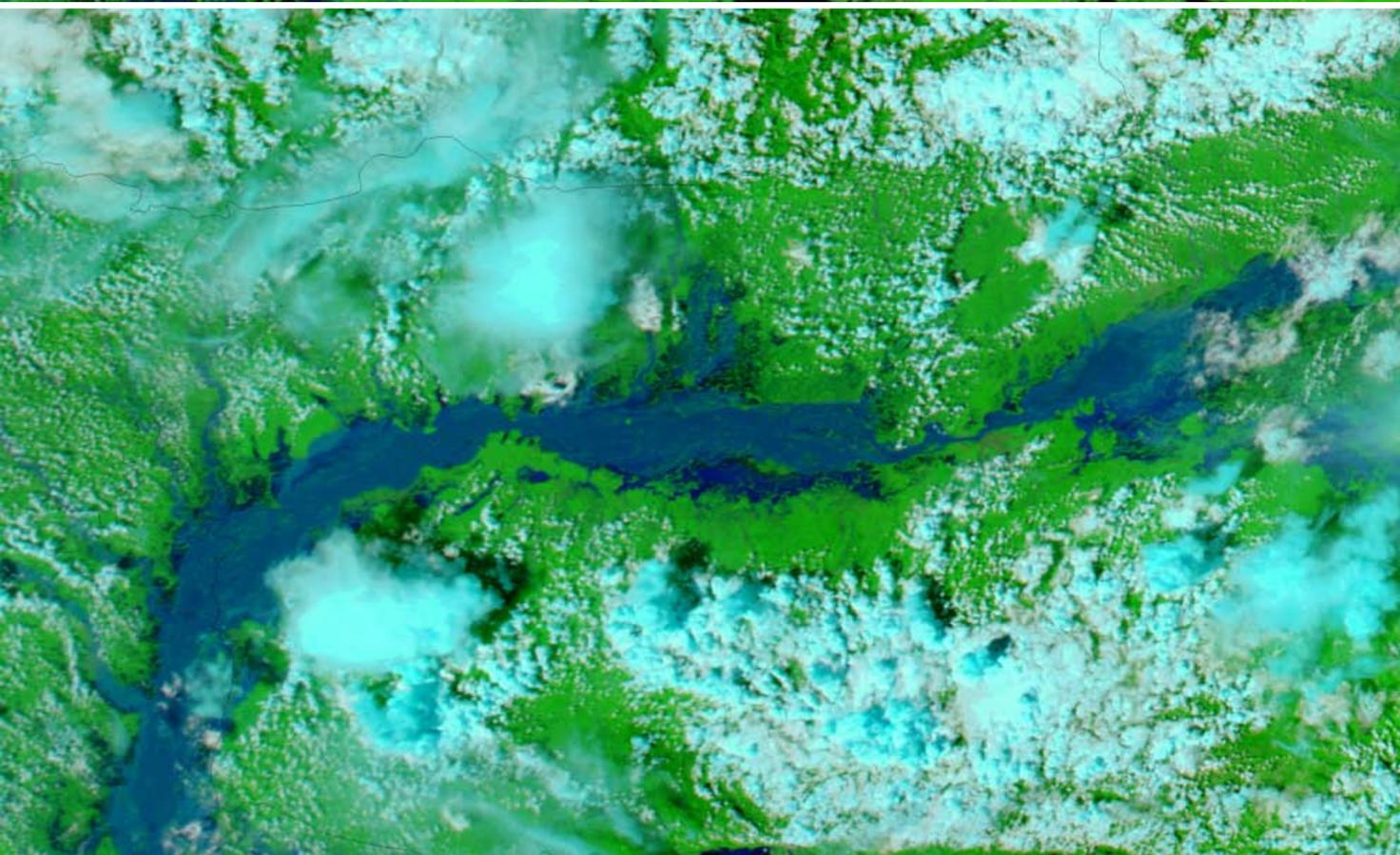
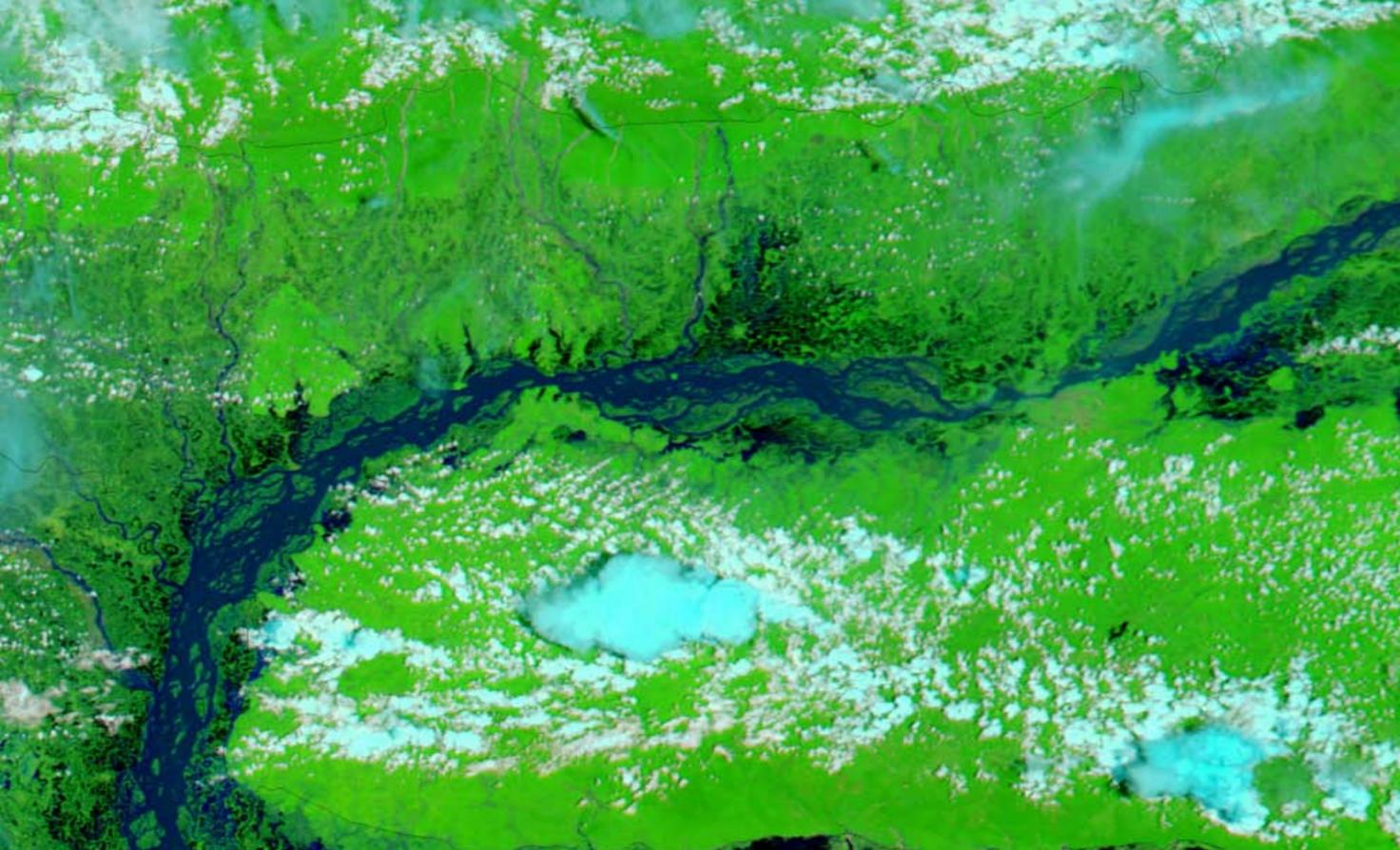
Fuente: [www.alernet.org](http://www.alernet.org)



de maremotos. También, son efectivas las medidas legales que, en muchas ocasiones, prohíben la construcción de zonas urbanas y de equipamientos en zonas inundables. Los Sistemas de Información Geográfica permiten cartografiar las zonas de riesgo, de manera que se incorpore esta información en el proceso de toma de decisiones de los gestores y planificadores del territorio.

En la actualidad, se cuestiona la utilidad de las medidas estructurales de mitigación y defensa de las inundaciones porque se ha demostrado, en distintos casos, que no sólo no han funcionado como se esperaba sino que, además, en ocasiones, han incrementado el impacto sobre las personas y las propiedades. Ahora comienza a defenderse la utilidad de las llamadas medidas no estructurales. Estas medidas, por sí mismas, no evitan las inundaciones pero sí mitigan su impacto. Entre ellas, se señalan como más importantes, además de los citados sistemas de alerta temprana, la ordenación de Zonas Inundables, la conveniencia de que los propietarios dispongan de seguros que cubran los daños provocados por este riesgo natural y una educación adecuada, tanto a escolares como a personas adultas, para prevenir el riesgo y autoprotegerse de él. En España, Protección Civil trabaja en estas líneas de actuación desde hace años.

En España se han sucedido diversas inundaciones a lo largo de la historia. Las cuencas más afectadas por este riesgo natural son las mediterráneas, debido a la ocurrencia recurrente de gotas frías, al final del verano y comienzos del otoño, que descargan intensas precipitaciones en cortos intervalos de tiempo de manera que son frecuentes los desbordamientos de ramblas, barrancos y ríos. Considerando los últimos cincuenta años, además de las catástrofes asociadas a la rotura de la presa de Tous y a la riada de Biescas ya mencionadas, conviene destacar la gran riada de Valencia, ocurrida el 14 de octubre de 1957 en las cuencas del Turia y del Palancia. El día anterior se produjeron abundantes precipitaciones que alcanzaron los 360 mm a los que se sumaron otros 100 mm caídos el día 14. Se registraron caudales de hasta 3.700 m<sup>3</sup>/s, desbordándose el Turia a su paso por Valencia, anegando buena parte de la zona urbana. Para evitar nuevas inundaciones, se construyó un nuevo cauce, al sur de la ciudad, con una capacidad de 5.000 m<sup>3</sup>/s. El caudal del Palancia alcanzó los 900 m<sup>3</sup>/s y se desbordó a su paso por Sagunto.



Figuras 86 (arriba) y 87 (abajo): Imágenes MODIS, en pseudocolor natural, tomadas por el satélite Aqua, los días 5 de agosto y 12 de septiembre de 2007, respectivamente. Se observa el río Brahmaputra, en el sector comprendido entre la frontera de Bangladesh e India, en el suroeste de la imagen, y Guwahati, la capital comercial del estado indio de Assam, a orillas del río en el centro oriental de la imagen. La secuencia de imágenes muestra la segunda y tercera inundación producidas en 2007 por el desbordamiento del Brahmaputra como consecuencia de las intensas lluvias monzónicas que asolaron los territorios del noreste de India y de Bangladesh y Bhutan. En la imagen inferior, el río alcanza hasta 25 km de ancho en algunos lugares. El color azul medio-claro se corresponde con masas de agua que contienen una abundante carga de sedimentos, propia de las crecidas de ríos que proceden de alta montaña. Es el caso de los tributarios del Brahmaputra, por su margen derecha (norte), que descienden desde el Himalaya.  
Fuente: MODIS Rapid Response Team, NASA GSFC



El 19 de octubre de 1973 se produjeron nuevas inundaciones, entre otros lugares, en la cuenca del Segura. Las precipitaciones superaron los 300 mm en 24 horas en la cabecera del Guadalentín, alcanzando un caudal de 2.500 m<sup>3</sup>/s, a su paso por Lorca. El derrumbamiento de casas y puentes por los elevados caudales e inundaciones ocasionaron la muerte de más de 100 personas. La crecida llegó al Segura, ocasionando nuevas catástrofes en las zonas ribereñas de Murcia y Orihuela.

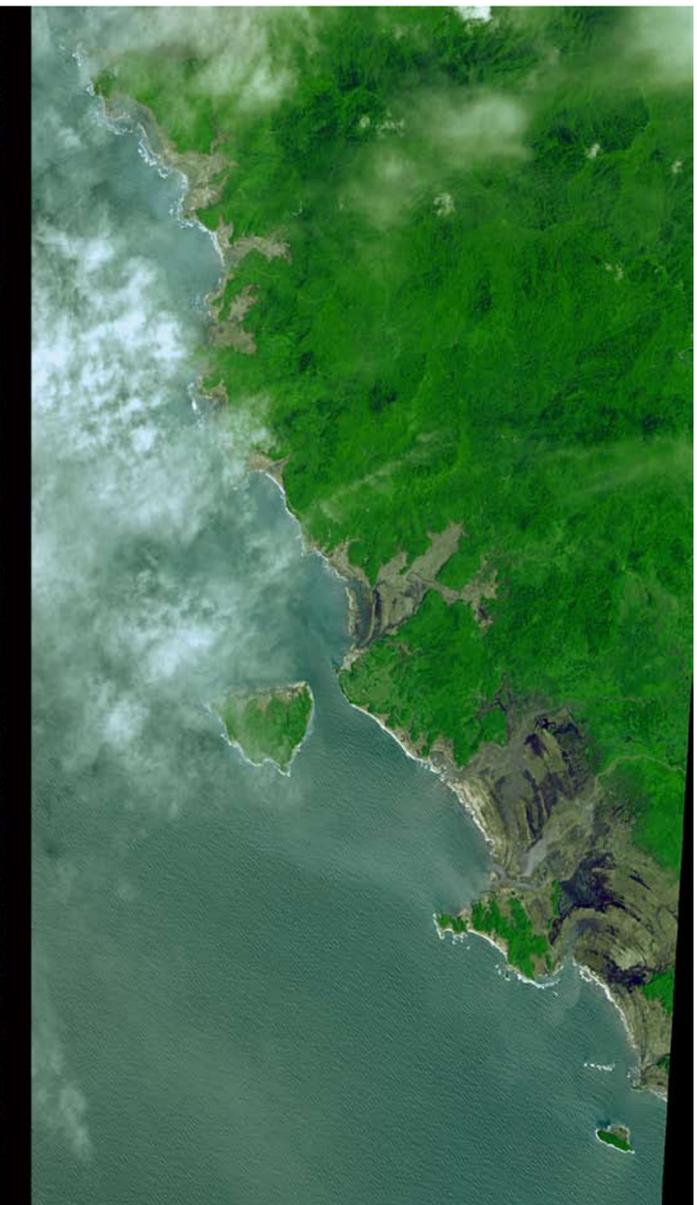
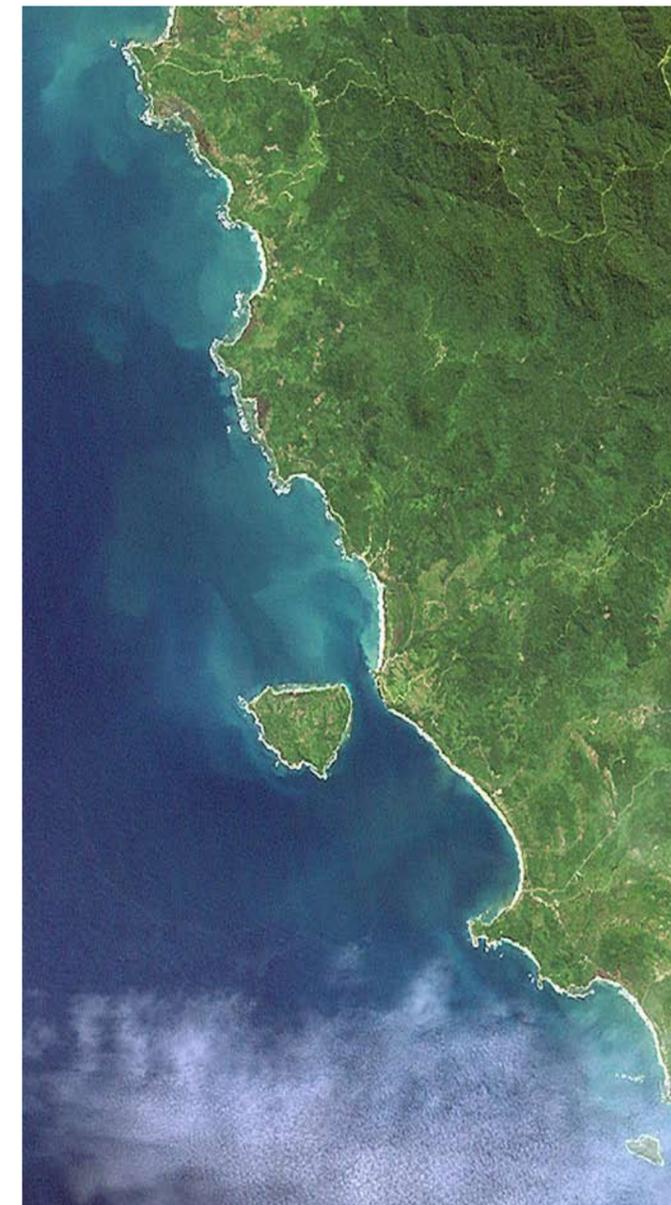
Otro ejemplo de catástrofe fue producida el 30 de septiembre de 1997 en la ciudad de Alicante. Una nueva gota fría es responsable de intensas precipitaciones, cuantificadas en 270 mm en medio día. La situación fue crítica como consecuencia del proceso urbanizador sobre algunas zonas inundables por las ramblas y torrentes. Las inundaciones afectaron a barrios como los de San Agustín y La Albufereta. En la rambla de las Ovejas se registró un caudal de 100 m<sup>3</sup>/s. A pesar de ello, el barrio

de San Gabriel no resultó afectado gracias a las obras de canalización de la rambla.

En el mes de octubre de 2000, una gota fría de grandes dimensiones ocasionó abundantes precipitaciones en toda la cuenca mediterránea. En distintos sectores de la provincia de Castellón se registraron hasta 500 mm. En la presa de María Cristina, construida para regular un afluente del río Mijares, el agua se desbordó y se activaron las alertas como consecuencia del peligro de rotura de la presa. En la ciudad de Valencia se registró un volumen de precipitaciones similar al de la gran riada de 1957. En esta ocasión, el desvío del cauce cumplió su misión de forma adecuada.

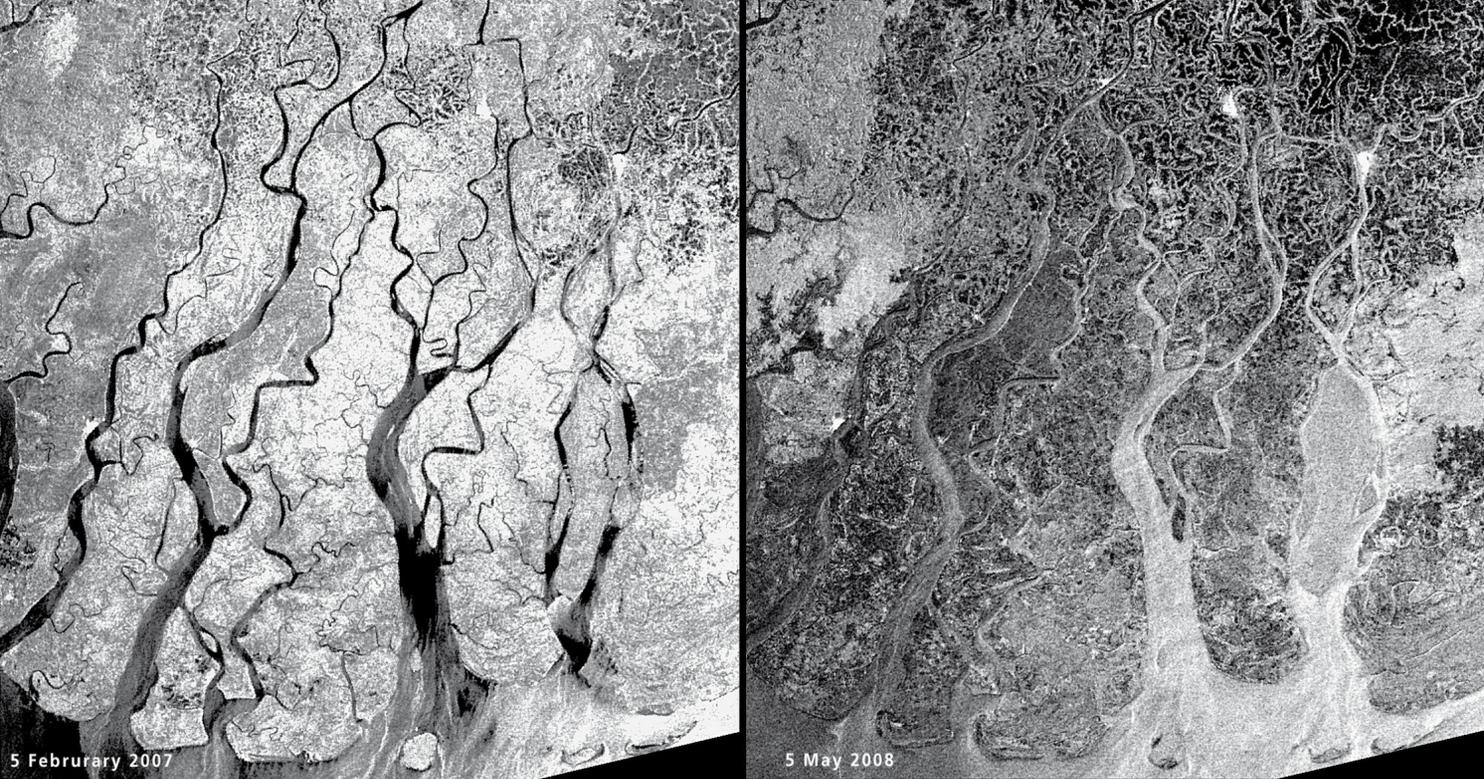
Menos frecuentes son las inundaciones en otras cuencas hidrográficas españolas.

Aunque excepcionalmente, las intensas precipitaciones también pueden ocasionar inundaciones en la cuenca del Norte. Según Mateu y Camarasa (2000), refiriéndose a un estudio del MOPU sobre los episodios catastróficos de los últimos 500 años, la cuenca del Norte regis-



Figuras 88 (izquierda) y 89 (derecha): Imagen Landsat 7-ETM, captada en junio de 2001, y ASTER, registrada el 12 de enero de 2005, respectivamente. Cubren una superficie de unos 130 km<sup>2</sup>, aproximadamente, situada en el noroeste de la isla indonesia de Sumatra, a unos 80 km al sur de Banda Aceh. Las ciudades costeras de Bahak Nipah y Keudepate han sido arrasadas por los efectos del tsunami producido en diciembre de 2004, unos días antes de la toma de la imagen ASTER. En ésta se observa, en colores ocres y azules oscuros, cómo las zonas costeras topográficamente más bajas han sido inundadas por las olas, destruyendo lo que se encontraron a su paso.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team



Figuras 90 (arriba a la izquierda) y 91 (arriba a la derecha): Imágenes radar ASAR, captadas desde el satélite ENVISAT los días 5 de febrero de 2007 y 5 de mayo de 2008. La imagen de la izquierda muestra el delta del río Irawaddy, en el sur de Birmania, al suroeste de Rangoon. La imagen de la derecha muestra una vista de las inundaciones provocadas, en la misma zona, un año después, por el paso del ciclón Nargis, de categoría 4, que tocó las costas birmanas el día 3 de mayo de 2008. Este ciclón causó 28.458 muertos, 33.019 heridos y 33.416 desaparecidos, según datos oficiales. Fuente: ESA

Figuras 92 (centro a la izquierda) y 93 (abajo a la izquierda): Imágenes MODIS, en pseudocolor natural, adquiridas por el satélite TERRA los días 15 de abril y 5 de mayo de 2008. Ilustran el momento anterior y posterior al impacto del ciclón Nargis sobre la región del delta del río Irawaddy. Entre las nubes, se evidencian las masas de agua, en color azul, que han ensanchado los canales del río, en su delta, y que han inundado gran parte de la zona próxima a la capital del país, Rangoon (Yangón en estas imágenes) y a Pegu. Fuente: [http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/19000/19874/Myanmar\\_TMO\\_2008126.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/19000/19874/Myanmar_TMO_2008126.jpg) MODIS Rapid Response Project at NASA/GSFC

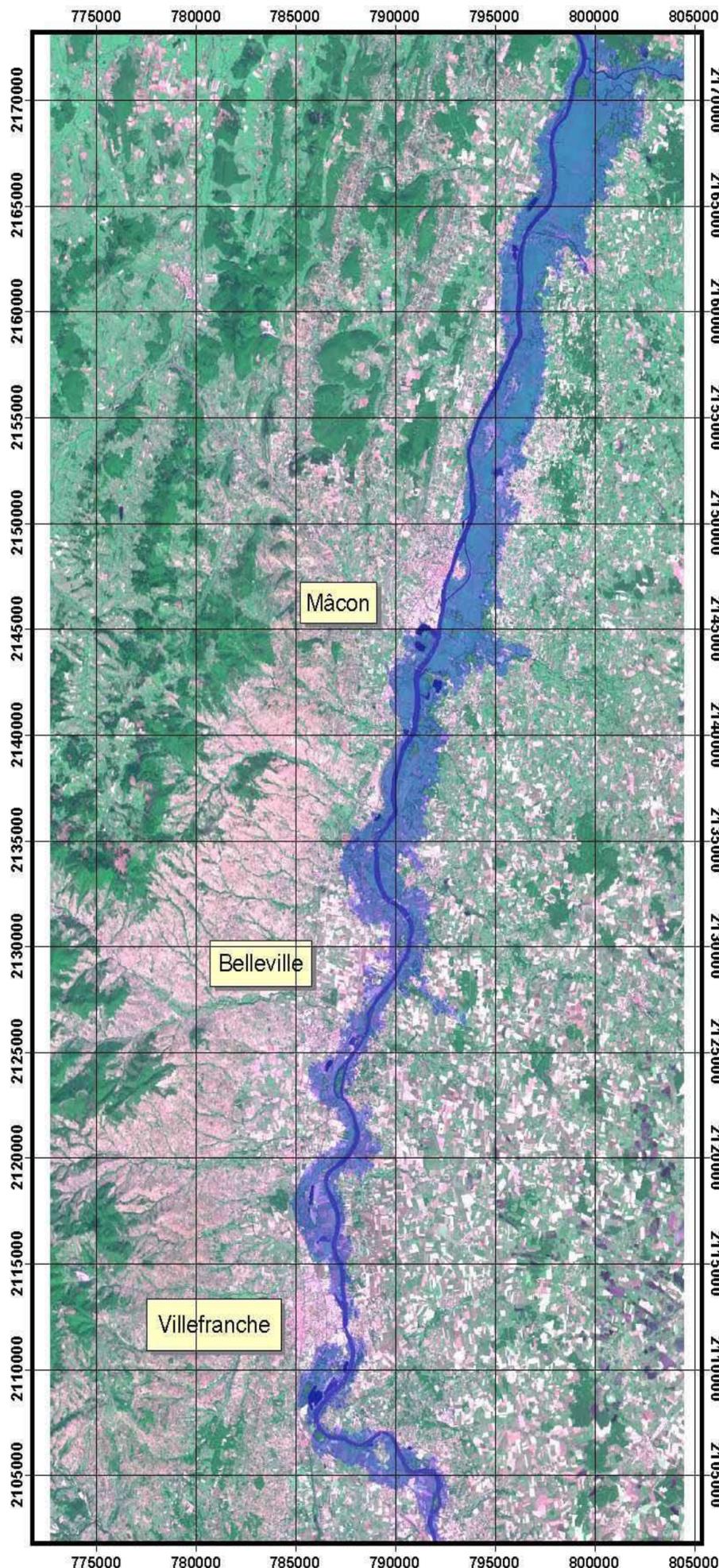


Figura 94: Imagen SAR del satélite ERS-2, fusionada con una cartografía SPOT, en color natural. De esta composición se ha extraído la cartografía del área inundada, el 27 de marzo de 2001, en el río Saône, en el tramo comprendido entre Tournous y Villefranche, unas decenas de kilómetros al norte de Lyon. Fuente: ESA/CNES-SpotImage/SERTIT



tra una media de 2,8 inundaciones por cada 1.000 km<sup>2</sup>, cifra significativamente menor que la media de la cuenca del Segura (11,2 inundaciones por cada 1.000 km<sup>2</sup>). El 26 de agosto de 1983 se produjeron las precipitaciones más intensas que se recuerdan en el País Vasco. En algunos puntos se alcanzaron los 500 mm. Este volumen de lluvias motivó el desbordamiento del río Nervión que ocasionó cuantiosos daños materiales en Bilbao y en otras localidades vizcainas y decenas de fallecimientos.

También es menor la vulnerabilidad histórica de otras cuencas atlánticas de la península ibérica frente a inundaciones. De acuerdo a los datos de la fuente anteriormente citada, la cuenca del Guadiana alcanza una cifra de 2,4 inundaciones por cada 1.000 km<sup>2</sup>. Asimismo, considerando el periodo de 500 años antes referenciado, la cuenca del Guadiana registra una media de 0,3 inundaciones al año, cifra muy inferior a la de otras cuencas peninsulares. El 5 de noviembre de 1997, las intensas lluvias provocadas por un fuerte temporal del SW ocasionaron la repentina crecida de varios afluentes del Guadiana, por su margen izquierda, provocando importantes inundaciones en las localidades de Valverde de Leganés y de Badajoz. Además de las importantes pérdidas materiales, hay que reseñar la muerte de varias personas.

En el resto del mundo se han producido importantes inundaciones que ejemplifican las causas que antes se han descrito. Las figuras de esta sección de la guía ilustran algunos casos significativos que, seguramente, los lectores guardan en sus memorias.

En Norteamérica, además de las inundaciones provocadas por la sucesión anual de huracanes en las costas surorientales de Estados Unidos, conviene recordar la gran inundación de 1993 causada por el desbordamiento del río Mississippi. Se ha catalogado como la peor catástrofe hidrológica de Estados Unidos desde las ocurridas en la década de los años 30. En la cuenca de este río, este tipo de eventos



suelen ocurrir entre 3 y 4 veces cada siglo. Un par de años después, en agosto de 2005, las lluvias asociadas al huracán Katrina junto a la rotura de un dique, ocasionaron la inundación de la ciudad de New Orleans, en el delta del Mississippi. Como ya se ha indicado, el agua alcanzó 9 m de altura en algunos sectores de la ciudad y ésta hubo de ser completamente evacuada.

En Sudamérica, el 13 de noviembre de 1985 se produjo la catástrofe de la ciudad de Armero, que quedó arrasada como consecuencia de la colada de barro originada por la fusión de la nieve del cono volcánico del Nevado del Ruiz después de su erupción y su mezcla con los materiales volcánicos. Se contabilizaron más de 25.000 muertos y cuantiosas pérdidas materiales.

Otra de las catástrofes que los lectores recordarán tristemente por la magnitud de los daños es el tsunami de Indonesia, producido el 26 de diciembre de 2004. Muchos países ribereños del Índico se vieron afectados

por la brusca elevación del nivel del mar originada por el maremoto cuyo epicentro se localizó al oeste de Indonesia. La intensidad del mismo se cifró en 9,2 en la escala de Richter. La ola producida alcanzó, en algunos lugares, los 30 m, arrasando lo que encontró a su paso. Los daños provocados afectaron a las zonas litorales de Indonesia, principalmente, y de India, Sri Lanka, Bangladesh y Tailandia. Se contabilizaron más de 300.000 muertos y un gran número de desaparecidos.

Por último, cabe señalar que la vulnerabilidad ante inundaciones se agrava en buena parte de los deltas de los grandes ríos del mundo, según un estudio de la Universidad de Colorado. Este fenómeno se debe a una combinación de causas. Se está produciendo un hundimiento relativo de los deltas como consecuencia de la elevación del nivel del mar debido al cambio climático y a la disminución de los aportes de sedimentos como consecuencia de la construcción de grandes embalses en sus cuencas y a la desviación de sus cauces, en algunos casos. Los ríos más afectados son el Colorado, el Nilo y el Yangtze.



*Figuras 95 (izquierda) y 96 (arriba): Imágenes Ikonos, en color natural, tomadas los días 18 y 22 de septiembre de 2004, respectivamente, sobre la ciudad de Gonaïves, en la costa noroeste de Haití. Comparando ambas imágenes pueden apreciarse los efectos ocasionados por el paso de la tormenta tropical Jeanne.*

*Haiti es particularmente vulnerable a las inundaciones como consecuencia de la intensa deforestación que sufre la mitad de la isla La Española. Sin una cobertura forestal que reduzca la escorrentía, el agua corre por la superficie calcinada a gran velocidad hasta que se remansa en las zonas más bajas de la ciudad. Han desaparecido buena parte de las calles y de los edificios de esta ciudad, cercana a 200.000 habitantes. El barro depositado tras las intensas lluvias es claramente visible en las calles y terrenos sin edificar del suroeste de la ciudad, en un color marrón intermedio. En la zona noroeste de la imagen se observa una extensa lámina de agua que cubre gran parte de esta pequeña península. Estas inundaciones han ocasionado la muerte de 1.260 personas y varios miles, más, de personas desaparecidas, de acuerdo a los informes oficiales.*

Fuente: Cortesía de Space Imaging  
[http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/14000/14000/Gonaives\\_IKO\\_2004266.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/14000/14000/Gonaives_IKO_2004266.jpg)

## 5.1.4. TERREMOTOS

La palabra terremoto proviene del griego, temblor. También es conocido el fenómeno con los nombres de seísmo y sismo. Se trata de un movimiento brusco de la Tierra que se produce cuando se libera, repentinamente, la energía acumulada, durante largo tiempo, por el rozamiento de las placas tectónicas en sus desplazamientos, cuando se supera el estado de equilibrio mecánico.

Por este motivo, la distribución geográfica de los terremotos de origen tectónico coincide con la localización de las grandes fallas geológicas y de los bordes de las placas tectónicas. No obstante, también ocurren terremotos por otras causas. Además de éstas, pueden deberse a procesos volcánicos, al hundimiento de cavidades cársticas, a masivos movimientos de ladera e, incluso, a determinadas actividades humanas como la realización de pruebas nucleares.

El hipocentro es el punto interior de la Tierra donde se origina el seísmo mientras que el epicentro se llama al punto de la superficie que se encuentra en la vertical del hipocentro. En el epicentro es donde repercuten, con mayor intensidad, las ondas sísmicas.

El instrumento que se utiliza para medir la magnitud y duración de un terremoto se llama sismógrafo. Registra la vibración de la Tierra y dibuja un gráfico denominado sismograma.

Existen varias escalas de medida. Una de las más utilizadas y conocidas es la escala Richter, ideada en 1935 por el Dr. Charles F. Richter. Tiene en cuenta la energía sísmica liberada en cada terremoto. Relaciona la magnitud de un terremoto con la longitud de la onda sísmica. Para la calibración de la escala, Richter analizó una onda S, la que se propaga transversalmente al sentido de vibración de los materiales, en un tiempo de 20 segundos en un registro sismográfico. No se trata de una escala lineal sino que es una escala semilogarítmica.

Escala de Richter

Magnitud	Efectos del terremoto
< de 3,5	Generalmente no se siente, pero es registrado
3,5 - 5,4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores
5,5 - 6,0	Ocasiona daños ligeros a edificios
6,1 - 6,9	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas
7,0 - 7,9	Terremoto mayor. Causa graves daños
>= 8	Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Escala\\_de\\_Richter](http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Richter)

Cada terremoto tiene una magnitud única. Sin embargo, puede ocurrir que los efectos de dos seísmos con la misma intensidad sean muy diferentes en unas zonas respecto a otras. Ello se debe a las desiguales condiciones del terreno, a su distancia respecto al epicentro, a los materiales geológicos del substrato y a los diferentes estándares de construcción entre zonas. En otras palabras, no todas las zonas tienen la misma vulnerabilidad. Un ejemplo puede ilustrar esta idea. En Japón, algunos terremotos que se han producido con una magnitud de 7, apenas han causado daños materiales ni pérdidas de vidas humanas. Sin embargo, en otras zonas del planeta, donde no se presta la misma atención a las normas constructivas ni se aplican criterios de antisísmicidad en los edificios, un terremoto de magnitud equivalente puede causar una auténtica catástrofe, con cuantiosos daños materiales y un gran número de víctimas mortales. Tristemente, éste ha sido el caso del terremoto registrado en la madrugada del 13 de enero de 2010, en Haití.

Otra escala de medida utilizada es la de Mercalli. La ideó, en 1902, el sismólogo italiano Giuseppe Mercalli. Esta escala no se fundamenta en la magnitud del terremoto sino que se basa en los efectos producidos

sobre las edificaciones, equipamientos e infraestructuras. Según este criterio, a un mismo terremoto se le pueden asignar distintas intensidades dependiendo de las zonas afectadas y de los efectos producidos en cada una de ellas. A diferencia de la escala de Richter, la de Mercalli es una escala lineal.

Escala de Mercalli

Intensidad	Efectos y percepción de los mismos
Grado I	Sacudida sentida por muy pocas personas.
Grado II	Sacudida sentida por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
Grado III	Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios. Muchas personas no lo asocian con un temblor. Los vehículos estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración similar a la originada por el paso de un vehículo pesado. Duración estimable
Grado IV	Temblor sentido durante el día por muchas personas en los interiores y por pocas en el exterior. Por la noche, algunas despiertan. Vibración de vajillas, cristales de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación similar a la de un vehículo pesado chocando contra un edificio. Los vehículos estacionados se balancean claramente.
Grado V	Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajilla y cristales de ventanas se rompen; pocos casos de agrietamiento; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
Grado VI	Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de daño en chimeneas. Daños ligeros.
Grado VII	Advertido por todos. La población huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; rotura de algunas chimeneas. Percibido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
Grado VIII	Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en la personas que conducen vehículos.
Grado IX	Daño considerable en las estructuras bien diseñadas; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
Grado X	Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
Grado XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
Grado XII	Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel (ríos, lagos y mares). Objetos lanzados en el aire hacia arriba.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Escala\\_sismoI%C3%B3gica\\_de\\_Mercalli](http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismoI%C3%B3gica_de_Mercalli)

En Europa, actualmente, se utiliza la escala EMS98 (*European Macroseismic Scale 1998*), que adapta la de Mercalli a los efectos producidos

sobre las construcciones actuales (Ugalde, 2009).

La probabilidad de ocurrencia de terremotos de una determinada magnitud en una región concreta viene dada por una distribución de Poisson. En el mundo, la frecuencia de ocurrencia de terremotos es inversamente proporcional a su magnitud. Como puede observarse en la siguiente tabla, son menos frecuentes los de mayor intensidad mientras que son mucho más frecuentes los terremotos de pequeña magnitud.

Se estima que, en el mundo, unos 130 millones de habitantes están expuestos a los terremotos. La vulnerabilidad relativa más alta la registran Irán, India y Afganistán y, en menor grado, Turquía y Rusia.

Frecuencia de terremotos en el mundo

Magnitud	nº de terremotos (promedio anual)
2,0 - 2,9	1.300.000
3,0 - 3,9	130.000
4,0 - 4,9	13.000
5,0 - 5,9	1.319
6,0 - 6,9	134
7,0 - 7,9	17
>= 8	1

Fuente: Instituto Geográfico Nacional

Como puede observarse en la figura 97, el impacto de los terremotos sobre las vidas humanas, a nivel mundial, ha sido muy desigual a lo largo de las últimas décadas. El peor año fue 1990. A lo largo de él, ocurrieron dos eventos trágicos. En Irán se registró un terremoto devastador, con una magnitud de 7,5 en la escala de Richter. Ocasionó 50.000 muertos. Ese mismo año, en Filipinas ocurrió otro terremoto de intensidad 7,7 que afectó, principalmente, a Manila y Luzón. Murieron más de 1.500 muertos.

