

LOS FUNDAMENTOS FISICOS DE LA TELEDETECCION ESPACIAL.

Los fundamentos físicos de la teledetección espacial son compartidos con otros sistemas de teledetección (fotografía aérea, televisión...), ya que todos se basan en la medida de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos, como respuesta a la incidencia de una radiación natural (luz solar) o artificial (radar). En el primer caso se habla de *teledetección pasiva* y en el segundo de *teledetección activa*.

Aunque sería extremadamente prolijo referirnos detenidamente a los fundamentos físicos de la teledetección, si parece obligado recoger de forma sintética los principios básicos que permiten comprender cómo y por qué se obtienen datos de objetos de nuestro planeta y en qué parámetros se sustenta su identificación o interpretación.

La energía electromagnética. Sus fuentes.

La energía electromagnética es un tipo de energía que se transmite por el espacio a través de ondas con una velocidad, que en el vacío, es de 300.000 Km/seg. Una onda electromagnética (Fig.1) resulta de la propagación simultánea en el espacio de un campo eléctrico (E) y otro magnético (B) variables y, dada su forma de propagación, los diferentes tipos se definen por la longitud de onda (λ) o por la frecuencia (F). La longitud de onda expresa el carácter periódico de esta perturbación, y vendría definida como la distancia entre dos picos contiguos de uno de los campos, midiéndose en unidades de longitud (mts. mm. μ m). La frecuencia mediría el número de ciclos por unidad de tiempo que pasan por un punto fijo, midiéndose en hercios (Hz).

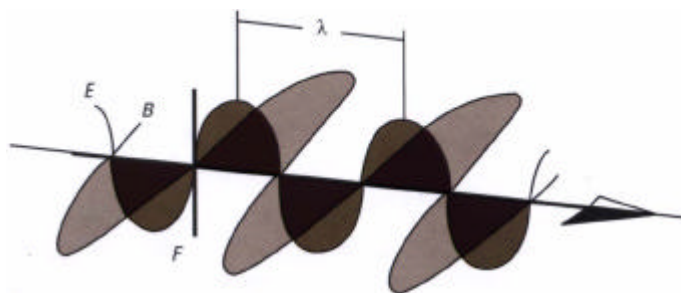


Figura 1: Esquema de una onda electromagnética en el que se diferencia el campo eléctrico (E) y el magnético (B), la frecuencia (F) y la longitud de onda (λ).

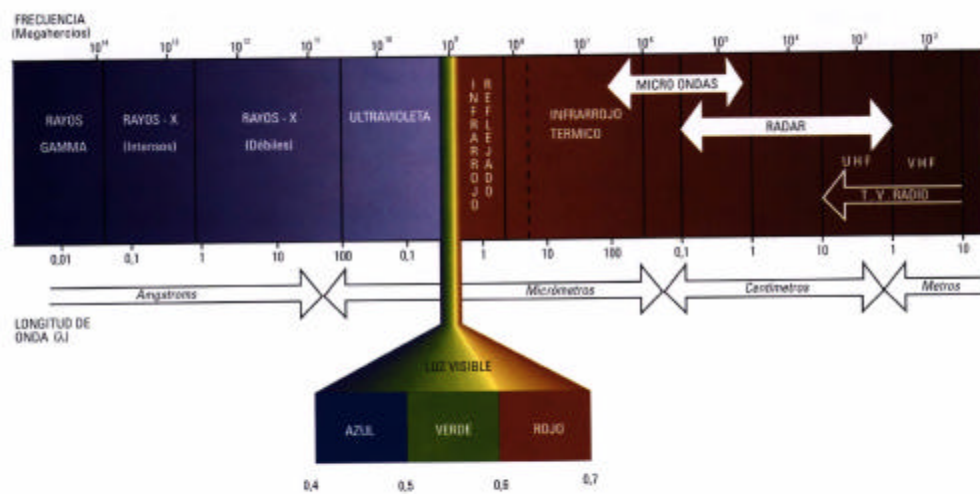


Figura 2: Representación esquemática del espectro electromagnético. (Adaptado de Chuvieco, 1990).

