

# Diplomado en Análisis de Información Geoespacial

## Introducción a los datos tipo raster

**Autores:**

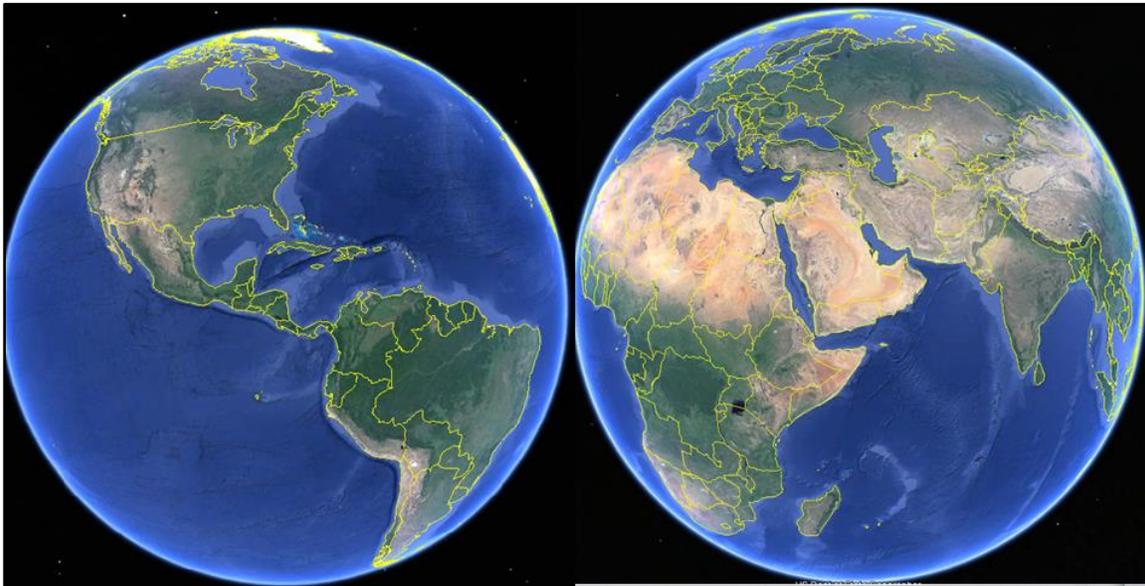
**M. en G. Daniel M. López López**

**M. en G. Aura C. Torres Gómez**

## Introducción

En las últimas cinco décadas se desarrolló una impresionante capacidad para observar la Tierra desde el espacio. La observación diaria, global y sinóptica de la superficie terrestre ha revolucionado el estudio de la Tierra y nos condujo a una nueva era de multidisciplinariedad en la dimensión espacio-tiempo.

La visión desde el espacio provee a los científicos de imágenes y parámetros globales no logrados con ningún sistema de observación terrestre en términos de frecuencia, homogeneidad y cobertura. La visión global, sinóptica (ver figura 1) y continúa desde el espacio, es única para estudiar la dinámica y la variabilidad de los procesos terrestres.



*Figura 1. Visión global – sinóptica de la superficie terrestre. Fuente: Google Earth.*

La observación de la Tierra desde el espacio ha permitido generar el más completo registro de parámetros biológicos, físicos y químicos.

La percepción remota ha contribuido a alcanzar grandes logros científicos, por ejemplo mejoró la predicción de los procesos del sistema terrestre, lo cual dio paso a la realización de pronósticos meteorológicos, la detección y monitoreo de cambios en la cobertura terrestre, el estudio de la dinámica del océano y su relación con el clima, así como a las evaluaciones de la capa de ozono.

A continuación se presentan algunos temas de diversos campos de estudio en los que la percepción remota juega un papel fundamental.

