

que se ha reflejado en los objetos a los que ha ido dirigida. Sin embargo, su carácter activo y la longitud de onda empleada presentan algunas ventajas comparativas respecto a los sistemas pasivos (independencia de la luz solar y buena penetrabilidad en la atmósfera incluso con elevada nubosidad). El único sensor con alta resolución de este tipo (con el que fue equipado el satélite SEASAT) captó muy pocas imágenes del territorio andaluz y prácticamente no han sido explotadas desde que ello sucediera. Hay que añadir que las dificultades y complejidad de tratamiento de este tipo de imágenes, para las que no se puede disponer de los necesarios trabajos de verificación en campo previos (son imágenes de un tiempo pasado) condicionan el uso de las mismas. Sin embargo, las expectativas creadas con el futuro satélite europeo ERS-1, dotado de varios sensores activos, potenciarán, sin duda, su utilización durante los próximos años.

Cualquiera de estos sensores, en el caso de la teledetección espacial van embarcados en satélites, cuyas características también inciden significativamente en la aplicabilidad de los datos registrados. Los satélites más utilizados en aplicaciones de evaluación y gestión de los recursos naturales aparecen en la tabla 1. (incluso listado de satélites utilizados).



Imagen 2: Visión del satélite americano Landsat. Esquema de su funcionamiento.

De los datos a la Información: El Tratamiento y Análisis de la Imagen.

Hasta ahora hemos visto cómo la energía electromagnética reflejada y emitida por los objetos podía ser captada por los diferentes sensores y, una vez convertida su intensidad en una magnitud física mensurable, almacenada o transmitida a estaciones de recepción en la Tierra. Posteriormente estos datos son distribuidos y comercializados en formato digital (cintas magnéticas compatibles con ordenador CCT) o bien en formato analógico, cuando se trata de sensores fotográficos (Cámaras Métricas) o cuando los datos digitales originales han sido sometidos a sencillos tratamientos para su comercialización y distribución en formato analógico.

Ahora bien, las operaciones para convertir esos "datos" (niveles de gris, color, o valores numéricos) en una "información" temática explotable se realizan a través de un proceso de "interpretación". La interpretación, a su vez, puede ser *visual*, sobre los productos analógicos, tradicionalmente realizada con la utilización de los criterios de textura, estructura, color, tono y distribución y distancia física de los objetos, explotando de esta forma, la enorme capacidad de la mente humana para valorar modelos espaciales en la imagen analizada, o *digital*, atendiendo a los valores numéricos recogidos por los sensores que indican las diferencias espectrales de los objetos, es decir, a través del análisis de su firma espectral.

Una de las principales ventajas comparativas de la Teledetección espacial, es precisamente la naturaleza digital de los datos que proporcionan los diferentes sensores. Ahora bien, con ello, lo único que tenemos es un enorme volumen de datos imposible de interpretar directamente. Es necesario, en primer lugar, procesarlos y convertirlos en imágenes explotables, para lo cual es preciso disponer de un equipo de proceso de datos con una periferia gráfica adecuada para el tratamiento digital de imágenes y de los programas de ordenador para tal fin. En este sentido, hay que decir, que el grado de complejidad en el manejo de estos equipos viene dado, en gran medida, por la gran cantidad de datos a manejar.

Los datos numéricos, generalmente captados por sensores de tipo "scanner", existen para cualquier punto de la superficie observada, de tal modo que nos podemos hacer una idea de estas cantidades si consideramos el ejemplo siguiente:

Un sensor del tipo MSS, situado a bordo del satélite LANDSAT, escruta la superficie del terreno a través de elementos de información "píxeles" de 79 x 56 mts, para los que registra los valores de la intensidad recibida en cuatro porciones del espectro. Como los datos registrados se distribuyen por escenas de 185 x 185 kms., esto supone que, para el tratamiento más simple realizado sobre la imagen, es necesario manejar más de 30 millones de datos. Para cualquier tratamiento, por simple que sea, se requiere una gran capacidad de memoria y gestión en los equipos informáticos utilizados.

Existen dos tipos principales de configuraciones en los equipos para trabajar en teledetección espacial:

- Los equipos de propósito específico, denominados "llave en mano", los cuales, ofrecen dispositivos desarrollados concretamente para el tratamiento de imágenes, poseyendo una serie de programas completos para este fin, siendo su rapidez y eficacia, en este contexto, extraordinarios. Suelen constar de un procesador dedicado exclusivamente al tratamiento de la imagen y periféricos como una unidad lectora de cintas, una unidad de diskettes y una consola gráfica de alta resolución, en la cual, a través de comandos, se pueden realizar múltiples tratamientos sobre la imagen.

- Los equipos de propósito general, son ordenadores normales para los que se crean programas especiales que permitan el tratamiento de imágenes, aunque no exclusivamente, y que se configuran con periféricos gráficos adecuados para la visualización de datos digitales. Este tipo de configuración es la que posee la Agencia de Medio Ambiente y la que utiliza su Grupo de Trabajo en Teledetección. (Imagen 3).

Las características de los periféricos gráficos de salida existentes en cada configuración posibilitan la impresión de los resultados gráficos a través de impresoras de chorros de tinta, "plotters" de plumas, "plotters" electrostáticos, "fotoplotters" de tecnología laser, con los que han sido realizadas la mayor parte de las imágenes de Andalucía que aparecen en este libro.