Tanto la longitud de onda como la frecuencia permiten clasificar los diferentes tipos de energía electromagnética (Fig.2)), recibiendo todos, en conjunto, el nombre de espectro electromagnético, y denominaciones particulares para cada una de las porciones del mismo (visible, ultravioleta, infrarrojo...). Como la velocidad de propagación es la misma para todos los tipos de energía electromagnética, existe una relación inversamente proporcional entre longitud de onda y frecuencia, es decir, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa, utilizándose ambos valores, de forma indiferente, para la clasificación de las ondas electromagnéticas.

Al ser la energía electromagnética la base de todos los sistemas de teledetección empleados en los satélites de recursos naturales, es imprescindible, para su funcionamiento, la existencia de una fuente de esta energía. Las fuentes de energía electromagnética utilizadas en teledetección espacial son esencialmente tres, dos de ellas naturales, en estrecha relación con su temperatura, y otra artificial:

- El sol es, con diferencia, la principal fuente de energía natural que se suele emplear en teledetección. Funciona como un cuerpo que emite energía de forma continua, siendo máxima esta emisión para las longitudes de onda comprendidas entre los 0.3 y 3 μm , valores entre los que se encuentra el espectro visible. La fuerte radiación en el visible lo convierte en fuente natural de radiaciones que son recibidas por otros cuerpos que, a su vez, las reflejan, absorben y transmiten.
- Cualquier cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto ($0^\circ \text{ Kelvin} \approx 273^\circ \text{ Centígrados}$) emite igualmente radiación electromagnética, con una intensidad y composición espectral muy diferente a la emitida por el sol, ya que está directamente relacionada con la

temperatura (alrededor de 6000° K para el Sol y 300°K. para la Tierra). En el caso de la radiación emitida (no reflejada) por los objetos de la superficie terrestre (segunda fuente natural de energía electromagnética), ésta alcanza su máximo en las longitudes de onda del infrarrojo térmico (de 8 a 12 μm). Como puede apreciarse, en la Fig. 3, a medida que aumenta la temperatura media de un cuerpo, el máximo de emisión se desplaza hacia longitudes de onda más cortas y viceversa.

- La tercera fuente de energía comúnmente utilizada en teledetección espacial es artificial. Generalmente se emplea a través de un sistema de teledetección activo que genera radiación electromagnética de gran longitud de onda (microondas o hiperfrecuencias) para posteriormente registrar su "eco" sobre la superficie terrestre. Este sistema es más conocido como "radar" y es de gran utilidad dada la buena penetrabilidad del tipo de energía utilizada a través de las nubes e, incluso, de cuerpos de gran homogeneidad (las arenas).

El efecto de la atmosfera sobre la energía electromagnética.

Una gran parte de la transmisión de energía se produce a través del cuerpo gaseoso que rodea nuestro planeta: la atmósfera. Sin embargo, en el tránsito de la radiación hacia el sensor, la atmósfera no se comporta como un cuerpo transparente, sino que impone a la misma un conjunto de modificaciones que es necesario conocer al utilizar cualquier sistema de teledetección. Los efectos son muy variados, destacando por su influencia en la teledetección espacial las modificaciones en la intensidad, frecuencia y distribución espectral de la radiación impuestas por la dispersión y la absorción atmosféricas. Ambas dependen de la altura de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación (que en el caso de los satélites espaciales es generalmente toda) antes de ser captada por el sensor, de su propia composición, del contenido en partículas en suspensión (muy importante en verano en nuestra región) y de las longitudes de onda en las que opere el sensor.