- **Meteorología:** Propiedades de la atmósfera y pronóstico del tiempo, predicción y prevención de desastres naturales.
- **Balance de radiación de la superficie:** El papel de las nubes y aerosoles, y su relación con el sistema climático.
- **Composición de la atmósfera:** Adelgazamiento o disminución de la capa de ozono y la polución global.
- **Hidrología:** Estimación de precipitación, análisis y cartografía de aguas superficiales y subterráneas, uso de modelos digitales en hidrología, estudios de sedimentación, cartografía de áreas inundables (figura2).
- **Criosfera:** Estudio de los glaciares.
- **Características y dinámica oceánica:** El papel del océano en el cambio climático, estudio de las mareas e interacción océano-atmósfera.
- **Los ecosistemas y el ciclo del carbono:** Productividad primaria neta, global marina y terrestre, el ciclo del carbono, estudio de la fisiología de las plantas desde el espacio, etc.
- **Cambio en uso y cobertura terrestre:** Monitoreo de tierras agrícolas (figuras 3 y 4), estimación de la deforestación, cartografía de la cobertura terrestre, determinación del vigor de la vegetación y de la biomasa, cartografía y planeación urbana, estudios de degradación, entre otros.

- **Tierra como un sólido:** Estructura y dinámica del interior de la Tierra, tectónica de placas, topografía, sismología, vulcanología y cartografía geológica.

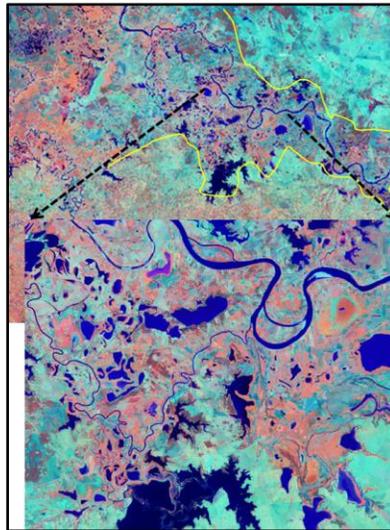


Figura 2. López, D. (2013). Mapeo de áreas inundables. Llanura de inundación del río Usumacinta, Tabasco. Imagen LANDSAT-TM.

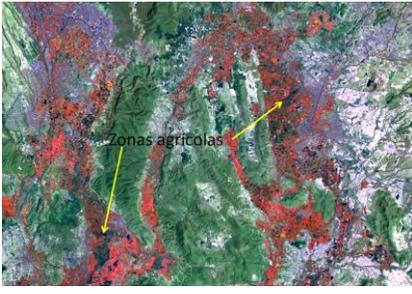
	<p>Los círculos ubicados en la parte superior derecha corresponden a áreas agrícolas con sistema de riego por cañón. Imagen LANDSAT CCC 453</p>
	<p>Tierras agrícolas en la zona de Cuernavaca, Morelos. Imagen LANDSAT CCC 453</p>

Figura 3. López, D. (2013). Tierras agrícolas. A la izquierda, San Luis Río Colorado, México y Yuma, EEUU; a la derecha, Cuernavaca, México.