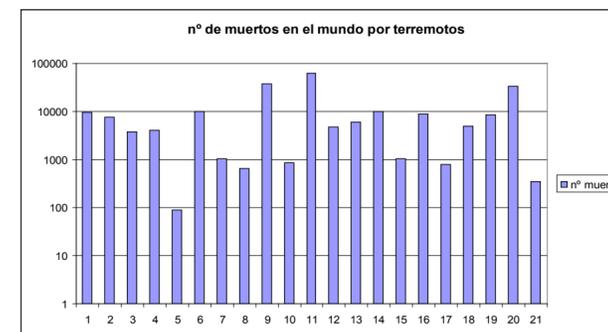


Figura 97: Número de víctimas mortales, en el mundo, por terremotos entre 1980 (1) y 2000 (21). Fuente: Anuario de Agostini

Terremotos ocurridos desde 1900 que han ocasionado más de 50.000 muertos

Fecha	Magnitud	Lugar	nº muertos
27.07.1976	7,5	Tangshan, China	255.000
26.12.2004	9,0	Sumatra, Indonesia	240.000
22.05.1927	7,9	Xining, China	200.000
16.12.1920	8,6	Gansu, China	200.000
01.09.1923	7,9	Kwanto, Japón	143.000
05.10.1948	7,3	Ashgabat, Turkmenistán	110.000
28.12.1908	7,2	Messina, Italia	100.000
12.05.2008	6,6	Sichuan, China	87.587
08.10.2005	7,6	Pakistán	86.000
25.12.1932	7,6	Gansu, China	70.000
31.05.1970	7,9	Perú	66.000
30.05.1935	7,5	Quetta, Pakistán	60.000
20.06.1990	7,7	Irán	50.000

Fuente: ISC-USGS.

Exceptuando el terremoto de Indonesia, de 2004, los terremotos que más muertos han ocasionado no figuran entre los de mayor magnitud. Sin embargo, una combinación de factores, que han influido en la vulne-

rabilidad, han desencadenado grandes tragedias en estos países afectados.

En algunos casos, las víctimas fallecieron por los efectos directos de los terremotos y, además, por la ocurrencia de otros fenómenos derivados como tsunamis, incendios, grandes deslizamientos de laderas, grandes fracturas e inundaciones.

Entre todos los terremotos ocurridos, vamos a reseñar algunos que han alcanzado las máximas magnitudes y que han ocasionado grandes catástrofes a lo largo de la historia.

Entre todos ellos, el que ostenta el récord de intensidad fue el terremoto ocurrido en Valdivia (Chile), los días 21 y 22 de mayo de 1960. Alcanzó una magnitud de 9,5 en la escala de Richter y se le asignaron los grados XI y XII, según la escala de Mercalli. Ha sido el mayor movimiento telúrico registrado hasta ahora.

El 21 de mayo hubo un primer terremoto que afectó a buena parte de las infraestructuras. El día 22 de mayo se registró una réplica, de mayor intensidad. Finalmente, el seísmo originó diversos tsunamis que afectaron, adicionalmente, al sur de Chile y otras zonas de la costa chilena y de otros países del Pacífico (Estados Unidos, Hawái, Filipinas y Japón).

El temblor se sintió en todo el cono Sur de América. Se registraron 5.000 víctimas mortales en la región, 3.000 heridos y 2 millones de viviendas afectadas. La ciudad de Valdivia quedó prácticamente destruida. Los ríos cambiaron su curso y se crearon nuevos lagos.

El seísmo de Alaska, ocurrido el 26 de marzo de 1964, alcanzó una intensidad de 9,4 en la escala de Richter. Se contabilizaron, oficialmente, 131 víctimas mortales. El terremoto originó olas de gran altura que arrasaron tres poblaciones costeras. Sus efectos se extendieron a otros estados norteamericanos como Oregón y California.

El terremoto de Indonesia, ocurrido el 26 de diciembre de 2004, alcanzó una magnitud de 9,0 en la escala de Richter. Su intensidad lo sitúa entre los cinco peores terremotos registrados en el mundo desde que existen métodos fiables de medida. Su epicentro se localizó frente a la costa noroccidental de Sumatra.

El terremoto se produjo como consecuencia del rozamiento entre las placas tectónicas de India y de Birmania. La primera se desplaza a una velocidad de 5 cm/año. El seísmo provocó varios tsunamis. Las olas, de alturas superiores a los 6 m, asolaron las costas de Indonesia y de sus países vecinos como Sri Lanka, Tailandia, India y de otros países bañados por el Índico.

Las primeras estimaciones calcularon un elevado número de víctimas mortales, en torno a 150.000 y otros muchos desaparecidos, además de unas cuantiosas pérdidas materiales. Más tarde, las cifras oficiales elevaron el número de muertos a 240.000.

En España, es poco frecuente la ocurrencia de terremotos de alta intensidad. Al contrario, son relativamente frecuentes los sismos de pequeña magnitud, como puede apreciarse en la tabla siguiente.

Número de terremotos detectados por la Red Sísmica Nacional en la Península Ibérica entre 2000 y 2008.

> 7	6,1-7,0	5,1-6,0	4,1-5,0	3,1-4,0	2,1-3,0	1,1-2,0	0,1-1,0	TOTAL
0	0	0	4	47	769	549	2	1371
0	0	0	1	65	833	539	2	1440
0	0	2	22	79	485	1226	316	2130
0	1	1	37	127	391	1499	314	2369
0	7	1	90	827	548	1971	322	3766
0	0	3	23	119	558	2554	434	3689
0	1	1	16	127	519	1981	455	3101
0	0	1	6	78	638	2641	1002	4367
0	0	1	15	98	619	2673	799	4205

Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

No obstante, las zonas más afectadas suelen localizarse en Andalucía y el sureste peninsular, en las áreas próximas al contacto entre los bordes de las placas euroasiática y africana.



Figura 98: Imagen Ikonos, adquirida el 27 de diciembre de 2003 sobre la ciudad de Bam (Irán), un día después de la ocurrencia de un terremoto, de magnitud 6,7. Destruyó el 70% de los edificios de la ciudad, una urbe fortaleza de 2000 años de antigüedad, declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Es una ciudad que se encontraba en la ruta de la seda y era famosa por sus tejidos. Sus casas y muralla de adobe no resistieron el temblor.

En la imagen se observa el centro histórico de la ciudad en el centro de la imagen, al sur del río que recorre su tercio septentrional. El perímetro de la ciudadela es muy perceptible. Dentro de ella, se puede apreciar la huella del terremoto. Gran parte de los edificios han sido afectados por el terremoto.

Extramuros, la ciudad actual ha registrado un rápido crecimiento como un centro agrícola e industrial. Se evidencia un plano reticular, en forma de damero.

Fuente: Space Imaging



Figura 99 (arriba): Imagen QuickBird en color natural, tomada el día 30 de septiembre de 2003 sobre la ciudad de Bam, Irán, tres meses antes del terremoto. Se observa la ciudadela fortificada por su muralla perimetral y el conjunto de viviendas de adobe.

Fuente: Digital Globe

Figura 100 (abajo): Imagen QuickBird en color natural, tomada el día 3 de enero de 2004 sobre la ciudad de Bam, Irán, ocho días después del terremoto. Como puede apreciarse, toda la ciudadela ha sido devastada. La zona meridional así como los sectores oriental y occidental del recinto amurallado han sido destruidos. El hundimiento de las viviendas ha desdibujado la trama urbana. Los contrafuertes y otros elementos defensivos de la muralla han desaparecido.

Fuente: Digital Globe





Figura 101 (arriba): Imagen QuickBird, en color natural, tomada el día 23 de junio de 2004 sobre la costa septentrional de Banda Aceh (Sumatra, Indonesia), antes del tsunami originado como consecuencia del terremoto de Indonesia, que alcanzó una magnitud de 9,0 en la escala de Richter.

Fuente: Digital Globe

Figura 102 (abajo): Imagen QuickBird, en color natural, adquirida, sobre el mismo sector de Banda Aceh, el 28 de diciembre de 2004. Como puede apreciarse, buena parte de las infraestructuras portuarias, de los equipamientos y de las viviendas han sido completamente destruidos. Parte de la barra litoral situada en el centro de la imagen ha desaparecido. Más al sur, las tierras bajas han sido ocupadas por el agua.

Fuente: Digital Globe

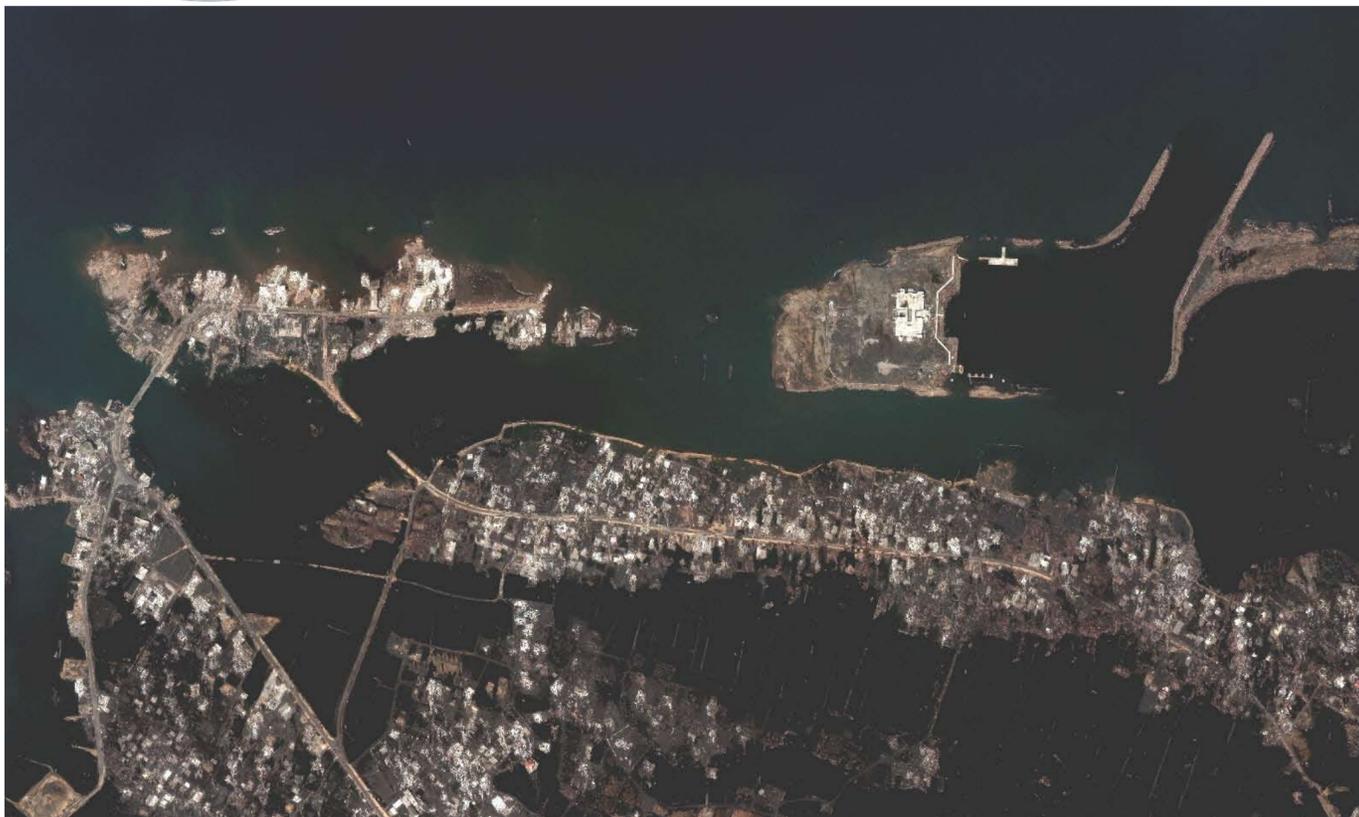
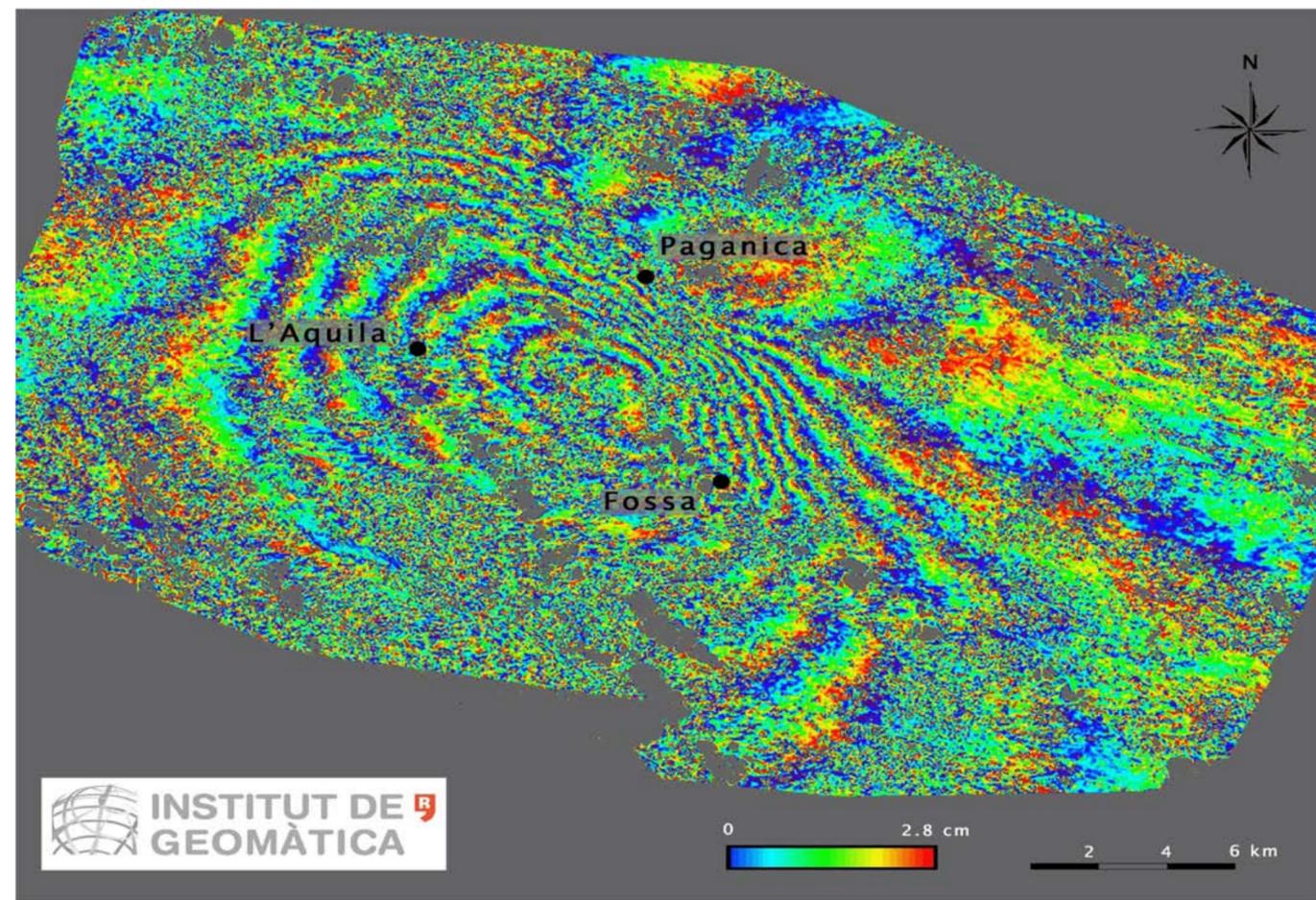


Figura 103 (izquierda): Serie de imágenes, en color natural, adquiridas por el satélite Formosat-2 antes del terremoto de Sichuán (14 de mayo de 2006, arriba) y después del mismo (15 de mayo de 2008, en el centro, y 19 de mayo de 2008, abajo). En la zona de Beichuan, el terremoto ocasionó deslizamientos de ladera que han obstruido el río Jianjiang, generando un nuevo lago (Tangjiashan). Bajo él han quedado sumergidas dos ciudades, tres puentes y 17 km de carreteras.

Fuente: Taiwan's National Space Organisation (NSPO)

Figura 104 (abajo): Mapa de las deformaciones del terreno ocasionadas por el seísmo, ocurrido el 6 de abril de 2009, en la localidad de L'Aquila, en la región italiana de Abruzzo. Este mapa ha sido construido mediante interferometría a partir de los datos obtenidos por el radar de apertura sintética (ASAR) que viaja a bordo del satélite Envisat. Ha sido derivado de la síntesis de dos imágenes, adquiridas antes (1 de febrero de 2009) y después del terremoto (12 de abril de 2009). Cada banda de color del mapa representa un desplazamiento del terreno de 2,8 cm. Puede observarse que desde el oeste (zona no afectada por el terremoto) hasta la localidad de L'Aquila (la zona más afectada) se acumula una deformación del terreno de 18 cm.

Fuente: Institut de Geomàtica



INSTITUT DE GEOMÀTICA

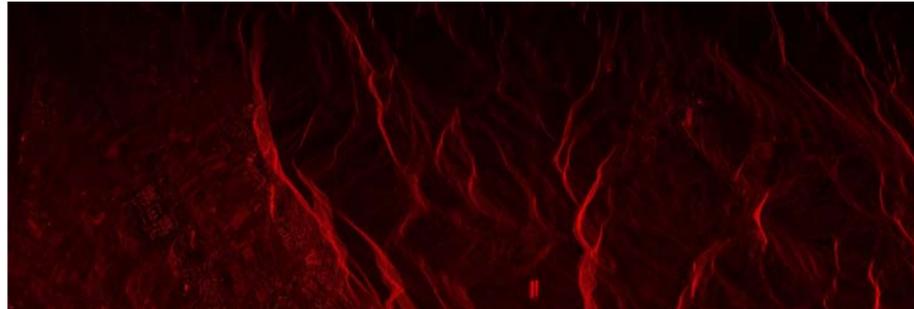
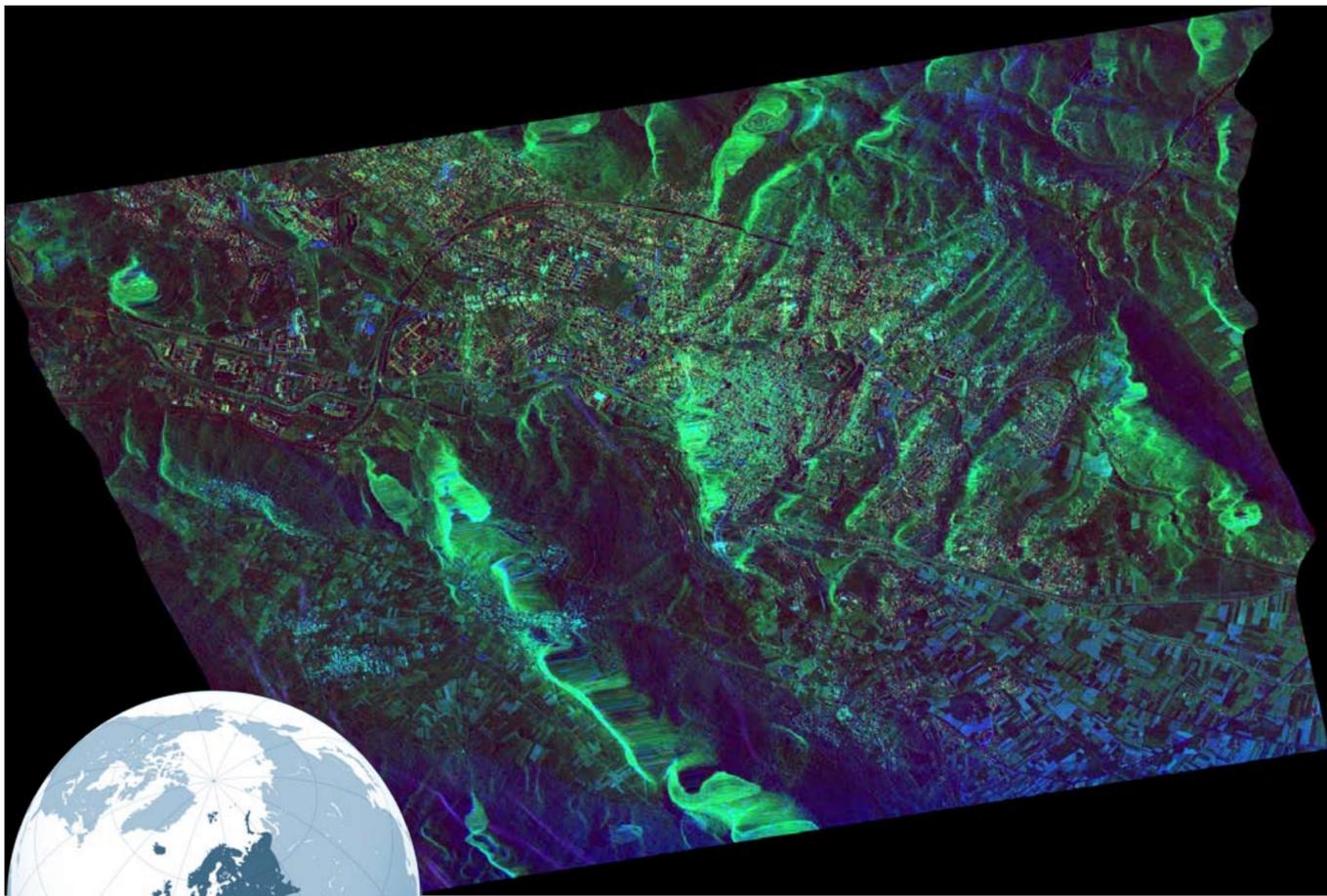


Figura 105 (arriba): Superposición de dos imágenes radar (SAR) adquiridas por la constelación COSMO-SkiMed antes y después del terremoto de L'Aquila (Italia), de intensidad 6,7 en la escala de Richter. La previa se tomó el día 22 de marzo de 2009 y la posterior el día 9 de abril de 2009. Las zonas verdes se han mantenido estables. En azul se observan las zonas que han sufrido daños, más o menos significativos, a consecuencia del terremoto. Hubo 294 muertos.  
Fuente: Agenzia Spaziale Italiana

Figura 106 (derecha): Fusión de dos nuevas imágenes SAR COSMO-SkiMed antes y después del terremoto de L'Aquila (Italia). La imagen previa al seísmo ha sido coloreada, artificialmente, en rojo. La imagen posterior (7 de abril de 2009) ha sido coloreada en azul. Las áreas blancas son zonas que no han sufrido transformaciones. Sin embargo, los puntos rojos son puntos que aparecen en la imagen previa y no en la posterior. Lo más probable es que se trate de edificios que han colapsado como consecuencia del seísmo. En colores azules y verdes se observan los objetos que aparecen en la segunda imagen y no en la primera. Se trata de los elementos que han sufrido un desplazamiento significativo de su posición geográfica.  
Fuente: Agenzia Spaziale Italiana



Figura 107 (arriba): Imagen adquirida por el satélite GeoEye-1 sobre el centro urbano de Puerto Príncipe, la capital de Haití, el 13 de enero de 2010, un día después de la ocurrencia del terremoto, de magnitud 7,3 que ha asolado al país. La primera sacudida fue seguida de tres réplicas con magnitudes comprendidas entre 5 y 6, según la escala de Richter. El epicentro se localizó a 15 km al suroeste de Puerto Príncipe. Incluso se activó una alerta por tsunami. El Centro de Advertencias por tsunamis de Estados Unidos registró una marejada en el fondo oceánico y en la superficie que afectó a la República Dominicana.

La imagen evidencia la extensión e intensidad de los daños producidos. Las calles están cubiertas por los escombros de los edificios cuyas estructuras han colapsado. El Palacio Nacional, localizado en Champ Mars en el centro de la imagen, en color blanco, se encuentra muy dañado. La nave central del palacio está hundida. En la zona sur de la misma manzana, la mitad de las viviendas de una misma hilera se han desplomado. Otros edificios singulares como algunos ministerios, la sede de Naciones Unidas o la catedral también han sido afectados. Las personas, los hospitales de campaña y los puestos de emergencias se concentran en las plazas, espacios abiertos y estadios. Además, la catástrofe ha motivado el colapso de innumerables edificios residenciales y de oficinas, así como hospitales, hoteles, supermercados y centros comerciales.

Las primeras estimaciones y valoraciones realizadas por expertos de la Unión Europea y de la comunidad internacional apuntan a cifras preocupantes: 200.000 muertos, 250.000 desaparecidos y cuantiosas pérdidas materiales.

Fuente: [http://geoyemediaportal.s3.amazonaws.com/assets/images/gallery/ge1/hires/haiti\\_01\\_13\\_10.jpg](http://geoyemediaportal.s3.amazonaws.com/assets/images/gallery/ge1/hires/haiti_01_13_10.jpg)

Figura 108 (izquierda): Vista oblicua del Palacio Nacional tomada el día 13 de enero de 2010 desde helicóptero, por la Delegación de la Cruz Roja Española, durante un vuelo de reconocimiento para la evaluación de daños y coordinación sobre el terreno.

Fuente: Cruz Roja Española

## 5.1.5. DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

Los deslizamientos de tierras, a veces llamados deslizamientos de laderas o de taludes, pertenecen a la categoría de riesgos naturales originados por procesos dinámicos de la superficie terrestre. Según Cifuentes *et al.*, (1993), un deslizamiento es un tipo de proceso gravitacional caracterizado por la existencia de un plano sobre el que se produce el movimiento. Aunque pueden producirse de forma lenta, habitualmente se trata de desplazamientos violentos de grandes volúmenes de tierra y rocas. Se habla de deslizamientos cuando capas enteras de terreno se mueven sobre el material firme que sirve de sustrato. En su movimiento descendente pueden seguir uno o varios planos de corte del terreno.

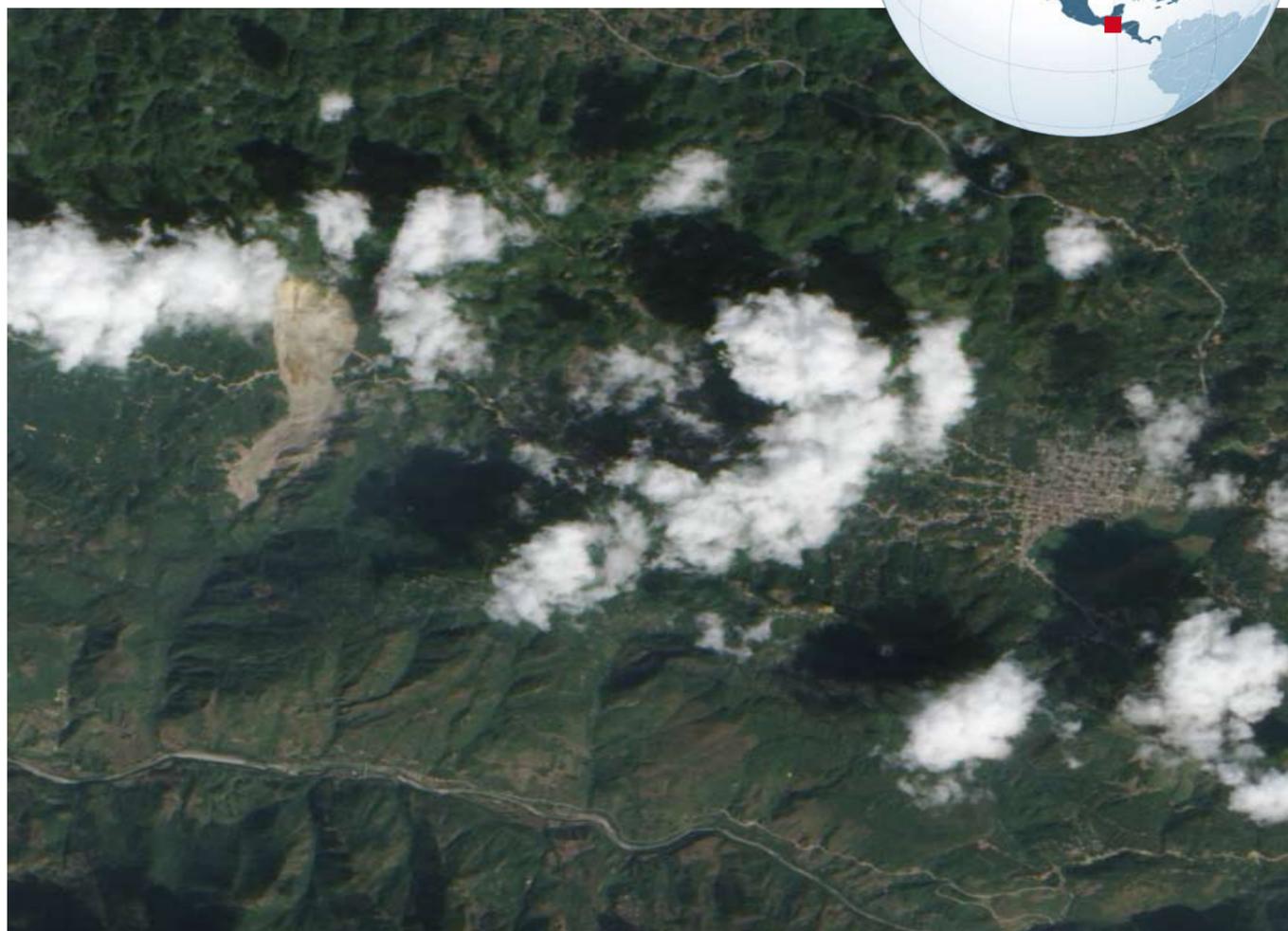
Los factores que determinan su ocurrencia suelen ser variados. Entre otros, normalmente influyen las pendientes elevadas, el tipo de litología y de suelos del sustrato, las precipitaciones abundantes, la orientación de las grietas, la actividad sísmica y volcánica, así como otros mecanismos naturales y humanos (cambios en la cobertura vegetal, tales como repoblaciones forestales o deforestación, incendios forestales, excavaciones y actividades mineras o construcción de infraestructuras viarias, por ejemplo), capaces de mitigar o acentuar los procesos gravitacionales.

Por lo general, las zonas montañosas con pendientes fuertes son las más proclives a sufrir deslizamientos. En las regiones lluviosas, los materiales suelen estar fuertemente meteorizados y el nivel freático suele estar cerca de la superficie. Ambas condiciones suelen ser, de forma sinérgica, desencadenantes de los deslizamientos. Incluso, este fenómeno puede ocurrir en regiones semiáridas tras un periodo de violentas precipitaciones. Las lluvias intensas son el principal factor que incide sobre la ocurrencia de deslizamientos en España. Se estima que, anualmente, en nuestro país los deslizamientos producen unas pérdidas económicas de 180 millones de € (Suárez y Regueiro, 1997).

A pesar de ello, los expertos reconocen el efecto negativo de algunas acciones antrópicas sobre los deslizamientos. Los movimientos de tierras y excavaciones, especialmente los desmontes, que se hacen para construir infraestructuras viarias (carreteras, ferrocarriles), hidráulicas (presas), extractivas (minas a cielo abierto) y edificaciones, entre otras, rompen los perfiles de equilibrio de las laderas y provocan deslizamientos. Es frecuente que, en las tareas de desmonte, se retiren los mate-

*Figura 109: Imagen, en color natural, adquirida el día 9 de enero de 2009 por el satélite EO1 de la NASA. La imagen capta un extenso deslizamiento de ladera ocurrido cinco días antes en Alta Verapaz (Guatemala), a unos 200 km. al norte de la capital. En la parte centro-izquierda de la imagen, entre las nubes, se observa la mancha alargada, en el sentido de la pendiente, de color beige que ha abierto un gran claro en la espesa masa boscosa, de color verde. Miles de toneladas de rocas y derrubios se han deslizado ladera abajo, sepultando una estrecha carretera que discurre de oeste a este (línea de color marrón en el centro de la imagen). Treinta personas perdieron la vida y se contabilizaron varias docenas de desaparecidos.*

Cortesía: Jesse Allen, NASA EO-1 Team



*Figura 110: Imagen ALI, en color natural, adquirida el día 17 de junio de 2009 por el satélite EO1 de la NASA. La imagen muestra la huella de un deslizamiento de ladera ocurrido doce días antes en una zona montañosa de la región de Chongqing, en el sur de China. En el centro norte de la imagen, se observan los efectos del deslizamiento sobre el paisaje con una forma alargada, de color beige, que contrasta claramente con el color verde de la zona forestal de su entorno. No están claros los motivos del colapso de la ladera. El deslizamiento movilizó 12 millones de m<sup>3</sup> de material, sepultando numerosas viviendas, dos carreteras que atraviesan la zona y atrapando a docenas de mineros que trabajaban en una mina de mineral de hierro cercana. Las intensas lluvias de los días posteriores obligaron a suspender temporalmente las tareas de rescate. Aún permanecen desaparecidas 64 personas, según informes de las autoridades locales. Además, el deslizamiento ocasionó el corte del suministro energético como consecuencia de los daños ocasionados a las infraestructuras.*

Cortesía: Jesse Allen, NASA EO-1 Team

riales de la base de la pendiente, que es la zona más vulnerable ante el riesgo de deslizamiento.

Para evitar los deslizamientos, suelen ejecutarse algunas medidas de corrección y/o mitigación que contribuyen a reducir el riesgo de ocurrencia. Las más habituales, son técnicas de ingeniería para la estabilización de taludes o para facilitar el drenaje en distintos puntos de la ladera, disminuyendo así la capacidad de arrastre del agua.

Es frecuente que la configuración típica de un deslizamiento, desde una perspectiva vertical, tenga la forma de una concha o cuchara. En las fotografías aéreas y en las imágenes de satélite suelen apreciarse de esta manera.

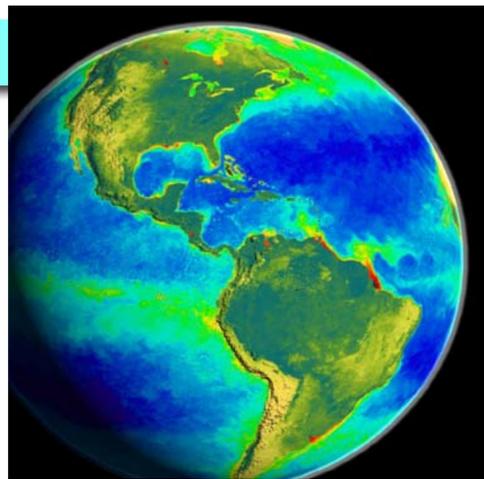
Uno de los peores deslizamientos de tierra ocurrió, en 1974, en el valle del río Mantaro en los Andes peruanos (Hutchinson y Kojan, 1975). Los materiales deslizados por la ladera represaron el río ocasionando un embalse eventual que ocasionó la inundación de granjas, tres puentes, y unos veinte kilómetros de carretera. Casi 500 personas de la localidad de Mayunmarca y de sus alrededores perdieron la vida.

Ante la importancia de este tipo de riesgo, cada vez se presta más atención a la recopilación de la información necesaria para evaluar el peligro de deslizamientos en un contexto de planificación del territorio. Su objetivo es localizar las áreas más susceptibles a deslizamientos y ordenar, adecuadamente, los usos del suelo más adecuados de manera que se reduzcan los riesgos.

En este sentido, las técnicas de zonificación ambiental y de usos del suelo son muy útiles para el planificador. En la literatura están descritas distintas metodologías estandarizadas para la determinación de la capacidad de uso de las tierras (FAO, 1976; USDA, 1961), en función de la combinación de factores biofísicos (topográficos, edáficos, climáticos y riesgo de erosión) y de las limitaciones que los mismos provocan sobre los suelos. La Teledetección espacial ha demostrado su capacidad para la detección de los deslizamientos de ladera mediante el análisis multitemporal de los ecosistemas a través de imágenes de satélite (Paolini *et al.*, 2002), su impacto sobre los bosques y su relación con el proceso del cambio climático, especialmente con el incremento de las precipitaciones registradas.

## 5.2. OTROS FENÓMENOS NATURALES

Como se decía en el inicio del capítulo 5, se mostrarán, en este apartado, otro tipo de fenómenos naturales que llaman la atención por las dimensiones que poseen y por sus efectos sobre la salud o sobre los sistemas de navegación aérea y marítima, como las tormentas de arena relacionadas con los grandes desiertos del mundo. Asimismo, se mostrarán algunas grandes geofomas o megaformas, que son claramente visibles desde el espacio. Desde esta perspectiva global, se comprenden mejor sus formas y sus estructuras.



### 5.2.1. TORMENTAS DE ARENA

Las tormentas de arena son fenómenos meteorológicos que se originan, frecuentemente, en los grandes desiertos de la Tierra y que afectan a los territorios próximos a ellos e, incluso, a zonas muy alejadas, geográficamente.

En ocasiones, se habla también de tormentas de polvo cuando el tamaño de las partículas en suspensión es inferior a las 100 micras.

Suelen producirse en el desierto del Sáhara, en Arabia, en el desierto del Gobi, en las zonas desérticas del noroeste de China y en otras regiones áridas y semiáridas del planeta como en Australia y en las extensas llanuras de Norteamérica.

Suelen producirse en primavera y verano y, en ocasiones, en invierno. La arena del Sáhara se levanta cuando el aire cálido del desierto choca con el aire más fresco de la región del Sahel. Éste levanta las partículas de arena y los intensos vientos alisios, que soplan desde el Este, las transportan, a través del Atlántico Norte, hacia el oeste, alcanzando el archipiélago canario y llegando hasta el Caribe y América Central y del Norte.

Según algunos estudios presentados en el Congreso de la Unión Geográfica Internacional (Glasgow, 2004), se estima que la cantidad de arena y polvo que se traslada, en suspensión, en la atmósfera de forma global, está comprendida entre 2.000 y 3.000 millones de toneladas anuales.

Entre las principales consecuencias o efectos que poseen las tormentas de polvo y arena pueden citarse las siguientes:

1. Las partículas de polvo, más ligeras, pueden ascender a alturas comprendidas entre 5.000 y 7.000 m. y, como se ha dicho, se trasladan a distancias superiores a los 1.000 km. Las tormentas de arena pueden durar hasta 5 y 6 días. Durante ese periodo, la visibilidad se reduce de forma significativa como consecuencia de las elevadas concentraciones de polvo y arena en la atmósfera. Dificultan, entre otras, la navegación aérea.
2. Es un fenómeno que contribuye a la contaminación o, al menos, a la turbidez del aire.
3. Como consecuencia de la dispersión de la luz en la atmósfera por el abundante contenido de partículas, se genera un llamativo efecto óptico sobre los atardeceres y amaneceres en los países del Caribe y en otros países como Australia.
4. Alteran la luminosidad de los casquetes polares.
5. Cuando afectan a áreas pobladas de Europa y América, suelen provocar episodios alérgicos y crisis asmáticas en muchas personas, sobre todo en aquellas que padecen problemas crónicos respiratorios.
6. Debido a la intensidad del fenómeno, se pierde la capa superior del suelo en las zonas subdesérticas. Así pues, produce pérdidas y ero-

sión del suelo en las zonas generadoras de este tipo de tormentas, contribuyendo al proceso de desertización.

7. Cuando las partículas de polvo o arena se precipitan sobre el terreno, en las zonas receptoras, normalmente salinizan el suelo.
8. A consecuencia de ello, en ocasiones, empobrecen la agricultura y la ganadería que soportan esos suelos.
9. Por el contrario, son una fuente importante de minerales para las plantas de la pluvisilva amazónica, escasos en esas zonas.
10. Por último, el polvo y la arena influyen sobre el crecimiento del plancton en las zonas mediterránea y oeste y norte del Océano Atlántico. Ello se debe al aporte de las sustancias nutritivas minerales esenciales para el plancton.

Además, los investigadores se encuentran ante un debate científico generado en relación a las tormentas de arena. Según expertos de la Universidad de Wisconsin, en base a estudios de una serie histórica de imágenes de satélite desde 1982 a 2005, las tormentas de arena generadas en el desierto del Sáhara son las reguladoras de la actividad de huracanes en el Océano Atlántico. Se ha constatado una relación inversa entre ambos fenómenos, de tal manera que puede decirse que cuanto mayor cantidad de polvo del desierto exista sobre el Atlántico, se producirán menos huracanes.