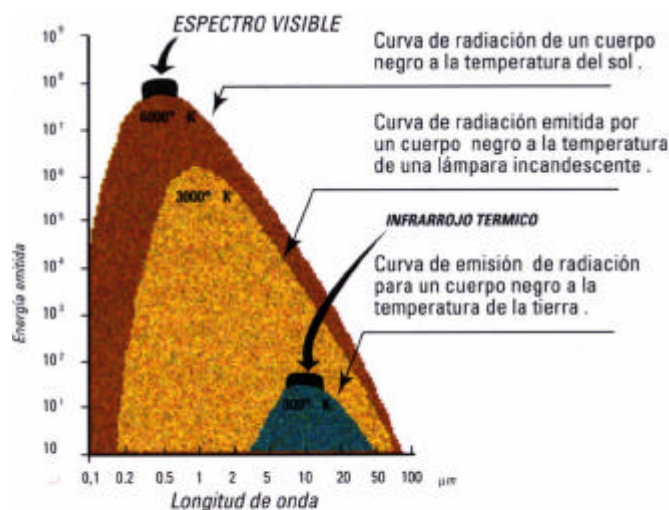


Figura 3: Curvas de radiación tipo a diferentes temperaturas.

En lo referente a la *dispersión atmosférica* (conocida con el término inglés "scattering"), este fenómeno aparece a causa de la difusión en todas las direcciones que las partículas en suspensión y las moléculas de los componentes de la atmósfera, producen sobre la radiación que interacciona con ellos. De forma general, este efecto de dispersión decrece a medida que aumenta la longitud de onda, aunque pueden distinguirse varios tipos:

- *Dispersión "Rayleigh"*: Este tipo de dispersión es producida por las moléculas y partículas atmosféricas que tienen un diámetro menor que la longitud de onda incidente, afectando especialmente a las longitudes de onda más cortas de espectro visible. Esta es la causa del "azul" del cielo en los días despejados.
- *Dispersión "Mie"*: Este tipo se produce cuando las partículas y moléculas presentes en la atmósfera tienen un diámetro de igual tamaño que la longitud de la onda de la energía incidente, afectando singularmente a longitudes de onda más largas que la dispersión Rayleigh.
- *Dispersión "no selectiva"*: Este tipo de dispersión, independiente de la longitud de onda de la energía incidente, se produce cuando las partículas y moléculas atmosféricas presentan un diámetro de mayor tamaño que la longitud de onda de la radiación. Un caso típico es el color blanco de las nubes, ya que los elementos y partículas que las forman reflejan con igual intensidad todas las longitudes de onda dentro del visible (azul, verde, rojo).

Este fenómeno de la dispersión atmosférica es un elemento que se debe tener siempre presente en cualquier proceso de análisis e interpretación de imágenes.

Por su parte, la *absorción atmosférica* está ligada a la retención de energía por parte de los diferentes componentes de la atmósfera, sobre todo del vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el oxígeno (O₂) y el ozono (O₃), aunque este fenómeno de la absorción es muy selectivo, limitándose a determinadas longitudes de onda dentro del espectro electromagnético (las inferiores a 0,3 μm por el ozono, por ejemplo).

Las regiones del espectro donde estos procesos son débiles, y por lo tanto la transmisión de energía se produce con facilidad, reciben el nombre de "ventanas espectrales" (Fig.4) y se centran especialmente en el ultravioleta, el visible y el infrarrojo reflejado y térmico, además de las longitudes de onda superiores a 1 mm., donde la transmisión atmosférica es total, siendo esta una de las principales razones de su frecuente uso en teledetección (radar). Lógicamente, los principales sensores utilizados en los sistemas de teledetección espacial se centran, por razones obvias, en las regiones de las ventanas espectrales y en las longitudes de onda donde la emisión es mayor.