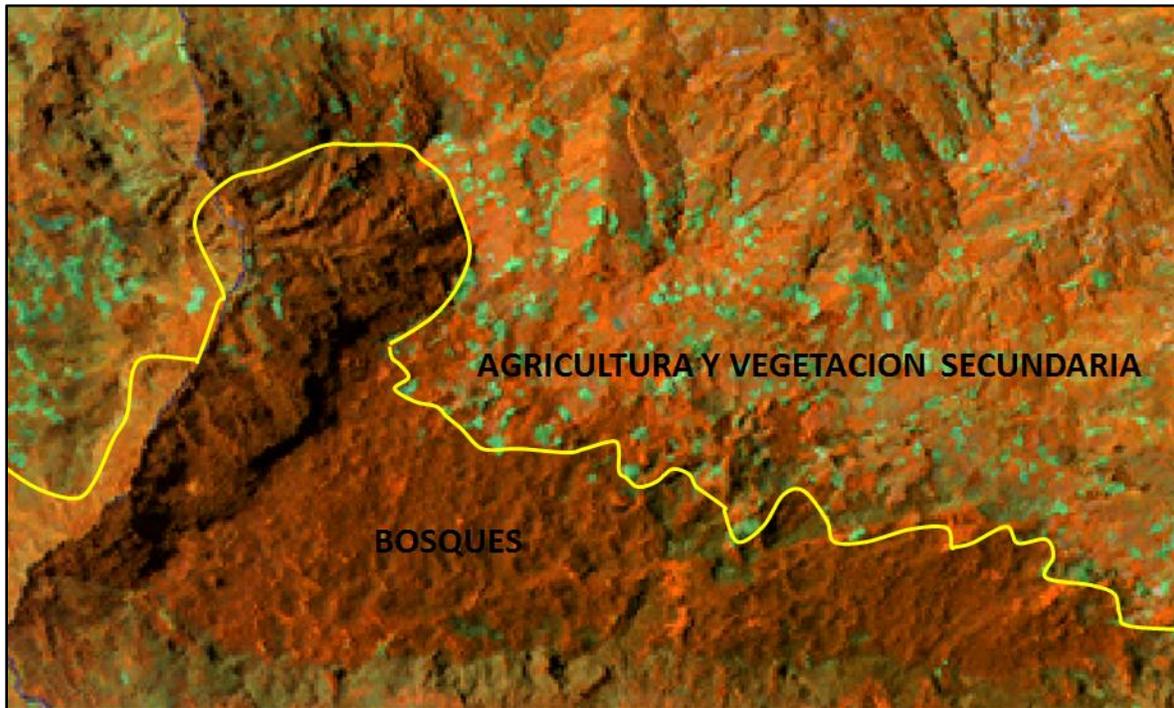


Figura 4. López, D. (2013). Expansión de la frontera agrícola sobre coberturas boscosas, Chiapas, México. Imagen LANDSAT-TM, CC453.

## Principios básicos de la percepción remota

El término percepción remota o teledetección es una traducción del término inglés “**remote sensing**”, que se refiere a la captación de datos desde el aire o el espacio, así como a su tratamiento posterior. De acuerdo con Lillesand y Kiefer (2000), se le define como la ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área, o fenómeno, a través del análisis de información o datos adquiridos por algún instrumento que no esté en contacto directo con el objeto, área, o fenómeno bajo investigación.

La percepción remota consiste en la identificación de los objetos a partir de la diferencia en la energía que reflejan y/o emiten. La posibilidad de adquirir información de un objeto a distancia para identificarlo se basa en la interacción específica de la radiación electromagnética y la materia.

Existen tres tipos de información a partir de los cuales se pueden diferenciar los objetos, los cuales se describen a continuación.

- **Diferenciación espectral de la energía reflejada o emitida.** Se manifiesta en rasgos y patrones representados por las variaciones en la respuesta espectral de los objetos, según sus características físicas, químicas o fisiológicas.
- **Diferenciación espacial de los detalles del objeto.** Ésta depende del tamaño del objeto, las características del sensor y la altura de observación; indica la organización de los elementos en el espacio y denota la naturaleza de las superficies.
- **Diferenciación radiométrica.** Consiste en detectar cambios en los niveles de “luminosidad” (brightness) de un objeto. Esta técnica depende de la sensibilidad de los sensores.

Esta información se encuentra relacionada estrechamente con tres conceptos fundamentales: resolución espacial, resolución espectral y resolución radiométrica de los sensores:

- **Resolución espacial.** Se refiere a las dimensiones del rasgo más pequeño que es posible detectar, lo cual define el detalle espacial que se distingue en una imagen. En el caso de los sensores pasivos, depende del campo instantáneo de vista o IFOV, que es el cono angular de visibilidad del sensor. Éste determina el área vista por el sensor a una altura dada.
- **Resolución espectral:** Describe la habilidad de un sensor para definir (registrar) intervalos de longitudes de onda. Entre más fina sea la resolución espectral, más estrecho será el rango de longitud de onda para una banda en particular. La resolución espectral también se refiere al número de bandas de un sensor.