Apuntan a la importancia de tres mecanismos, complementarios, que pueden explicar esta relación inversa. En primer lugar, la introducción de aire seco en un sistema de tormenta puede causar corrientes descendentes, bloqueando la elevación de ráfagas de aire, necesarias para alimentar un huracán. En segundo lugar, los vientos de nivel medio que acompañan al aire del Sáhara causan una desviación de las corrientes. Un cambio en la dirección, combinada con la altitud, evitaría que se formaran las corrientes de chorro, típicas de las tormentas. En tercer y último lugar, el polvo absorbe el calor en el aire, lo cual estabilizaría las condiciones y evitaría la formación de tormentas.

Otras investigaciones apuntan a la influencia de este elemento contaminante del aire sobre el clima y sobre otros ecosistemas. Señalan que, por sus características físicas, las partículas de polvo reducen el tamaño de las gotas de lluvia e inhiben la formación de nubes de gran desarrollo vertical, generadoras de precipitaciones, favoreciendo así los procesos de sequía. Como el polvo viene cargado de hierro, sílice y sal, además de otros minerales, hongos y bacterias, puede incrementar la salinización de los suelos, y propiciar la aparición, en los océanos, de las denominadas mareas rojas o concentraciones masivas de algas muy tóxicas, causantes de la muerte de diferentes organismos marinos.

En la Universidad de Liverpool, otros investigadores centran sus estudios en la relación entre las tormentas de arena del Sáhara y determinados procesos biológicos en el Atlántico Norte. Señalan que las tormentas de arena del Sáhara son responsables, en gran medida, de las significativas diferencias que existen entre el Atlántico Norte y el Atlántico Sur

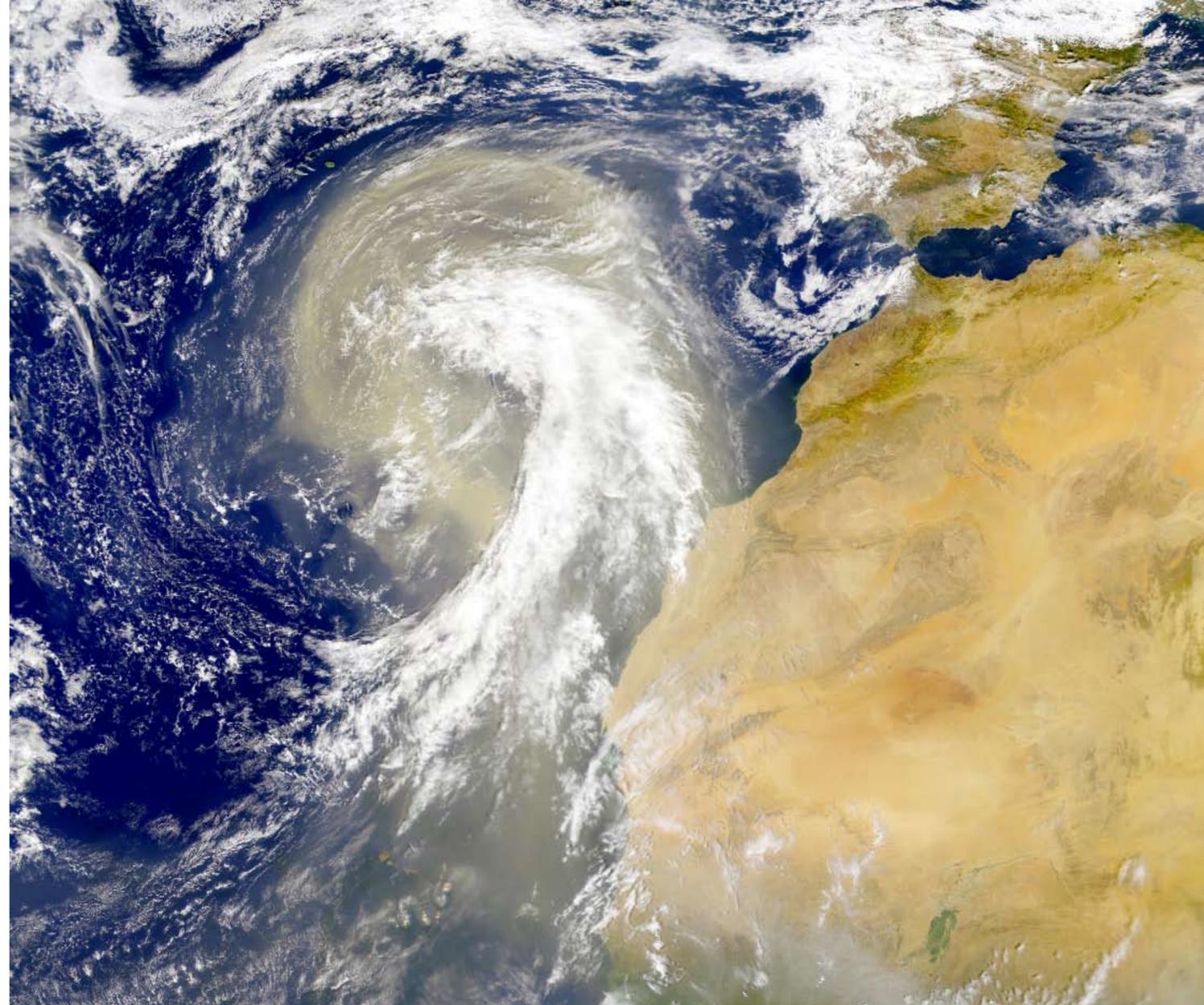


Figura 111: Imagen adquirida el día 1 de noviembre de 1998 por el sensor oceano-gráfico SeaWiFS, destinado a estudiar el color de los océanos.

Se aprecia la gran tormenta de arena que se extiende por el Atlántico Norte y que afecta, en el momento del paso del satélite Orbview-2, a las Islas Canarias. Obsérvese las grandes dimensiones de la tormenta, tan grande como la Península Ibérica.

Como se indica en el texto, esta gran nube de polvo y arena se genera en el desierto del Sáhara y es transportada por los vientos alíseos hacia el Caribe y América del Norte. Con esta situación se reduce notablemente la visibilidad y se dificulta la navegación aérea.

Fuente: <http://visibleearth.nasa.gov>

en cuanto a su contenido en cianobacterias. Como ya se ha visto, el Atlántico Norte es una de las zonas habituales de distribución del polvo y arena aportados por las tormentas del desierto. Según estos estudios, el polvo posibilita al fitoplancton utilizar el fósforo orgánico transportado. Este polvo no llega a las regiones del Atlántico Sur. Al no disponer de suficiente hierro, el fitoplancton es incapaz de utilizar la materia orgánica por lo que no crece con tanto éxito.

Aunque el Atlántico Norte es la zona de mayor impacto de las tormentas de arena en el hemisferio occidental, éstas también se producen en otros lugares del mundo. En septiembre de 2009, una gran tormenta de arena cubrió los cielos de Sidney. Se dice que ha sido una de las

peores en los últimos 70 años. Tenía una extensión de más de 500 km de ancho por 1.000 km de largo, cubriendo buena parte del estado de Nueva Gales del Sur y de otros estados vecinos. Incluso afectó a Nueva Zelanda. El polvo y la arena transportados procedían del desierto del centro de Australia.

En el interior de Estados Unidos también son conocidas las tormentas de polvo. En 1930, una gran sequía originó un fenómeno, conocido como "Dust Bowl", identificado por una serie de tormentas de arena. Se dice que fue uno de los desastres ecológicos más importantes del siglo XX.

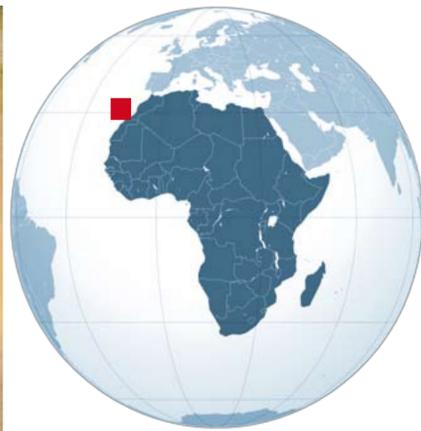
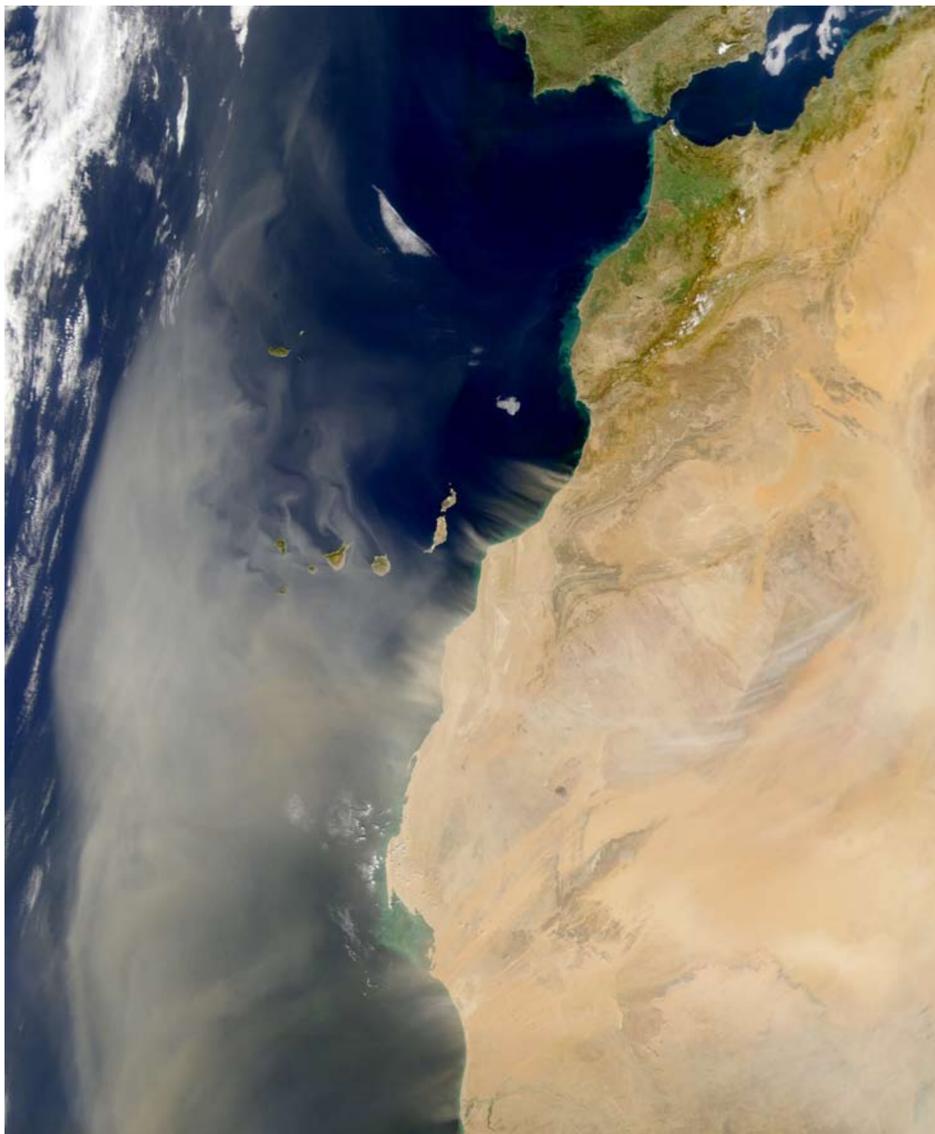


Figura 112 (izquierda):

Imagen SeaWiFS captada el día 11 de febrero de 2001.

Se aprecia una gran tormenta de arena que se desplaza desde el noroeste del continente africano hacia las Islas Canarias, en el centro de la imagen, y hacia el oeste del Atlántico Norte.

Es interesante observar los remolinos y ondas que forma la tormenta a sotavento de los elevados relieves de las Islas Canarias, en su cara norte, especialmente en las islas occidentales de mayores altitudes (Gran Canaria, Tenerife y La Palma).

Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE

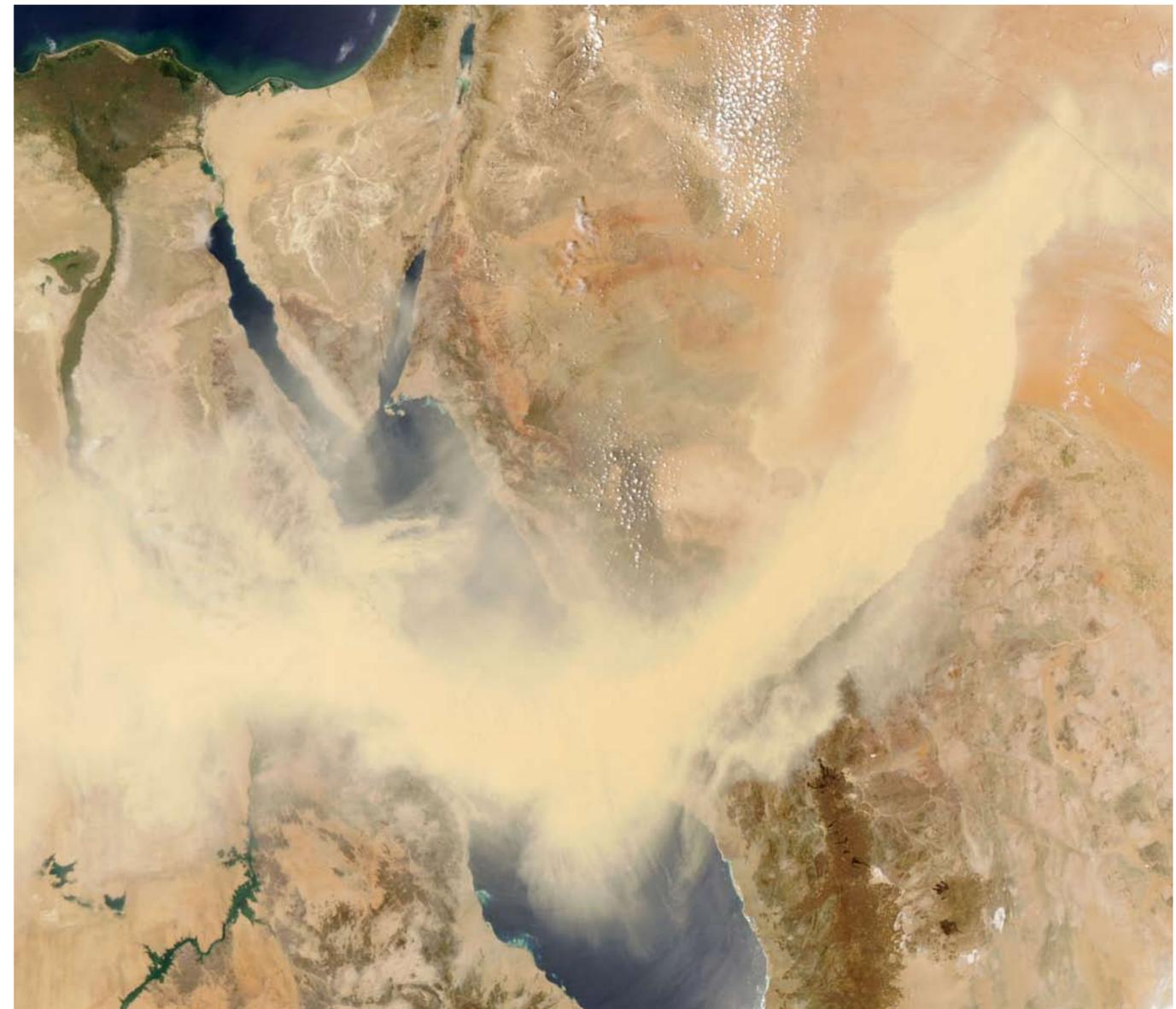


Figura 114 (arriba): Imagen MODIS captada por el satélite AQUA el día 13 de mayo de 2005.

Se visualiza en la imagen una extensa y alargada tormenta de arena que se extiende entre Arabia Saudí y Egipto, atravesando el Mar Rojo. Con la ayuda de imágenes de satélite complementarias, con mayor resolución temporal, como las de METEOSAT, es posible conocer el movimiento de esta masa de nubes de polvo. Se originó en Arabia Saudí, al sur de Jordania, y se desplazó hacia el oeste, hacia el sur de Egipto, dificultando la visibilidad y transportando importantes cantidades de sedimentos finos.

En la imagen, además, puede apreciarse la importancia del Nilo que se muestra como un corredor verde de vegetación, que fluye de sur a norte, en un contexto completamente desértico. Se puede observar el gran delta, con una forma de abanico de color verde, en la esquina noroeste de la imagen. Inmediatamente al norte, en la costa mediterránea, se visualizan los arrecifes de coral, en colores turquesas. Finalmente, es evidente la península del Sinaí que dibuja su silueta triangular sobre el mar Rojo, en el centro norte de la imagen. Pueden diferenciarse los golfos de Acaba (al este de la península) y de Suez (al oeste de la misma).

Cortesía: Jacques Descloîtres, MODIS Rapid Response Team, NASA Goddard Space Flight Center

Figura 113 (página anterior, abajo): Imagen MODIS adquirida por el satélite TERRA el día 15 de enero de 2009. Se observa la tormenta de arena originada en el desierto de Arabia, al este del Mar Rojo, y que es arrastrada por el viento, en sentido inverso a las agujas del reloj, hacia el desierto de Nubia, en Sudán, al oeste del mar. Al oeste de la imagen se aprecia el contraste del lago Nasser o de Assuan (en color negro) y de los cultivos que bordean el Nilo (en color verde) frente a la inmensidad del desierto (en color amarillo).

Cortesía: MODIS Rapid Response, NASA Goddard Space Flight Center

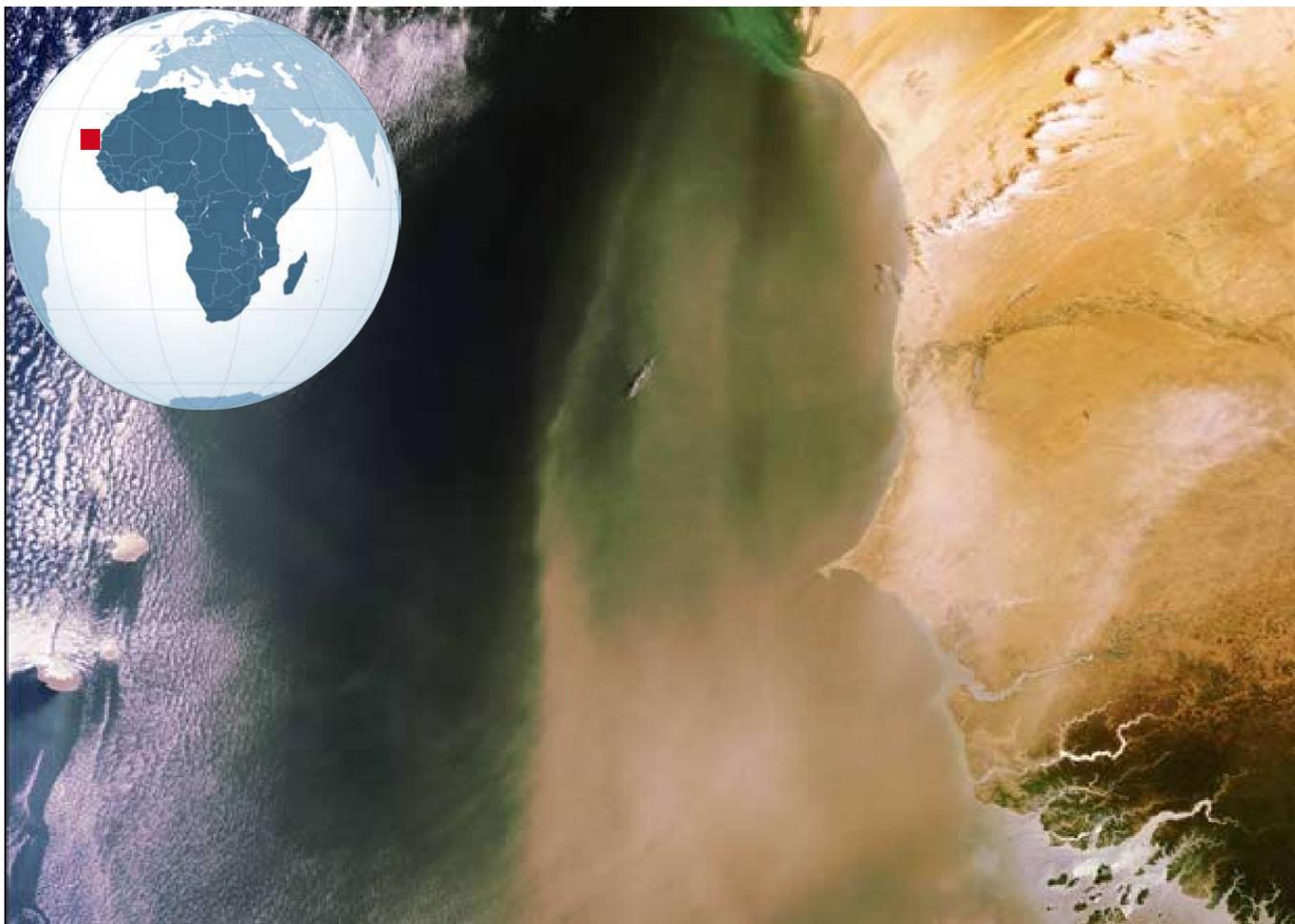


Figura 115: Imagen MERIS, captada desde el satélite Envisat en abril de 2008. Se observa la gran tormenta de arena que transporta el polvo, en suspensión, desde el desierto del Sáhara hasta el Océano Atlántico y afecta a países de la costa oeste africana como Mauritania, Senegal y Guinea.

Fuente: ESA

## 5.2.2. GEOFORMAS

El término geomorfología deriva de las palabras griegas, geos (Tierra), morfé (forma) y logos (conocimiento). Así pues, etimológicamente significa el conocimiento racional de las formas de la Tierra. En la actualidad, se concibe a la Geomorfología como una subdisciplina de la Geografía, "que tiene como objeto el reconocimiento, la clasificación y la explicación de las diferentes configuraciones que presenta la superficie externa de la litosfera, de cuya combinación resulta el relieve terrestre" (Muñoz, 2000, p. 13).

La Geomorfología se apoya en otras subdisciplinas geográficas como la Climatología y la Hidrografía, así como en otras ciencias afines como la Geología, la Biología o la Edafología, con objeto de conocer mejor los factores bióticos y abióticos, endógenos y exógenos que, mediante su continua interacción, explican las formas del relieve.

Comenzó a desarrollarse en Estados Unidos, a finales del siglo XIX. Davis, un geógrafo y geólogo americano, es considerado el padre de la Geomorfología. Éste pensaba que los siguientes grupos de factores son los responsables de los procesos geomorfológicos y de la formación y evolución de las formas del relieve:

1. Factores geológicos: tales como la tectónica, la orogénesis y el vulcanismo. Son factores de origen endógeno y son considerados procesos constructivos.
2. Factores geográficos: se consideran propiamente geográficos aquellos factores abióticos de origen exógeno, tales como el relieve, el

suelo, el clima y los cuerpos de agua. Éstos ayudan al modelado, favoreciendo los procesos erosivos.

3. Factores bióticos: tales como la vegetación y la fauna. Su efecto sobre el relieve es dispar. En ocasiones favorecen los procesos del modelado mientras que, en otras, contribuyen al proceso erosivo.
4. Factores antrópicos: Igualmente que los factores bióticos, la acción del hombre sobre el relieve es muy variable. Históricamente, su papel ha sido relevante en la pérdida de relieves a consecuencia de una inadecuada planificación del territorio. Algunos deslizamientos de laderas y la pérdida de suelo se han acelerado por la deforestación intensiva o por las prácticas agrícolas en zonas marginales con declives significativos que, de forma natural, deberían suponer un limitante para aquéllas. En otras ocasiones, la intervención del hombre es crucial para proteger relieves inestables. Algunas políticas de restauración y protección de cuencas hidrográficas son una buena muestra de ello.

De la interacción de estos elementos resulta el proceso morfogenético o modelado, dividido en tres procesos sucesivos: la erosión, el transporte y la sedimentación. Este proceso es, en gran parte, causante del modelado de la superficie terrestre.

Hay geoformas de grandes dimensiones, que sólo pueden apreciarse, en su conjunto, desde el espacio.



Figura 116 (arriba): Fotografía tomada por los astronautas de la Estación Espacial Internacional el 11 de diciembre de 2005. Se observa, en el centro de la imagen, Sierra Nevada (España). Al oeste de la misma, cubiertos de nieve, se localizan el Veleta (3.398 m) y el Mulhacén (3.478 m), el pico más alto de la Península Ibérica. Se trata de una sierra que forma parte del sistema montañoso Bético, formado durante la orogénesis alpina, como consecuencia del choque de las placas africana y euroasiática. Sus abruptas pendientes están labradas por profundos barrancos que salvan ese importante desnivel en los escasos kilómetros que separan Sierra Nevada del Mar Mediterráneo, en la esquina sureste.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 117 (abajo): Imagen tridimensional en la que se han fusionado una escena Landsat, adquirida el 4 de mayo de 2001, y un modelo digital de elevaciones extraído de una imagen SRTM tomada desde el Space Shuttle. Se aprecia la falla de San Andrés, que recorre el estado de California, desde el noroeste, en la parte superior de la imagen, hasta el sureste, en la esquina inferior derecha. Separa dos dominios fisiográficos, el sistema montañoso de San Gabriel, al oeste, del desierto del Mojave, al este.

Cortesía: SRTM Team NASA/JPL/NIMA y Landsat 7 Science Team NASA GSFC/USGS



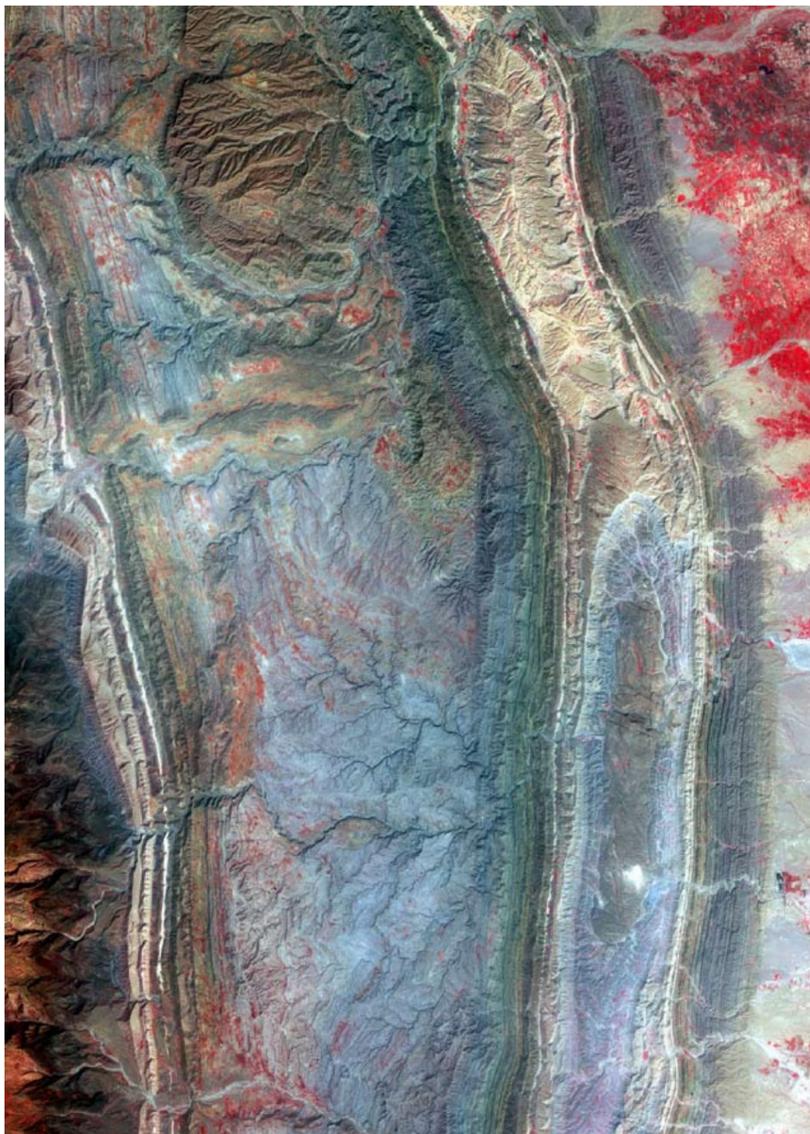


Figura 118 (izquierda): Imagen ASTER, en falso color, tomada el día 14 de octubre de 2001. Se aprecia el anticlinal de Zinda Pir, en los Montes Sulaiman (Pakistán), al oeste del río Indo.

Esta estructura, de rocas terciarias, ha sido formada por compresión en el momento de la colisión entre la placa del subcontinente indio y la placa afgana, como consecuencia de la deriva de la primera hacia el norte.

En la zona norte del anticlinal se ha descubierto un gran yacimiento de gas y se cree que toda esta estructura geológica es una gran reserva de gas.

Fuente: METI/ERSDAC



Figura 120: Imagen estereoscópica compuesta, en color natural, adquirida el 31 de diciembre de 2000 por la misión MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer). Para magnificar el aspecto tridimensional, el norte se encuentra a la izquierda de la imagen.

Desde el centro de la imagen hasta su parte inferior, al oeste, se aprecia el Gran Cañón que ha tallado el río Colorado, en el norte del estado de Arizona, en su paso hacia el Pacífico. En el cuadrante superior izquierdo de la imagen, en el noreste, se observa la magnitud del Lago Powell (en color negro). A la derecha, al sur, en el interior de la mancha de color verde oscuro, se encuentra uno de los picos de mayor altitud de la zona, el Humphreys Peak (3.861 m).

Fuente: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team.

Figura 119 (derecha): Imagen Landsat, en falso color (457=RGB), adquirida en agosto de 1995.

Se muestra el crater del volcán Ngorongoro (Tanzania) en el centro oriental de la imagen, acompañado de otros edificios volcánicos que dominan los lagos (en color negro) de Antron, al noreste, de Eyasi, al sur, y el lago Manyara, al sureste. El cuadrante noroeste está cubierto por las vastas llanuras del Parque Nacional del Serengeti (en color azul claro y tonos anaranjados).

Fuente: www.eurimage.com

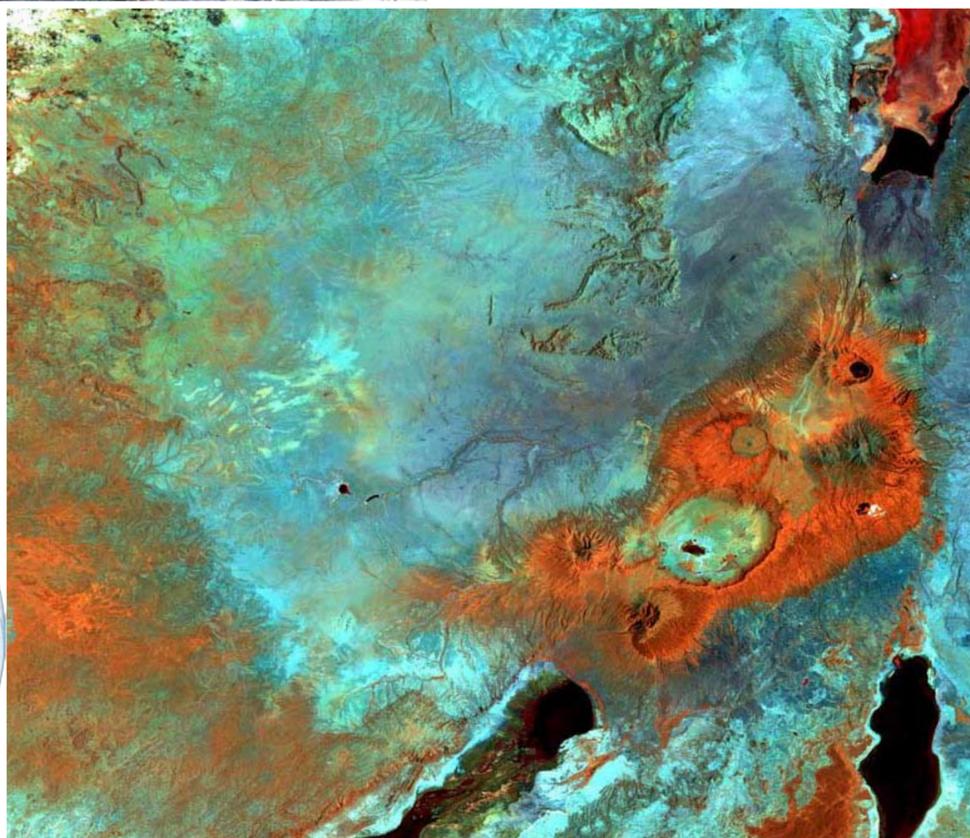




Figura 121: Imagen ASTER adquirida el 2 de mayo de 2002. Se trata de una gran abanico aluvial formado en un medio árido de China, en la provincia occidental de XinJiang. Se ha generado en torno al cauce del Karamiran He, que discurre, intermitentemente en el borde meridional del desierto de Taklimakan, entre las cadenas montañosas de Kunlun, al oeste, y Altun, al este.

Los cauces son radiales en torno al vértice meridional del abanico. El color azul de los cauces de la mitad occidental indica que se trata de los que, aún, se encuentran activos.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 122: Imagen, en color natural, adquirida el 1 de junio de 2001 por la misión MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer). Se observa el Lago Manicouagan, en el norte de la provincia de Quebec, Canadá, al norte del estuario del río San Lorenzo.

Tiene una peculiar forma circular, diferente al resto de los lagos del entorno. Se trata de un lago cuyo origen se debe, según algunas investigaciones, al impacto de un asteroide de unos 5 km de diámetro que generó un gran cráter de unos 100 km de diámetro. Se cree que el impacto ocurrió hace unos 212 millones de años, hacia el final del periodo Triásico.

Las glaciaciones y otros procesos erosivos han reducido su diámetro hasta los 70 km. Aún así, el lago permanece gracias a la erosión diferencial practicada sobre unos materiales cristalinos y metamórficos más resistentes.

En la actualidad, el lago es conocido como una de las más importantes reservas de salmón de las provincias atlánticas de Canadá.

Cortesía: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team.