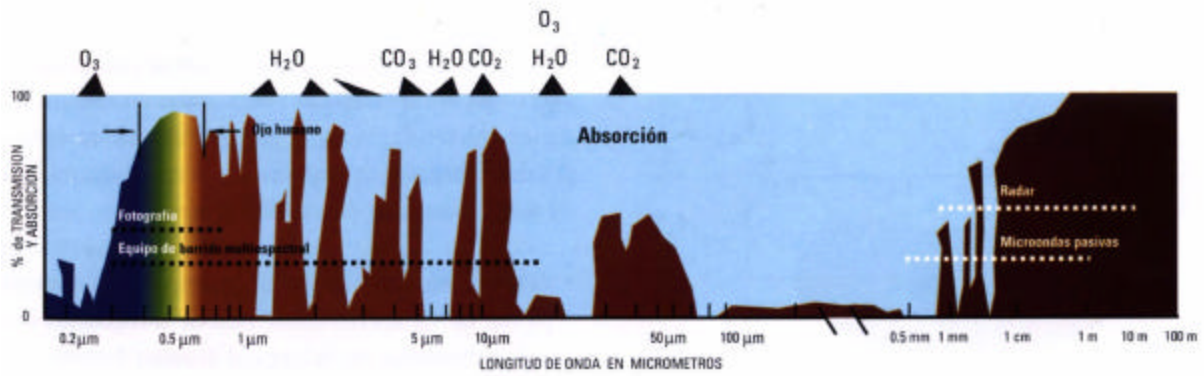


Figura 4: Transmisión y absorción atmosférica.

Las modificaciones sufridas en el superficie terrestre

La energía electromagnética que recibe la superficie terrestre, sufre diferentes procesos. Una parte puede ser reflejada y el resto penetra en los elementos de la superficie terrestre a través de ondas refractadas que pueden ser absorbidas o transmitidas, dependiendo de la naturaleza de los objetos y de la longitud de onda de la energía. Por otra parte, la energía absorbida es posteriormente devuelta en forma de energía emitida por los objetos, aunque dicha emisión se produce en otras longitudes de onda (generalmente más largas) dependiendo, como ya hemos visto, de su temperatura (Fig. 5). Aplicando el principio de la conservación de la energía podemos decir que:

$$E \text{ incidente} = E \text{ reflejada} + E \text{ absorbida} + E \text{ transmitida}$$

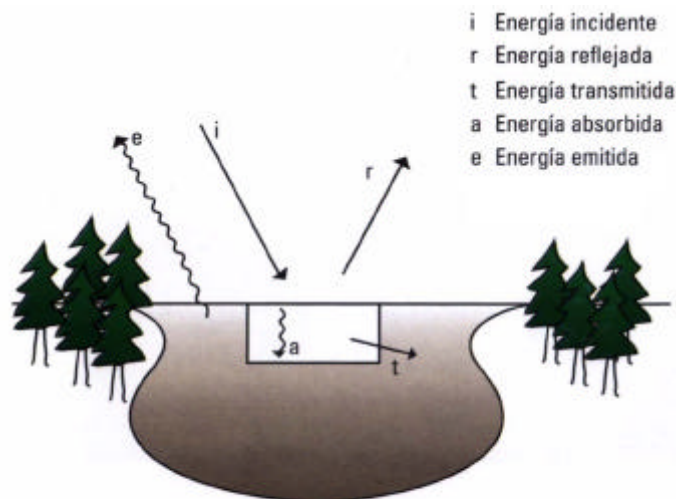


Figura 5: Modificaciones de la energía electromagnética en la superficie terrestre. (Adaptado de Chuvieco, 1990).

Ahora bien, las proporciones de energía reflejadas, absorbida y transmitida varían para cada objeto, lo cual nos permite discriminarlos con los sistemas de teledetección. Igualmente, para un mismo objeto las mencionadas proporciones varían con diferentes longitudes de onda, con lo que dos objetos pueden ser no distinguibles en una porción del espectro y perfectamente diferenciables en otra.

Como todos o la mayor parte de los sistemas de teledetección se sustentan en la energía reflejada o emitida por los objetos es interesante definir el concepto de *reflectividad o reflectancia* que equivaldría al porcentaje de energía reflejada respecto a la energía incidente. Sin embargo, la reflexión de los objetos depende, en gran medida, de su naturaleza interna y del grado de rugosidad de la superficie, pudiéndose diferenciar dos tipos de reflexión extremos:

- *Reflexión especular.* Se produce en superficies lisas y planas (donde las variaciones altimétricas de la rugosidad superficial sean menores que la longitud de onda). En estos casos el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, pudiendo llegar a ser muy molesta en teledetección al saturar el detector (reflejos en el agua para el espectro visible, por ejemplo).
- *Reflexión difusa:* Cuando las variaciones de la rugosidad superficial son mayores que la longitud de onda, la energía es reflejada más o menos uniformemente en todas las direcciones. Cuando la superficie refleja la energía uniformemente, con independencia del ángulo de incidencia recibe el nombre de "superficie Lambertiana" (arena, nieve...), dependiendo la reflectancia sólo de la longitud de onda.