- Resolución radiométrica:** Describe la habilidad de un sistema para discriminar diferencias muy ligeras en la energía. Entre más fina sea la resolución radiométrica de un sensor, mayor será su sensibilidad para detectar pequeñas variaciones en la energía reflejada o emitida. La resolución o sensibilidad radiométrica se refiere al número de niveles digitales utilizados para expresar la información adquirida por el sensor en una escala de gris (brillo). Se expresa comúnmente como el número de bits (dígitos binarios) y se refiere al rango dinámico, o número de posibles valores, que puede tomar cada dato. Por ejemplo, con 8 bits, el rango de valores va de 0 a  $255 = 2^8$ .

### El proceso de percepción remota

El proceso de percepción remota incluye la interacción entre la radiación incidente y los objetos o fenómenos de interés, en donde se involucran siete elementos, como se ilustra en la figura 5.

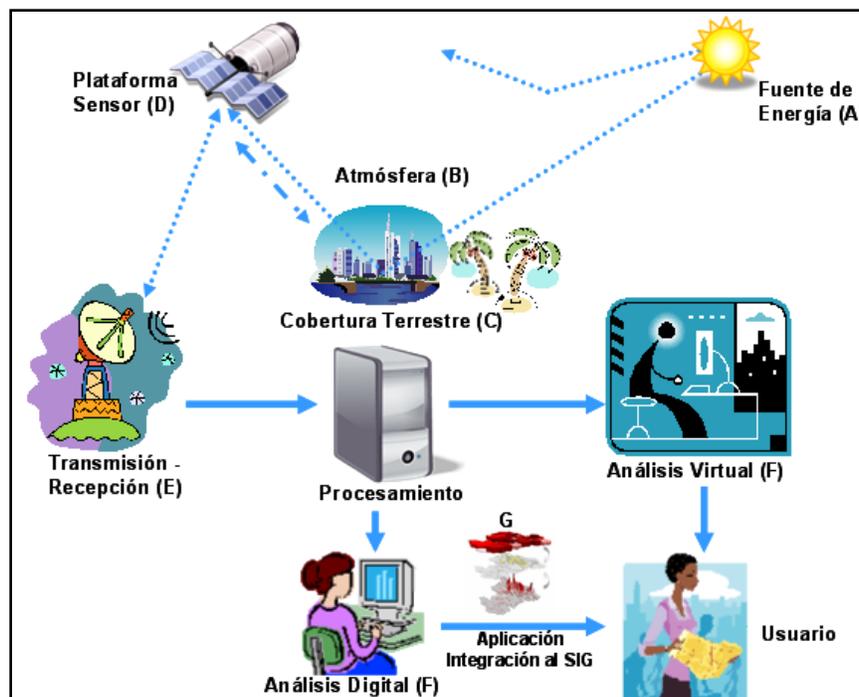


Figura 5. López, D. (2013). El proceso de percepción remota.

- **Fuente de energía o iluminación: el Sol [A].** La percepción remota requiere de una fuente que ilumine o provea de energía electromagnética al objeto de interés.
- **Radiación y atmósfera [B].** La energía electromagnética interactúa con la atmósfera antes y después de que alcanza la superficie terrestre.
- **Interacción con el objeto [C].** Después de su contacto con la atmósfera, la energía interactúa con el objeto. El proceso depende de las propiedades del objeto y de la radiación.
- **Registro de energía por el sensor [D].** Una vez que la energía ha sido reflejada o emitida por el objeto, es registrada y medida por el sensor (de manera remota).
- **Transmisión, recepción y procesamiento [E].** La energía registrada por el sensor se trasmite, de manera electrónica, a una estación de recepción y procesamiento, donde los datos son convertidos en una imagen (digital o análoga).
- **Interpretación y análisis [F].** La imagen es analizada e interpretada visual y/o digitalmente para extraer la información del objeto de interés.
- **Aplicación [G].** El objetivo del proceso se cumple cuando la información extraída de las imágenes se aplica (se integra) a la comprensión del fenómeno de estudio, a la solución de un problema o una vez que se descubre nueva información.