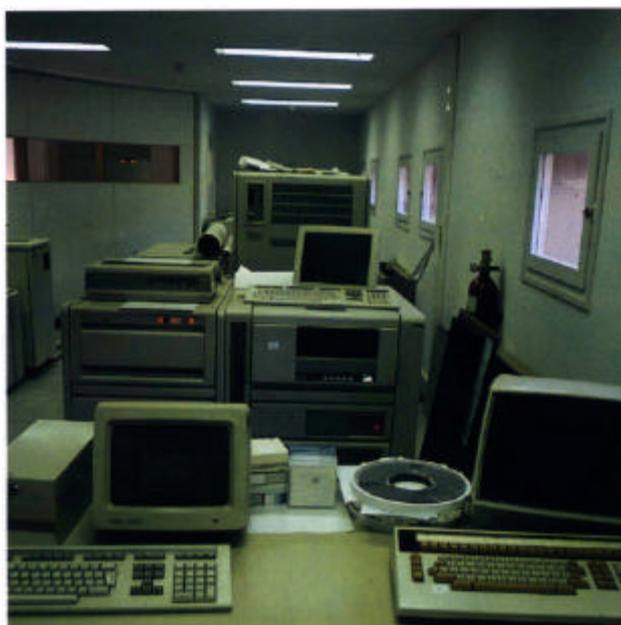


Imagen 3: Centro de proceso de datos de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

PRINCIPALES SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

Nombre y Fecha de Lanzamiento	Objetivos	Carga útil	Caraterísticas de la misión
METEOSAT 1 23-11-77	Toma de imágenes de la Tierra y la atmósfera cada media hora	Canal visible 0,4-1,1 μ m Resolución espacial: 2,5 Km	- Orbits ecuatorial geostacionaria a 35.500 Km.
METEOSAT 2 19-06-81	Predicción meteorológica.	Canal infrarrojo térmico: 10,5 - 12,5 μ m. Resolución espacial: 5 Km. Canal vapor de agua: 5,7 - 7,1 μ m Resolución espacial: 5 Km.	- La observación de la Tierra se efectúa cada 30 minutos. - Los datos son recibidos y tratados en Darmstadt. (Alemania Occidental) y enviados a los usuarios del resto de Europa vía satélite. - METEOSAT 1 dejó de funcionar el 24 de Noviembre de 1979.
TIROS-N 13-10-78	Misión principal: Observación meteorológica y oceanográfica	Sensores embarcados: Scanning Radiometer (SR) 0,52 μ m; 10,5 - 13,5 μ m.	- Orbits heliosincrónica con paso a las 8,30 h. y 20,30 h. por el ecuador.
NOAA-6 27-06-79		Resolución espacial: 4 Km.	- Altura de órbita: 870 Km. - Repetitividad: cada 12 horas.
NOAA-7 23-06-81		Very high resolution radiometer. (AVHRR). 0,6 - 0,7 μ m; 10,5 - 12,5 μ m.	- La precisión de las mediciones de temperatura en superficies marinas es de 1,5° en términos relativos y 0,5° en términos absolutos.
NOAA-8 23-03-83		Resolución espectral. NOAA n ^a par: 4 canales. 0,58 - 0,68 μ m. 0,78 - 1,10 μ m. 3,55 - 3,93 μ m. 11,50 - 12,30 μ m.	- TIROS-N dejó de emitir informaciones el 27 de febrero de 1981.
NOAA-9 12-12-84		NOAA n ^a impar: 5 canales. 0,58 - 0,68 μ m. 0,78 - 1,10 μ m. 3,55 - 3,93 μ m. 11,50 - 12,30 μ m. 10,30 - 11,30 μ m.	
NOAA-10 17-09-86		Resolución espacial: 1,1 Km. Anchura del campo de visión: 3000 Km.	
NOAA-11 20-09-88		Sensor Stratospheric Sounding Unit (SSU). Sensible a la radiación atmosférica analizada a través del paso de la misma por un gas (CO ₂) a presiones diferentes.	
NOAA-12 14-05-91		Sistema de localización y colecta de datos ARGOS.	
HCMM 26-04-78	- Discriminación de tipos de rocas y Reconocimiento de recursos. - Medida de la humedad de los suelos. - Cartografía de surgencias y efluentes en el mar. - Estudio de las reservas de nieve y balances de agua a gran escala.	Sensor CHMR. Canal térmico: 10,5 - 12,5 μ m. Precisión: 0,70° K Canal 0,55 - 1,12 μ m. Resolución espacial: 480 x 480 m. Anchura del campo de visión: 700 Km.	- Orbits: 550/642 Km. Heliosincrona a las 14 horas en nudo ascendente. - Repetitividad de paso: 1,5 días a 3,5 días. - Posibilidad de toma de imágenes nocturnas con canal térmico. - Dejó de funcionar el 14 de Septiembre de 1980.