Sin embargo, lo predominante en la naturaleza es una mezcla de ambos tipos, originándose grandes diferencias de reflectancia entre los objetos debido a la variabilidad de las texturas superficiales existentes y a la movilidad con que el relieve modifica el ángulo de incidencia.

Por otra parte, al mismo tiempo, cada uno de los objetos de la superficie terrestre emiten energía electromagnética (infrarrojo térmico) con una intensidad que está en relación con su temperatura, por lo que también puede ser utilizada para su identificación. Todo ello nos lleva al concepto de *emisividad (E)* que es la proporción de energía emitida en relación con la energía incidente o, lo que es igual, la proporción entre la energía emitida por un objeto y la que emitiría un perfecto emisor, un "cuerpo negro", a su misma temperatura.

Lo expuesto con anterioridad nos conduce, definitivamente, al concepto de "firma espectral" que vendría a ser el conjunto de valores característicos y propios de cada objeto, captados para los diferentes campos del espectro de los que se obtiene información, sustentándose gran parte de los procesos de interpretación de imágenes de satélite en el análisis y tratamiento de estos valores (Fig. 6).

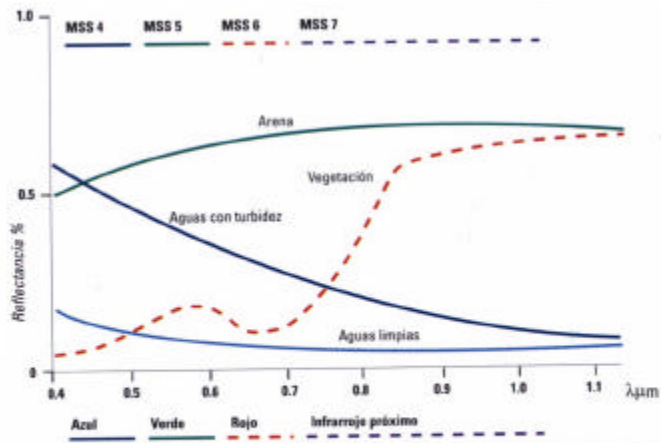


Figura 6: Firmas espectrales de algunos objetos característicos de la superficie terrestre. Ventanas espectrales del sensor MSS de Landsat.

En este sentido, la signatura espectral que captan los diversos sensores utilizados en teledetección reflejan el comportamiento de los diferentes objetos analizados en función de su mayor o menor capacidad de absorción, transmisión o reflexión de la energía que reciben, siendo este hecho condicionado por la estructura y composición del elemento observado (Fig. 7). Incluso un mismo objeto puede variar su respuesta espectral en función de su estado y relación con el entorno, permitiendo la teledetección calibrar variaciones estacionales en los ciclos de la naturaleza, como se muestra en el caso de diferentes cubiertas vegetales en las figuras 8, 9, 10 y 11.

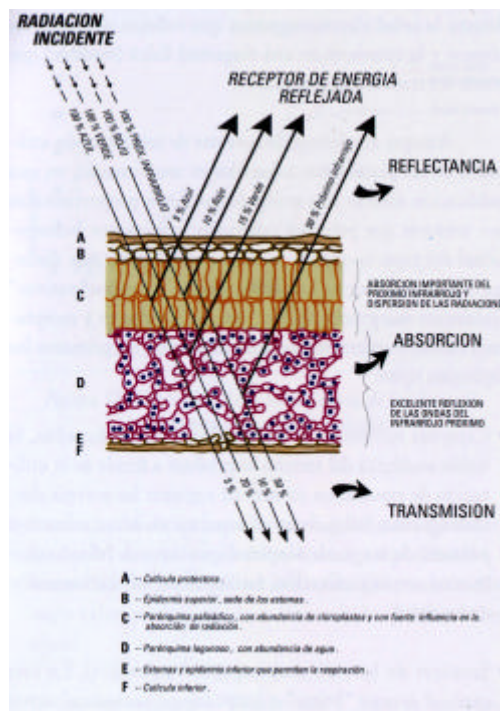


Figura 7: Comportamiento de la energía electromagnética condicionado por la estructura de una hoja.