## El espectro electromagnético. La distribución de las energías radiantes

La distribución de toda la energía de los fotones sobre el rango observado de frecuencias es condensada en el término espectro. El Sol emite un espectro continuo de energía que va desde los rayos gamma hasta las microondas (figura 6), la luz visible es una de muchas formas de la energía electromagnética.

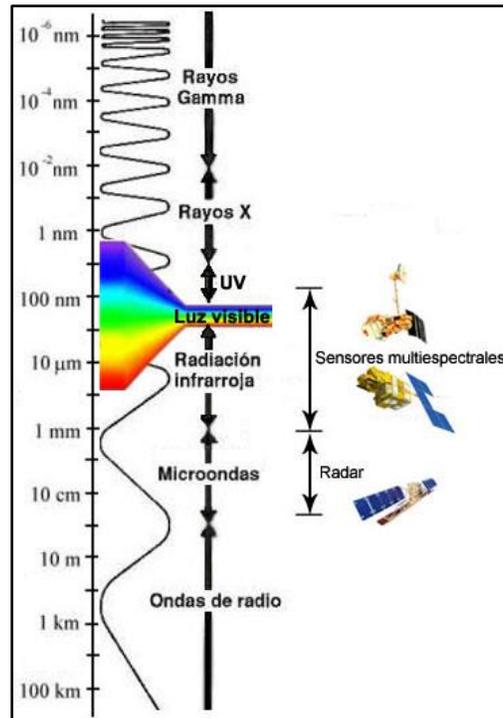


Figura 6. Representación del espectro electromagnéticos [Imagen], recuperada el 31 de Enero de 2017, de: <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/espectro.htm>

Podemos definir cualquier tipo de energía con su longitud de onda o frecuencia. El espectro electromagnético es la sucesión continua de esos valores de longitud de onda, aunque para propósitos prácticos se divide en sectores o bandas, en las que la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

Existe una serie de bandas o sectores más utilizadas en los sensores remotos, que se describen a continuación:

- **Región del espectro visible (0.4 - 0.7  $\mu$ m).** Es la única radiación electromagnética perceptible al ojo humano, coincide con el rango de longitud de onda, donde la radiación solar es máxima. La región visible es la única que

podemos asociar directamente con el concepto de “color”, como se describe en la figura 7.