NIMBUS-7 24-10-78	<ul style="list-style-type: none"> - Estudio de la polución atmosférica. - Oceanografía: Medida de la temperatura de superficie, color del agua. - Temperatura e interfase atmosférica. - Estudio de la capa de ozono atmosférico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coastal Zone Color Scanner radiómetro multispectral de barrido. (CZCS). 440 ± 10 NM - 520 ± 10 NM 550 ± 10 NM - 670 ± 10 NM 750 ± 60 NM - 10,5 - 12,5 μm. - Resolución espacial: 800 x 800 m. - Anchura campo de visión: 1000 Km. - Scanning Multichannel Microwave Radiometer. Radiómetro de microondas por barrido con 5 canales. 4,99 GHz (6,01 cm.) 10,69 GHz (2,81 cm.) 18,0 GHz (1,67 cm.) 22,05 GHz (0,81 cm.) - Resolución espacial: 19 x 33 Km. Anchura del campo de visión: 600 Km. - Medidor de polución aérea mediante infrarrojo, con 3 canales. - LIMBS. Radiómetro para medición de perfiles térmicos de la estratosfera. - SAMHI. Radiómetro para medición de aerosoles en la estratosfera. 	<p>Orbita: 925 Km. casi polar.</p> <p>Repetitividad: 2 a 3 días.</p> <p>Transmisión de datos por radar banda S.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CZCS. Determina la concentración y gradientes de las aguas con clorofila y sedimentos, así como los gradientes térmicos. - S.M.M.R. Cartografía de icebergs. Contenidos de humedad en la atmósfera. Vientos de superficie y temperaturas. Humedad de los suelos. - NIMBUS-7 dejó de funcionar en Junio de 1986.
MOS-1 23-02-87	<ul style="list-style-type: none"> - Seguimiento de pesquerías - Cartografía de fenómenos superficiales oceanográficos. - Cartografía temática. 	<p>Sensor MESSR.</p> <p>Resolución espectral: 4 bandas. 1 = 0,51 - 0,59 μm 2 = 0,61 - 0,69 μm 3 = 0,73 - 0,80 μm 4 = 0,80 - 1,10 μm</p> <p>Resolución espacial: 50 metros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Orbita: ± 900 Km. circular heliosincrónica. - Obtención de imágenes cada 17 días. - Campo de visión: 100 x 100 K
SPOT-1 22-02-86 SPOT-2 01-07-90	<ul style="list-style-type: none"> - Cartografía topográfica a escalas de reconocimiento - Cartografía de vegetación - Actualización de usos del suelo - Seguimiento de contaminación litoral 	<p>Sensor Haute Resolution Visible Multispectral (HRVX) Resolución espectral 4 bandas XS1 = 0,50 - 0,60 μm XS2 = 0,60 - 0,70 μm XS3 = 0,70 - 0,80 μm XS4 = 0,80 - 0,90 μm Resolución espacial 20 metros.</p> <p>Sensor Haute Resolution Panchromatique (HRVP) Resolución espectral 1 banda P = 0,50 - 0,70 μm Resolución espacial 10 metros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Orbita: ± 870 Km. circular heliosincrónica. - Obtención de imágenes mediante programación. - Obtención teórica de imágenes cada 26 días. - Campo de visión: 60 x 60 Km.

LANDSAT-1 23-07-72	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario y revisiones agrícolas. - Cartografía de usos de suelo. 	<p>Radiómetro multispectral (M.S.S.) 0,5 - 0,6 μm 0,6 - 0,7 μm 0,7 - 0,8 μm 0,8 - 1,1 μm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Órbita = 900 Km. circular, heliosíncrona a 9,30 h. en nudo descendente. - Repetitividad de la órbita: 18 días.
LANDSAT-2 22-01-75	<ul style="list-style-type: none"> - Estudios de medios litorales. 	<p>Resolución espacial: 80 metros.</p> <p>Banda infrarrojo térmico: 0,4 - 12,6 μm</p> <p>Resolución espacial: 237 metros.</p> <p>Anchura del campo de visión: 185 Km.</p> <p>Cámara R.B.V. 0,475 - 0,830 μm</p> <p>Resolución espacial: 40 metros.</p> <p>Anchura del campo de visión: 93 x 2 = 185 Km.</p> <p>Sistema de colecta de datos</p> <p>Registrador magnético</p>	<ul style="list-style-type: none"> - LANDSAT-1 cesa de funcionar a fines de 1978; LANDSAT-2 fué detenido a fines de 1979 y reactivado en junio de 1980 para dejar de funcionar en 1983; LANDSAT-3 deja de funcionar también en marzo de 1983.
LANDSAT-3 15-03-78	<ul style="list-style-type: none"> - Estudios geológicos. - Estudios de los glaciares. 		
LANDSAT-4 16-07-82	<ul style="list-style-type: none"> - Previsiones agrícolas. - Control de zonas de regadío. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor Thematic Mapper. <p>Resolución espectral: 7 bandas 0,45 - 0,52 μm 0,52 - 0,60 μm 0,63 - 0,69 μm 0,76 - 0,90 μm 1,55 - 1,75 μm 10,40 - 12,50 μm (térmica) 2,08 - 2,35 μm</p> <p>Resolución espacial: 30 metros.</p> <p>Resolución IR.Térmico: 120 mts. Anchura del campo de visión: 180 Km.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Órbita: \pm 700 Km. circular heliosíncrona a 9,30 h. en nudo descendente. - Repetitividad: 16 días.
LANDSAT-5 03-84	<ul style="list-style-type: none"> - Cartografía de usos de suelos. - Planificación regional de los recursos hídricos. - Control de costas y zonas húmedas. - Determinación de focos de contaminación en aguas y suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor MSS similar a los de los LANDSAT-1, 2 y 3. 	<ul style="list-style-type: none"> - El sensor TM de LANDSAT-4 deja de funcionar en Abril de 1984.
ERS-1	<ul style="list-style-type: none"> - Oceanografía y glaciología. - Altura y dirección de oleaje. - Velocidad viento en medio marino. - Control de cambios en zonas terrestres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Synthetic Aperture Radar (SAR) en modo imagen. <p>Resolución espectral: 1 banda c. 5,3 GHz (radar) Polarización W.</p> <p>Resolución espacial: 30 metros. Anchura campo visión 100 Km. Ángulo de incidencia : 23°.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Radar Altimeter. <p>Resolución espectral: 1 banda Km. Fiabilidad altímetro \pm 20 cm.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Along-Track Scanning Radiometer (ATSR). <p>Resolución espectral: Canales IR: 1,6; 3,7; 11 y 12 μm. Canales Radas: 23,8 y 36,5 GHz. Resolución espacial: 1 Km. En infrarrojo y 500 Km. De campo de visión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Órbita heliosíncrona 785 Km. - Paso a las 10,30 en modo descendente. - Resolución espectral variable entre 3 días y 176 días.