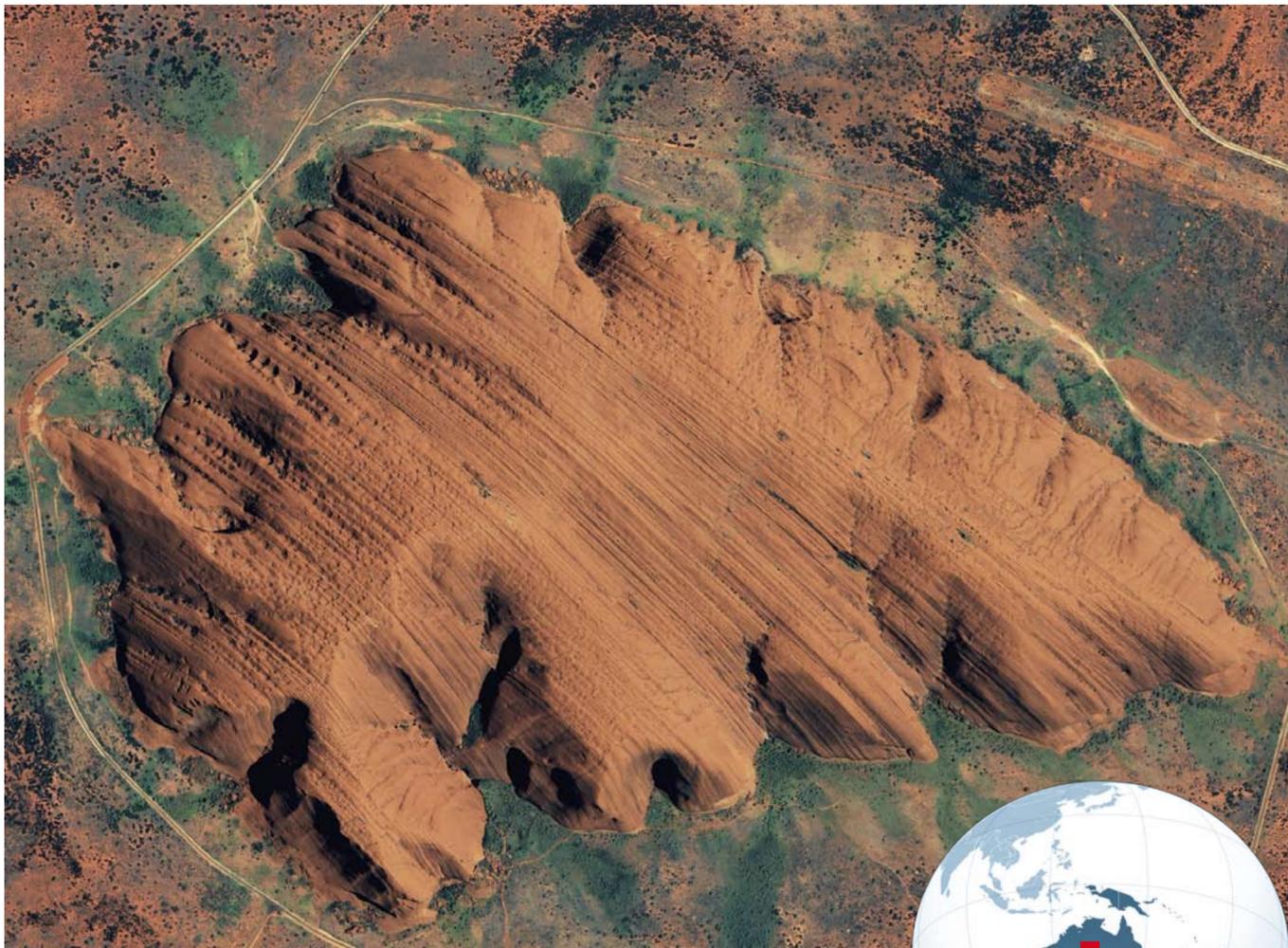


Figura 123 (arriba): Imagen Ikonos, tomada el 17 de enero de 2004. Se observa la magnitud de Ayers Rock, conocido también por el nombre de Uluru, el monolito más grande del mundo. Mide 3,6 km de largo por 2,5 km de ancho y tiene una altitud de 348 m. Se localiza en el centro de Australia, en el estado de los Territorios del Norte. Se trata de una gran roca arenisca, de edad precámbrica, sin fracturas que, dada la dureza de su composición, ha resistido a los agentes erosivos. Es un lugar sagrado para los aborígenes de Australia.  
Fuente: Space Imaging

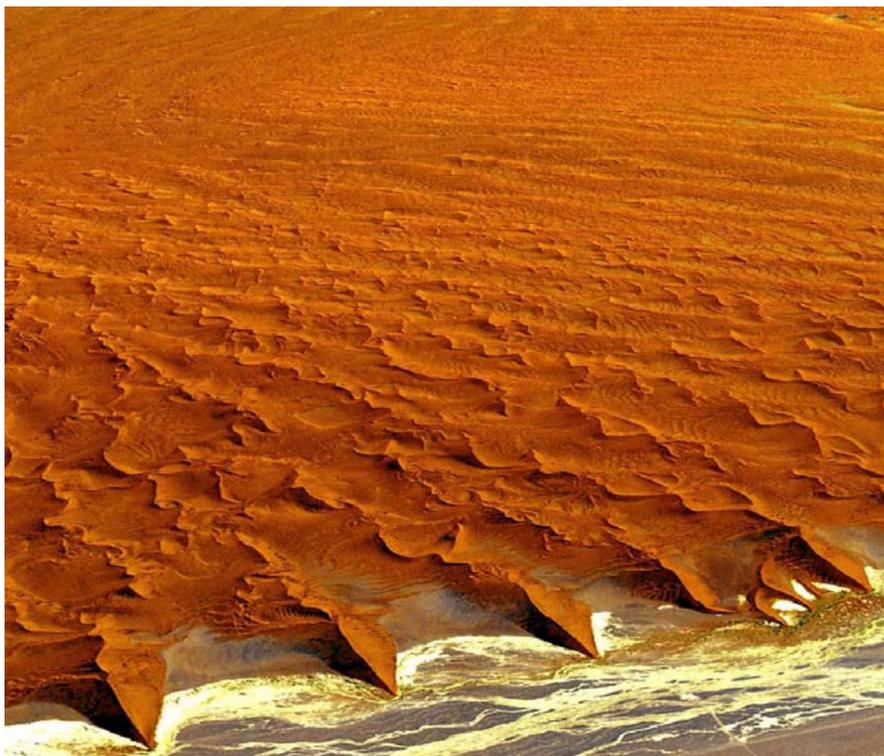


Figura 124 (izquierda): Perspectiva tridimensional generada mediante la fusión de una imagen ASTER y un modelo digital de elevaciones derivado de la misma. La imagen ha sido captada el día 14 de octubre de 2002 sobre el desierto costero de Namibia, en el entorno del Parque Nacional de Naukluft. Los vientos costeros han modelado las dunas de arena que se aprecian en la imagen. Algunas miden hasta 300 m. de altura.  
Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team

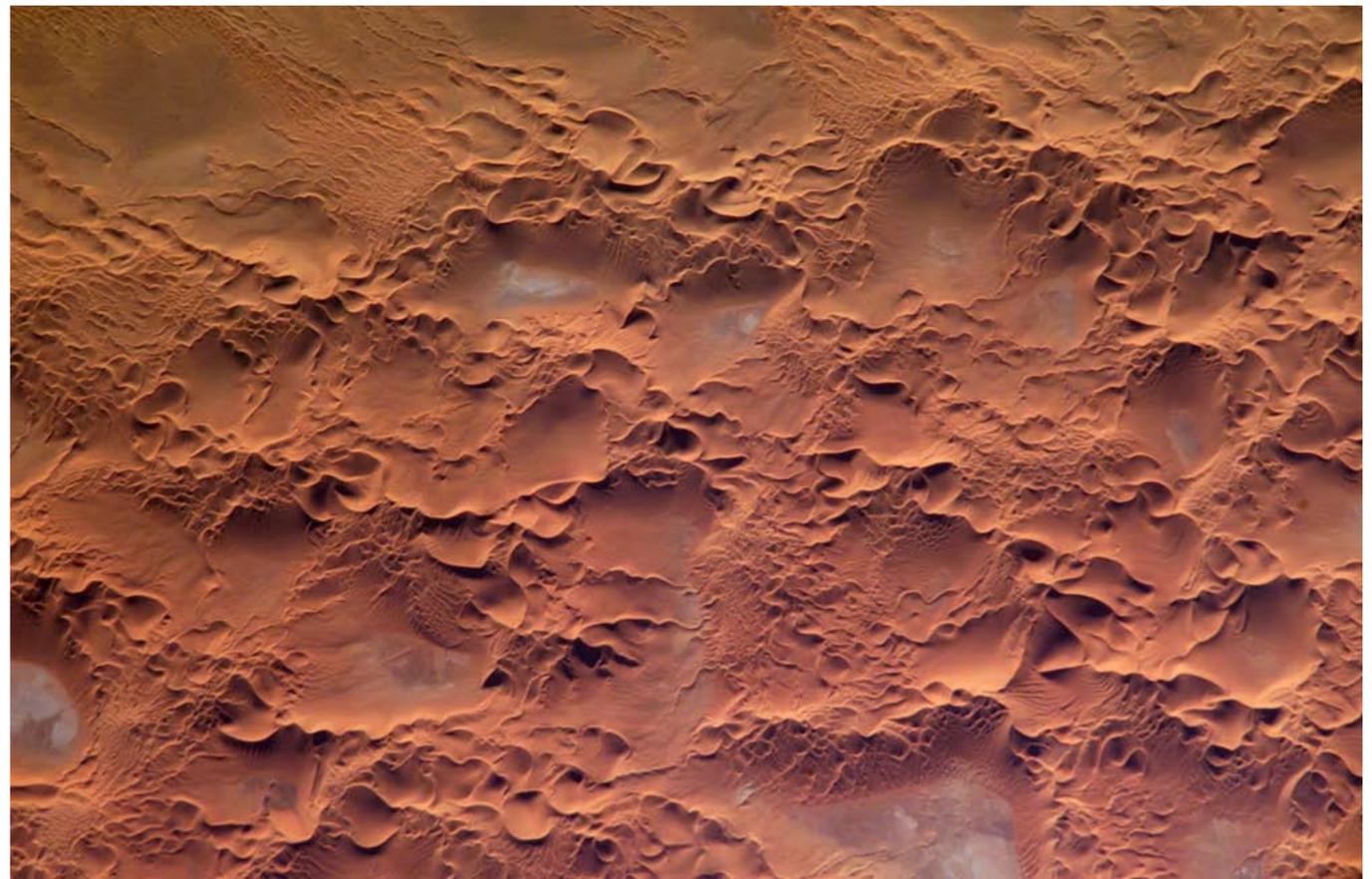


Figura 125 (arriba): Fotografía tomada, por los astronautas de la Estación Espacial Internacional, el día 16 de enero de 2005 sobre el área de Isouane, en el este de Argelia. Forma parte del desierto del Sáhara. Se observa un gran Erg, también llamado mar de arena, formado por una gran cantidad de dunas móviles. La cresta de algunas indica que existe una dirección dominante de vientos mientras que la forma y orientación de otras sugiere que los vientos tienen direcciones cambiantes. El agua precipitada ocasionalmente se acumula en las hondonadas formadas entre dunas. Una vez que se evapora el agua, se acumulan sales que se observan en un color blanco-azulado.  
Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

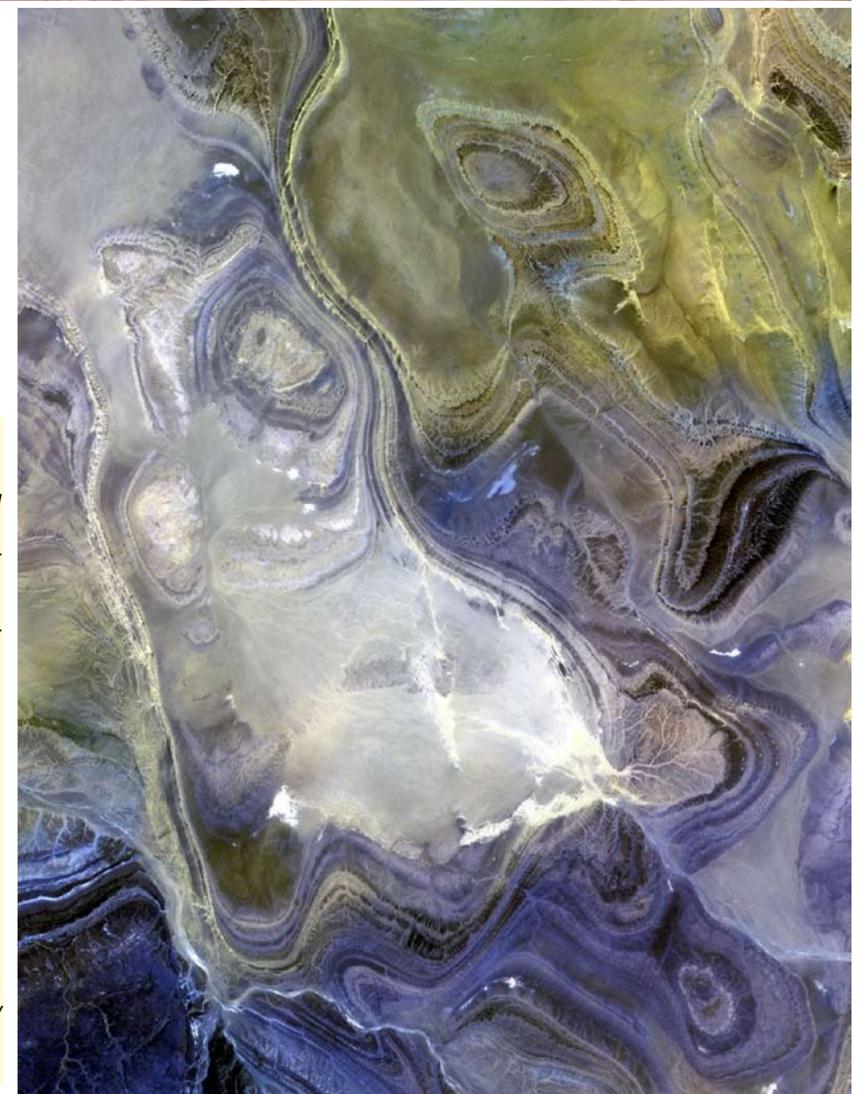


Figura 126 (derecha): Imagen ASTER, en color natural, captada el 8 de agosto de 2001 sobre la cuenca de Tanezrouft, en el desierto del Sáhara, al sur de Argelia. Los sedimentos de edad Paleozoica han sido erosionados por el viento. Ahora quedan a la vista materiales de distinta naturaleza. Contrastan los colores amarillo, de las arenas, blanco, de las sales, y azul, de otros sedimentos.  
Fuente: METI/ERSDAC



Figura 127: Imagen MERIS, tomada desde el satélite Envisat, el día 24 de noviembre de 2004. Se trata de una imagen adquirida en modo de mejor resolución que proporciona un tamaño de píxel de 300 m. Dentro de las grandes manchas de color naranja-amarillo, se observa la rugosidad de los mares de dunas de Ubari y Murzuq, en la región de Fessan, al suroeste de Libia, en una zona próxima a la frontera con Argelia, en el gran desierto del Sáhara.

Fuente: ESA

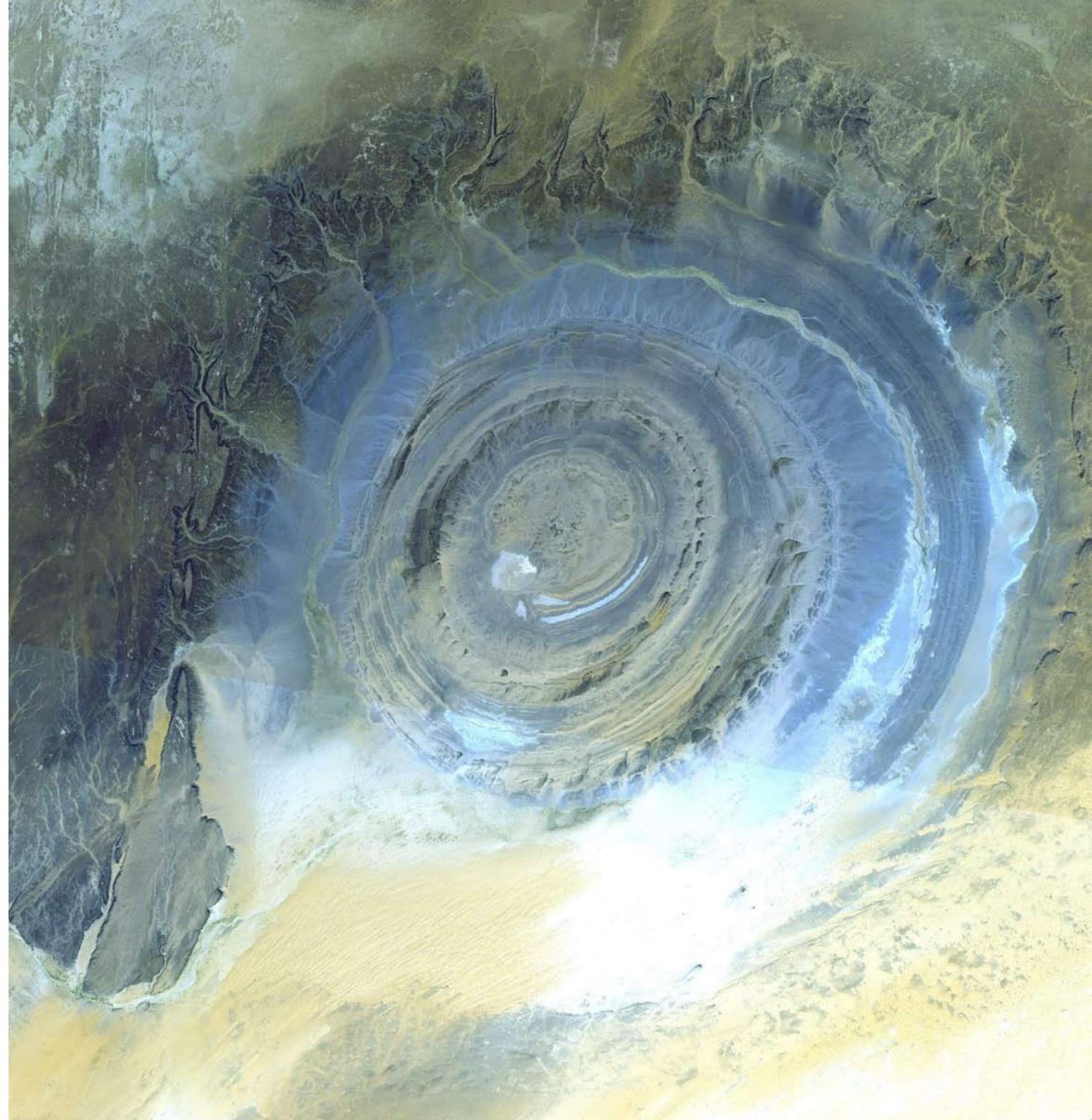


Figura 128: Imagen ASTER, adquirida el 7 de octubre de 2000. Se observa una megaestructura localizada en Richat (Mauritania). Se encuentra en la vertiente meridional del sistema montañoso Dhar Adrar. Tiene un diámetro de 50 km. Siempre ha llamado la atención de los astronautas por sus dimensiones y por su llamativa forma circular en medio del desierto del Sáhara.

Inicialmente, se pensó que se trataba de una estructura resultante del impacto de un meteorito. Sin embargo, hoy se sabe que se trata de un gran anticlinal circular que ha quedado al descubierto por erosión. Las resistentes cuarcitas paleozoicas perfilan esta geoforma.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team





### 5.2.3. RÍOS Y MASAS DE AGUA

La importancia del agua como uno de los elementos básicos del medio natural es indudable. Existe cierto consenso para afirmar que el agua es un factor determinante que explica la organización del territorio y que condiciona su ordenación.

La Hidrología es la ciencia que se encarga del estudio de la distribución del agua, de su circulación y del conocimiento de sus propiedades físico-químicas.

La hidrosfera es la parte más característica y diferente de nuestro planeta. En la Tierra hay unos 1.365 millones de km<sup>3</sup> de agua (Berga, 2009), aunque el 97,5% es agua salada. La mayor parte del agua dulce renovable de nuestro planeta se encuentra en los lagos naturales. Se estima que existen unos 15 millones de lagos que ocupan en torno al 1,5% de la superficie terrestre. El volumen de las láminas de agua formadas por los lagos naturales es de unos 91.000 km<sup>3</sup>, unas 13 veces mayor que el volumen de todos los embalses artificiales construidos por el hombre.

Los ríos almacenan unos 2.120 km<sup>3</sup> de agua y ocupan una parte pequeña de la superficie terrestre. Sin embargo, por sus cauces circulan las aguas provenientes del ciclo hidrológico que proporciona unos 40.000 km<sup>3</sup> de agua al año.

El hombre y las sociedades interactúan con el agua de forma muy variada. Unas veces, los primeros son víctimas de las aguas como consecuencia del impacto de las inundaciones y riadas provocadas por las intensas lluvias asociadas al paso de un huracán o por el desbordamiento de embalses, lagos y ríos. Otras veces, son los hombres los que ocasionan un impacto sobre los recursos hídricos como consecuencia de una mala administración de los mismos, rebasando los periodos de reposición natural del recurso agua. Es el caso de la sobreexplotación de acuíferos subterráneos e, incluso, de reservorios de agua superficial. Otros casos, se manifiestan en forma de contaminación de corrientes y masas de agua continentales y marinas o en forma de una reducción de los glaciares y casquetes polares como resultado del calentamiento de la Tierra. Todos estos procesos, suelen traducirse en un incremento de

la vulnerabilidad del recurso. Algunos de estos impactos los estudiaremos en el próximo capítulo.

En este capítulo, vamos a realizar una exposición de distintas entidades hidrográficas, atendiendo a una clasificación muy elemental y descriptiva. Vamos a presentar distintos ejemplos de los grandes ríos del mundo y, especialmente, de sus deltas y, posteriormente, de algunos lagos y embalses significativos. Los glaciares los presentaremos en un epígrafe aparte. No hemos querido insistir en los océanos porque ya fueron presentados, indirectamente, en el epígrafe dedicado a los huracanes.

A través de las imágenes espaciales seleccionadas, el lector podrá observar, aunque sea indirectamente, aspectos relacionados con la forma de las redes hidrográficas, con la distribución del recurso agua en el planeta o con la calidad de las aguas.

Hemos prestado especial atención a los deltas de los principales ríos del mundo porque suelen ser zonas de gran interés ecológico al tiempo que son zonas vulnerables. En ellas, o en sus proximidades, se concentran grandes aglomeraciones urbanas y zonas agrícolas ocupadas por cultivos intensivos. En los últimos años, parece corroborarse una tendencia creciente a las inundaciones, de manera que la vulnerabilidad de estas áreas va en aumento.

Según una investigación de la Universidad de Colorado, el 85% de los grandes deltas del mundo ha sufrido inundaciones porque se están hundiendo y les afecta más las crecidas de los ríos y el incremento del nivel del mar como consecuencia del calentamiento global.

La construcción de presas y el desvío de los cauces de los ríos en proyectos de irrigación, reduce la cantidad de sedimentos transportados hacia las desembocaduras, de manera que se limitan los aportes y rellenos de materiales en los deltas y, por tanto, se produce un hundimiento relativo respecto al nivel del mar. Entre los 33 deltas estudiados, los ríos más afectados son el Colorado, Nilo, Yangtze y Mekong.

Figura 130: Fotografía oblicua, en color natural, sobre el lago Chad, captada por un astronauta desde Apollo 7, en octubre de 1968. Fuente: NASA -JSC's Gateway to Astronaut Photography of Earth



Figura 129: Imagen MERIS con la máxima resolución espacial, tomada desde el satélite Envisat, el día 24 de enero de 2004. Se observa la península de Florida y gran parte de Cuba, al sur, así como las Bahamas, al este de la imagen. Se aprecia la diferencia en la profundidad y calidad de las aguas. En color azul turquesa se muestran las aguas poco profundas del Caribe, al sur de Cuba, y del Atlántico, en torno a las Bahamas y a los Cayos de Florida.

Fuente: ESA

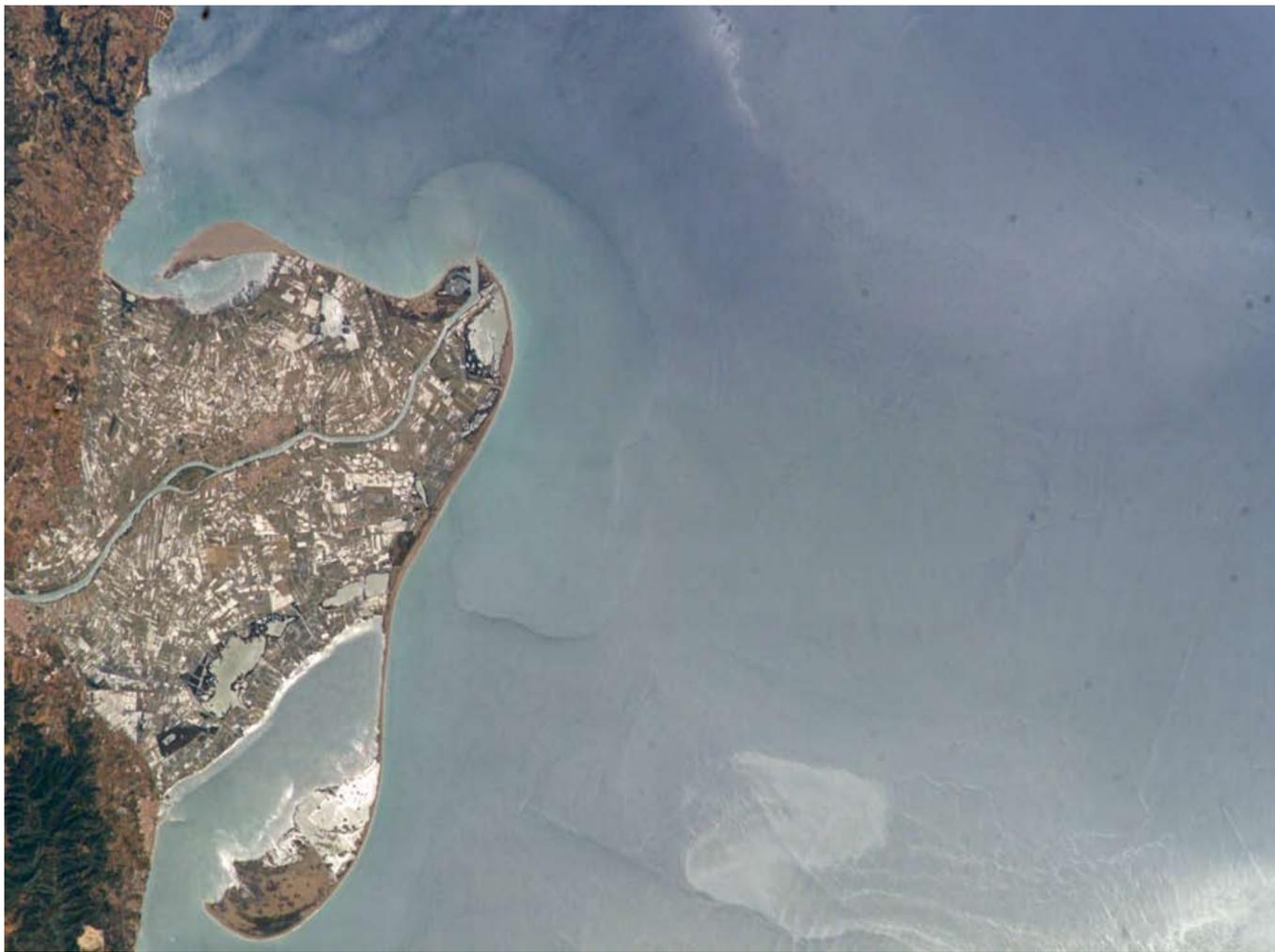


Figura 131 (arriba): Imagen adquirida el 3 de junio de 2004 desde la Estación Espacial Internacional, en color natural, sobre el delta del río Ebro (España). Su forma triangular, ligeramente redondeada, indica el equilibrio alcanzado entre los procesos de deposición de sedimentos y de erosión. En la zona costera de la punta del delta se observa una mancha formada por la capa de agua fresca aportada por el río Ebro que se superpone al agua salada del Mediterráneo, con distintas densidades. El Ebro es el río más caudaloso de España (caudal medio de 426 m<sup>3</sup>/s). Drena una cuenca de 85.362 km<sup>2</sup>.

El delta está ocupado por humedales que sustentan una diversa avifauna. Se han llegado a censar más de 300 especies diferentes de aves. Desde 1983, esta zona ha sido declarada espacio natural protegido con el nombre de Parque Natural del Delta del Ebro. Junto a él coexisten campos de cultivo de arroz y frutales, principalmente, regados por una densa red de canales y acequias.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 132 (derecha): Imagen tomada el 30 de enero de 2001 por el espectroradiómetro multiangular MISR de la NASA sobre el valle y el delta del Nilo. Tradicionalmente, se le ha considerado el río más largo del mundo, con una longitud de 6.756 km. Posee un caudal medio de 2.830 m<sup>3</sup>/s y drena una cuenca de 3.254.555 km<sup>2</sup>, aproximadamente un 10% de la superficie de África.

Se observa el contraste entre el verdor proporcionado por los cultivos y la aridez del inmenso desierto que bordea las zonas cultivadas. Como ya es conocido, las cíclicas crecidas del Nilo depositaban abundantes y fértiles limos en la parte baja de la cuenca. Antes de la construcción de la presa de Asuán y de la existencia del lago Nasser, se estima que el delta crecía a un ritmo medio de 1 km<sup>2</sup> al año, gracias al aporte de limos. El delta se forma en la parte baja del Nilo. La palabra delta proviene del griego, por la semejanza de su forma triangular con la letra griega delta (Δ). Está enmarcado por tres grandes ciudades: Alejandría, en la costa occidental, Port Said, en la costa oriental y, en el vértice meridional del delta, se ubica El Cairo, la ciudad más poblada de África. En su área metropolitana se ubican más de 24 millones de habitantes. Desde este punto, el Nilo se bifurca en dos grandes brazos: Rosetta, al oeste, y Damietta, al este. Al este de la imagen se aprecia el Mar Rojo y el canal de Suez, que comunica con el Mediterráneo.

Fuente: NASA/GSFC/JPL, MISR Team.



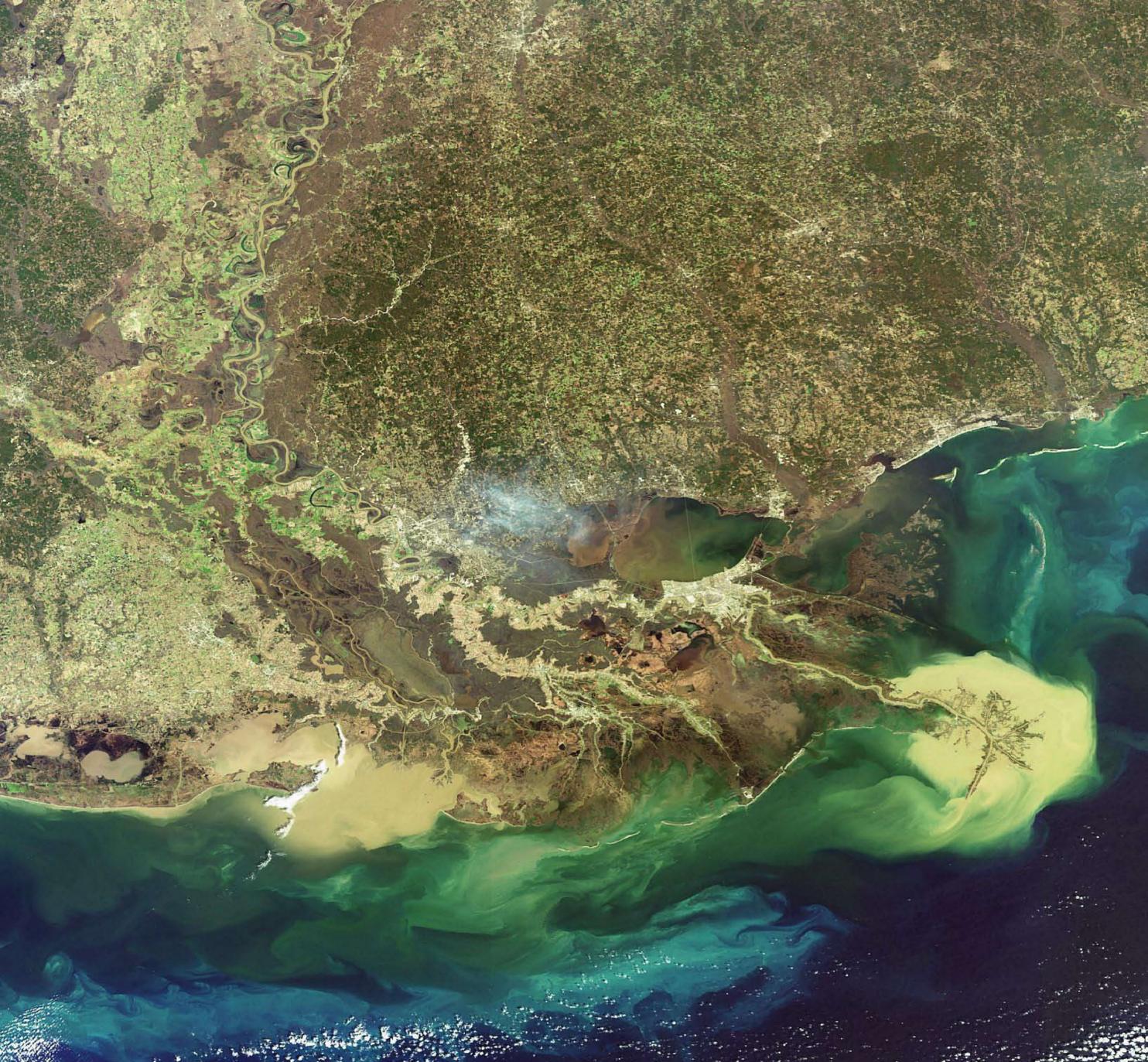


Figura 133: Imagen MERIS tomada, el día 6 de febrero de 2007, desde el satélite Envisat sobre el delta del río Mississippi.

En el sureste de la imagen se aprecia, con nitidez, el delta que forma este gran río americano. El Mississippi tiene una longitud de 3.770 km, un caudal medio en la desembocadura de 18.000 m<sup>3</sup>/s y drena una cuenca de 3.238.000 km<sup>2</sup>, que afecta a 31 estados norteamericanos.

La carga de sedimentos que aporta al Golfo de México puede observarse en colores amarillos. Sin embargo, durante las últimas décadas, los expertos han constatado una disminución drástica de la carga de sedimentos como consecuencia de causas naturales y antrópicas. Las grandes presas y embalses retienen los sedimentos, aguas arriba, por lo que los humedales de las zonas bajas se ven afectados por estas capturas de sedimentos. Se estima que estas zonas húmedas, como el gran lago Pontchartrain, al norte de New Orleáns, unos 160 km aguas arriba de la desembocadura del Mississippi, serán más vulnerables ante el paso de huracanes y de las grandes tormentas.

Fuente: ESA

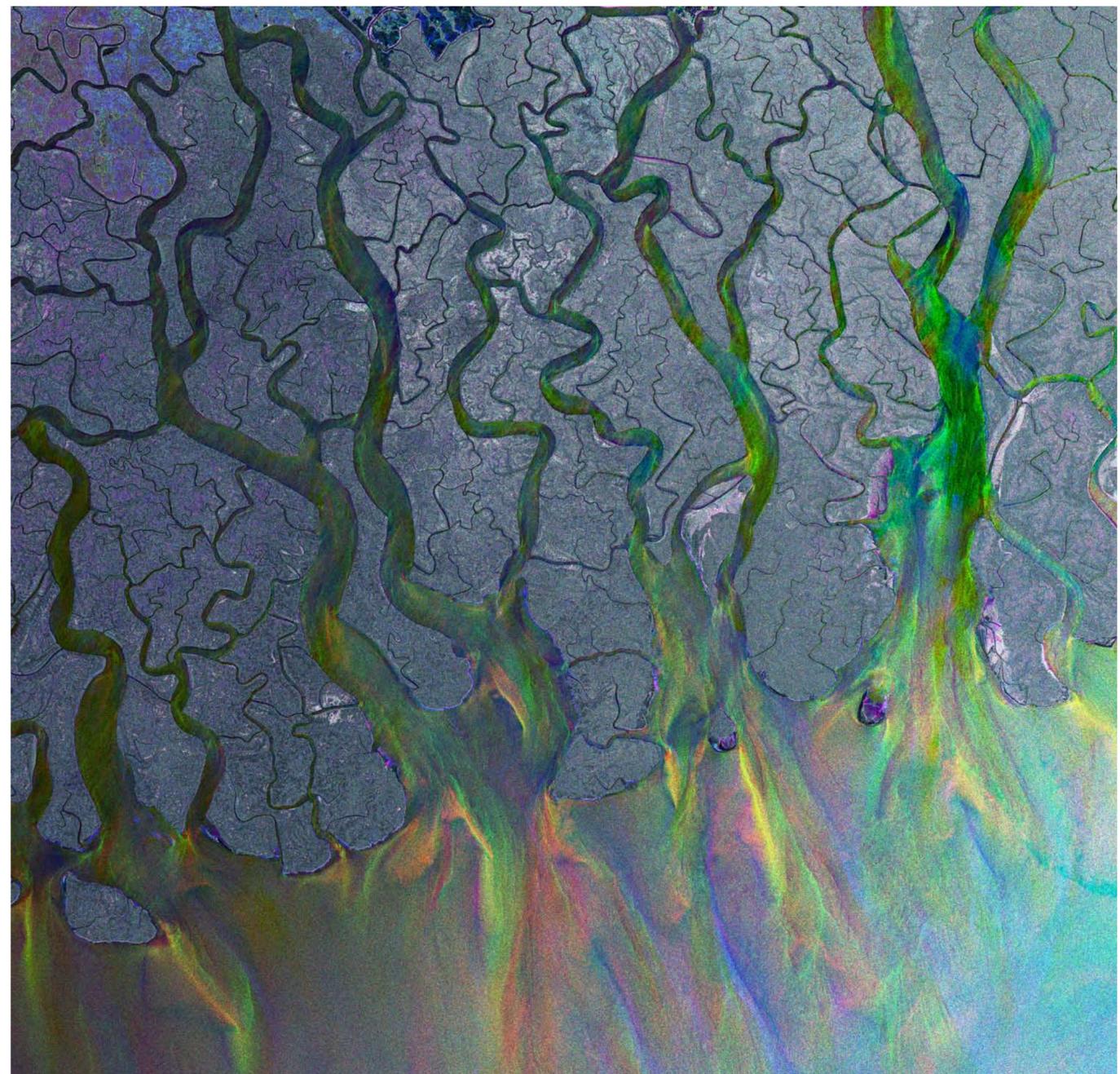


Figura 134: Imagen radar, adquirida desde el satélite Envisat, sobre el delta del Ganges, Bangladesh. Con objeto de proporcionar color, se ha realizado una fusión de tres imágenes ASAR, registradas los días 20 de enero, 24 de febrero y 31 de marzo de 2009 sobre la misma zona. Los colores son el resultado de las variaciones ocurridas en la superficie entre las tres fechas de adquisición.

En la imagen se observa el sector bangladesí del delta del Ganges, el delta más grande del mundo. Ocupa una superficie de 105.000 km<sup>2</sup>. La llanura del delta tiene una anchura de 350 km a lo largo de la bahía de Bengala. El delta es formado por la confluencia del Ganges y de los ríos Brahmaputra y Meghna, configurando un gran sistema fluvial. Es una zona fértil en la que se concentran 143 millones de habitantes. Aunque la ciudad de Calcuta está fuera de la imagen, al noroeste, se ubica en el delta. La población de su área metropolitana supera los 13 millones de personas. Así pues, ésta puede ser considerada una zona muy vulnerable, especialmente al paso de ciclones y huracanes.

Por otra parte, es un área húmeda de gran interés natural. Los hábitats localizados entre las distintas bocas del Ganges están ocupados por manglares, que sirven de refugio a especies como el tigre de Bengala. En las aguas se refugian dos especies raras de delfines. La Reserva de Sunderbans ha sido declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

Fuente: ESA



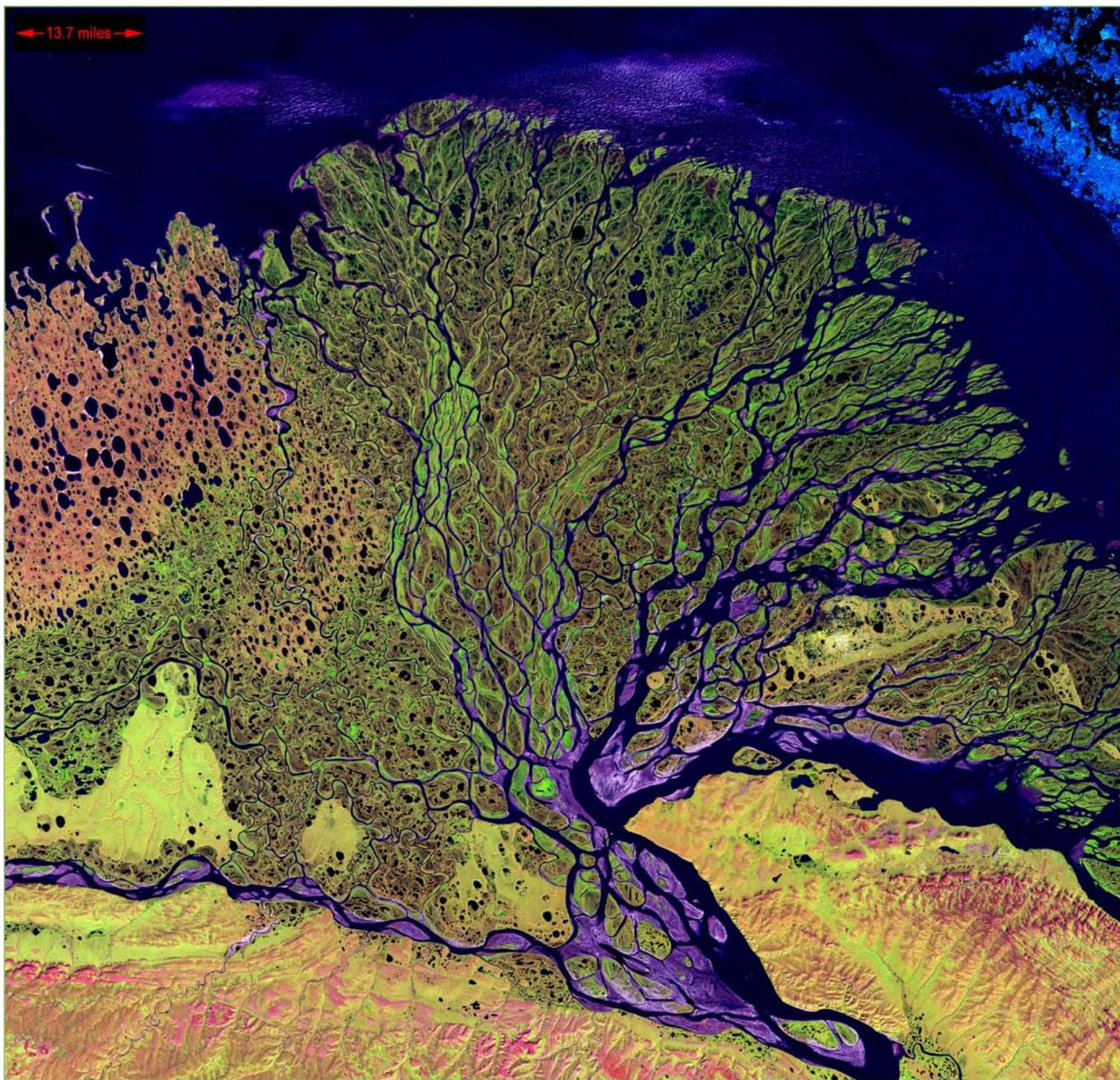


Figura 135: Imagen ETM, en falso color, adquirida por Landsat-7 el día 27 de julio de 2000 sobre el delta del río Lena, Rusia.

El Lena, con 4.313 km de longitud, ocupa el 10º puesto entre los ríos más largos del mundo. A lo largo de su amplia cuenca recoge las aguas de más de 2.000 afluentes por lo que, a pesar de recorrer buena parte de la meseta de Siberia y de atravesar zonas de escasa pluviometría, consigue registrar un caudal medio de 16.400 m³/s en su desembocadura.