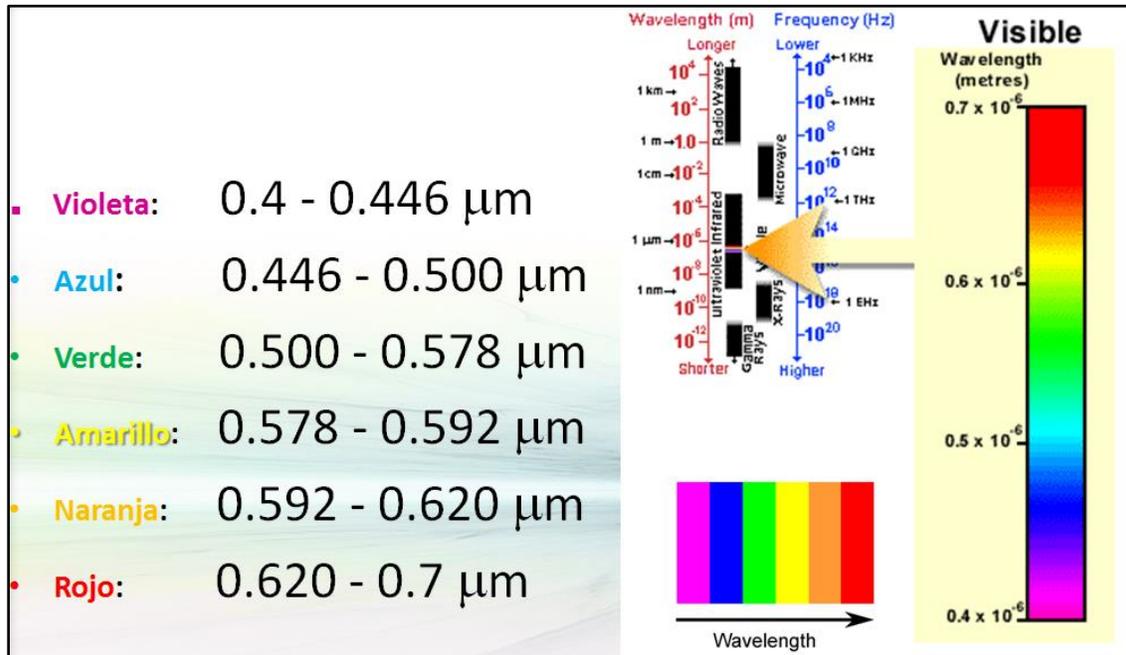


Figura 7. Región del Visible [Imagen], recuperada el 31 de enero de 2017, de:  
<http://www.geowebrum.org/0contenidos/cursos/percepcion/022.html>

- **Región del infrarrojo (0.7 μm a 100 μm).** Otra región de interés en la percepción remota es la del infrarrojo (IR), que cubre los rangos de longitudes de onda entre aproximadamente 0.7 μm a 100 μm (100 veces más amplia que la región visible). La región del infrarrojo puede dividirse en dos categorías con base en sus propiedades radiativas (figura 8):
  - **La región infrarroja reflejada** cubre un rango de longitud de onda entre 0.7 a 3.0 μm. Ésta se puede dividir en dos subregiones:
    - **Infrarrojo cercano próximo (0.7 - 1.3μm).** Se trata de una banda importante para diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- **Infrarrojo medio** (1.3 - 8  $\mu\text{m}$ ). En esta región se mezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre, por lo que hay muchas dificultades.
- **La región infrarroja emitida** cubre un rango de longitud de onda entre 3.0 y 100  $\mu\text{m}$ . Como la temperatura de la superficie terrestre es de unos 300  $^{\circ}\text{K}$ , su emitancia espectral es máxima en la banda entre 8 y 14  $\mu\text{m}$  (infrarrojo térmico).

Esto permite detectar el calor que procede de las distintas superficies, a partir de la medición de la energía emitida y en función de la temperatura.

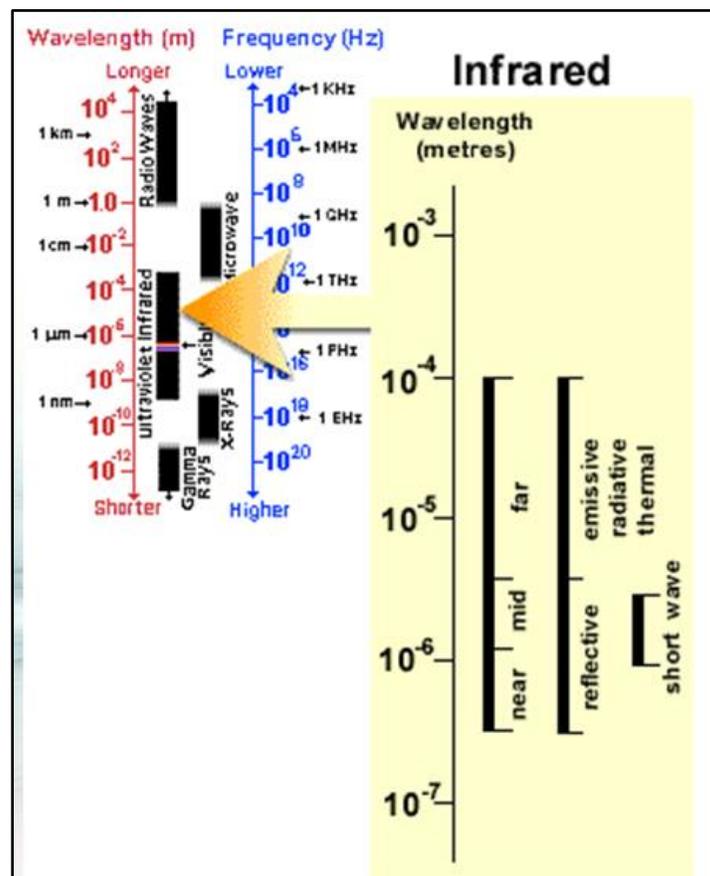


Figura 8. Región del Infrarrojo [Imagen], recuperada el 31 de enero de 2017, de: <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>

**Región de microondas (1 mm. – 1 metro).** Tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa y lleva asociada muy poca energía. Si se quiere utilizar esta banda, tendrá que ser con teledetección activa.