Tabla 2. Sensores aerotransportados más recientes
Airborne Thematic Mapper (A.T.M.)
Area aparente y resolución espacial a diversas alturas.

Angulo de exploración	Altura de vuelo (mts.)				
	500	1.000	2.000	4.000	10.000
85°	900 m.	1.800 m.	3.600 m.	7.300 m.	18.000 m.
72°	720 m.	1.450 m.	2.900 m.	5.800 m.	14.500 m.
Resolución mts. IFOV 2,5 mrad.	1,25	2,5	5,0	10,0	25,0

Bandas espectrales del sensor ATM de ADDS-1268

Bandas	Longitud de onda	Equivalencia con TM
1	0,42 - 0,45	
2	0,45 - 0,52	1
3	0,52 - 0,60	2
4	0,605 - 0,625	
5	0,63 - 0,69	3
6	0,695 - 0,75	
7	0,76 - 0,90	4
8	0,91 - 1,05	
9	1,55 - 1,75	5
10	2,08 - 2,35	6
11	8,50 - 13,00	7

Aplicaciones: Agricultura, seguimiento de cultivos, estudios ambientales, silvicultura, geología, hidrología, geotermia, mineralizaciones, estudios urbanos.

Programmable Multispectral Imager P.M.I.

Modo espectral de funcionamiento	Modo espacial de funcionamiento
- Posibilidad de programar hasta 288 canales dentro del rango 430-800 ìm.	- Líneas de barrido de 1.925 píxeles.
- Resolución 2,5 mrad. (similar al ATM).	- Resolución de 1,6 mrad.
	- Canales: los píxeles son agrupados en 8 canales opcionales dentro del rango 430-800 mm.

* El coste de barrido con un sensor ATM viene a ser el doble del de un vuelo en color.

Tratamientos previos. Las correcciones

Los datos obtenidos directamente por los sensores empleados en teledetección espacial, sólo en pocas ocasiones, pueden utilizarse en estado original. Una de las primeras operaciones realizadas en los equipos de tratamiento de imágenes, previa recalibración de los datos, es corregir un conjunto de deformaciones o de distorsiones que habitualmente presentan estos datos originales.

Una parte importante de estas distorsiones están ligadas a la alteración que impone la atmósfera a la radiación reflejada o emitida en su tránsito hacia el sensor. Las operaciones utilizadas para ello son conocidas como *correcciones atmosféricas* y su aplicación exige conocer la composición de la atmósfera en el momento de la adquisición para corregir las modificaciones inferidas, y así, poder relacionar los datos registrados con la respuesta de los objetos en la superficie terrestre, a la vez que

su corrección/normalización facilita la comparación con datos del mismo espacio para otras fechas distintas. A ellas habría que unir las correcciones de las distorsiones introducidas por errores en la toma de datos debidos al funcionamiento deficiente del sensor (correcciones radiométricas).

Otro grupo importante de estas deformaciones se vincula a las distorsiones geométricas ligadas al funcionamiento del dispositivo de adquisición de los datos (scanner), a los cambios de altitud de la órbita o a la rotación relativa de la Tierra respecto a la órbita del satélite. Entre ellas cabe citar la distorsión producida en la escala tangencial debido a que el dispositivo de barrido se mueve a una velocidad constante y, por lo tanto, la distancia de superficie inspeccionada por unidad de tiempo aumenta hacia los extremos. Sin embargo, la mayor parte de las mismas se pueden corregir o minimizar simplemente programando la velocidad del satélite para compensar este defecto, o bien utilizando, como ya se hace en algunos satélites, sistemas de matriz de líneas "pushbroom" de gran simplicidad mecánica, larga duración y fidelidad geométrica muy alta.

Ligadas directamente al sistema de barrido, podemos incluir las deformaciones inducidas por el desplazamiento unidireccional o abatimiento del relieve o cualquier elemento vertical y aquellas producidas por la modificación de los parámetros de vuelo. Las primeras están directamente relacionadas con la altura del sensor, respecto al nivel de referencia y son, obviamente, importantes en los sensores aerotransportados. No obstante, al ser el abatimiento similar al producido en una fotografía aérea, (aunque, en este caso, se produce exclusivamente en el sentido perpendicular a la línea de vuelo y no de forma radial respecto al nadir de la fotografía) en las plataformas espaciales juega un papel importante a su favor la altura de la órbita (800 a 36000 Kms.), presentando esta deformación unos valores insignificantes (*). En el segundo caso, las deformaciones se deben a la inestabilidad de la plataforma aérea, ligada a su irregular desplazamiento por la siempre dinámica capa atmosférica. Obviamente, la estabilidad de las plataformas espaciales alejadas de las turbulencias atmosféricas es, en este sentido, significativamente mayor que en los aviones.

Por último, conviene señalar la similitud o el aceptable ajuste producido entre los datos originales captados por los satélites de órbita circumpolar (LANDSAT, SPOT...) respecto a la proyección cartográfica UTM, ya que la distribución de las deformaciones geométricas es muy semejante. Esta cualidad, de enorme valor cartográfico, se deriva del sistema de barrido de los radiómetros multiespectrales con que van equipados, ya que este se realiza a ambos lados de la traza

(*)La cima de la cumbre del Mulhacen (4000 mts. aproximadamente) presentaría una distorsión de 2,5 mm. como máximo, en una imagen del satélite SPOT, tomada verticalmente y reproducida a escala 1/50.000, en la que esta cima ocupase el extremo mas distal (la mayor deformación posible) en la línea de barrido (30 Km.). Como quiera que estas circunstancias teóricas no se dan en las aplicaciones reales, ya que se eligen las imágenes donde la zona representada ocupa la zona central y el nivel de referencia altitudinal no es el cero topográfico, las distorsiones entonces se reducen a niveles prácticamente insignificantes.

de la órbita (generalmente curva por efecto del movimiento permanente de la plataforma espacial y de la Tierra), generándose una especie de proyección "oblicua" de Mercator, ya que, debido al movimiento de rotación de la Tierra y a la inclinación de las órbitas, los trazos no coinciden exactamente con los meridianos. Desde la perspectiva geométrica es una proyección espacial casi "conforme", ya que dentro de cada línea de barrido (184 ó 60 Kms.), la desviación es irrelevante como hemos visto y el factor de escala está muy próximo a 1 en el eje de la órbita. Quizás la corrección más importante a realizar en este sentido es la distorsión respecto al norte geográfico, estrechamente relacionada con la inclinación del eje de la órbita respecto al Ecuador.