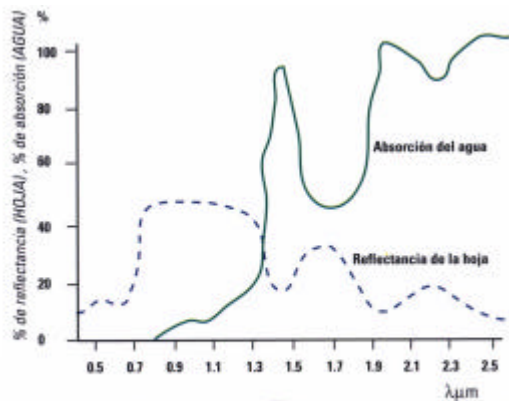


Figura 8: Relación inversa entre reflectancia y absorción por el agua en el espectro visible e infrarrojo próximo.

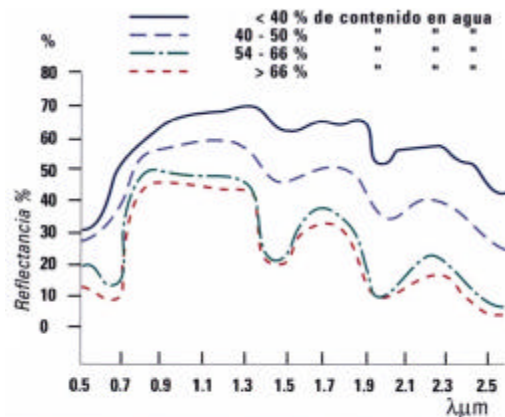


Figura 9: Efecto del contenido en agua en la respuesta espectral de las hojas de maíz.

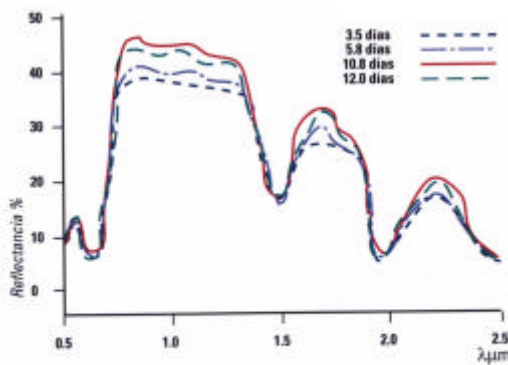


Figura 10: Evolución de la reflectancia de una hoja de algodón en función de su crecimiento.

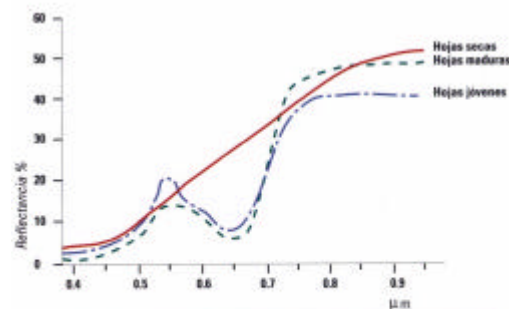


Figura 11: Evolución de la reflectancia de las hojas de alcornoque según su fenología.

La adquisición de los datos. Sensores y Plataformas

La radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos puede ser captada por unos dispositivos adecuados que reciben el nombre genérico de "sensores" y, aunque bajo esta denominación se puede incluir la fotografía, se suele reservar el término para aquellos instrumentos que miden la radiación de forma electrónica, transformando su intensidad en un valor "numérico". Se puede decir que desde que se comenzaron a utilizar de forma operativa en la década de los años 60, hasta la actualidad, su estructura es la misma. Generalmente se componen de: *instrumentos de toma o captación*, con los que se delimita la zona observada, de *detección*, con los que se seleccionan las zonas de espectro cuya radiación interesa medir y, finalmente, están equipados con técnicas adecuadas para el *almacenamiento* de los datos en un soporte estable (films, cintas magnéticas...) o bien para transmitirlos a una estación terrestre donde son registrados y adecuadamente almacenados.