Las regiones de longitud de onda más cortas del espectro micro-ondas tienen características similares a la región térmica infrarroja, mientras que las regiones de longitud de onda más amplias tienen características similares a las ondas de radio.

Es importante señalar que los sistemas de radar operan en el rango de la región de microondas del espectro electromagnético, más allá del visible y de la región del infrarrojo térmico (figura 9). Todos los cuerpos de la superficie terrestre emiten energía en esta región del espectro.

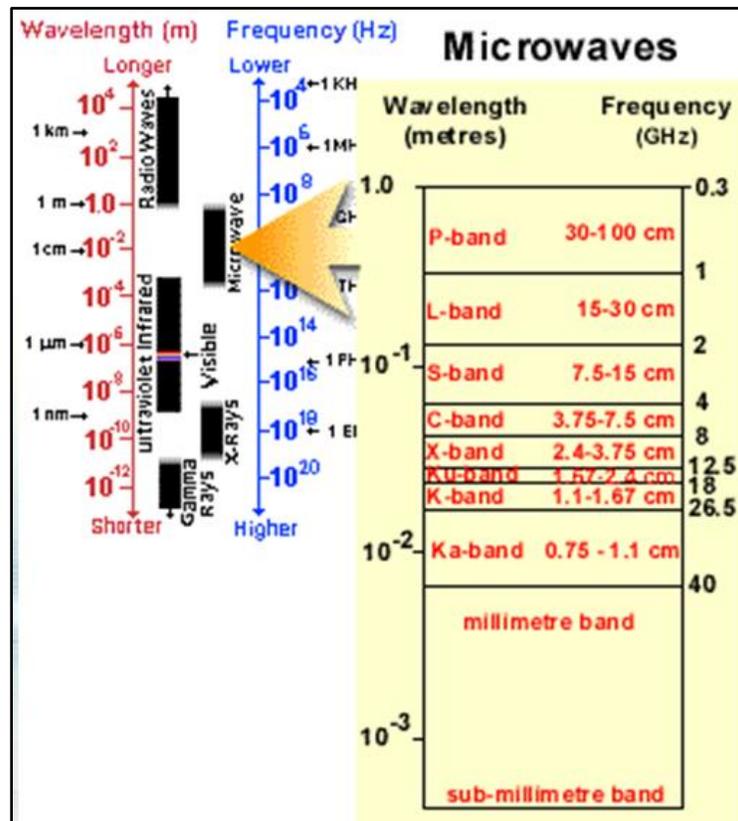


Figura 9. Región del Microondas [Imagen], recuperada el 31 de enero de 2017, de: <http://www.geowebrum.org/0contenidos/cursos/percepcion/022.html>

## Datos raster

La imagen digital (dato raster) es la caracterización numérica de la distribución de la energía radiante que proviene de la escena bajo estudio. La extracción de información a partir de ésta es vital para entender el comportamiento de la escena, de aquí que la percepción remota esté basada fundamentalmente en el procesamiento digital de imágenes (Lira J., 2002).

## Píxel y nivel digital

El sensor explora secuencialmente la superficie, adquiriendo a intervalos regulares la radiación reflejada por los objetos. La radiación emitida por la fuente (el sol, por ejemplo) interactúa con un elemento físico de la escena, denominado campo instantáneo de vista (CIV).

El píxel o elemento pictórico es la unidad básica de una imagen digital. También se le conoce como tamaño de celda y se refiere al área de la superficie terrestre a partir de la cual el sensor registra la energía reflejada o emitida.