El color de la imagen es el resultado de la combinación de las bandas del infrarrojo medio, infrarrojo cercano y rojo. En la imagen se muestra, principalmente, la desembocadura del Lena en el mar de Láptev. El delta es recorrido por numerosos brazos del río. Cubre una extensión de 10.800 km². El delta ha sido declarado Reserva y es el área natural protegida más extensa de Rusia. Se ha consolidado como uno de los principales refugios de la fauna y flora de Siberia.

Fuente: USGS EROS Data Center. Satellite Systems Branch.

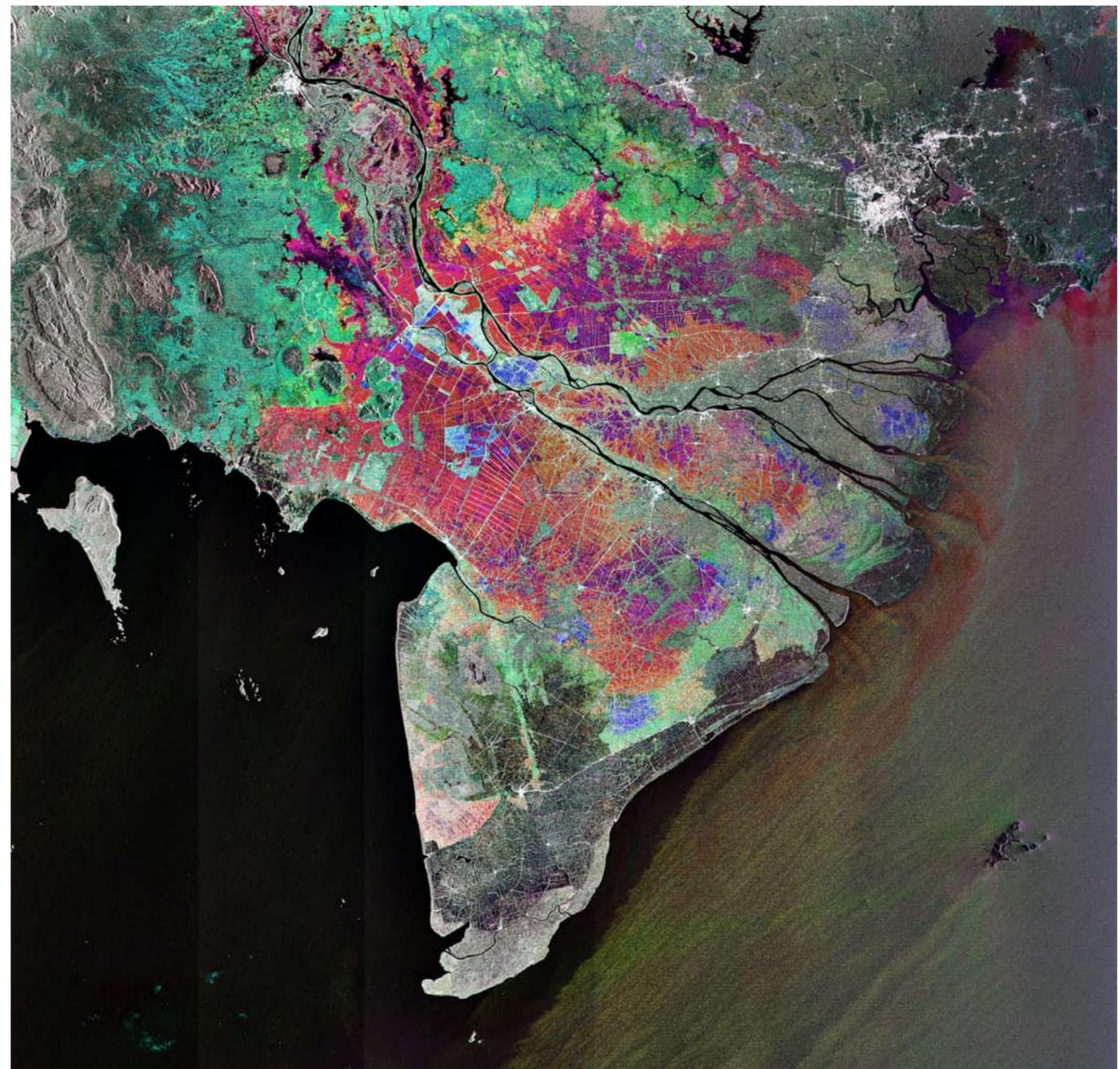


Figura 136: Imagen radar, adquirida desde el satélite Envisat, sobre el delta del Mekong, Vietnam. Con objeto de proporcionar color, se ha realizado una fusión de tres imágenes ASAR, registradas los días 9 de enero, 13 de febrero y 20 de noviembre de 2007 sobre la misma zona. Los colores son el resultado de las variaciones ocurridas en la superficie entre las tres fechas de adquisición.

En la imagen se observan las bocas del Mekong que aportan sus aguas al Mar de China Meridional. Este río, el 8º más largo del mundo, nace en el Himalaya a más de 5.000 m. de altitud. Drena una cuenca de 810.000 km² que afecta a seis países del sureste asiático. En su desembocadura, el río se divide en nueve brazos, formando un gran delta de 40.000 km², surcado por más de 3.000 km. de canales.

En la esquina noreste de la imagen se puede apreciar la gran mancha blanca que forma la ciudad de Ho Chi Minh, la antigua Saigón, al oeste del río Saigón. Es la ciudad más poblada de Vietnam y el principal puerto del país. Su área metropolitana concentra más de 9 millones de habitantes, lo que la convierte en una de las principales aglomeraciones urbanas del sureste asiático.

Fuente: ESA



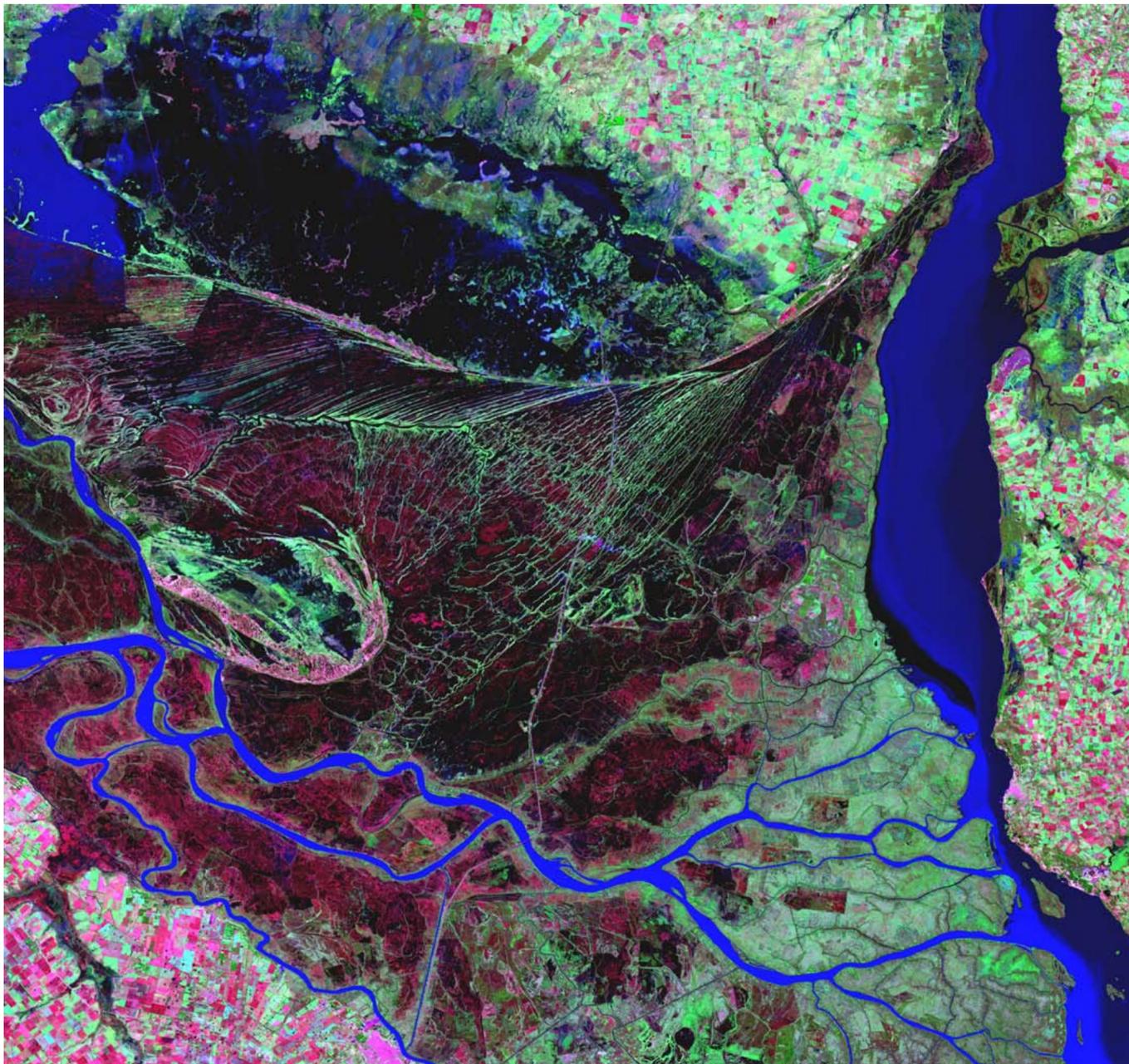


Figura 137: Imagen Landsat ETM, registrada el 26 de mayo de 2000, sobre el delta del Paraná, Argentina. Esta zona se encuentra en las inmediaciones de Buenos Aires, a unos 30 km. al norte de la capital federal. Cubre una extensión de 17.500 km<sup>2</sup>. Es un delta original porque no desemboca en el mar sino en el río de La Plata.

Se trata de un gran humedal forestado que contiene una gran variedad de ecosistemas. En la imagen se aprecian las diferencias de color entre las zonas densamente forestadas (en colores rojos oscuros y pardos), los herbazales que quedan entre la densa red de canales (en verdes claros) y las zonas inundadas compuestas por las corrientes de agua y por los humedales. Es llamativo el color azul intenso del río Uruguay, al este, y de los canales del delta del Paraná.

Esta composición se ha realizado en falso color, mezclando las bandas espectrales de los infrarrojos medio y próximo y la del verde.

El extremo suroriental del delta ha sido declarado, por la UNESCO, Reserva de la Biosfera, a través del Programa MAB. Ocupa una superficie de 88.624 ha. Alberga una rica diversidad de especies de fauna y de flora. En esta zona se puede observar el 30% de la avifauna de Argentina, cerca del 60% de sus peces de agua dulce y cerca del 20% de los anfibios.

En la actualidad, es una zona de atractivo turístico. Desde Buenos Aires se organizan visitas guiadas en barco, durante todo el año. El delta es un gran observatorio de aves.

Fuente: USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch



Figura 138: Imagen ASTER, adquirida el día 16 de julio de 2000, sobre la confluencia de los ríos Negro y Amazonas, Brasil.

En esta composición en pseudocolor natural, se observa claramente la diferencia en la calidad de las aguas de los ríos. El Amazonas, que entra en la imagen por la esquina suroeste, lleva una gran carga de sedimentos en suspensión, recogiendo las aguas de escorrentía de su cuenca alta, que drena parte de los territorios de Ecuador, Perú, Bolivia y vastas extensiones del occidente de Brasil. La lámina de agua tiene un color marrón claro. Por el contrario, el río Negro, que proviene del noroeste de Brasil y de Colombia, apenas lleva carga de sedimentos. Además, sus aguas aparecen en color negro como consecuencia de su mayor contenido en taninos.

Como puede apreciarse, las aguas aportadas por ambos ríos, discurren en paralelo, sin mezclarse, al menos durante 100 km. En la margen izquierda del río Negro, poco antes de la confluencia, se localiza la ciudad de Manaus, capital del estado de Amazonas. En la imagen, se aprecia en color blanco. La zona urbana concentra una población de 1,7 millones de habitantes. Dado que el Amazonas es navegable, el puerto de la ciudad es considerado estratégico para el desarrollo de la misma y del estado.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team



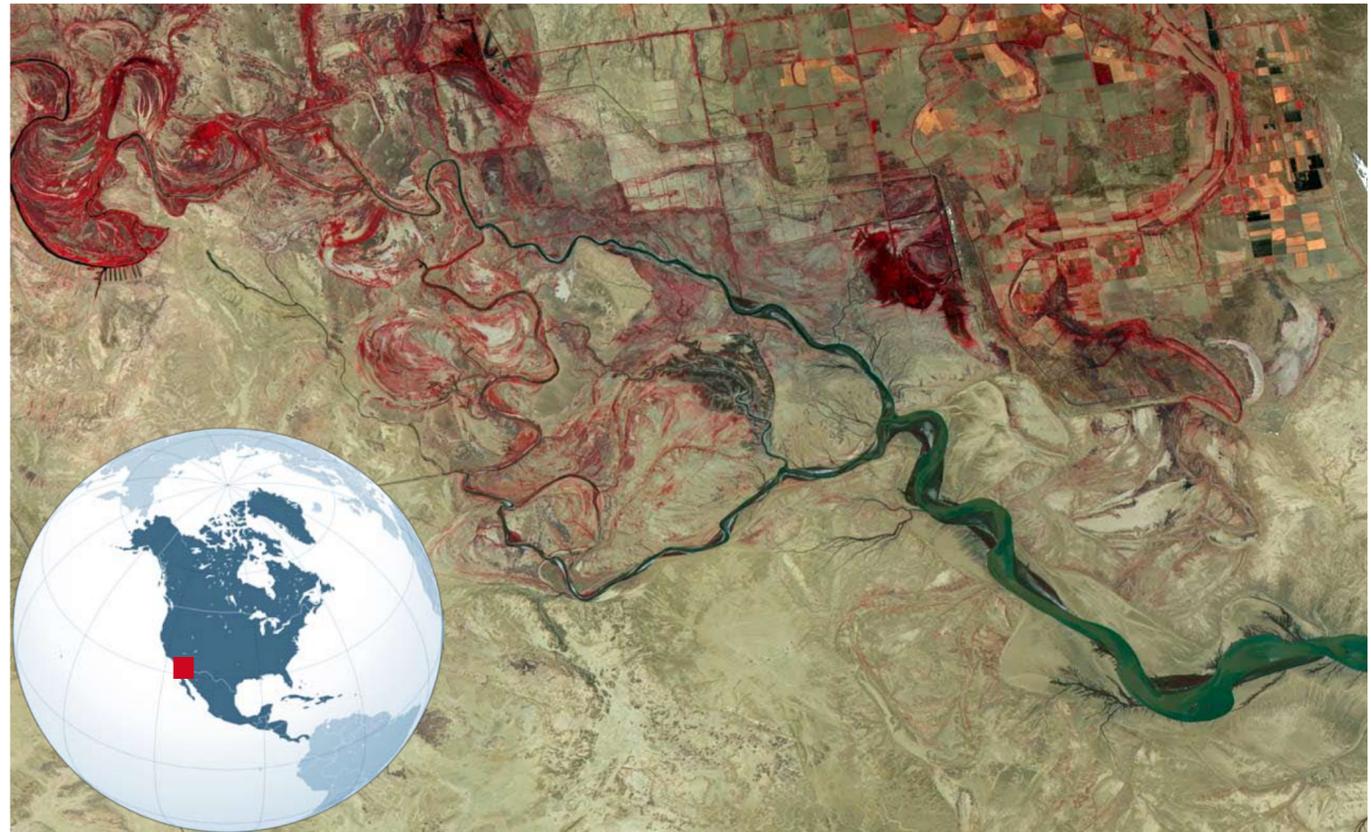
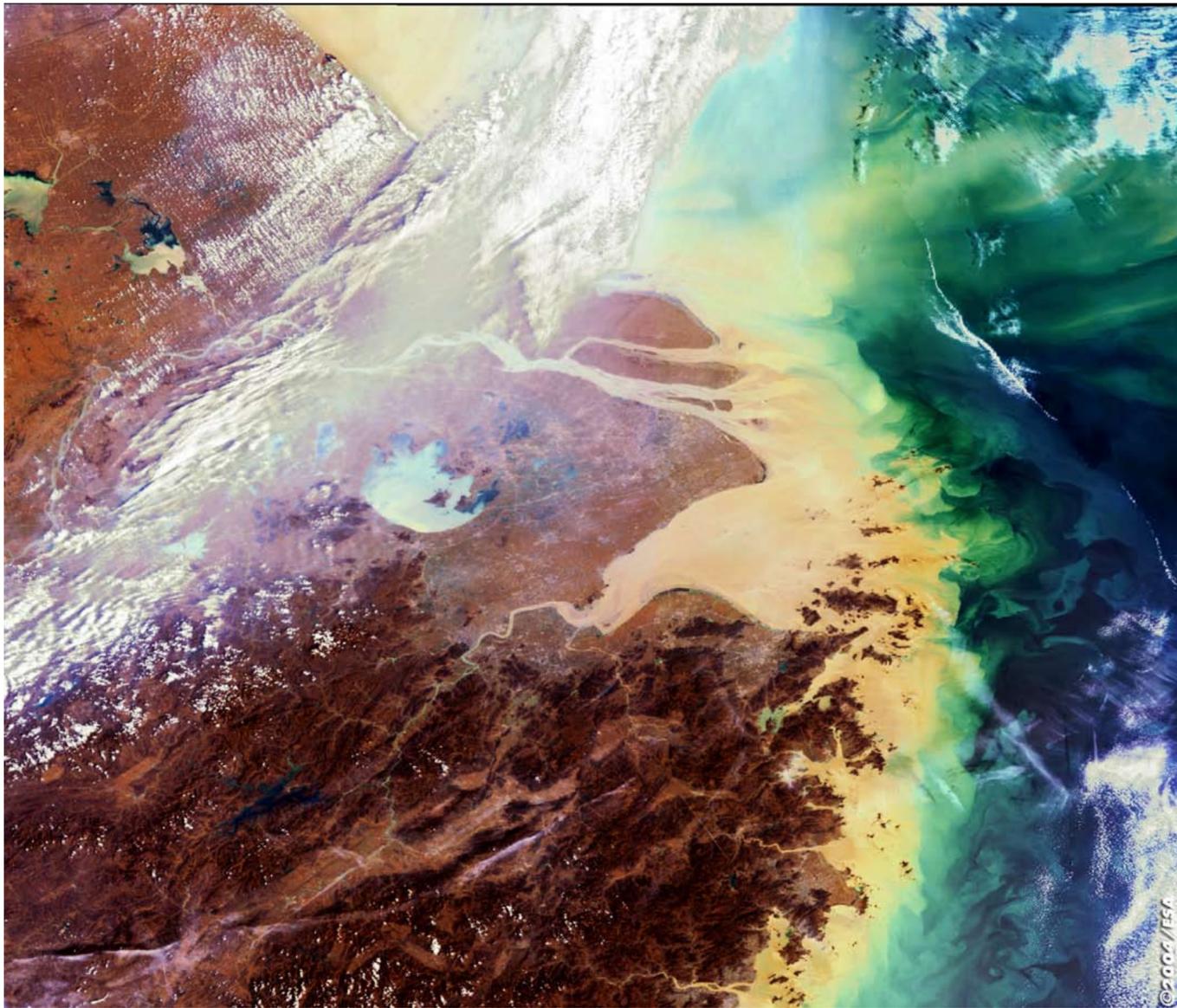


Figura 140 (arriba): Imagen SPOT adquirida el 9 de junio de 1992 sobre el delta del río Colorado, México.  
 Figura 141 (abajo): Imagen SPOT adquirida el 20 de junio de 2009 sobre el delta del río Colorado, México.

Se trata de la primera imagen captada por SPOT-2 sobre el delta del río Colorado y de la última adquirida por este sistema de observación de la Tierra antes del término de su explotación comercial. Tras un largo recorrido de 2.330 km. y de tallar profundos cañones y perfilar un sistema de terrazas fluviales, desemboca en el Golfo de California. A pesar del tratado firmado entre México y Estados Unidos para asegurar el 9% del caudal medio en la desembocadura, en ocasiones las reservas de agua no alcanzan esta magnitud como consecuencia de los intensos aprovechamientos para el riego, la generación de energía hidroeléctrica y la evaporación de la lámina superficial. En 1992 (arriba), al menos 3 brazos del río llegaban al estuario (en verde). Diecisiete años más tarde (abajo) tan sólo llega un brazo del río.  
 Fuente: Spot Image, CNES.

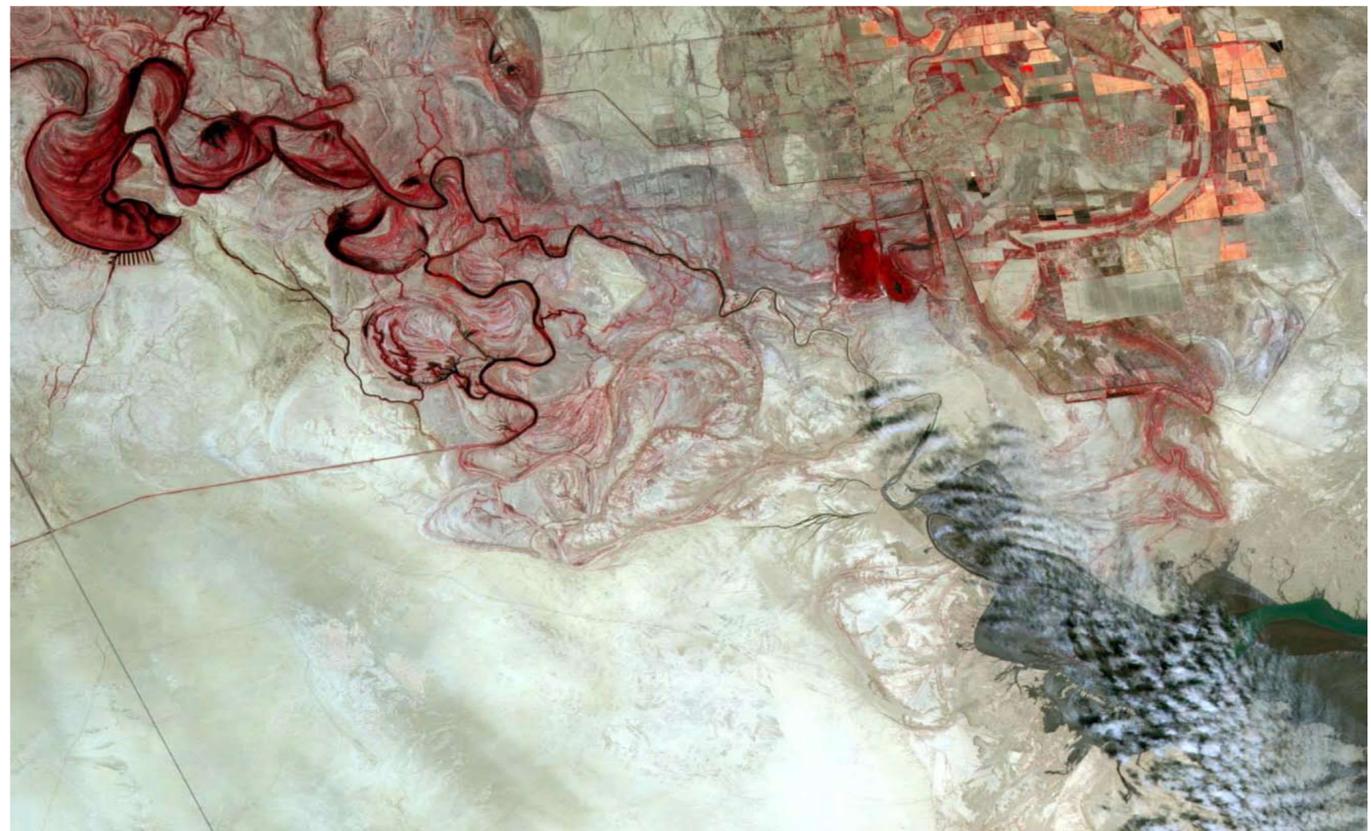
Figura 139: Imagen MERIS adquirida desde el satélite Envisat el día 21 de marzo de 2003 sobre el delta del Yangtsé, China.

El Yangtsé es el río más largo de Asia y el 3º del mundo tras el Amazonas y el Nilo. De sus 6.300 km. de longitud, cerca de 950 km. son navegables por lo que es una gran vía de comunicación y de transporte fluvial. Registra un caudal medio de 21.900 m³/s en su desembocadura, que es vertido al Mar de China Oriental. El río transporta una gran carga de sedimentos que son vertidos al mar. Se observan, en la imagen, gamas de amarillos, turquesas y azules que denotan, además de diferentes profundidades, distintas calidades de las aguas y niveles de turbidez.

Las tierras bajas están ocupadas por cultivos de arroz y de seda. Al sur del Yangtsé se observa el lago Tai Hu, de forma casi circular, que bordea por el oeste a la metrópoli de Shanghai. Ésta es la ciudad más poblada de China y una de las más habitadas del mundo. Asentada sobre la llanura aluvial del Yangtsé, su población sobrepasa los 20 millones de habitantes.

Al sur de la desembocadura del Yangtsé, un gran número de islas salpica la entrada de la bahía de Hangzhou. En el continente, al sur de la bahía, la llanura aluvial deja paso a altas tierras montañosas donde predomina el cultivo del té.

Fuente: ESA



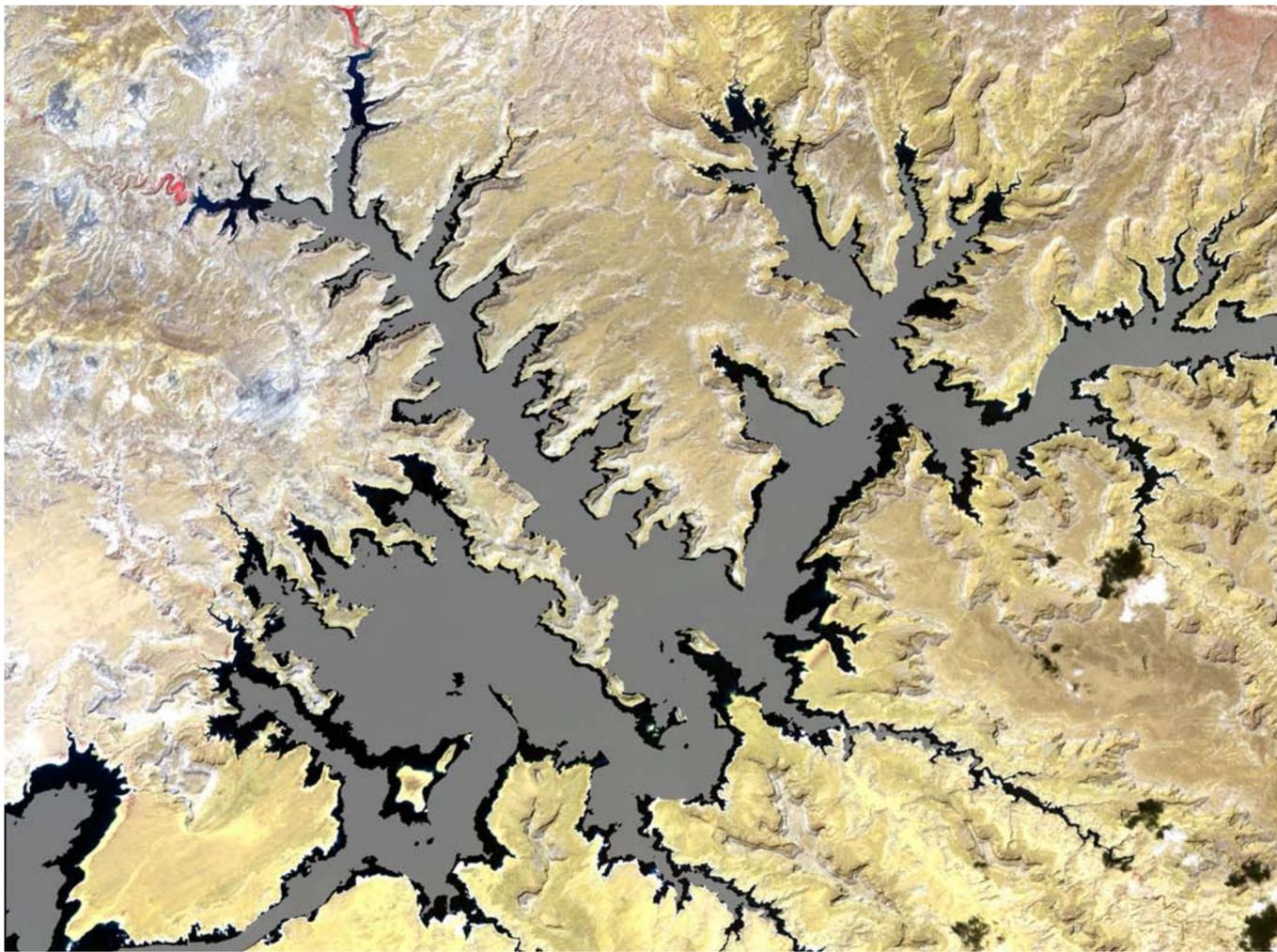


Figura 142: Imagen ASTER, tomada en 2001, sobre el lago Powell, en el río Colorado. Se encuentra en la frontera entre los estados de Utah y Arizona, aguas arriba del Gran Cañón. Sobre la meseta del Colorado, el río ha labrado otro cañón conocido con el nombre de Glen, que ha sido declarado Parque Nacional. El embalse se terminó de construir en 1963. Tiene una longitud de 300 km y la presa tiene una altura de 216 m. Ahora es un área recreativa muy frecuentada. Se encuentra entre los 26 mayores embalses del mundo, con una capacidad de agua embalsada superior a 35 Km<sup>3</sup>.

Comparando esta imagen con otra posterior, adquirida en 2007, se ha registrado un descenso del nivel de agua del reservorio de 33 m. Esta situación ha sido calificada de crítica por las autoridades ya que millones de personas de cinco estados se abastecen de agua de éste y de otros lagos de la misma cuenca.

En la última década, esta zona del país ha sufrido una severa sequía. Algunos científicos han estimado que, en el estado de California, se ha reducido el 30% de las reservas de nieve.

Comparando las imágenes de 2007 y 2001 se puede visualizar el impacto de la sequía en la lámina de agua del lago Powell. La mancha gris es la lámina de agua existente en 2007. La orla negra del embalse indica la diferencia del nivel de las aguas entre 2007 y 2001.

Fuente: NASA/GSFC/MET/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 143: Imagen TM, adquirida por Landsat el día 10 de junio de 2009 sobre el lago Eyre, Australia. Este lago forma una gran cuenca endorreica, de 1.200.000 Km<sup>2</sup>, que recoge las escasas precipitaciones de una buena parte del centro de Australia, desde los Territorios del Norte hasta el estado de Australia Meridional, a través del desierto de Simpson. Buena parte del lago se encuentra seco, excepto cuando se registran intensas precipitaciones que rellenan parte de su vaso. En la imagen, parte del lóbulo suroeste se ha cubierto con una lámina poco profunda (1,40 m.) que se muestra en color verde como consecuencia de las concentraciones de algas y de sedimentos. En el resto del lago se aprecia su fondo y, en algunas zonas, depósitos salinos, de color blanco. Cuando está lleno, el lago y otros humedales son hábitats de abundantes poblaciones de aves.

Cortesía de Jesse Allen; NASA-USGS.  
[http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/38000/38994/lakeeyre\\_tm5\\_2009081\\_lrg.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/38000/38994/lakeeyre_tm5_2009081_lrg.jpg)



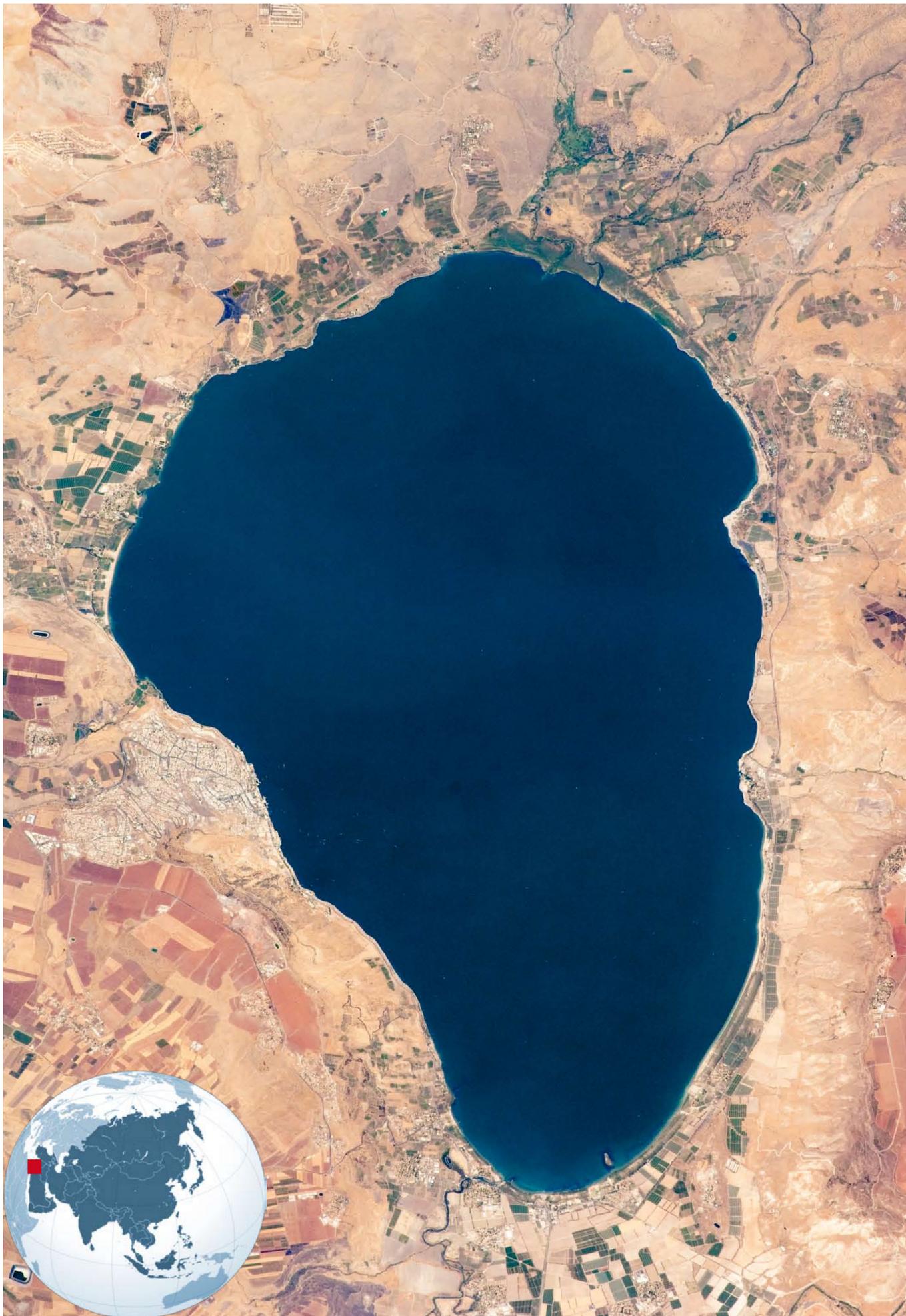


Figura 144 (izquierda): Fotografía, en color natural, captada desde la Estación Espacial Internacional el día 15 de agosto de 2009, sobre el Lago de Tiberíades, también conocido como Mar de Galilea, Israel.

Ocupa una superficie de 166 km<sup>2</sup> y tiene una profundidad de 43 m. Se encuentra a 212 m. por debajo del nivel del mar, por lo que puede decirse que es el lago de agua dulce más bajo del planeta.

Se trata de un lago de origen tectónico, situado en el Gran Rift africano. La falla que separa las placas asiática y africana es recorrida por el río Jordán que sigue una dirección meridiana. Aporta sus aguas por la costa norte del mar y desagua éste por el sur. El lago es aprovechado, entre otros usos, para el regadío de explotaciones agrícolas en un medio árido. Sus aguas han permitido regar cultivos en el desierto del Néguev, en el sur de Israel.

Fuente: Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center.



Figura 145 (arriba): Imagen MODIS en color natural, adquirida el 4 de noviembre de 2001 por el satélite Terra, sobre el lago Titicaca.

La lámina de agua, en color negro, ocupa una superficie de 8.562 km<sup>2</sup>. Tiene una profundidad de 365 m. Territorialmente, el 55% de sus aguas pertenecen a Perú mientras que el 45% oriental del mismo se encuentra bajo las fronteras de Bolivia. Es el segundo lago más grande de Sudamérica. El río Desaguadero drena una cuenca de 56.270 km<sup>2</sup> y desagua el lago Titicaca, transportando el agua hasta el lago Poopó y, ocasionalmente, hasta los salares de Coipasa y de Uyuni.

Es un lago de origen tectónico, situado en el altiplano peruano-boliviano que está entre las cordilleras occidental y oriental de Los Andes. Esta última se encuentra al este de la imagen y, en el momento del paso del satélite, está cubierta por nieve, en color blanco. Localizado a 3.800 m. de altura, es el lago navegable más alto del mundo. A pesar de ser un lago endorreico, sus aguas son mayoritariamente dulces aunque tienen algo de salinidad. Debido a la altitud, a la pureza del aire y a la ausencia de fuentes contaminantes en la cuenca, las aguas del lago tienen una elevada calidad.

Fuente: <http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?11012>



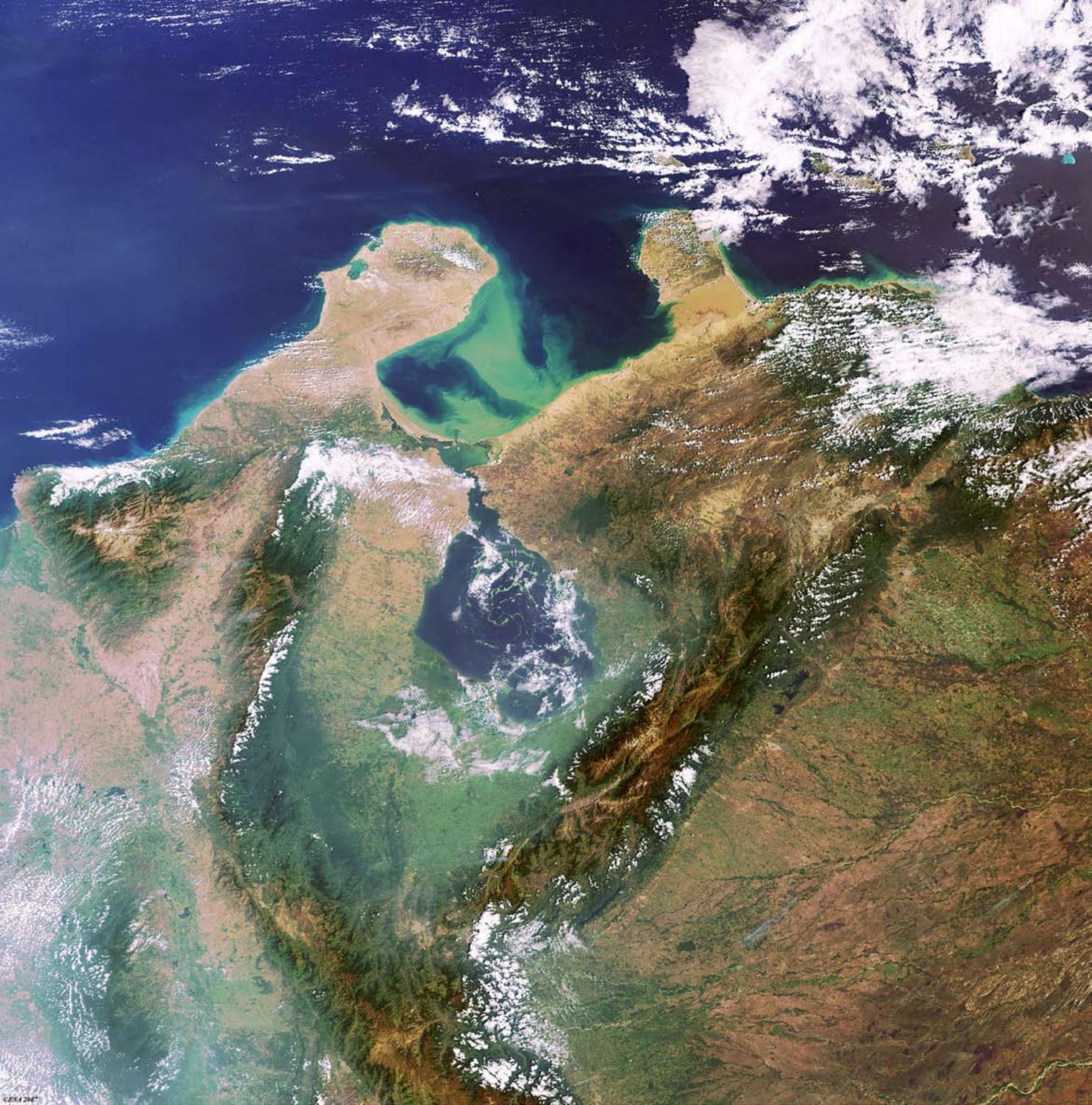


Figura 147: Imagen MERIS, adquirida el día 3 de octubre de 2005 desde el satélite Envisat, sobre el mar Caspio.