Sin embargo, a pesar de las matizaciones hechas con antelación que, en cierta medida, justifican la utilización de los datos originales para muchas aplicaciones temáticas, las distorsiones antes aludidas (escala tangencial, movimientos de la plataforma, desplazamientos horizontales...), pueden ser corregidas fácilmente para obtener productos de mayor fidelidad geométrica, sobre todo a nivel planimétrico. Este conjunto de técnicas reciben el nombre de *correcciones geométricas* y su objetivo es aplicar a los datos originales una transformación tal que el espacio geográfico resultante sea perfectamente ajustable a una cartografía general de referencia. Generalmente el proceso se basa en la elección de un conjunto de puntos de control homólogos en la imagen original y en el documento cartográfico utilizado, a partir de los cuales se obtienen las funciones de transformación polinómicas que permiten convertir el espacio geométrico de la imagen original en otro espacio igual al de la cartografía de referencia. En este sentido, hay que decir que una corrección geométrica realizada sobre una imagen modifica los valores radiométricos originales y que, por consiguiente, la imagen resultante no podrá ser utilizada para establecer sobre ellas una clasificación de objetos en función de sus firmas espectrales.

Son muy numerosos los métodos de corrección geométrica, implicando, siempre, una reubicación de los píxeles que componen una imagen y una modificación de su valor radiométrico influenciado por los píxeles de su entorno.

La Visualización. Las Técnicas de realce y Transformaciones.

La plasmación gráfica de los resultados de cualquier tratamiento es la operación que nos permite reconstruir una imagen analógica con los datos digitales originales y su calidad depende sustancialmente de los periféricos gráficos empleados. El proceso más elemental consiste en asignarle un tono de gris o un color a cada uno de los valores numéricos captados por los sensores, obteniéndose, así, una imagen en blanco y negro o en color de la escena seleccionada. Para este fin, deben de construirse unas tablas de color en el ordenador, ya que no existe una relación tan

evidente en el orden entre los colores como entre los diferentes tonos de grises e, incluso, esta relación puede ser modificada según las aplicaciones o el interés del usuario.

Sin embargo, habitualmente, las imágenes originales recogen datos en varias longitudes de onda del espectro (bandas o canales) para cada pixel. Por ello, generalmente, se construyen tres tablas de color correspondientes a los tres colores básicos (azul, verde y rojo), ordenados según su tonalidad (de más claros a más oscuros), y es la combinación de ellas la que permite obtener la mayor parte de la gama de colores. De esta forma, podemos asignar cada una de las tres tablas de color a tres de los valores numéricos (bandas o canales) recogidos para cada pixel y construir composiciones en "falso color", ya que la asignación de las tablas de color no tiene por qué coincidir con los datos referidos a sus longitudes de onda específicos, es decir, azul con el azul, verde con el verde y rojo con el rojo. (Imagen 4).

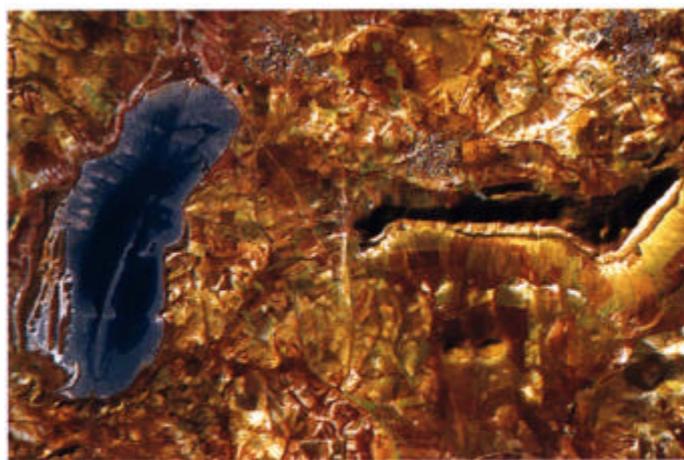


Imagen 4: Visualización de una imagen de satélite Landsat-TM en falso color, utilizando las bandas 1 (azul), 4 (verde y 7 (rojo). Laguna Fuente de Piedra (Málaga).

Además de visualizar los datos originales, los corregidos o los extraídos de una clasificación, entre las técnicas de tratamiento de imágenes existen un conjunto de funciones cuyo objetivo es manipular las imágenes de forma que parezcan "más claras" o bien parezcan "distintas" (como si le diésemos la vuelta a un objeto y lo mirásemos desde distintos puntos de vista), permitiéndonos extraer aspectos de la imagen que antes parecían ocultos. Estas operaciones son denominadas *técnicas de realce* y son de enorme ayuda en los procesos de interpretación, identificación visual y en la plasmación taxonómica, desde la perspectiva espacial, de los resultados. Entre ellas es necesario distinguir dos grandes grupos:

Las denominadas operaciones "*pixel a pixel*", son aquellas donde el valor de cada pixel de la imagen transformada depende exclusivamente del valor numérico del mismo en la imagen original. Se desprecia por lo tanto su estructura como "imagen" y la transformación depende del valor numérico de cada pixel y no de su "posición". De esta forma, todos los que tenían el mismo valor antes de la operación, seguirán teniendo el mismo valor después.