El posterior tratamiento y análisis de estos datos numéricos permite obtener una "imagen" bidimensional (analógica) de la zona inspeccionada, cuya calidad espectral y espacial dependerá de las peculiaridades de cada sensor. En definitiva un sensor no es más que un

instrumento que detecta la señal electromagnética que reflejan o emiten los objetos y la convierte en una magnitud física (medible) que puede ser tratada y registrada.

Aunque el número de sistemas de teledetección utilizados en las plataformas espaciales es muy variado, en esta publicación sólo se han utilizado los datos proporcionados por sensores que permiten componer una imagen bidimensional del espacio observado. Entre ellos habría que distinguir, en primer lugar, los denominados sensores "pasivos" (solamente receptores), de los "activos" (emisores y receptores), siendo frecuentemente utilizados entre los primeros los siguientes tipos:

- *Captore instantáneos de tipo fotográfico.* En ellos, la visión analógica del terreno se produce a través de la utilización de emulsiones capaces de registrar la energía electromagnética reflejada en el espectro e infrarrojo próximo. Se les puede acoplar dispositivos de barrido electrónico con digitalización, facilitándose así la transmisión de los datos.
- *Sensores de barrido multiespectral (scanners).* En este caso, el sensor "barre" o inspecciona secuencialmente sucesivas parcelas del terreno (pixel) para construir las líneas que constituyen la imagen. La radiación captada en cada una de ellas pasa por una serie de filtros (espectrómetro) individualizando las longitudes de onda seleccionadas (generalmente dentro del visible e infrarrojo reflejado y térmico) y las dirige hacia los correspondientes detectores, los cuales emiten una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la energía recibida para cada una de ellas, cuyo valor es almacenado o transmitido. Existen varios tipos:
 - De espejo oscilante ("*Wiskbroom*"). Aquí es un espejo oscilante con una velocidad de rotación adaptada a la velocidad de la plataforma espacial quien barre secuencialmente la escena observada a través de líneas perpendiculares a la dirección de la órbita. Un ejemplo bastante conocido es el Multispectral Scanner (MSS) embarcado en los satélites LANDSAT.
 - En otros casos, cuando el satélite permanece fijo sobre un punto concreto de la superficie terrestre, el barrido de la imagen se consigue por el giro del satélite sobre sí mismo. (METEOSAT).
 - Recientemente se han construido sensores de "matriz lineal", donde un conjunto importante de detectores sólidos captan, de una sola vez, cada una de las líneas de la imagen ("*Pushbroom*"), con lo que se eliminan problemas de calibración, inducidos por el giro inherente a los sensores de espejo oscilante. Este sistema equipa al sensor HRV del satélite SPOT.

Los sensores activos, generalmente conocidos como "radar", se diferencian de los anteriores en que van equipados con un dispositivo que emite una señal en una determinada longitud de onda (generalmente entre 1 y 30 cms.), que posteriormente es vuelta a captar por el sensor una vez

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).

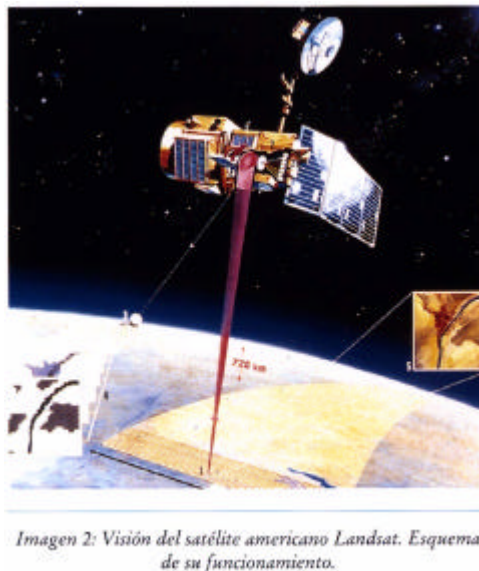


Imagen 2: Visión del satélite americano Landsat. Esquema de su funcionamiento.

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.