La imagen capta el lóbulo meridional del mar. En el sentido de las agujas del reloj, esta costa baña los países de Turkmenistán, Irán y Azerbaiyán, desde la península de Krasnovodsk, en el este, hasta la ciudad de Bakú, localizada en la península de la orilla occidental. La zona sureste es un área pantanosa de humedales. La escasa profundidad y los sedimentos otorgan ese color azul turquesa a las aguas del área de Gasan-Kuli.

El mar Caspio ocupa una superficie de 371.900 km<sup>2</sup>. Su superficie se encuentra por debajo del nivel del mar. Drena una vasta cuenca de 3.626.000 km<sup>2</sup>. Se trata de la cuenca endorreica más grande de la Tierra. Su principal tributario es el río Volga, que aporta su caudal por la parte norte del mar, fuera de la imagen. Ningún río desagua sus recursos hídricos, de manera que las únicas pérdidas se realizan mediante evaporación, dando lugar a depósitos salinos. El Caspio marca parte de la frontera entre Europa y Asia.

Esta zona del mar es rica en yacimientos petrolíferos. En las inmediaciones de la ciudad de Bakú, se halla un extenso campo petrolífero. En la orilla opuesta, al sur de Nebit-Dag, se encuentran ricos yacimientos de gas natural. En la zona sur del mar se aprecian manchas verdes oscuras que son concentraciones de algas. La zona litoral más fértil es la iraní, en la ribera meridional, que se extiende a lo largo de una estrecha franja hasta la ciudad de Bakú. Esta zona contrasta con la inmensidad de los desiertos.

Fuente: ESA.



Figura 146: Imagen MERIS, captada el día 3 de febrero de 2007 desde el satélite Envisat, sobre el lago Maracaibo, Venezuela.

En el centro de la imagen se observa el lago Maracaibo rodeado de las cordilleras de Mérida, al este, y de Perijá, al oeste. El lago se conecta, a través del estrecho de Maracaibo, con el Golfo de Venezuela, en el Caribe, flanqueado por las penínsulas colombiana de Guajira, al oeste, y venezolana de Paraguaná, al este. Las nubes tapan, parcialmente, la ciudad de Maracaibo, en la esquina noroeste del lago, antes de iniciarse el estrechamiento que conecta el lago con el mar. El lago Maracaibo ocupa una superficie de 13.820 km<sup>2</sup>, siendo considerado el más grande de Sudamérica. Tiene una profundidad de 30 m. Posee abundantes yacimientos petrolíferos que han motivado la instalación de innumerables pozos extractivos. Es una de las principales fuentes económicas de Venezuela.

Como contrapartida, el lago se encuentra intensamente contaminado por los vertidos de petróleo, principalmente, y por los vertidos de aguas residuales sin tratar, provenientes de las industrias y de las ciudades ribereñas. La acumulación de nitratos en las aguas ha ocasionado altas concentraciones de lemna, una planta acuática que impide que llegue la luz a zonas más profundas, dificultando la vida de especies tradicionales de flora y fauna

Fuente: ESA



Figura 148 (arriba): Imagen Landsat TM, en color natural, del Lago Balatón, Hungría. El lago se localiza a unos 100 km. al suroeste de Budapest. Ocupa una superficie de 594 km<sup>2</sup> y tiene una profundidad media de 3 metros. Es una de las principales entidades hidrográficas del país, junto al Danubio. Tiene una función turístico-recreativa principal. Buena parte del turismo interior del país tiene como destino el lago.

Fuente: NASA.

Figura 149 (abajo): Imagen Landsat TM, en pseudocolor natural, adquirida en 2000, sobre el Lago Balatón y su área de influencia. El lago ejerce un papel importante como regulador del clima de la zona. Regula las temperaturas, evitando los cambios bruscos, e incrementa las precipitaciones medias normales en la zona. Al sur y este del lago se observa una densa red de lagos más pequeños ubicados sobre la gran llanura centroeuropea.

Fuente: NASA; <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>

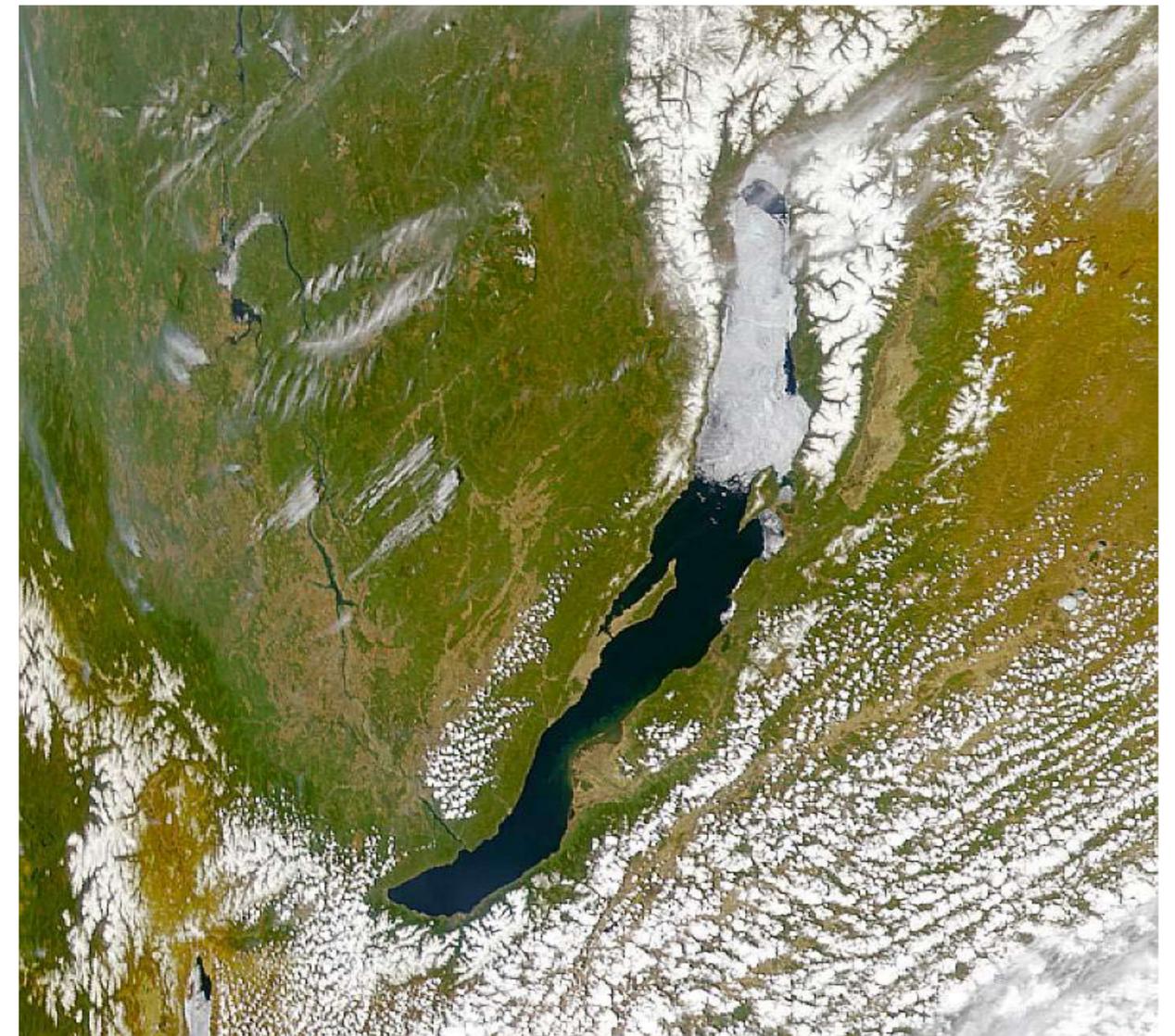


Figura 150: Imagen SeaWiFS, adquirida el 23 de mayo de 1999 desde el satélite OrbView-2, sobre el lago Baikal, Rusia.

Se localiza al sureste de la Federación Rusa, en la región de Siberia, cerca de la frontera con Mongolia, a 467 m. sobre el nivel del mar. El lago ocupa una honda fosa continental, dispuesta en dirección suroeste-noreste, en el interior de una vasta zona montañosa y de altiplanos que se prolonga, a través de Mongolia y de Siberia hasta el Pacífico. La falla principal está activa desde el punto de vista sísmico. El lago está enmarcado por dos cadenas montañosas: los montes homónimos del lago, al oeste, y los Montes Barguzinskii, al este. Los Montes Baikal sustentan un ecosistema de taigá. Su interés natural ha motivado la declaración de los mismos como parque nacional.

Tiene una superficie de 31.494 km<sup>2</sup> y una gran profundidad de 1.637 m. Es el lago de agua dulce más grande de Asia y el más profundo del mundo. El volumen de agua que contiene equivale al 20% del agua dulce de toda la Tierra. Es el lago que más volumen de agua alberga en el mundo. La calidad de las aguas es muy buena, a pesar de estar amenazado, de forma creciente, por distintas fuentes de contaminación. Sustenta una rica diversidad biológica. Fue catalogado, por la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad en 1996.

El lago recibe los aportes hídricos de distintos ríos. El principal es el río Angará, afluente del Yenisei, que entra en el lago por el noreste, procedente de la altiplanicie de Stanovoi, fuera de la imagen. El tercio norte del lago se encuentra cubierto de hielo buena parte del año, como en la imagen. Este mismo río desagua el lago por su parte suroccidental. Aguas abajo, las aguas transportadas por el río son reguladas por el gran embalse de Bratsk, estrecho y alargado. Se observa, en la imagen, en la lámina de agua, de color negro, entre las nubes. El río Selenge, proveniente de Mongolia, entra en el lago por el sureste. Éste es el principal responsable de los aportes de contaminantes.

Fuente: [www.visibleearth.nasa.gov](http://www.visibleearth.nasa.gov)



## 5.2.4. GLACIARES

Un glaciar puede definirse como *una gran acumulación natural de hielo situada en tierra firme y afectada por un movimiento pasado o presente* (Strahler y Strahler, 1989, p. 357). Es necesario que la nieve precipitada en invierno sea mayor que la ablación producida en verano, es decir que exceda a las pérdidas provocadas por la evaporación y por la fusión del hielo y de la nieve. De esta manera, cada año se va superponiendo una masa de nieve a la acumulada anteriormente. A medida que la nieve se compacta, se transforma en hielo granular y éste se convierte en hielo cristalino cuando es comprimido por las capas superiores. Cuando la masa de hielo alcanza grandes espesores (más de 50 m. según algunos autores), las capas inferiores adquieren plasticidad y el conjunto de nieve y hielo acumulado comienza a desplazarse a favor de la pendiente. En ese momento, se puede hablar de un glaciar activo. Se estima que los glaciares almacenan en torno al 75% del agua dulce del planeta.

Actualmente, los glaciares se distribuyen geográficamente en las zonas de alta montaña, por encima del nivel de nieves perpetuas, y en áreas de altas latitudes, en las cuales el balance entre ganancias (caída de nieve) y pérdidas (evaporación y fusión) sea favorable y en las que la temperatura permita la existencia de hielo durante todo el año. Altitudinalmente, el límite de nieve perpetua es variable dependiendo de la latitud. Por ejemplo, en latitudes ecuatoriales asciende a 5.000 m. de altitud mientras que en latitudes medias se encuentra en torno a 2.700m. y en zonas subpolares y polares puede oscilar entre 600 m. y el nivel del mar. A pesar de ello, hay indicios de que los glaciares pudieron ocupar otros territorios de latitudes y altitudes más bajas en épocas pasadas. Estas diferencias entre el pasado y el presente aún suscitan discusión científica. Algunos autores lo atribuyen a la deriva continental mientras que otros no creen que esta causa sea suficientemente justificativa y lo relacionan con variaciones en la órbita terrestre y cambios en la oblicuidad de su eje respecto al plano de su órbita.

Según sus características y su localización geográfica, los glaciares se clasifican en dos tipos: de montaña y continentales (Rebollo, 2010). Entre los glaciares de montaña se distinguen los siguientes:

1. Glaciares de circo: rellenan las zonas cóncavas en los flancos de las cimas montañosas.
2. Glaciares de meseta: recubren zonas elevadas en las cadenas montañosas.
3. Glaciares de valle: se encuentran encajados en valles de regiones montañosas y se deslizan a favor de la pendiente.
4. Glaciares de piedemonte: se extienden, al final de un valle, a lo largo de una llanura formando un lóbulo.

Los glaciares continentales son vastas superficies de hielo de miles de kilómetros de extensión que se extienden sobre la corteza continental. Se desplazan radialmente. En ocasiones, los glaciares sobrepasan la superficie de tierra emergida, extendiéndose lentamente desde la costa hasta flotar encima del océano. En estos casos se habla de plataformas de hielo.

Los principales riesgos asociados a los procesos glaciares son las avalanchas de bloques de hielo y de mantos de nieve, inundaciones producidas por fusiones rápidas, a veces asociadas a erupciones volcánicas, rotura de presas naturales y avance de los glaciares sobre zonas ocupadas por el hombre. Estos riesgos deben sumarse a los que ocurren debido a los procesos periglaciares. Entre ellos, pueden citarse a las fracturas de rocas y a los deslizamientos como consecuencia de los frecuentes cambios de estado y volumen del agua (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

La principal amenaza que se cierne sobre los glaciares es el calentamiento global provocado por el incremento y acumulación de CO<sub>2</sub> y de otros gases y aerosoles de efecto invernadero. Aunque no existe unanimidad y está abierto un debate científico sobre la velocidad, magnitud y gravedad del proceso, según los datos analizados desde que existen registros fiables, parece cierto que la temperatura se está incrementando 0,5°C cada década. Este calentamiento está produciendo pérdidas significativas y la reducción de las masas de hielo de los glaciares así como fracturas y desprendimientos de grandes bloques de hielo.



Figura 151: Conjunto de fotografías adquiridas, desde el Space Shuttle, el 10 de octubre de 1994 (arriba) y, desde la Estación Espacial Internacional, el 7 de marzo de 2002. En ellas se observa, de forma dinámica, el glaciar de San Quintín, en el sur de Chile.

A pesar de que han sido captadas en épocas y condiciones de iluminación distintas, es evidente la pérdida de masa, especialmente en el lóbulo del centro y en el perímetro de la morrena terminal del oeste. Los glaciares son uno de los objetivos científicos prioritarios de las tripulaciones de las misiones espaciales.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 152: Imagen ASTER registrada, por el satélite Terra, el 2 de mayo de 2000 sobre el glaciar de San Quintín, localizado en la XI Región de Chile.

La vegetación que rodea al glaciar se observa en rojo debido a que la imagen está compuesta en falso color. A las bandas espectrales del infrarrojo cercano, del rojo y del verde se les han asignado los colores primarios, rojo, verde y azul, respectivamente.

Como se ha comentado en la imagen anterior, el glaciar de San Quintín está en retroceso. En la morrena terminal de la izquierda de la imagen se aprecian rocas y suelo al desnudo en el extremo occidental que antes estaba cubierto por la masa de hielo. Ésta se encuentra llena de profundas grietas. Los charcos están ocupados por agua y una carga de sedimentos que se encuentran en suspensión en las láminas de agua. En el este de la imagen se observan varios valles paralelos en los que el glaciar ha retrocedido. Se han realizado distintas mediciones sobre el glaciar. Desde 1993, se está constatando que ha perdido una importante masa de hielo, lo que ha originado el colapso parcial de su frente.

Fuente: <http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?7149>

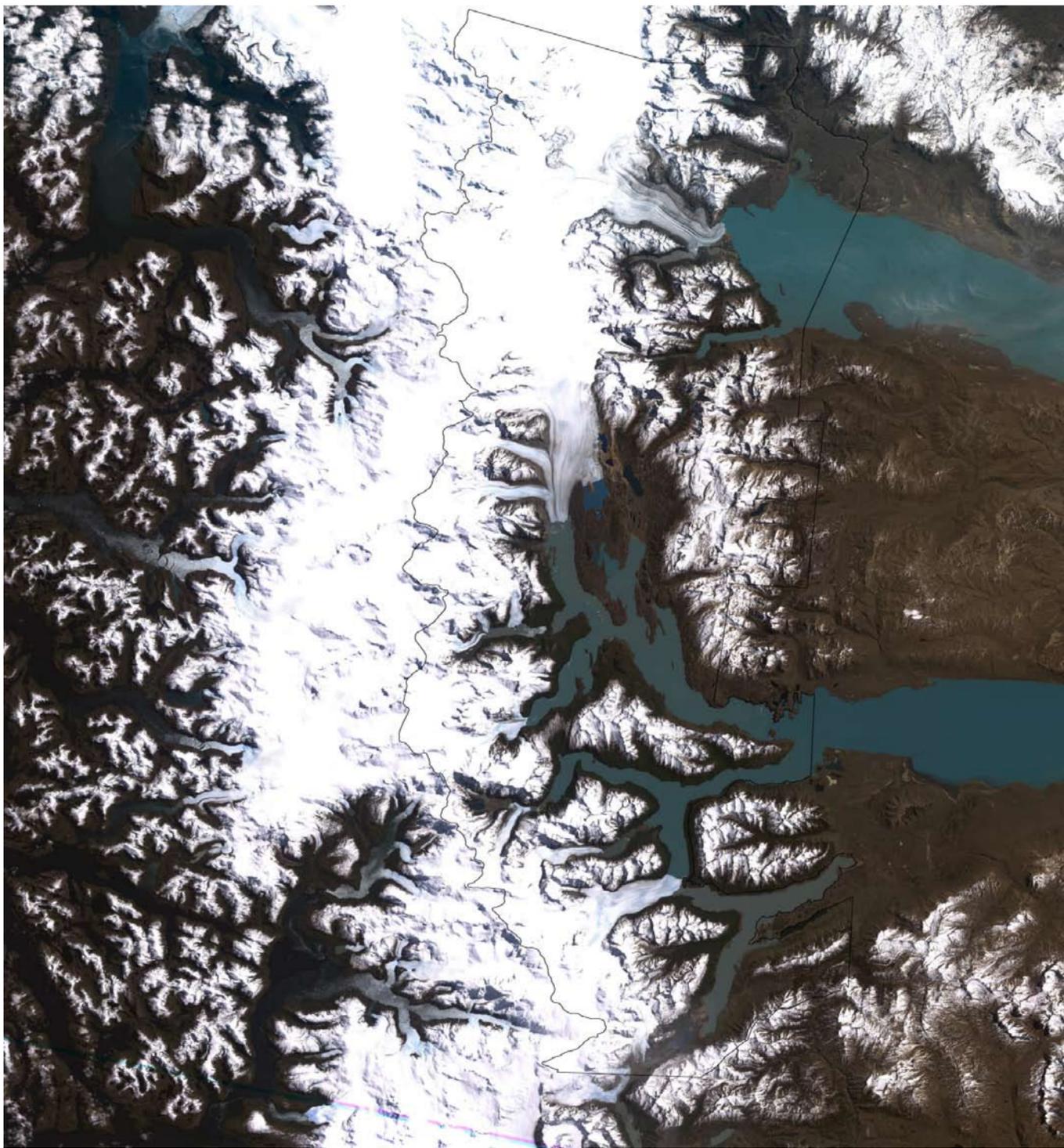


Figura 153: Imagen Landsat, adquirida el 14 de octubre de 2001, sobre el sector meridional del Parque Nacional de los Glaciares, Argentina.

El parque se localiza en el suroeste de Argentina, en la frontera con Chile, en el contacto entre la Patagonia y los Andes. Es una región de altas montañas, acompañada de masas forestales, glaciaras y roquedos de granito labrados por aquéllos. El parque nacional ha sido declarado, por la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad en 1981. En la imagen se aprecian la extensa masa de hielo de los glaciares en color blanco, las masas de agua de los lagos, en color azul (Viedma, al norte, y Argentino, en el centro) y las zonas de roquedo o cubiertas por un tapiz vegetal poco denso, en color marrón.

En el sureste de la imagen se puede observar el glaciar Perito Moreno. Cuando la masa de hielo avanza, el frente del glaciar tapona el Brazo Rico, el ramal más meridional, en forma de T, del Lago Argentino. Cuando el nivel del agua se incrementa en el Brazo Rico, la presión ejercida por el agua rompe la esquina oriental del frente del glaciar (en el extremo superior izquierdo de la T). Este fenómeno ocurre cada 4 o 5 años, aunque este acontecimiento no sigue un patrón regular.

Cortesía de: Jesse Allen, Earth Observatory  
NASA-University of Maryland's Global Land Cover Facility.



Figura 154 (arriba): Panorámica del frente del glaciar Perito Moreno y del campo de hielo rodeado por montañas.

Figura 155 (centro izquierda): Vista de la esquina oriental del frente del glaciar Perito Moreno, donde se produce periódicamente la ruptura. Detrás, se puede observar el Brazo Rico.

Figura 156 (centro derecha): Vista del frente del glaciar Perito Moreno hacia el oeste.

Figura 157: Iceberg flotando sobre el Lago Argentino, en el Parque Nacional de los Glaciares.

Fuente: SdP

Figura 158: Imagen ETM en color natural, adquirida por Landsat 7, el 14 de septiembre de 2001 sobre el Parque Nacional de los Glaciares, en Canadá.

Esta área protegida se localiza al noroeste de Calgary, cerca del límite entre las provincias canadienses de Alberta y de British Columbia, en la cadena montañosa de Columbia. Es una zona donde se registran abundantes precipitaciones por las masas de aire húmedas que proceden del Pacífico. Además, en invierno las temperaturas son templadas o moderadas, sin alcanzar los registros extremos típicos de otras cadenas montañosas canadienses.

En el interior del parque nacional se distinguen tres ecosistemas. En las laderas más bajas del parque, se encuentra el bosque lluvioso templado, propio de esta zona pacífica del noroeste de Canadá. En estas zonas, las precipitaciones se producen, predominantemente, en forma de lluvia. En la imagen se observa este ecosistema en color verde oscuro. En las zonas altas, las precipitaciones se producen en forma de nieve. Las áreas de innivación y las masas de hielo de los glaciares se muestran en color blanco. Cubren un 12% de la superficie del parque. Por último, se encuentra la zona supraforestal, es decir aquella que se encuentra, altitudinalmente, por encima del nivel donde existen condiciones idóneas para el desarrollo de las masas arbóreas. Esta zona está ocupada por la tundra en la que se desarrollan formaciones de matorral y manchas de roquedo, en gris oscuro. Hay zonas de suelo desnudo que se muestran en color beige.

A lo largo del valle del cuadrante nororiental de la imagen se observa la autopista transcanadiense como una línea de color gris claro. Se terminó de construir en 1962 y, desde entonces, la frecuentación del parque ha aumentado al construirse centros de interpretación y áreas recreativas.

Cortesía de: Jesse Allen, Earth Observatory

NASA-USGS-World Conservation Union and UNEP- University of Maryland's Global Land Cover Facility.

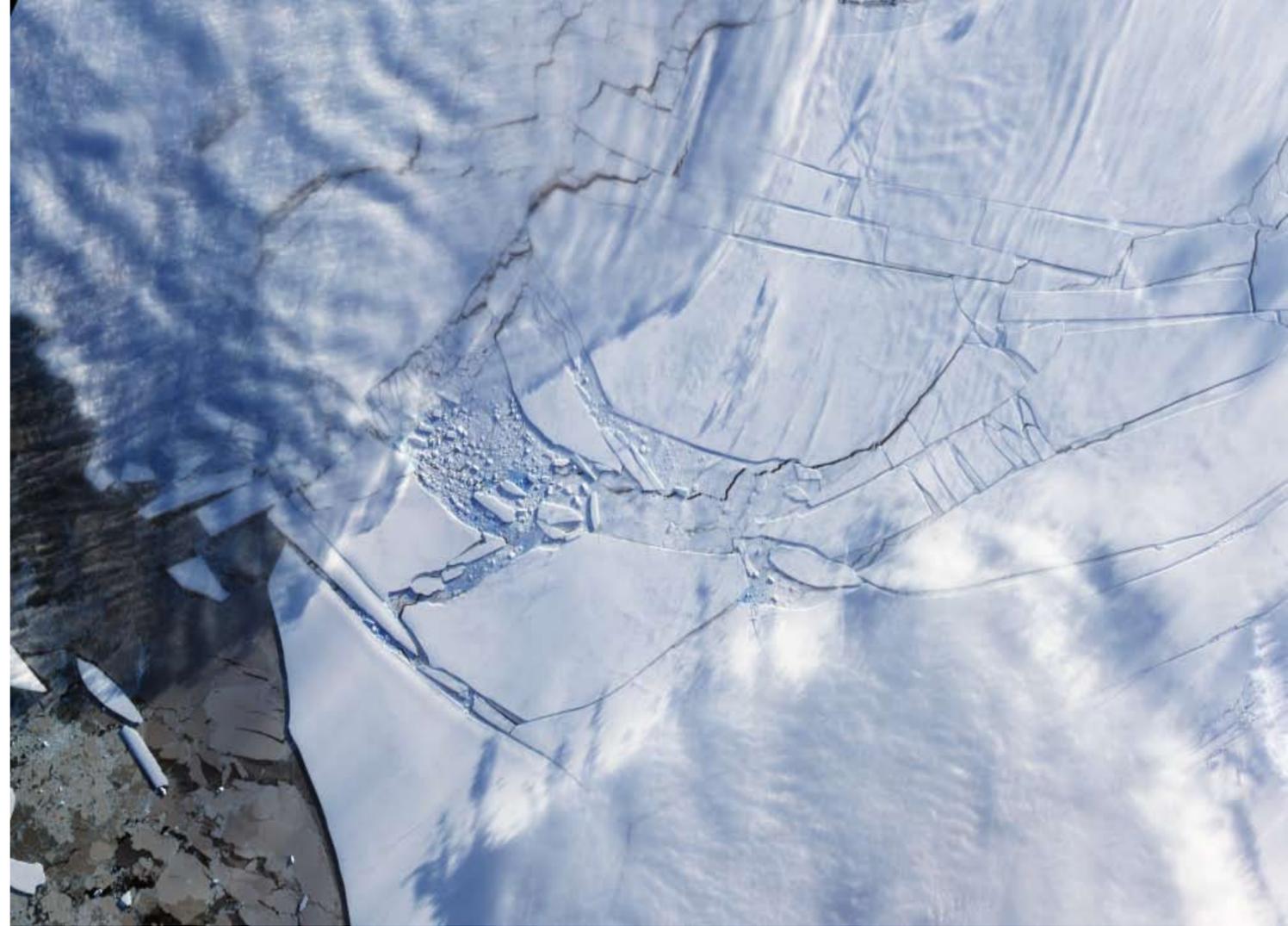


Figura 159: Imagen ASTER adquirida, desde el satélite Terra, el día 12 de abril de 2009 sobre la plataforma de hielo Wilkins, Antártida.

Esta plataforma se encuentra en el oeste de la península Antártica, en la zona más próxima al cono sur americano. Se desarrolla entre las islas Charcot, Latady y Alexander y la península, cubriendo el canal Wilkins, del que toma su nombre. Ocupa una superficie de 16.500 km<sup>2</sup>.

En marzo de 2008 se desprendió, de la plataforma principal, una masa de hielo de 405 km<sup>2</sup>. Los científicos creen que las causas son el incremento de temperatura en 0,5°C por década, debido al calentamiento global, y la ocurrencia de varios terremotos en la dorsal Pacífico-Antártida.

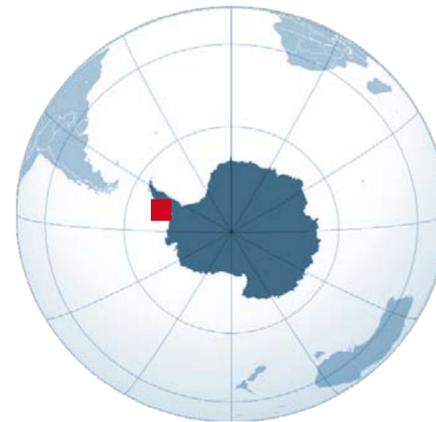
La plataforma está unida a la isla Charcot a través de un estrecho istmo. Entre el 30 y 31 de mayo de 2008, nuevamente se desprendió otro bloque de 160 km<sup>2</sup>. Estos desprendimientos han estrechado el istmo de 6 a 2,7 km. Se estima que, en 2008, la plataforma ha perdido una superficie de hielo de 2000 km<sup>2</sup>.

Debido a las múltiples grietas mostradas en la superficie y al riesgo inminente de ruptura, la plataforma Wilkins ha sido sometida, en el último año, a un seguimiento diario por parte de los satélites de las agencias espaciales europea y norteamericana, Envisat, Terra y Aqua. El 5 de abril de 2009, la ESA confirmó la ruptura definitiva de la plataforma, quedando desconectados sus 14.000 km<sup>2</sup> de tierra firme.

En la imagen se aprecian, claramente, las líneas de ruptura y grietas y el color oscuro del océano, a través de ellas. Asimismo, se observan los grandes bloques y icebergs que se han desprendido de la plataforma principal.

Cortesía de Jesse Allen.

NASA/GSFC/MET/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team.



## 6. IMPACTOS AMBIENTALES

Aunque la expresión impacto ambiental está discutida por los expertos y muchos de ellos no la consideran muy afortunada, el hecho es que su uso se ha extendido en el lenguaje popular e, incluso, en la literatura científica. Habitualmente, se entiende por impacto ambiental los efectos producidos por una acción humana determinada, o una combinación de ellas, sobre el medio ambiente. Aunque los efectos pueden ser positivos, por norma general, el impacto ambiental suele tener una connotación peyorativa, considerándose principalmente los efectos adversos que las actividades humanas ocasionan.

El hombre transforma continuamente el medio natural. Cuanto mayor es el grado de tecnificación de una sociedad más grande es su capacidad para modificar los ecosistemas. En ocasiones, las infraestructuras construidas suponen un impulso sobre el desarrollo socioeconómico de un territorio determinado. Es el caso de numerosas infraestructuras hidráulicas, tales como grandes embalses o canales, a través de los cuales se trasvasa agua de una cuenca hidrográfica a otra. Otras veces es la presencia de un acuífero subterráneo el que permite transformar amplias zonas áridas en productivos campos de cultivos regados mediante pivots, aspersores o empleando sistemas de riego por goteo.

Sin embargo, otras veces el hombre provoca profundas transformaciones sobre los ecosistemas tradicionales que, en ocasiones, se vuelven

irreversibles o adquieren una difícil reversibilidad. Es el caso de algunos cambios en los sistemas agrícolas tradicionales, de la deforestación de los bosques que favorece el avance de la frontera agrícola, de los incendios forestales asociados a la actividad humana, de la desecación de grandes masas de agua y de humedales que soportan una rica diversidad biológica, de la eutrofización de lagos, embalses y de otras masas de agua, del avance imparable de las zonas urbanas sobre áreas de gran interés ecológico o de elevada vulnerabilidad, de los frecuentes vertidos de hidrocarburos al mar debidos a accidentes o a la negligencia de las tripulaciones que limpian los fondos de los buques, de forma ilegal, en los mares, de las actividades mineras que dejan una huella evidente sobre el paisaje, especialmente cuando se trata de una minería practicada a cielo abierto, de la construcción de grandes infraestructuras viarias o hidráulicas y del deshielo y retroceso de los glaciares y de las plataformas de hielo como consecuencia del cambio climático.

Algunos de estos impactos producidos por el hombre han sido seleccionados para ser presentados en este capítulo sexto. Gracias a su visión global, la teledetección espacial es capaz de registrar transformaciones que se producen de forma extensa y difusa en el territorio.

Asimismo, el carácter multitemporal de esta técnica, permite detectar cambios producidos a lo largo de un periodo determinado, posibilitando un seguimiento dinámico en el espacio y en el tiempo.

### 6.1. MODELOS DE OCUPACIÓN DEL SUELO EN EL MUNDO

Tradicionalmente, cada sociedad se ha caracterizado por una relación diferente con su medio natural. Unas han sabido administrar mejor sus recursos naturales mientras que otras, menos preocupadas por el efecto de sus actividades o, quizás, con mayor capacidad tecnológica, han transformado profundamente sus paisajes naturales, dando lugar a paisajes antropizados y, en muchos casos, degradados.

Territorial y paisajísticamente, las diferentes formas de interactuar con el medio ambiente han dado lugar a distintos modelos de ocupación del suelo. En algunos casos, entre comunidades vecinas, las diferencias entre estos modelos son patentes, evidenciando un claro y perceptible efecto frontera. La revolución tecnológica de los últimos siglos ha supuesto un cambio de escala en la transformación de los sistemas de ocupación del suelo. Los impactos ambientales producidos han dejado de ser locales para convertirse en globales. Ahora tienen una importancia planetaria.

Numerosos son los programas y proyectos internacionales que se preocupan por este tema. IGBP (*International Geosphere and Biosphere Program*), LUCC (*Land Use & Cover Change*) y LULCC (*Land Use & Land Cover Change*) son algunos de ellos. CORINE (*CoORdination sur l'INformation Environnemental*) o SIOSE (*Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España*) son referencias obligadas a nivel europeo y nacional.

Todos ellos emplean, de forma principal, imágenes de satélite para hacer un seguimiento multitemporal de la ocupación del suelo y de sus patrones correspondientes en diferentes zonas del mundo.

En consecuencia, las agencias espaciales están plenamente comprometidas en este tema. La NASA, por ejemplo, ha producido una serie temporal de mapas globales de los patrones de uso del suelo entre 1700 y 1990. Hasta fechas recientes, las zonas más pobres del mundo y las menos ocupadas apenas han experimentado cambios. Sin embargo, en la actualidad, los cambios afectan a todo el planeta.

Foley *et al.*, 2005, se refieren a estos cambios como uno de los mayores problemas ambientales de la actualidad. Algunos expertos apuntan a que las transformaciones en los usos del suelo rivalizan con los gases de efecto invernadero como causa del cambio climático. Cada año millones de hectáreas de ecosistemas naturales se transforman. La conversión masiva de los paisajes naturales puede socavar la capacidad de los ecosistemas para sostener una población creciente.



Imagen 160: Vista del valle del río Mayor (Cuenca, España), que vierte sus aguas al embalse de Buendía. El fondo del valle está ocupado por cultivos de secano mientras que los taludes de las alcarrias, tradicionalmente han estado ocupadas por plantas aromáticas, muchas de ellas especies endémicas.

Fuente: JMV

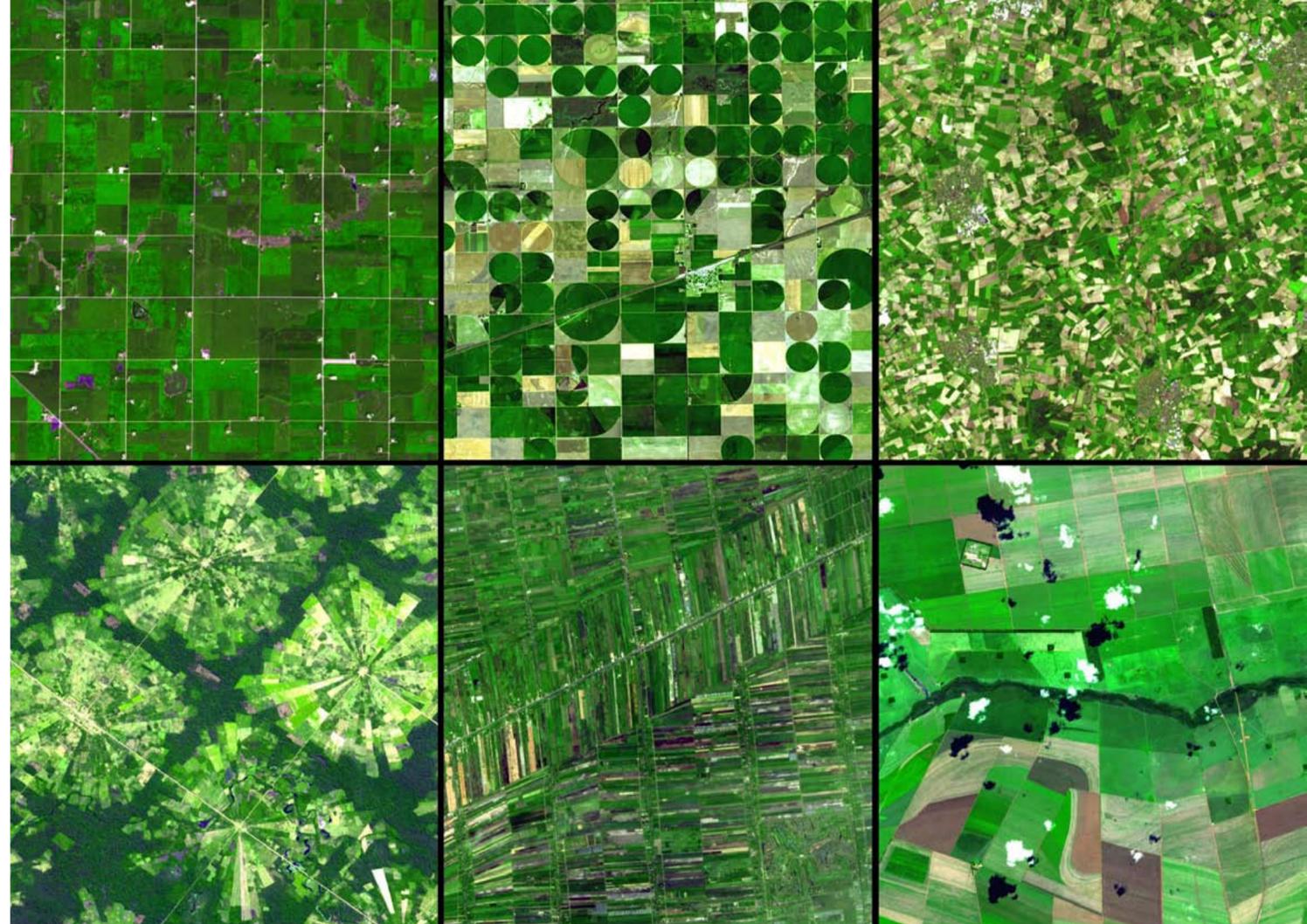


Figura 161: Mosaico de seis subescenas ASTER que muestran distintos patrones de ocupación de suelos agrícolas en el mundo. Cada subescena cubre un área de 10,5 x 12 km. de lado.