Quizás, la más sencilla de estas operaciones sea la de la *umbralización*, es decir, segmentar los valores del histograma de una imagen en dos o varios intervalos utilizando algunos valores como umbrales. A veces, esta sencilla operación es de gran ayuda en un proceso de visualización o de interpretación solventando la dificultad que encontramos en ocasiones para separar visualmente tonos o colores muy próximos en una primera visualización. Otras veces, el rango de los valores numéricos presentes en una imagen no ocupan todos los posibles (por ejemplo de 0 a 255 en las imágenes TM-LANDSAT), con lo cual, hay muchos niveles de color o grises que no se emplean y, quizás, los que se utilizan, están muy próximos. Para facilitar las visualizaciones se procede a la *expansión del histograma*. El objetivo es, simplemente, expansionar los valores existentes, es decir, llevar los máximos y mínimos presentes a los teóricamente posibles, aprovechando, de esta manera, todos los tonos o colores y ganando, con ello, contraste. Como generalmente los valores máximos y mínimos presentan una escasa frecuencia, se eliminan antes de expandir el histograma. Para este proceso, denominado "corte de colas", se suelen utilizar los valores correspondientes a algunos límites del porcentaje acumulado del número de píxeles (por ejemplo el 1 y el 99%). Otro proceso, un poco más sofisticado, es la *equalización del histograma*, es decir, intentar que este sea plano. Para ello, se realiza un reagrupamiento de los intervalos hasta conseguir que los nuevos creados tengan todos la misma frecuencia (histograma plano). De esta forma todos los colores o tonos utilizados en la visualización tendrán un similar número de píxeles en la imagen, ganándose calidad visual al aumentar considerablemente la gama de colores en la imagen.

La mayor parte de las técnicas de realce vistas con anterioridad tenían como finalidad observar de forma más clara la imagen, sin embargo, existe otro grupo de técnicas cuyo objetivo es verlas de forma "*diferente*", "*distinta*". En algunas de ellas se realizan un conjunto de operaciones de sustracción, adición, división o multiplicación con los diferentes valores de cada pixel para conseguir neocanales que permiten resaltar determinados aspectos de la imagen cuando se visualizan. Algunas de estas operaciones (índices) son muy conocidas, como los "*índices de vegetación e índices de brillo*", que permiten destacar la actividad clorofílica de la vegetación y la mayor o menor mineralización de las zonas contenidas en la imagen. (Imágenes 5 y 6).

Entre las operaciones con los valores de los diferentes canales o bandas habría que incluir algunas técnicas estadísticas multivariantes, como el análisis en componentes principales. Dicho análisis pretende la obtención de un conjunto de nuevos canales como combinaciones

lineales de los valores de los canales originales, de tal forma, que las componentes resultantes de la transformación sean independientes entre sí, eliminándose las correlaciones entre canales. En el caso de las imágenes multispectrales, muchas bandas suelen estar muy correlacionadas, y con esta técnica se reduce significativamente el número de canales necesarios para visualizar la imagen con el máximo de información.

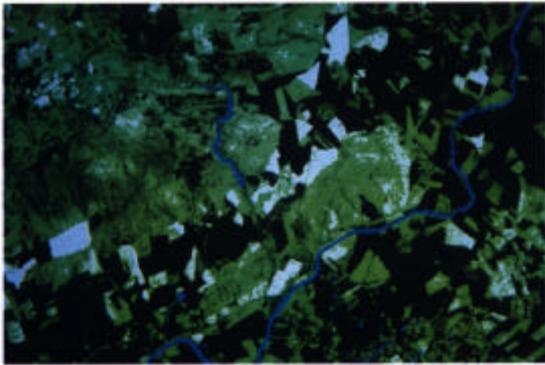


Imagen 5: Índice de vegetación (en verde) para una zona del valle medio del Guadalquivir.

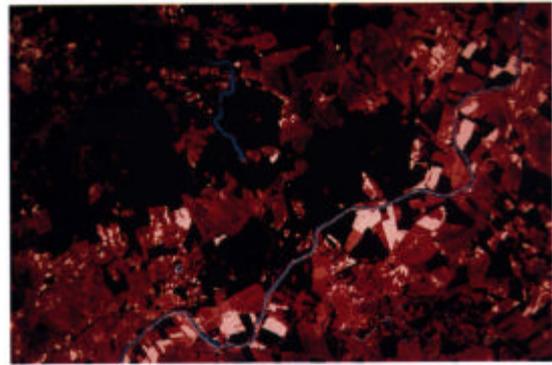


Imagen 6: Índice de brillo (en rojo) para una zona del valle medio del Guadalquivir.

En las operaciones de realce "*dependientes del entorno*" el valor del pixel en la imagen transformada depende no exclusivamente de su propio valor en la imagen original, sino también, de los valores de los píxeles de su entorno próximo. Una de las principales técnicas dentro de este apartado son los denominados *filtros* en el dominio espacial (convoluciones) que consisten en la aplicación de una transformación sobre la imagen original, obteniéndose una nueva imagen en la que se pretende realzar ciertas características de la original, eliminando otras. En ellos, el valor de cada pixel transformado se recalcula como una función de los valores de los píxeles de un cierto entorno en la imagen original, llevándose a cabo a través de desplazamientos sobre cada uno de los píxeles de una matriz o mascarilla móvil con los coeficientes utilizados para calcular el nuevo valor del pixel central de la matriz en relación con los presentes en el resto de píxeles que constituyen la matriz o máscara. Entre los más comunes se encuentran los denominados filtros de suavizamiento (paso bajo) utilizados para eliminar el "ruido" de la imagen atenuando las altas frecuencias, siendo muy utilizados para la homogenización de áreas, haciendo desaparecer los píxeles aislados. Los filtros de realce (paso intermedio) permiten obtener una imagen de mayor calidad donde los contornos se realzan pero sin afectar excesivamente a las zonas homogéneas, facilitando la apreciación de más detalles que en la imagen original. Por último, los filtros de extracción de bordes (paso alto) provocan un cambio completo en la estructura de la imagen que resulta dominada por el "ruido". Son de gran utilidad para la extracción de contornos, límites, que aparecen realzados perdiéndose las zonas homogéneas. (Imágenes 7 y 8).

Una de las técnicas más utilizadas en el tratamiento de imágenes es la del "zoom", ya que los datos originales "no tienen escala" y es el tipo de restitución o visualización que se haga (el tipo de punto de la imagen, o el número de puntos asignados a cada pixel), lo que nos permite

obtener unas dimensiones u otras en los productos analógicos. Existen varios tipos de "zoom" entre los cuales el más sencillo es el directo, repitiendo un número de puntos (x2, x3) de imagen por cada valor del pixel original, sin embargo, desde la perspectiva visual, este proceso no es indefinido, ya que a partir de determinadas fases aparece el efecto del "cuadrulado" de la imagen. Por ello, se han desarrollado otros tipos donde el valor de los nuevos píxeles repetidos se pone en relación con los valores de los del entorno en la imagen original. Este proceso se realiza por varios procedimientos (interpolación directa o cúbica) obteniéndose una transición entre los píxeles más real y un significativo aumento de la calidad visual.

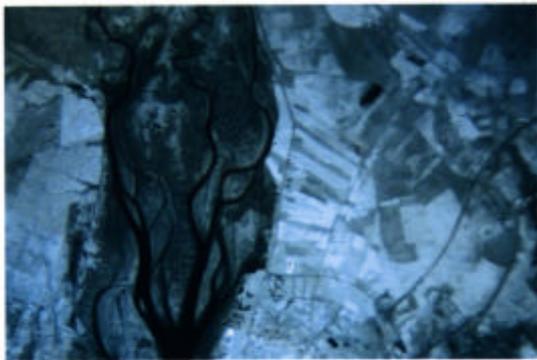


Imagen 7: Imagen de satélite SPOT pancromática sin filtrar. Entorno de la ciudad de Huelva.



Imagen 8: Imagen de satélite SPOT pancromática filtrada con un filtro de paso medio. Entorno de la ciudad de Huelva.

El Análisis de la Imagen. Las Clasificaciones.

Hasta ahora, hemos descrito procesos en los que los datos de las imágenes originales se transformaban para mejorar su apariencia visual, sin embargo, sobre esos datos podemos aplicar un conjunto de técnicas en las que el equipo informático de tratamiento nos "ayude" a "entender" los datos originales, es decir, a convertirlos en "información temática". Se trata, pues, de que el ordenador realice parte del proceso de interpretación, distribuyendo los píxeles en grupos o clases representativos de diferentes realidades de la zona observada.

En cierta medida, las técnicas de realce permiten restituir los datos digitales originales en productos analógicos susceptibles de interpretarse visualmente con claves y criterios similares a las empleadas en los procesos de fotointerpretación convencional, sin embargo, con los datos proporcionados por los satélites espaciales se dispone de registros numéricos almacenados en ficheros informáticos sobre cintas o "disquettes", en los cuales, a cada unidad elemental de referencia sobre el terreno (a la que ya hemos denominado con el nombre de "pixel"), corresponde un registro de "n" valores que definen su firma espectral, es decir, su respuesta característica en los diferentes campos de espectro para los que sea sensible el sensor empleado. Asimismo, cada pixel viene definido por su posición en el espacio, a través de unas coordenadas, y por su situación en el tiempo ya que, como veremos, estos registros numéricos son susceptibles de ser captados con intervalos de tiempo a veces muy breves.

Este hecho hace que el análisis de los datos no deba circunscribirse exclusivamente a las técnicas de interpretación basadas en la distancia espacial, sino también en función de su valor numérico, siendo entonces más importante la "*distancia espectral*" que la meramente física, para cuya cuantificación son aplicables una gran parte de las técnicas empleadas en las clasificaciones estadísticas. Aunque, en teoría, cada objeto tendría su firma espectral característica y, por lo tanto, sería fácil clasificar de forma automática cada píxel, tras la comparación de su firma espectral con las correspondientes a las clases seleccionadas, la realidad no es así por varias causas (tamaño del píxel, fecha de toma, geometría de la adquisición, píxeles mixtos...), necesiándose un tipo de análisis estadístico más complejo (asignación de un píxel a una clase según la mayor probabilidad de pertenecer a ella, según la menor distancia estadística.), o bien, la utilización de criterios complementarios "*a posteriori*" (posición, tamaño...), por lo que el número y tipo de clasificaciones es muy variado.

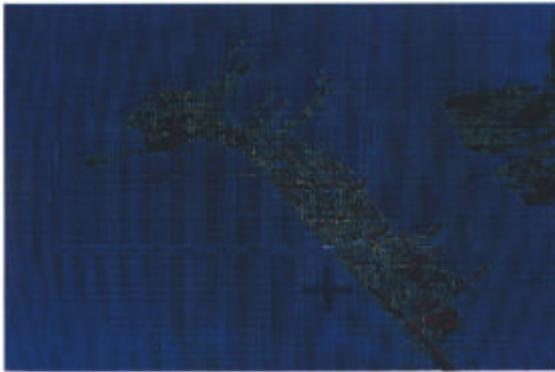


Imagen 9: Visualización de un canal del satélite Landsat-R.B.V. a tamaño original en pseudocolor. Ciudad de Cádiz.