Tradicionalmente, los paisajes agrícolas eran el resultado de una combinación de factores entre los que estaban involucrados la topografía, el tipo de suelo, el tipo de cultivo, la precipitación anual de la zona y la tradición cultural. En la actualidad, sobreviven paisajes culturales milenarios junto a otros que son fruto de las transformaciones recientes en las que uno de los factores se ha impuesto sobre los demás o ha sido compensado por otros.

En la imagen superior izquierda se aprecia un paisaje agrícola de Minnesota, Estados Unidos. La forma y tamaño regular de las parcelas es una herencia de comienzos del s. XIX. Se fundamenta en las técnicas de la época para la mecanización de los cultivos. En la escena central superior (Kansas, Estados Unidos) se observa el patrón geométrico de los campos regados por aspersión mediante pivots de avance circular. La longitud de los sistemas de riego determinan el radio de las parcelas circulares y, en consecuencia, su superficie. En la imagen superior derecha (noroeste de Alemania), se ilustra un ejemplo típico de Europa Occidental en el que el patrón irregular de las parcelas es una herencia de la Edad Media. Existe una gran heterogeneidad en cuanto al tamaño de las parcelas aunque predominan las pequeñas parcelas, fruto quizás de las pequeñas dimensiones de los países europeos y de la presión demográfica, si se compara con la de otros continentes de reciente poblamiento.

En la imagen inferior izquierda (Santa Cruz, Bolivia) se observa uno de los típicos patrones agrícolas, con formas radioconcéntricas, resultantes de la deforestación del bosque tropical y de un esquema concreto de colonización, apoyado en los núcleos de poblamiento que son los ejes centrales de cada sector. Los sectores agrícolas (en colores amarillos y verdes claros) contrastan claramente con las manchas forestales (verdes oscuras y texturas gruesas) que quedan entre unas comunidades y otras (cada una de las unidades radioconcéntricas). En el siguiente epígrafe, en las páginas 118 y 119 se proporcionan más detalles sobre este patrón. En la imagen inferior central (Bangkok, Tailandia) se observa un patrón agrícola regular formado por pequeños y alargados campos de arroz separados por centenarios canales de riego. Los campos de arroz se agrupan en lotes transversales entre sí. Por último, en la imagen inferior derecha se contempla un patrón agrícola típico en la ecorregión denominada Cerrado, en el centro-meridional de Brasil. La gran diversidad biogeográfica de esta área está amenazada por los monocultivos, especialmente, de soja. El bajo precio de las parcelas y la topografía de esta vasta llanura han facilitado la presencia de grandes explotaciones agrícolas formadas por grandes y regulares parcelas.

Fuente: NASA/GSFC/MET/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team

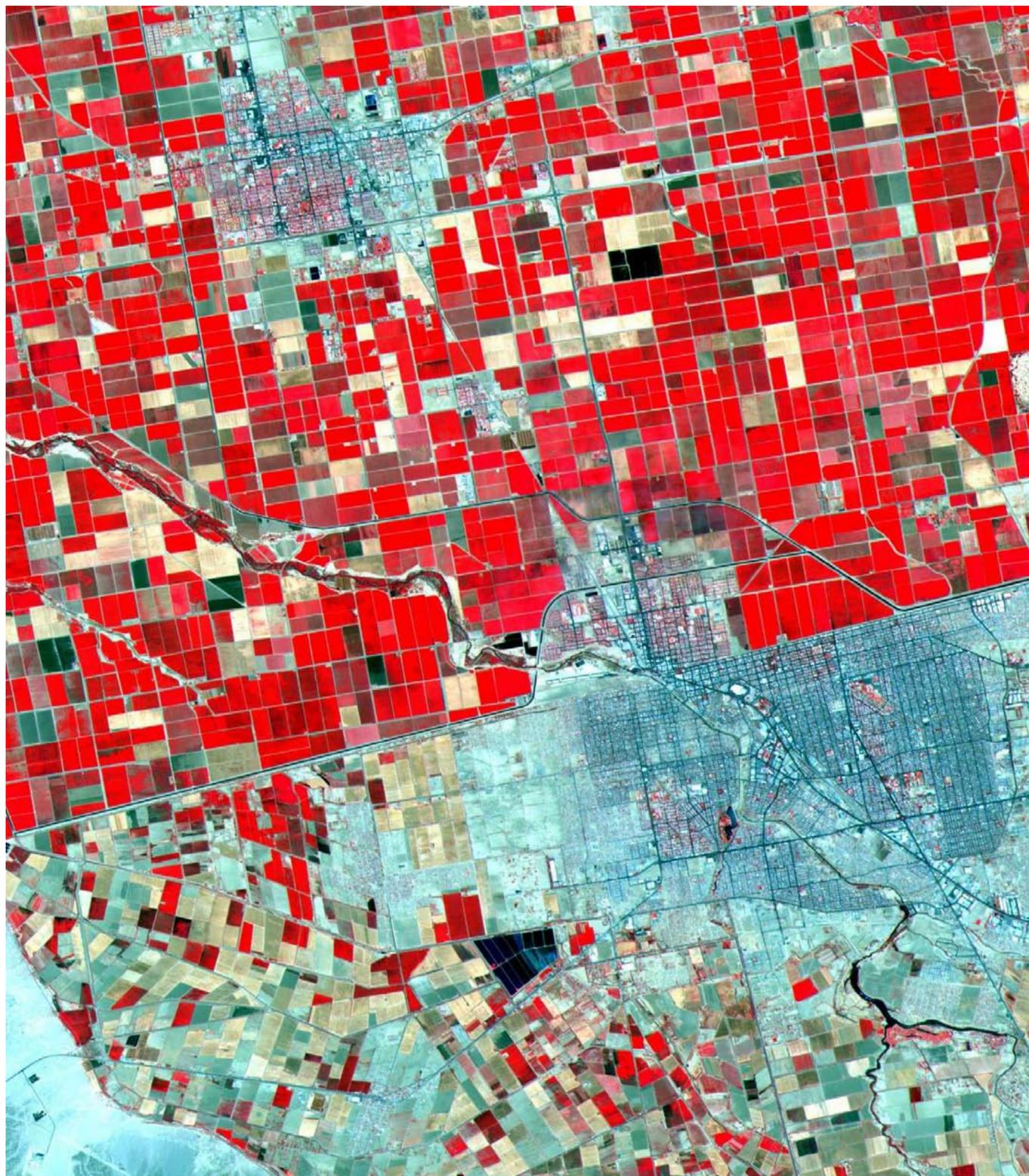


Figura 162: Imagen ASTER, en falso color convencional, adquirida el 12 de junio de 2000 sobre la frontera entre los estados de California (Estados Unidos) y Baja California (México). En la esquina noroeste se observa la ciudad de El Centro (California) y en el centro-oriental de la misma se ubica la ciudad mejicana de Mexicali-Calexico. Aunque las fronteras geopolíticas entre países suelen ser líneas imaginarias, en ocasiones, debido a accidentes geográficos o a un modelo de ocupación del suelo diferente, estas fronteras pueden ser observadas con nitidez, incluso desde el espacio. En este ejemplo, el efecto frontera está realizado visualmente como consecuencia de una agricultura de regadío muy intensiva en el territorio estadounidense (colores rojos y formas regulares) frente a una agricultura más tradicional en el lado mexicano, en el que predominan los cultivos de secano y las parcelas descubiertas (colores blancos y azules, texturas finas y un parcelario más desordenado). La agricultura de regadío es menos extensa.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 163 (arriba): Fotografía captada por un astronauta, desde la Estación Espacial Internacional, el día 7 de febrero de 2004 sobre el Campo de Dalías y El Ejido, en la provincia de Almería, España.

Sobre esta planicie litoral, situada al suroeste de la ciudad de Almería, entre la Sierra de Gádor, al norte y el mar Mediterráneo, al sur, en la que apenas se registran 200 mm. anuales de precipitación, se ha producido una de las más intensivas transformaciones del paisaje agrícola del sur de España. Desde los años 80 se ha instalado una agricultura intensiva bajo los plásticos de los invernaderos en una extensión de más de 20.000 hectáreas. Se trata de cultivos tempranos, de alto valor añadido, que compiten con los de otros continentes. Generan una actividad económica valorada en algo más de 1 billón de euros al año. Esta agricultura intensiva demanda una gran cantidad de aportes hídricos que es satisfecha por el acuífero subterráneo sobre el que se asienta. Los incensantes bombeos han hecho descender los niveles piezométricos del acuífero, provocando la intrusión de agua marina y un proceso de salinización del manto de agua subterránea. En la imagen se aprecia el intenso brillo de los plásticos que forman una mancha discontinua de color blanco.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 164 (abajo): Vista panorámica del Campo de Dalías, en la provincia de Almería, España, desde la Sierra de Gádor. Se observa, con claridad, la extensión que ocupan los invernaderos.

Fuente: JPG



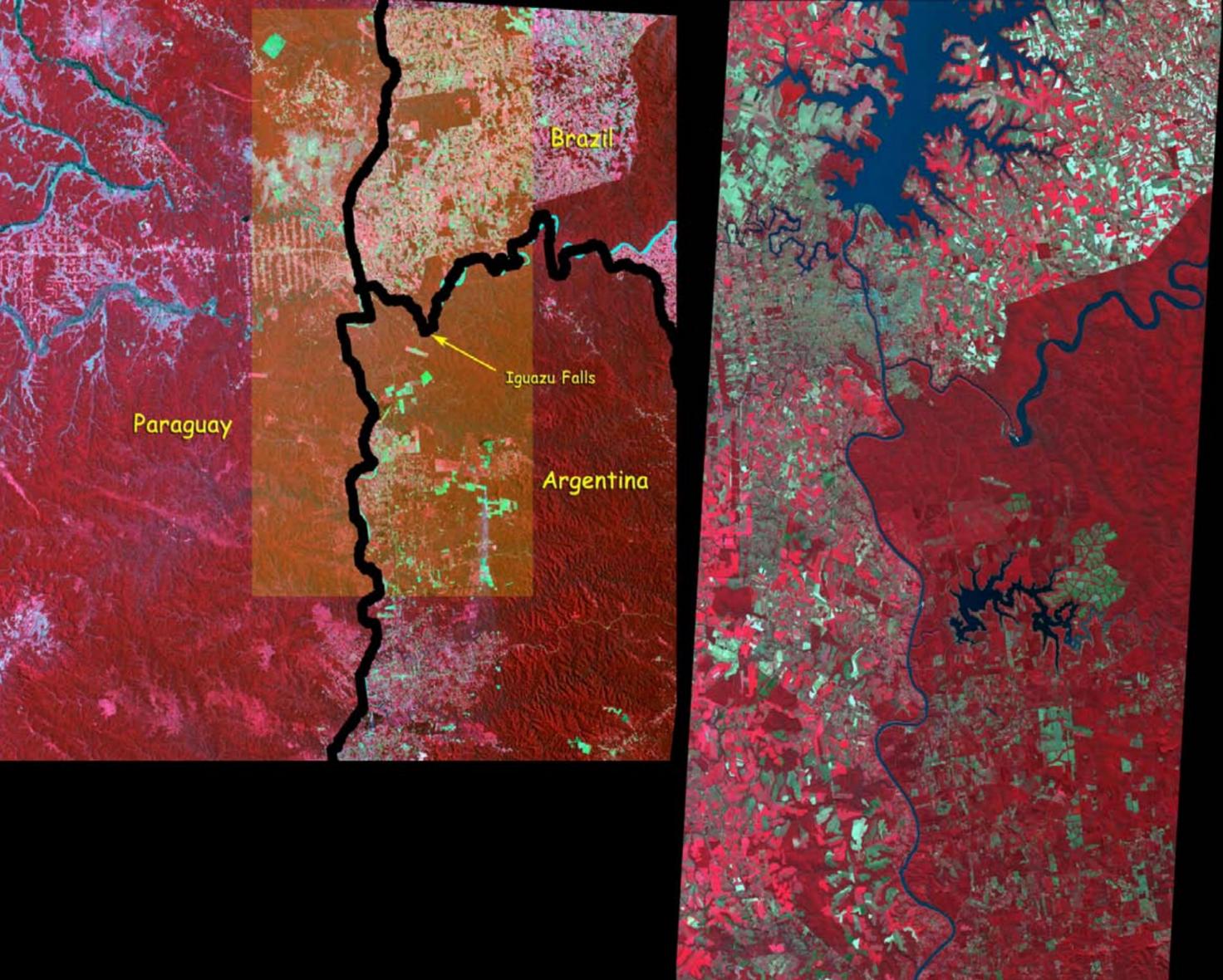


Figura 165: Conjunto de dos imágenes de satélite sobre las cataratas de Iguazú y la frontera entre Argentina, Brasil y Paraguay. La imagen de la izquierda ha sido adquirida, en 1973, por el sensor MSS a bordo de Landsat. La imagen de la derecha ha sido captada, en 2001, por el sensor ASTER. En la imagen de la izquierda se ha dibujado un rectángulo, de color naranja, para representar el sector común registrado desde los dos satélites.

En el sector centro-oriental se ubican las cataratas de Iguazú, sobre el río del mismo nombre, poco antes de su confluencia con el río Paraná que recorre la imagen en sentido norte-sur. Si se comparan, visualmente, ambas imágenes se puede apreciar que las transformaciones de los usos del suelo, entre 1973 y 2001, han sido muy desiguales en los tres países analizados. Nuevamente, el efecto frontera se hace patente desde el espacio.

En Argentina y en Brasil, la foz de Iguazú y su área de influencia se han protegido bajo la figura de Parque Nacional, a ambos lados de la frontera. En Argentina, los cambios han sido moderados. Se conserva razonablemente el bosque tropical original. En Brasil, se evidencia una notable diferencia entre el territorio incluido en el parque nacional y el que se encuentra fuera de él, mucho más presionado y transformado. Paraguay ha optado por un modelo de ocupación del territorio más permisivo, de forma que las masas de bosque tropical han sido ocupadas, masivamente, por tierras de cultivo. En la imagen Landsat ya se observa el comienzo del patrón típico de la deforestación en forma de espina de pez. Además, el gran embalse construido sobre el Paraná, en la frontera brasileño-paraguaya, es un cambio muy apreciable.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team.

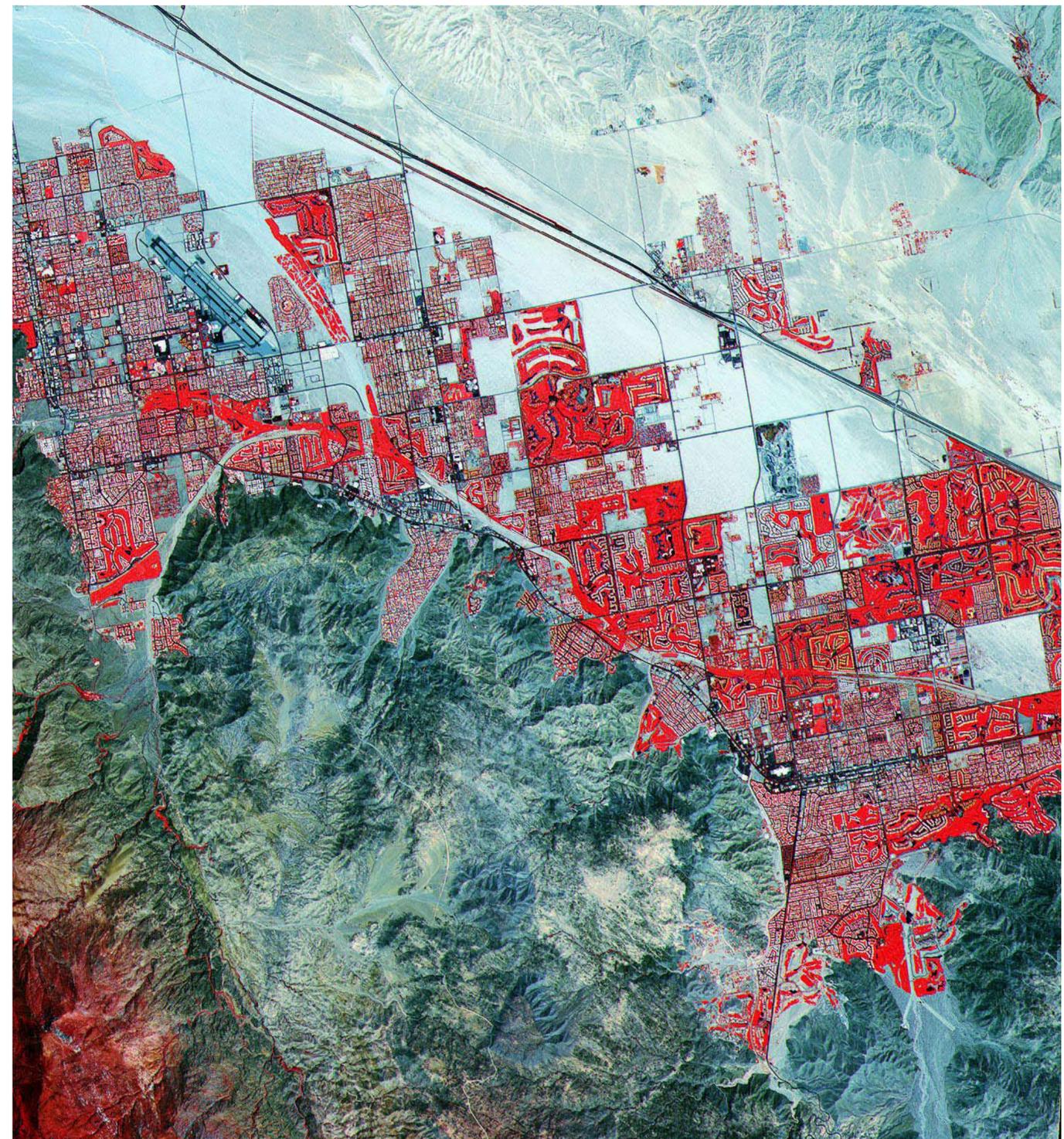


Figura 166: Imagen ASTER adquirida el 10 de mayo de 2000 sobre las ciudades de Palm Springs, al noroeste de la imagen, Cathedral City, en el centro, y Palm Desert, al sureste, localizadas a 160 km. al este de Los Ángeles, California.

Se trata de un falso color convencional (infrarrojo cercano, rojo, verde-RGB), de modo que la vegetación se observa en color rojo, los suelos desprovistos de cobertura vegetal se aprecian en una variedad cromática de blancos y azules.

Estas ciudades están ocupadas por áreas residenciales de alto standing organizadas en cuadrículas trazadas regularmente. Entre las viviendas proliferan un buen número de campos de golf que tienen un color rojo intenso como consecuencia del vigor vegetal de los céspedes de los greens que rodean a cada hoyo. Además, se aprecia bien el típico patrón de, lo que llaman los especialistas, espaguetti, formado por las manchas alargadas y estrechas, de color rojo, de las calles que unen cada hoyo.

Fuente: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team



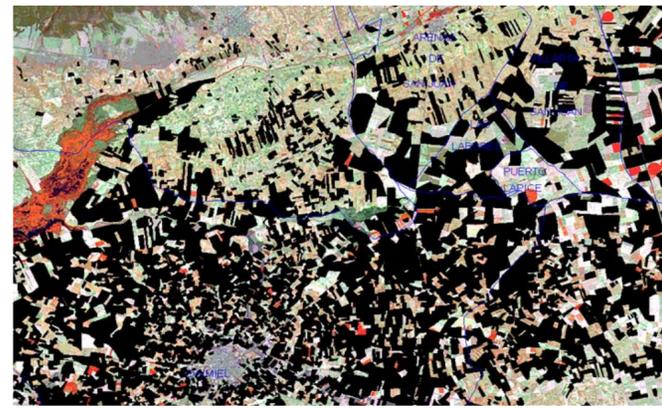
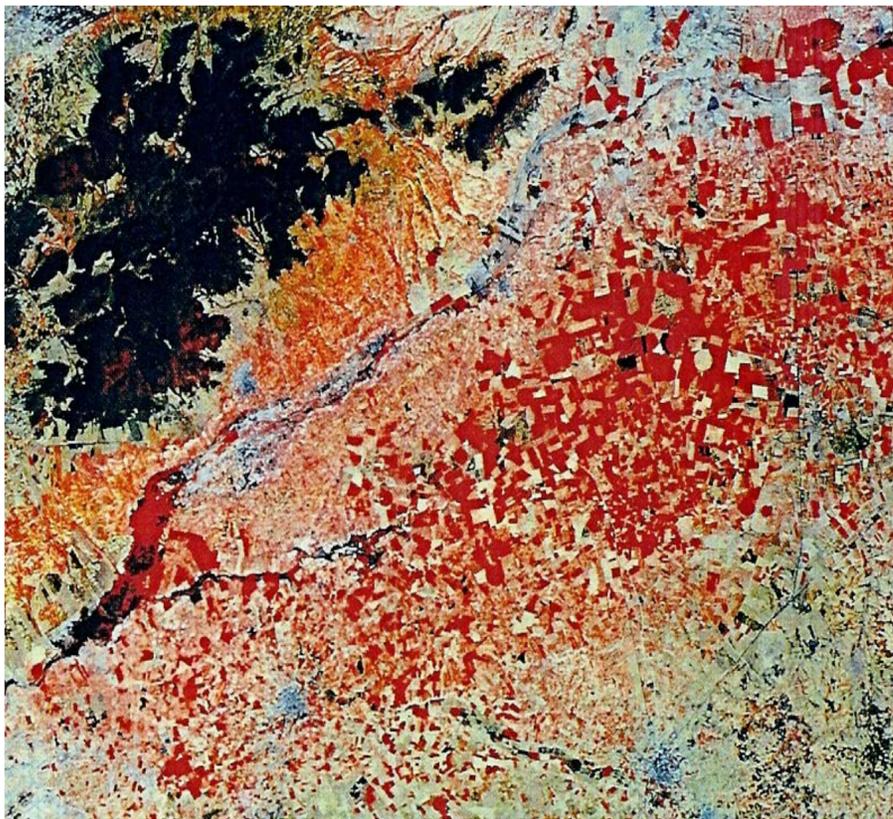


Figura 170: Imagen Landsat, en falso color mejorado (TM453-RGB), sobre el entorno del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, España. En la parte izquierda de la imagen se observa una mancha roja que se corresponde con la vegetación palustre del extremo norte del parque nacional. En su interior se aprecian las manchas negras características de las tablas, las superficies encharcadas.

La Teledetección espacial se ha utilizado para establecer mecanismos de control de los riegos. Con la ayuda de las funcionalidades de un SIG, a la imagen se le han superpuesto las parcelas (en color negro) que disponían de concesión administrativa para poder regar, en ese momento. Las parcelas que aparecen en color rojo son áreas que se están regando de forma ilegal.  
Fuente: Montesinos y Bea, 2008



Figura 167 (arriba a la izquierda): Imagen Landsat TM en falso color convencional (TM432-RGB), adquirida en agosto de 1988 sobre el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel y sobre el acuífero 23, en La Mancha Occidental. En la esquina suroeste de la imagen, se observa la vegetación palustre en color rojo, en la confluencia de los ríos Gigüela y Guadiana. Entre los carrizales se aprecia las láminas de agua, en color negro, que inundan el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, humedal que alberga una importante población de aves. En color rojo intenso, textura fina y formas geométricas (cuadradas, rectangulares y circulares) se aprecia la gran extensión de los cultivos herbáceos y leñosos en regadío que alternan con los cultivos de secano (en colores blanco y verdes claros) sobre el gran acuífero 23, que cubre una extensión de 5.500 km<sup>2</sup>. Las aguas subterráneas han sido los recursos que han propiciado la transformación de una agricultura tradicional de secano en otra más intensiva de regadío. El escaso control por parte de las autoridades administrativas ha desencadenado un desenfrenado incremento de las extracciones superando, continuamente, las recargas naturales del acuífero. Los balances hídricos negativos acumulados motivaron, en 1987, la declaración de acuífero sobreexplotado. Desde 1987, se han implantado distintas medidas y planes (Plan de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, Plan de Compensaciones de Rentas, Plan Especial del Alto Guadiana) para recuperar los niveles del acuífero y para incrementar la superficie inundada de Las Tablas de Daimiel. Sin embargo, estos planes han tenido desigual éxito como consecuencia de no afrontar este problema ambiental desde su base.

Figura 168 (centro a la izquierda): Noria tradicional en La Mancha Occidental, España. Mediante un tiro animal, se extraían las aguas subálveas del acuífero 23. El balance tradicional entre las extracciones y las recargas naturales era positivo. La superficie regada era muy escasa.

Fuente: JAC

Figura 169 (centro a la derecha): Los pivots son uno de los principales sistemas de riego empleados, actualmente, en La Mancha Occidental. Según las investigaciones realizadas en el marco del proyecto EFEDA, el descenso de los niveles piezométricos del acuífero 23, acumulados entre 1974 y 1987, ha llegado a los 35 m. en el sector central. Existen miles de pozos ilegales.

Fuente: JMV

En algunas regiones semiáridas, la agricultura tradicional ha sido sustituida por otra más rentable pero poco adaptada a las condiciones ambientales del lugar. En un plazo temporal dado, estos modelos alóctonos se colapsan originando degradación ambiental y problemas socioeconómicos debido a su insostenibilidad. Este es el caso del ámbito geográfico de La Mancha Occidental y de Las Tablas de Daimiel (centro-sur de España).

La extensión del viñedo manchego en regadío ha pasado de 5.000 ha, en 1977, a más de 25.000 ha en 1990. Desde 1982, se ha producido, también, un fuerte incremento de la superficie dedicada a cultivos herbáceos en regadío. En general, la extensión de los herbáceos en regadío se mantiene, desde 1981, por encima de las 25.000 ha, superando las 49.000 ha en 1990. En la figura 167 se muestra, en color rojo intenso, la distribución de los cultivos en regadío que salpica toda la llanura manchega, intercalados entre los tradicionales cultivos de secano, en color blanco. La vegetación palustre también se observa en color rojo en la esquina suroeste de la imagen, en la confluencia de los ríos Gigüela y Guadiana. Entre los carrizales se aprecia las láminas de agua, en color negro, que inundan el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, humedal que alberga una importante población de aves. Asimismo, se registra un importante aumento de los cultivos forrajeros en las últimas décadas, durante las cuales se ha duplicado su extensión. Es la alfalfa la que destaca en la región, pasando de más de 6.000 ha, en 1982, a cerca de 12.000 en 1983.

El incremento de la superficie regada en la región ha provocado un aumento del volumen de agua extraída del acuífero. Desde 1977 se han superado los recursos renovables del acuífero (260 hm<sup>3</sup>) hasta duplicarlos, a mediados de los años 80. Esta sobreexplotación acumulada del acuífero, resultado de los cambios de usos del suelo, ha propiciado la declaración definitiva de sobreexplotación del acuífero.

La consecuencia directa del proceso de explotación de los recursos hídricos subterráneos ha sido el descenso de la piezometría del acuífero 23 (figura 170). Desde 1974 a 1994 se ha producido un descenso medio total de 22 m en todo el acuífero, si bien en algunas zonas se superan los 35 m. El efecto socioeconómico inmediato es el encarecimiento de los costes que debe acometer un agricultor a la hora de poner en riego su explotación. Sin embargo, ambientalmente, existen otros efectos más graves (Martínez Vega y Echavarría, 2008).

Desde mediados de los años 90, la Confederación Hidrográfica del Guadiana realiza un seguimiento de la evolución hidrogeológica de La Mancha Occidental a partir de la observación de 21 puntos, distribuidos de forma homogénea por todo el acuífero. Puede decirse que se ha continuado la tendencia al vaciado. Se estima que, entre 1980-2004, podría haberse producido un vaciado de reservas de 2.800 hm<sup>3</sup>.

Entre los impactos más visibles se encuentran la reducción de la superficie inundada de las Tablas de Daimiel, la desecación de lagunas y humedales, la desaparición de los cauces fluviales y de los Ojos del Guadiana y, por último, la pérdida de las turberas del Guadiana.

Al examinar la evolución de la superficie inundada en Las Tablas de Daimiel debemos distinguir dos periodos: uno de régimen natural hasta 1987, durante el cual el ecosistema sufría las consecuencias de la sobreexplotación del acuífero; y un segundo, desde 1988, donde las Tablas de Daimiel están sometidas a variaciones estacionales ocasionadas, por el aporte del agua derivada por el trasvase Tajo-Segura y a su pérdida por evaporación e infiltración. Esta alteración es un hecho

lo suficientemente expresivo de la presión a la que ha sido sometido el acuífero 23 y la búsqueda de soluciones a los problemas ocasionados. La degradación del Parque Nacional ha producido la pérdida y reducción de la fauna y la flora.

Más clara es la desecación de las lagunas del oeste de Daimiel conectadas hidrológicamente con el acuífero. Su transformación en espacios agrícolas nos puede dar una idea de la verdadera magnitud de los daños ecológicos que los cambios de usos del suelo han desencadenado.

Los ríos manchegos que atraviesan la zona (Gigüela, Záncara, Azuer, Jabalón, entre otros) se caracterizan por tener unos caudales más bien escasos, siendo en su mayoría estacionales, ligados a las precipitaciones más o menos abundantes y/o a los sobrantes del acuífero. Los escasos caudales de estos ríos y arroyos se han visto mermados por el intenso aprovechamiento del agro manchego. La duración de los estiajes desde los años 70 se ha hecho cada vez más prolongada en el tiempo, no tanto por la falta de precipitaciones como por el abuso de los recursos hídricos. Los ríos ahora, cuando llevan agua, ceden rápidamente gran parte de su caudal al exhausto acuífero. Singular y dramático es el caso del río Guadiana, el cual con un caudal muy regularizado debido a su origen kárstico, ha desaparecido como consecuencia del descenso de los niveles piezométricos del acuífero 23.

Más espectacular, si cabe, es la desaparición de los Ojos del Guadiana y la destrucción de sus turberas. Su estado actual es una de las expresiones más dramática de las repercusiones ecológicas que ha sufrido esta zona. Lo que antes eran Ojos del Guadiana y humedales de Zuacorta han dejado paso a unas grandes áreas improductivas, perdiendo para siempre su singularidad y valor ecológico. Las turberas, explotadas no hace mucho en los alrededores de Zuacorta, hoy se pierden, pasto del fenómeno de combustión espontánea.

La intensiva aplicación de abonos químicos y productos fitosanitarios está ocasionando fuertes impactos en el medio natural. Es previsible la contaminación difusa del manto freático y preocupante su difícil regeneración. En caso de que, a medio plazo, se recuperen los niveles hídricos se hará patente este problema al entrar en contacto el agua con el suelo, saturado de productos químicos. Para mitigar este problema agro-ambiental los agricultores acogidos al Plan de Compensación de Rentas se comprometieron a reducir la aplicación de estos productos.

Desde el punto de vista socioeconómico, es evidente que estas transformaciones de la campiña manchega han repercutido en un incremento de las rentas agrarias a pesar de las elevadas inversiones que han tenido que realizar los agricultores, y su consiguiente endeudamiento, para proveer una infraestructura de riego particular que no ha sido asumida por la administración.

En resumen, estos cambios estructurales y morfológicos muestran el papel determinante que ha tenido la intensificación de la agricultura en el deterioro ecológico de la Mancha Occidental. Las Tablas de Daimiel sirven como "observatorio" para valorar la situación general que vive el Acuífero 23. En ellas hemos visto plasmado el intenso dinamismo que ha acompañado a esta región española y el paso de un sistema equilibrado o "sostenible" a una agricultura "insostenible" en menos de 50 años. Sin embargo, lo más grave es que el paisaje manchego, en tan corto espacio de tiempo y fruto de la intensa presión sobre el medio, ya da muestras de ese deterioro por la falta de planificación y la mala gestión de los recursos naturales.

## 6.2. PROCESOS DE DEFORESTACIÓN Y AVANCE DE LA FRONTERA AGRÍCOLA

La deforestación es uno de los problemas ambientales más graves que tienen los ecosistemas y, en definitiva, el hombre en la actualidad junto con la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y del aire y el cambio climático. La conservación de los bosques tiene considerables repercusiones en el resto de problemas que tienen los ecosistemas.

Los bosques tienen gran importancia como sumideros de CO<sub>2</sub> en el escenario actual de calentamiento global, como focos de biodiversidad y de conservación de la misma, como forma de proteger los suelos de la erosión, como almacén de agua, etc. Los bosques no solo son un importante sumidero de CO<sub>2</sub> sino que su destrucción que, en muchas ocasiones se produce por quema controlada, produce entre el 20 y el 25% de los gases de efecto invernadero.

La deforestación es uno de los problemas ambientales que más posibilidades de análisis presenta desde el punto de vista de la Teledetección.

El mercado de emisiones de CO<sub>2</sub>, la producción de biocombustibles a gran escala y el aumento de la población y la globalización son fenómenos económicos que plantean interrogantes a medio y largo plazo sobre los bosques y pueden tener repercusiones muy importantes y sin precedentes en los mismos. En otro sentido, la educación, la acción de organismos internacionales y la cooperación con los países menos desarrollados en un mundo globalizado se plantea como una posibilidad de contrarrestar la deforestación.

En 1990, el planeta tenía una superficie forestal de 40.772.900 km<sup>2</sup>. En el año 2000, se reduce a 39.886.100 km<sup>2</sup> y se vuelve a reducir a 39.520.250 km<sup>2</sup> en el año 2005, según datos de la FAO. Según este organismo, la superficie forestal y su variación anual, por continentes, es la siguiente:

Zona Geográfica	Superficie forestal (km <sup>2</sup> )	Tasa de variación anual (%)	
		1990-2000	2000-2005
África	6.354.120	-0,64%	-0,62%
Asia-Pacífico	7.342.430	-0,17%	+0,09%
Asia Oriental		+0,81%	+1,65%
Asia Sudoriental		-1,20%	-1,30%
Asia Central y Occidental	435.880	+0,08%	+0,03%
América del Sur y Centroamérica	8.599.250	-0,46%	-0,51%
América del Norte (incluye Groenlandia)	6.774.640	0,00%	-0,01%
Europa (incluye CEI)	10.013.940	+0,09%	+0,07%
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>39.520.250</b>	<b>-0,22%</b>	<b>-0,18%</b>

Fuente: Situación de los bosques del mundo, 2009, FAO.

Las tasas anuales de deforestación se duplicaron en 52 países tropicales en la década 1980-1990. Así pues, puede concluirse que las grandes reservas forestales del planeta, situadas en África, Sudamérica y el sudeste asiático (Asia sudoriental), están seriamente amenazadas. Por otra parte, la fertilidad de los suelos tropicales es menor que la de los suelos de zonas templadas por lo que la deforestación favorece la rápida erosión de los mismos, impidiendo la acumulación de nutrientes para plantear estrategias agrícolas a largo plazo.

El informe de la FAO también señala una fuerte correlación entre el desarrollo económico de los diferentes países y regiones y el estado de sus bosques. Los países que experimentan un rápido crecimiento económico suelen ejercer gran presión sobre sus recursos naturales y, en concreto, sobre los bosques. Frente a ellos, los países que han alcanzado un alto nivel de desarrollo económico estabilizan la explotación de sus recursos naturales, incluso incrementan, aquellos que pueden, la superficie de sus bosques, mediante políticas de reforestación.

Ahora bien, aún hay lugar para la esperanza, si se comparan las tasas de variación anual mostradas en la tabla anterior con las tasas de la década 1980-1990. A lo largo de ella, Asia-Pacífico perdió el 1,2% de su superficie forestal cada año, América del Sur y Centroamérica perdieron anualmente el 0,8% y África el 0,7%.

La situación en cada una de las regiones del mundo es la siguiente:

En África, la superficie forestal disminuye en todas las zonas del continente y de forma alarmante. Los principales desafíos que tiene el continente africano, en torno a la gestión de los bosques y al proceso de deforestación, son la gran dependencia de los recursos naturales para el desarrollo, que se agrava con el incremento de la población y el escaso control que ejerce el sector público, lo que genera talas ilegales. El aumento de la demanda de servicios ambientales (captura de carbono) plantea una oportunidad única al continente africano.

En Asia-Pacífico (Oceanía), la superficie forestal disminuye en todo el continente hasta el año 2000 y presenta un ligero repunte después de este año, a costa del aumento de superficie forestal en Asia oriental (China, Japón, etc), manteniéndose la deforestación en el resto del continente, especialmente en la zona suroriental (Indonesia, etc). Las perspectivas de futuro son variadas. En los países desarrollados o en vías de desarrollo, las áreas forestales se estabilizan o, incluso, aumentan, mientras que, en los países menos desarrollados, las áreas forestales disminuyen como consecuencia de la expansión de la agricultura. Los países más poblados de la región tienen planteados graves problemas por la falta de tierras que podrían reducir las oportunidades de desarrollo y autosuficiencia.

En Europa, incluida la CEI, el balance es positivo a pesar de que, en los últimos años, en los países de esta última comunidad, ha disminuido la superficie forestal. Los recursos forestales seguirán aumentando por la preocupación de la población por el medio ambiente y por la existencia de un marco normativo e institucional sólido. Las diferencias, en materia forestal, que hay entre la Europa oriental y la Europa occidental tienden a desaparecer, a medida que la primera se iguala económicamente a la segunda.

En América del Sur y Centroamérica, la superficie forestal disminuye de forma importante. Las perspectivas de futuro dependen de los ritmos de diversificación económica y de los cambios en la dependencia de la tierra de los diferentes países. El aumento de la urbanización supondrá el progresivo abandono de la agricultura y la disminución de la deforestación. Algunas zonas dedicadas a la agricultura, a pequeña escala, volverán a convertirse en bosques. Un desafío importante, en algunos países de esta región, para la ordenación sostenible de los bosques es la definición de la tenencia de la tierra. La demanda de servicios ambientales proporcionados por los bosques (captura de carbono) puede ser una interesante oportunidad, aunque ello supondrá una mejora del marco normativo e institucional.

En América del Norte, la superficie forestal disminuye en México, aumenta en EE.UU. y se mantiene en Canadá. El futuro de la superficie forestal en México depende de la velocidad de transición desde la economía agraria a la economía industrial. El interés y preocupación de la población por los bosques es creciente. Numerosas instituciones norteamericanas protagonizan iniciativas de conservación a escala regional y mundial.

En Asia central, la superficie forestal aumenta ligeramente, aunque se trata de la región con menor cantidad de bosques del mundo. La prestación de servicios ambientales (freno de la desertificación, protección de cuencas hidrográficas) puede ser la principal justificación para la actividad forestal.