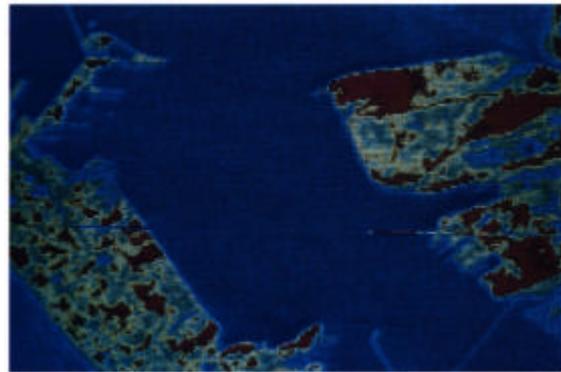


Imagen 10: Efecto de zoom digital sobre la imagen en pseudocolor de la ciudad de Cádiz.

Algunas técnicas de clasificación se sustentan en la segmentación de la población de píxeles dentro de un solo canal, dos o varios (segmentación n-dimensional) como forma de establecer los límites de las clases o categorías entre los píxeles que componen la imagen. Esta técnica, también llamada de "*paralelepípedos*", ya que la división de los histogramas genera áreas poligonales de lados paralelos multidimensionales, aunque muy rígida, es bastante efectiva en algunas aplicaciones y se realiza generalmente sobre la visualización gráfica de los píxeles en histogramas unidimensionales o "n" dimensionales (imágenes 11 y 12). Otros procesos de clasificación utilizan técnicas estadísticas más complejas, entre las que podemos señalar por su frecuente utilización:

- Algunos métodos de "*clustering*" (conglomerados), que buscan una estructuración del conjunto de píxeles a partir de una matriz inicial de distancias. Normalmente se sigue un proceso aglomerativo hacia arriba que permite la consideración simultánea de todos los valores espectrales de los píxeles analizados y agruparlos jerárquicamente según la menor distancia entre sus valores. Para definir esa distancia se emplean métodos como la distancia euclídea.

- El análisis discriminante, que busca encontrar la mejor separación posible entre varios grupos de píxeles. Para encontrar las fronteras entre las dos clases se utilizan diferentes criterios estadísticos, como el ya citado en la mínima distancia, o el de máxima probabilidad, donde cada pixel se asigna a la clase que posee mayor probabilidad de pertenencia.

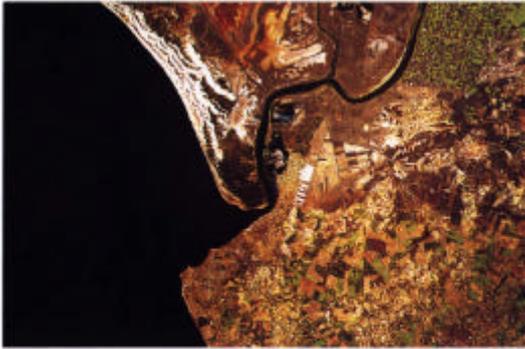


Imagen 11: Imagen de satélite Landsat - TM, en falso color. Desembocadura del río Guadalupe.

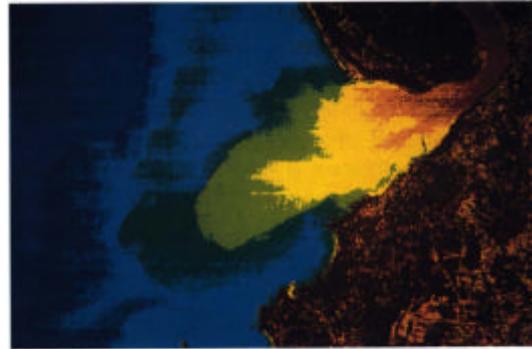


Imagen 12: Imagen de satélite Landsat - TM. Clasificación de niveles de turbidez en la desembocadura del río Guadalupe.

En definitiva, las clasificaciones constituyen siempre una de las partes más decisivas de cualquier proceso de tratamiento de imágenes ya que su objetivo es reducir el enorme volumen de datos originales a un producto explotable, generalmente cartográfico. Para ello el ordenador "ayuda" en el proceso de interpretación ejecutando programas que agrupan a los píxeles en clases atendiendo a la semejanza en su respuesta espectral, en un momento determinado o en las diversas fechas para las que se obtienen imágenes.

Generalmente, en los procesos de clasificación el problema fundamental es la identificación adecuada de las distintas clases y la estimación de los parámetros estadísticos que mejor las definen. Los métodos de asignación, y por lo tanto las clasificaciones, se pueden dividir en:

- *No supervisadas o "automáticas"*. En ellas se solicita al ordenador que él decida cuántas clases hay en la imagen y cuáles son sus parámetros estadísticos, dejando posteriormente al usuario o investigador la labor de identificación de las clases. Una de las técnicas más empleadas dentro de este tipo es la de "cluster".
- *Supervisadas*. En este caso, el investigador conoce previamente las clases que quiere identificar y delimitar ("*verdad terreno*"). Para conocer sus parámetros estadísticos se delimitan sobre la imagen algunos sectores donde se tiene la seguridad de la presencia de cada una de las clases seleccionadas (campos de entrenamiento o parcelas-test) extrayendo las firmas espectrales que las definen para instruir, posteriormente, con ellas, al ordenador en el proceso de clasificación, donde el resto de píxeles se asignan a cada una de aquellas según los criterios estadísticos utilizados en los métodos de asignación empleados.