La crisis económica que experimenta el mundo, desde finales de 2008, ha repercutido en el sector de la vivienda, en el sector financiero y en el empleo pero también ha tenido repercusiones en los bosques. Se ha reducido la demanda de madera y productos forestales y el mercado de servicios ambientales (mercado de emisiones) se hace más inestable y volátil. Igualmente se han reducido las inversiones en ordenación forestal sostenible. Asimismo, la crisis tiene repercusiones en los países

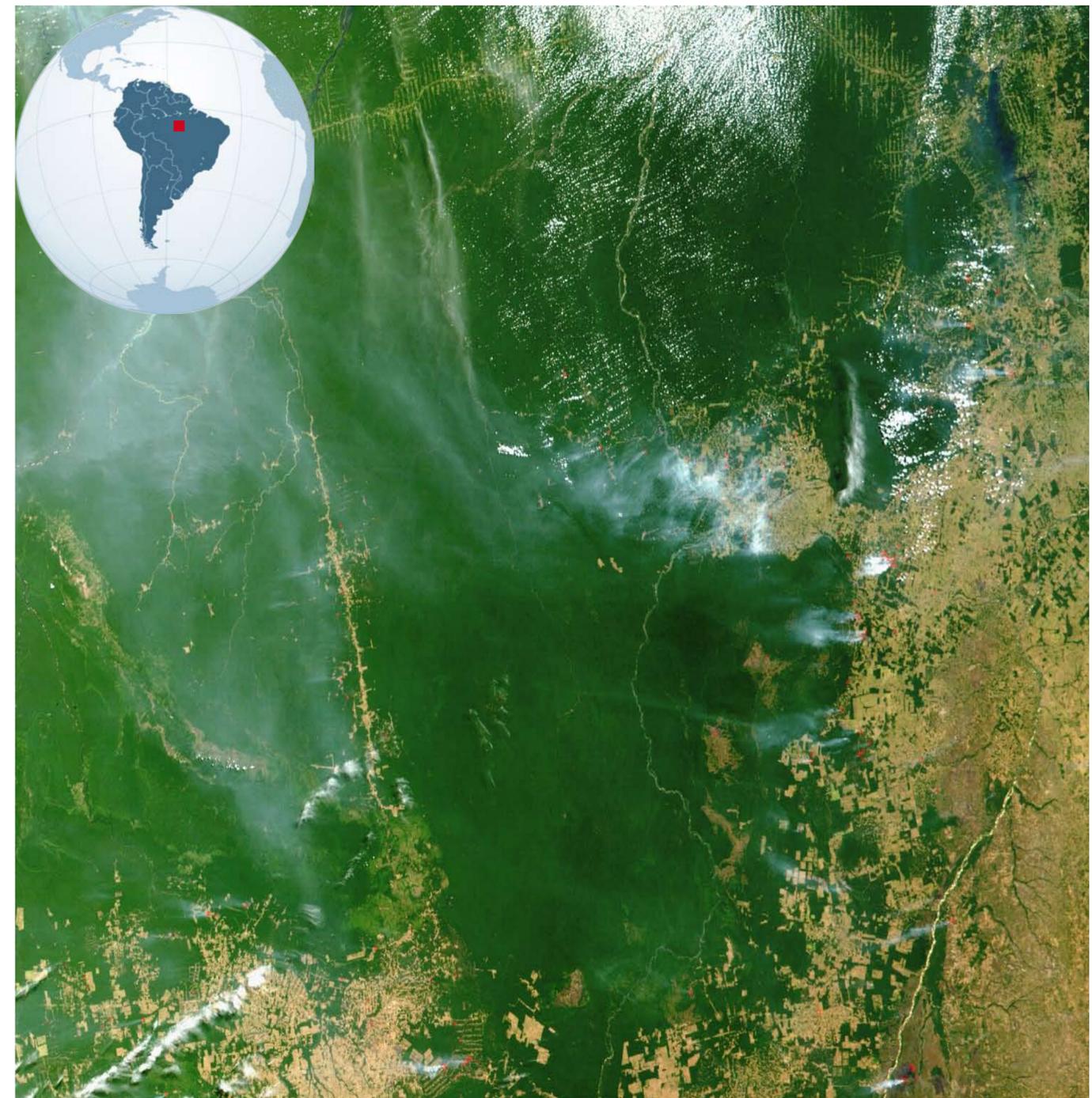


Figura 171: BRASIL, Estado de Pará. Imagen MODIS, en color natural, captada desde la plataforma TERRA el 24 de agosto de 2001. Cortesía de Jacques Desclotres. MODIS Land Rapid Responses, NASA/GSFC.

en vías de desarrollo, cuya economía depende más de sus recursos naturales.

La demanda de madera no volverá fácilmente al máximo de 2005-2006 y la bajada de los precios de los productos agrícolas del segundo semestre de 2008 puede reducir la superficie agraria en beneficio de la superficie forestal. El precio de la soja tiene una correlación directa con la deforestación en la cuenca del Amazonas. En resumen, la crisis económica también puede influir en el aumento de la explotación de madera ilegal como ocurrió en el sudeste asiático en 1997-1998.

No obstante, el sector forestal podría aprovechar el cambio de ciclo económico para reestructurar el mercado, reforestar, promocionar las prácticas sostenibles y las energías renovables.

Los desafíos más importantes que presenta la gestión de los bosques en el momento presente y en el futuro inmediato son los siguientes:

- Desarrollo de la legislación y de la capacidad institucional de protección.
- Participación de las comunidades locales y de organismos internacionales en la gestión de los recursos.
- Lucha contra la tala ilegal y el comercio ilegal de madera.
- Reducción de la demanda de madera y, en su caso, sustitución de la misma por madera certificada.
- Avance y mejora de la accesibilidad al conocimiento científico-técnico (a todo tipo de propietarios) en la gestión de los bosques. Apoyo a la ordenación sostenible de los bosques.
- Fomento del reciclaje, la reforestación y de las energías alternativas.
- Prevención de los incendios forestales que, cada vez, son más frecuentes y severos.
- Control de los perjuicios causados por plagas y especies invasivas.

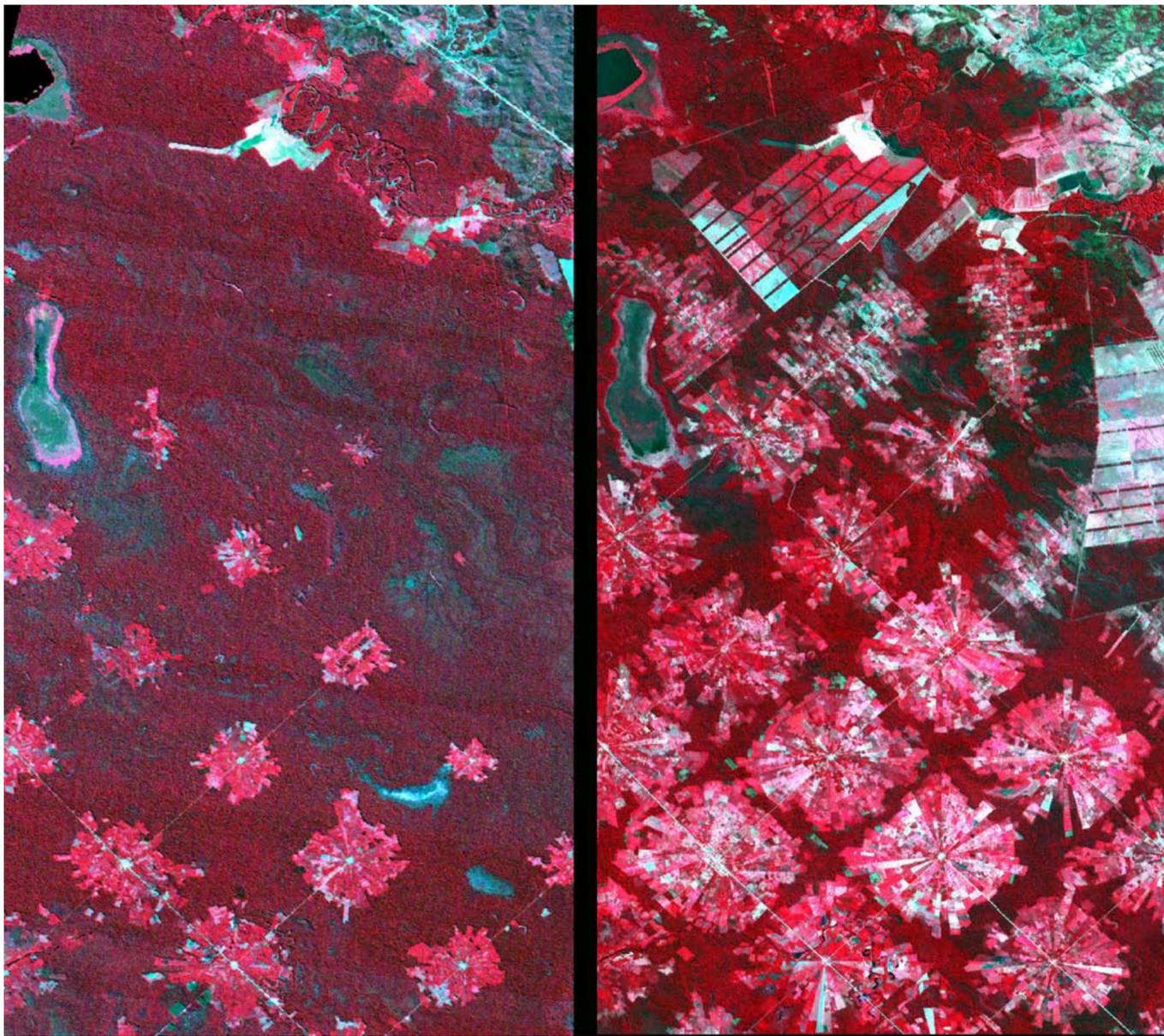


Figura 172: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Izquierda: Imagen LANDSAT en falso color, adquirida el 4 de agosto de 1986. Derecha: Imagen ASTER en falso color, captada el 11 de agosto de 2001.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team

### CASO DE ESTUDIO: BOLIVIA, TIERRAS BAJAS

El conjunto gráfico de arriba ofrece una secuencia temporal de un mismo ecosistema que ilustra, de forma indiscutible, el intenso proceso de deforestación del bosque tropical y el avance continuo de la frontera agrícola, en tan sólo quince años.

A la izquierda, se muestra una imagen Landsat tomada el 4 de agosto de 1986. A la derecha, una imagen Aster, captada el 11 de agosto de 2001, permite, al lector, efectuar una comparación con la anterior y hacerse una idea de la magnitud del proceso. Ambas imágenes están centradas en torno a la coordenada 17° latitud S y 63° longitud O. El área cubierta por cada una de ellas es de 616 km<sup>2</sup>.

Las imágenes muestran la parte oriental de la planicie amazónica de Bolivia, en concreto la zona situada al noreste de Santa Cruz de la Sierra (Bolivia), situada a una altitud de unos 400 m. sobre el nivel del mar, a orillas del río Grande.

La migración de la población, desde el altiplano boliviano, que se está produciendo desde mediados de los años 80 y un amplio desarrollo agrícola han contribuido a la creciente deforestación de esta zona. El proyecto Tierras Bajas del Este (Urioste y Pacheco, 2001) fue financiado, entre 1990 y 1997, por el Banco Mundial con el objetivo de incrementar

la producción agropecuaria. Asimismo, pretendía favorecer la permanencia de las comunidades indígenas en sus territorios tradicionales. La producción agrícola de la zona se centra en la soja. Su cultivo empezó, con más intensidad, a comienzo de los años 70. El posterior aumento de los precios ha retroalimentado la producción agrícola y, por consiguiente, la deforestación.

La imagen Aster muestra dos tipos de patrones de cultivos, claramente diferenciados:

- Agrupaciones radioconcéntricas situadas en torno a una pequeña comunidad que cuenta con iglesia, escuela y café-bar, entre otros equipamientos. La economía de estas comunidades agrícolas se fundamenta en la comercialización de la soja. Desde el centro de la comunidad, se va rozando el bosque en sentido radial. Este patrón forma parte del esquema de ocupación planificado en los asentamientos de San Javier y de La Victoria. Cada agrupación está separada de su vecina unos 5 km.
- Parcelas con forma rectangular, al N y E de la imagen Aster que se dedican, igualmente, a la producción de soja aunque dedicada a la exportación. Las parcelas son más grandes. Los cultivos se financian con préstamos extranjeros. Las líneas más oscuras que separan unas parcelas de otras son protecciones contra el viento ya que los suelos, en esta zona, son finos y proclives a la erosión eólica.



Figura 173: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Fotografía tomada por un astronauta el 16 de abril de 2001, desde la Estación Espacial Internacional (ISS), con una resolución espacial de 6 m.

Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov/>

La superficie de bosque tropical que resta en 2001, entre cada una de las agrupaciones concéntricas, es mucho menor que en 1986. Las imágenes muestran cierta planificación u ordenación en la zona, sobre todo en las agrupaciones radioconcéntricas, a las que, posteriormente, se añaden las explotaciones con forma rectangular.

Bolivia ha perdido una superficie forestal de 270.000 hectáreas en el quinquenio 2000-2005, a un ritmo anual de deforestación del 0,5%. Esta cifra significa que el 6% de la superficie deforestada en toda América Latina y el Caribe en ese mismo periodo se localiza en tierras bolivianas.

Así pues, la deforestación y la reducción del bosque tropical húmedo se produce, igualmente, y a mayor escala, en otros países de Sudamérica como Brasil y en países del sudeste asiático como Indonesia. A continuación, veremos unos ejemplos. Este fenómeno preocupa, especialmente, a la comunidad científica y a los gestores del territorio ya que contribuye, intensamente, a agravar los procesos globales del cambio climático y del efecto invernadero, entre otros.

A pesar de estos datos, desde los años 90 comienza a atisbarse, tímidamente, una corriente, de signo contrario, a la descrita hasta ahora. La ley forestal de Bolivia, de 1996, exige que las explotaciones forestales, incluso aquellas que se encuentran en tierras comunitarias tradicionales, dispongan de un plan de gestión sostenible. Desde entonces, incluidas las comunidades indígenas, los productores de madera comienzan a manifestar interés por los sistemas de certificación, por los mercados internacionales de la madera, las organizaciones no gubernamentales, los planes de gestión y los Sistemas de Información Geográfica. Parece una buena oportunidad y un buen contexto para frenar el proceso intensivo de destrucción del bosque tropical y revertir la tendencia por otra que comience a sustituir el modelo anterior por un sistema de introducción de buenas prácticas en la gestión forestal. Aunque queda mucho camino por recorrer, este cambio de signo resulta alentador para la comunidad indígena Yuquí, entre otras, y para la comunidad internacional, preocupada, en términos globales, por el estado del Medio Ambiente.

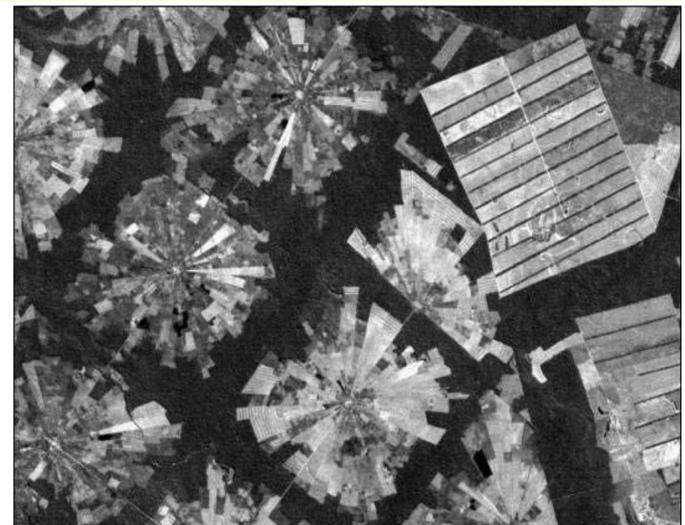


Figura 174: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Vista de una imagen Landsat-7, captada el 8 de enero de 2000, y vistas oblicuas de campo sobre el asentamiento de San Javier. Fuente: [www.visibleearth.nasa.gov/](http://www.visibleearth.nasa.gov/)

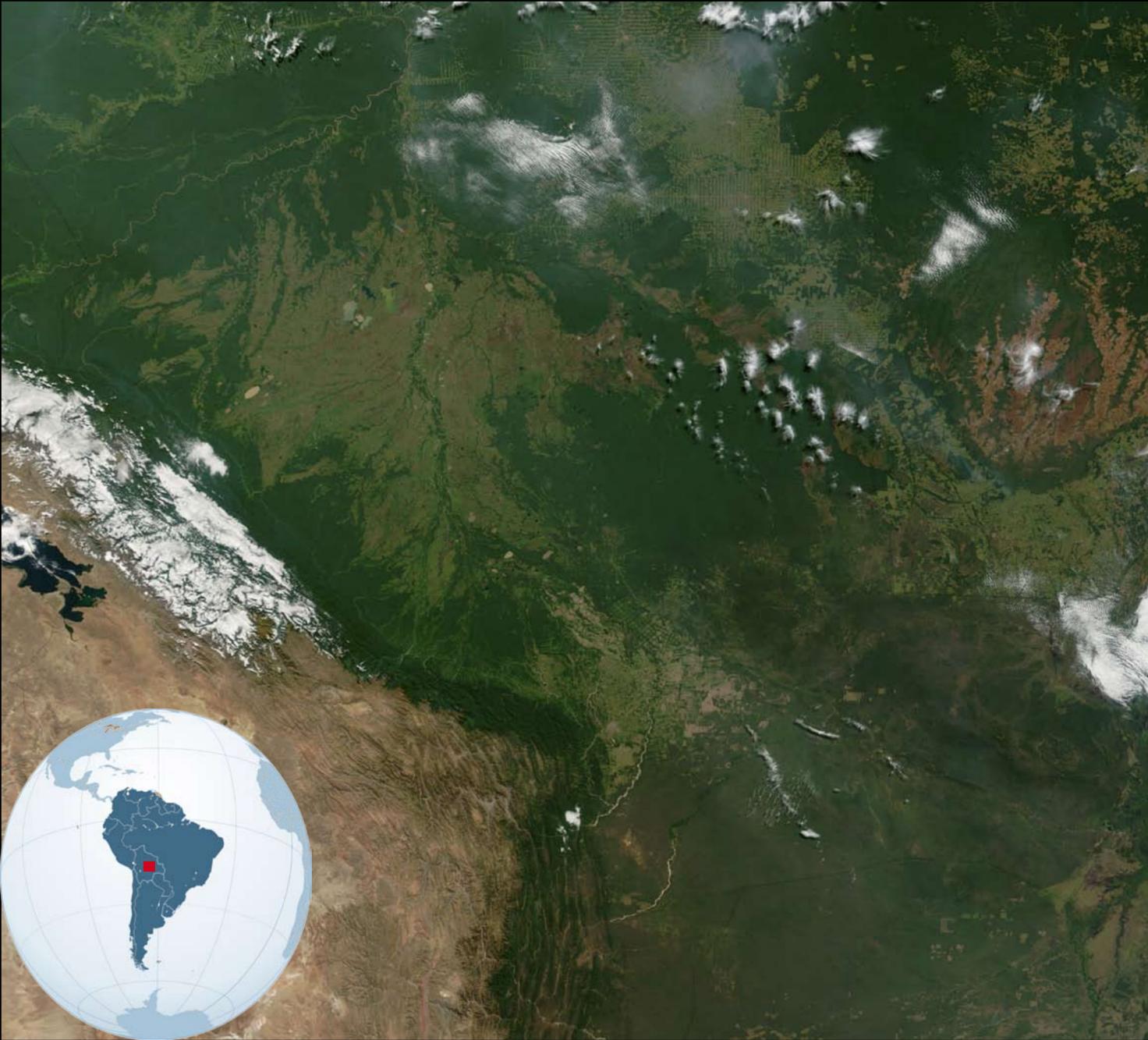


Figura 175: BOLIVIA. Imagen MODIS, en color natural, captada desde la plataforma TERRA el 20 de junio de 2002. Cortesía de Jacques Descloitres. MODIS Land Rapid Responses, NASA/GSFC. [http://visibleearth.nasa.gov/view\\_rec.php?id=3261](http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=3261)

### CASO DE ESTUDIO: BOLIVIA Y PAÍSES VECINOS

La figura 175 muestra la selva amazónica en Bolivia y sur de Brasil (Mato Grosso). Gracias al amplio campo de visión del sensor MODIS, se observa, en la misma imagen, el norte de Paraguay, Argentina, Perú y Chile. La zona está frecuentemente cubierta de nubes por lo que es difícil la captura de imágenes de satélite de una zona tan extensa sin nubes.

La zona árida, al oeste de la imagen, se corresponde con el Altiplano boliviano y la cordillera de los Andes. La zona lacustre que se aprecia en esta zona, en color negro, es el lago Titicaca, en la frontera entre Perú y Bolivia, cerca de la capital boliviana de La Paz. Al sur, igualmente en el Altiplano, se ve otra zona lacustre que se corresponde con el lago Poopo, en las proximidades de la ciudad boliviana de Oruro.

El lago Titicaca es uno de los lagos más grandes de América. Ocupa

una superficie de 8.562 km<sup>2</sup> y es de agua salada. Es el lago navegable situado a mayor altura del mundo (3.800 m) y tiene más de 300 m de profundidad.

El lago Poopo tiene un área de 2.337 km<sup>2</sup>. Su salinidad es superior a la del Titicaca. En la imagen se observa en color verde claro como consecuencia de su alto grado de eutrofización. Ambos lagos están conectados por el río Desaguadero que termina en los saladares de la zona oeste de Bolivia y que nunca ha tenido salida al mar.

El río Amazonas discurre, de oeste a este, por la zona norte, fuera de la imagen.

La imagen presenta tres grandes ecosistemas:

1. El altiplano: es la zona más árida, con grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche y escasas precipitaciones.
2. La selva amazónica: es la zona con más vegetación, con temperaturas más altas y menor variabilidad entre el día y la noche. Dispone de abundantes precipitaciones.

3. Zona mixta de bosques y estepas: se trata de una zona templada y húmeda, con grandes variaciones de temperatura entre estaciones y escasas lluvias.

Bolivia produce diversos productos agrícolas como soja, café, algodón, maíz y caña de azúcar. Adicionalmente, es uno de los principales exportadores de madera tropical.

La parte de la imagen que se corresponde con la selva amazónica presenta varios tonos de verde que reflejan el diferente grado de deforestación.

La estructura de parcelas deforestadas es visible desde el satélite y los patrones más importantes son las siguientes:

1. Zona central de la imagen que se corresponde con Bolivia. Las parcelas tienen forma, aproximadamente, circular y, a su vez, se

agrupan formando una red. Estas parcelas se organizan en torno a fuentes de agua y pequeños núcleos de población. El ecosistema deforestado es la selva.

2. Zona septentrional de la imagen que forma parte del territorio de Brasil. Las parcelas tienen forma cuadrada o rectangular y se agrupan linealmente en torno a vías de comunicación principales y secundarias, ríos, etc. El patrón de crecimiento de la deforestación se conoce como "espina de pez". El ecosistema deforestado es la selva.

3. Zona meridional de la imagen, ocupada por territorios de Bolivia, Argentina, Paraguay y Brasil (Gran Chaco). Las parcelas tienen forma cuadrada o rectangular y se agrupan en torno a núcleos de población, estancias y vías de comunicación. El ecosistema deforestado es una mezcla de bosque y estepa.

Los patrones de deforestación se pueden observar mejor en imágenes de mayor resolución espacial.



Figura 176: BRASIL. Imagen MERIS, captada desde la plataforma europea ENVISAT el 30 de mayo de 2006. La escena se corresponde con un sector de la cuenca del río Xingu, afluente del Amazonas, por la derecha, en el estado de Pará.

Se aprecia el fuerte contraste entre las masas de bosque lluvioso ecuatorial (en verde en la imagen) y las desordenadas parcelas agrícolas, de bordes geométricos y colores ocres y amarillos, ganadas a la pluviosidad. Esta imagen es una muestra más del intenso proceso de deforestación que sufre este país y que amenaza su diversidad biogeográfica.

Fuente: ESA.

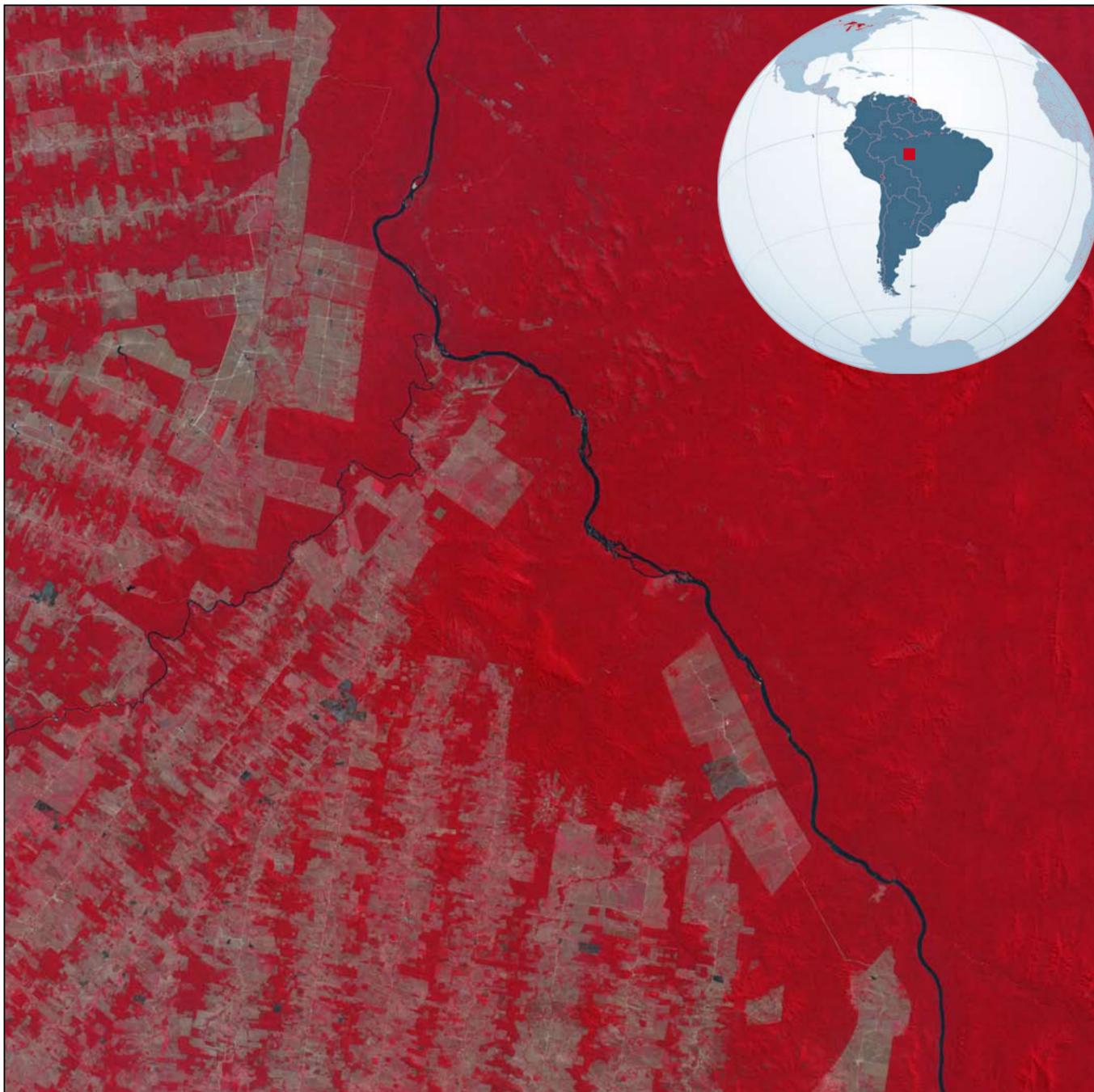


Figura 177: ESTADO DE RONDONIA, BRASIL. Imagen ASTER en falso color, adquirida el 24 de agosto de 2000, en las inmediaciones del río Jiparaná.  
Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team

La figura 177 muestra, claramente, la huella de la deforestación sobre el paisaje del estado de Rondonia (Brasil), a orillas del río Ji-Paraná o río Machado, que desemboca en el río Madeira, afluente, a su vez, del Amazonas. El afluente por la izquierda que también se observa en la imagen es el río Jaru.

La imagen fue obtenida por el sensor ASTER, en agosto de 2000, y cubre un área aproximada de 2500 km<sup>2</sup>. El territorio observado se sitúa al oeste de la ciudad de Ariquemes y al norte de la ciudad de Ji-Paraná.

La imagen combina los canales infrarrojo, rojo y verde, resultando una composición en falso color, por lo que la vegetación se aprecia en color rojo y las zonas desprovistas de vegetación, más áridas, se ven en color marrón y rojo más claro. Las zonas de color gris-negro han sido quemadas recientemente.

El aumento de la deforestación se produce a partir de ejes paralelos entre sí, en torno a un eje principal. Este patrón de crecimiento se denomina "espina de pez" y se produce en torno a vías de comunicación (carreteras), ríos y fronteras administrativas (el río Machado en ocasiones es frontera administrativa con el estado de Mato Grosso). La deforestación disminuye a medida que

nos alejamos de los núcleos de población que, en este caso, están al sur y al oeste.

La deforestación se produce por quema "controlada" o por tala y comercialización de la madera. Las parcelas resultantes se dedican, posteriormente, a la agricultura y a la ganadería.

El Estado construyó, en los años 60, la carretera BR-364 que une Cuiabá (Mato Grosso) con Porto Velho (capital del estado de Rondonia) y que atraviesa el estado de Rondonia, pasando por Ji-Paraná y Ariquemes. La carretera contribuye al desarrollo de la región, que antes estaba ocupada por indígenas, pero a la vez contribuye a la deforestación de la misma.

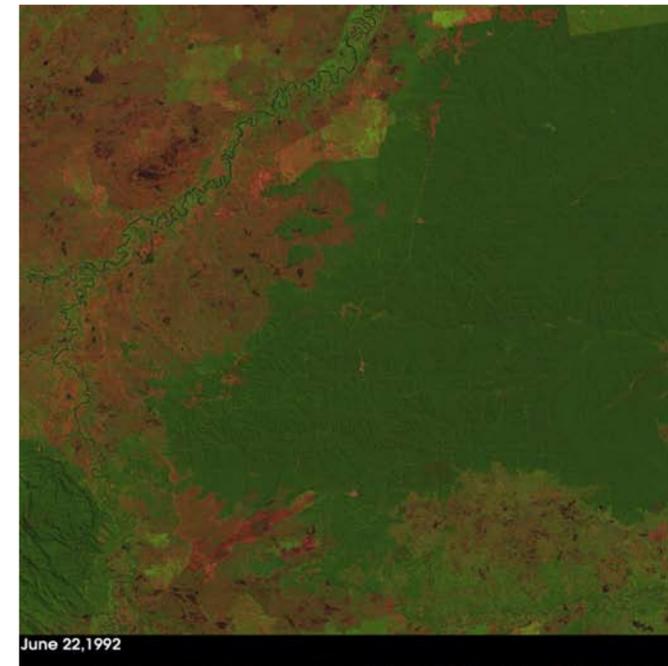
Los grupos ecologistas locales e internacionales y otros grupos de acción social se oponen al asfaltado de las carreteras y a la construcción de otras infraestructuras (presas hidroeléctricas aprobadas por el gobierno regional) para no facilitar el acceso a zonas no taladas y dificultar la deforestación. El IBAMA (Instituto Brasileño de Medio Ambiente) constata, en sus informes, el aumento de las áreas deforestadas en los márgenes de las carreteras fruto de madereras ilegales.

En 1975, la región aún presentaba grandes extensiones de pluvisilva intacta y no es hasta 1989 cuando se aprecia el típico patrón de "espina

de pez". Durante los años 80, en el conjunto de Brasil, la deforestación supuso la eliminación de 15.000 km<sup>2</sup> de bosques al año, lo que equivale a la destrucción anual del 0,31% de su superficie forestal nacional. Para establecer una referencia conviene decir que la superficie geográfica de Brasil es de 8,5 millones de km<sup>2</sup> y su superficie forestal está cercana a los 4,8 millones de km<sup>2</sup>. Aunque proporcionalmente no parezca una superficie muy grande, en términos absolutos sí lo es. Una comparación servirá. Ese ritmo de deforestación significa destruir anualmente masas forestales equivalentes al doble del tamaño de la Comunidad de Madrid.

Rondonia es uno de los estados brasileños cuyo índice de deforestación es más alto, aunque las cifras oficiales de áreas deforestadas no concuerdan, en modo alguno, con la realidad de la zona, puesta de manifiesto en la imagen. Los datos oficiales señalan que la deforestación creció más de un 600% entre 2006 (42 km<sup>2</sup>) y 2007 (295 km<sup>2</sup>), afectando, sobre todo, a la zona del estado que limita con Bolivia (al sur de la imagen). Los datos oficiales y las imágenes de satélite reflejan que Rondonia está desplazando a Mato Grosso en el primer puesto de los índices de deforestación de Brasil. El principal problema de esta devastación, según la directora del IBAMA, es que "las personas actúan con la idea de que la tierra no es de nadie". En resumen, la deforestación se hace evidente en las imágenes de satélite obtenidas con pocos meses de diferencia.

**CASO DE ESTUDIO:  
SUMATRA, INDONESIA**



La secuencia de imágenes expresa gráficamente el proceso de deforestación que sufre Indonesia y, especialmente, la isla de Sumatra. En 1992, el cuadrante nororiental de la imagen se encontraba cubierto por un espeso bosque tropical que se observa en color verde oscuro. Sin embargo, nueve años después, se han abierto grandes claros en este sector. Las manchas rojas y ocres son tierras bajas donde se han producido las talas masivas. En la vecina provincia de Riau, al norte, han sido deforestados 4,2 millones de hectáreas de bosque tropical y de zonas pantanosas (turberas) en los últimos 25 años. Según datos de la FAO (2009), entre 2000 y 2005 Indonesia ha perdido una superficie forestal de 1.871.000 hectáreas, a un ritmo anual del 2%. Estas cifras significan que en Indonesia se ha producido el 67% de la deforestación ocurrida entre 2000 y 2005 en toda Asia Sudoriental y el 25% de la deforestación mundial durante ese mismo periodo.

Este proceso está provocando la desaparición de los hábitats de especies vulnerables o en peligro de extinción como los elefantes, orangutanes, rinocerontes o los tigres de Sumatra, así como incrementos significativos de las emisiones de CO<sub>2</sub> como consecuencia de los incendios y de la combustión de la turba.

Figura 178: SUMATRA, INDONESIA. Secuencia de dos imágenes. Arriba, imagen captada por el sensor Thematic Mapper, a bordo de Landsat 5, el 22 de junio de 1992, en falso color. Abajo, escena tomada el 14 de enero de 2001 por el sensor ETM+ de Landsat 7. La zona observada se encuentra en la isla de Sumatra, aproximadamente, a 100 km., al suroeste de la capital provincial de Jambi.

Fuente: Tropical Rain Forest Information Center (TRFIC), Basic Science and Remote Sensing Initiative (BSRSI), Michigan State University and the Landsat 7 Project Science Office at NASA Goddard Space Flight Center

# 7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

## MANUALES Y TUTORIALES DE TELEDETECCIÓN

CAMPBELL, J.B. 1987. *Introduction to Remote Sensing*, New York, The Guilford Press, 551 pp.

CCRS, 2009. *Fundamentals of Remote Sensing*, Canada Centre for Remote Sensing, 258 pp. [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals\\_e.pdf](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf)

CHUVIECO, E. 2008. *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*, Barcelona, Ed. Ariel Ciencia, 3ª ed., 594 pp.

CHUVIECO, E. y HUETE, A. 2010. *Fundamentals of satellite remote sensing*, Boca Raton, 436 pp.

SHORT, N.M. 1982. *The Landsat Tutorial Workbook. Basics of satellite Remote Sensing*, Washington, NASA, 553 pp.

SHORT, N. 2009. Remote Sensing Tutorial, NASA, <http://rst.gsfc.nasa.gov/>

## OTRAS OBRAS Y ARTÍCULOS CITADOS

BALTANÁS, A. 1999. Plan Andaluz de Prevención de Inundaciones, en *Previsión y Mitigación de Avenidas: Nuevas Técnicas de Planificación y Gestión*, Tetuán, 1999.

BROWN, J.F., LOVELAND, T.R., MERCHANT, J., REED, B.C. y OHLEN, D.O. 1993. Using multisource data in global land-cover characterization: concepts, requirements and methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59: 977-987.

CHUVIECO, E. 1995. *Teledetección y Medio Ambiente*, Madrid, UNED, video VHS y guía.

CIFUENTES, P., GONZÁLEZ ALONSO, S. y RAMOS, A. 1993. *Diccionario de la Naturaleza*, Madrid, Espasa Calpe-BBV, 694 pp.

ECHARRI, 2009. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*, <http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/indice.html>

EL PAÍS-AGUILAR, 1991. Atlas El País-Aguilar, Barcelona, El País-Aguilar, 311 pp.

FAO, 1976. A framework for land evaluation, *Soil Bulletin*, 32, Roma, FAO.

FAO, 2009. Situación de los bosques del mundo 2009, Roma, FAO, 176 pp. [www.fao.org](http://www.fao.org).

FOLEY, J.A., DEFRIES, R., ASNER, G.P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S.R., CHAPIN, F.S., COE, M.T., DAILY, G.C., GIBBS, H.K., HELKOWSKI, J.H., HOLLOWAY, T., HOWARD, E.A., KUCHARIK, C.J., MONFREDA, C., PATZ, J.A., PRENTICE, I.C., RAMANKUTTY, N., y SNYDER, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.

GONZÁLEZ, J.L. 2009. Situación actual de los riesgos naturales en la planificación del territorio. En GONZÁLEZ, J.L. (Ed.) *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*, Madrid, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos: 13-24.

GUINEY, J.L. y LAWRENCE, M.B. 1999. *NHC Mitch Report. Hurricane Mitch Tropical Cyclone Report*, National Hurricane Center, [www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html](http://www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html).

HUTCHINSON, J.N. y KOJAN, E. 1975. The Mayunmarca Landslide of 25 April 1974, UNESCO, Serial No. 3124/RMO.RD/SCE. <http://unesdoc.unesco.org/images/0001/000154/015477eb.pdf>

MARTÍNEZ VEGA, J. y ECHAVARRÍA, P. 2008. Detección de cambios en la ocupación del suelo y sus impactos ambientales sobre los ecosistemas acuáticos: el caso de La Mancha Occidental (España Central). En VV.AA. *España y el Mediterráneo: una reflexión desde la Geografía española. Aportación Española al 31º Congreso Internacional de la Unión Geográfica Internacional*, Madrid, Real Sociedad Geográfica-AGE-Instituto Geográfico Nacional, 25 pp.

MATEU, J.F. y CAMARASA, A.M. 2000. Las inundaciones en España en los últimos veinte años. Una perspectiva geográfica. *Serie Geográfica*, 9: 11-15.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1998. *Libro Blanco del Agua en España*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 855 pp.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2000. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 809 pp.

MONTESINOS, S. y BEA, M., 2008. Aplicaciones operativas de la Teledetección en la planificación y gestión del medio hídrico, *Revista de Teledetección*, 29: 91-100.

MUÑOZ, J. 2000. *Geomorfología General*, Madrid, Síntesis, 351 pp.

PAOLINI, L., SOBRINO, J.A. y JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C. 2002. Detección de deslizamientos de ladera mediante imágenes Landsat TM: el impacto de estos disturbios sobre los bosques subtropicales del noroeste de Argentina, *Revista de Teledetección*, 18: 21-27.

REBOLLO, L. 2010. Geología Física. las formas del relieve: modelado glaciar y periglaciar, [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-65108/TAB42351/GF-II-4.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-65108/TAB42351/GF-II-4.pdf)

SIMMON, R. 2009. *Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, NASA-Earth Observatory, [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring\\_vegetation\\_2.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php).

STRAHLER, A.N. y STRAHLER, A.H. 1989. *Geografía Física*, Barcelona, Omega, 550 pp.

STRANDBERG, C.H. 1975. *Manual de Fotografía Aérea*, Barcelona, Omega, 268 pp.

SUÁREZ, L. y REGUEIRO, M (eds.). 1997. *Guía ciudadana de los riesgos geológicos*, Madrid, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 196 pp.

TOWNSHEND, J., JUSTICE, C., LI, W., GURNEY, C. y McMANUS, J., 1991. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities, *Remote Sensing of Environment*, 35: 243-255.

UGALDE, A. (coord.). 2009. *Terremotos. Cuando la Tierra tiembla*, Madrid, CSIC. Colección Divulgación, 195 pp.

URIOSTE, M. y PACHECO, D. 2001. *Las tierras bajas de Bolivia a finales del s. XX*, PIEB Investigación, 437 pp.

USDA, 1961. *Land Capability classification*, Agricultural USDA Handbook nº 210, Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture.

WIKIPEDIA, *La Enciclopedia libre*, <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>. Se han consultado diversas voces, términos y datos contenidos en esta guía.