Existen dos tipos de píxeles, puros, cuando el sensor registra energía de un objeto homogéneo, y mezclados, cuando el sensor registra energía de dos o más tipos de coberturas (objetos diferentes). Este es un aspecto que depende de dos factores fundamentales: la heterogeneidad del paisaje y el tamaño del píxel (resolución espacial de la imagen).

El sensor detecta la radiación media reflejada-emitida por el objeto, equivalente al tamaño del píxel, que es el elemento lógico correspondiente al CIV. La irradiación integrada en cada píxel se convierte en una señal eléctrica y cuantizada como un valor entero, un valor numérico que se denomina **Nivel Digital (ND)**.

El **ND** de una banda espectral depende de la capacidad del objeto para reflejar o emitir energía y de la longitud de onda de la radiación, por lo tanto, el valor del píxel varía de banda a banda.

Las interacciones de la radiación electromagnética con la atmósfera (procesos de absorción y reflexión) es otro de los factores importantes que afectan el valor del píxel. Cuando se despliega una imagen en una computadora, el valor numérico, no visual, se traduce a una intensidad visual (o nivel de gris) mediante un convertidor digital-analógico.

- **Matriz de datos en una imagen digital**

La organización de los datos en una imagen digital se puede esquematizar así: una matriz numérica de tres dimensiones, las dos primeras corresponden a las coordenadas de la imagen y la tercera al valor radiométrico registrado por el sensor. La figura 10 muestra un esquema de este arreglo para una escena LANDSAT y una de tipo AVIRIS.

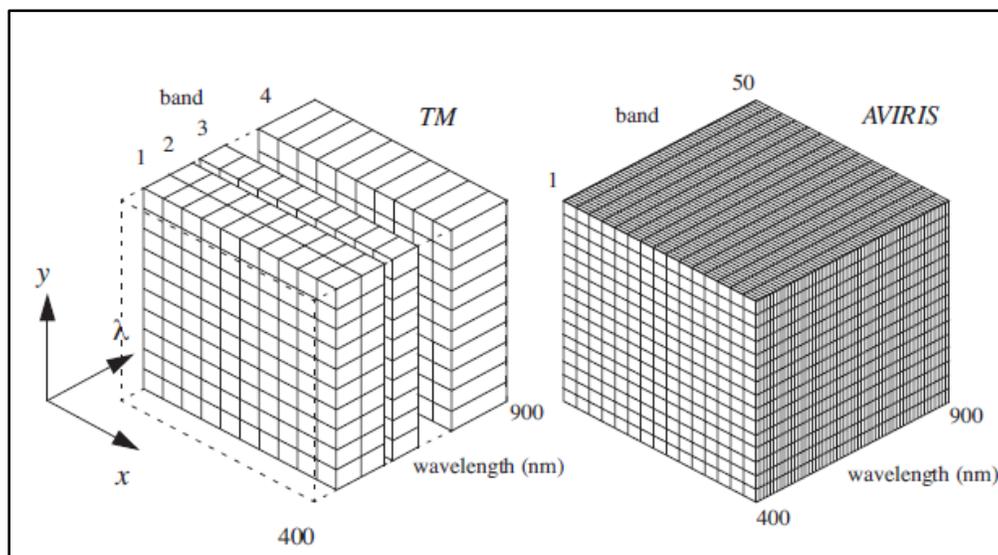


Figura 10. Representación del muestreo espacial y espectral de Landsat-TM y AVIRIS. Fuente, Schowengerdt R. A., 2007

La orientación aproximada norte-sur define las líneas y la orientación este-oeste, las columnas. En esta matriz el origen de las coordenadas se ubica en la esquina superior izquierda, esto se explica por la secuencia de adquisición de las imágenes, de norte a sur, de acuerdo con el rumbo del satélite.

A continuación se ilustra el concepto de la matriz numérica, el ejemplo corresponde a una pequeña ventana de las bandas 6 y 7 del sensor TM.

En la figura 11 (banda 6), los valores entre 97 y 99 corresponden a un cuerpo de agua (se pueden considerar píxeles puros); los valores entre 100 y 109 corresponden a los píxeles del borde del lago (píxeles mezclados), los cuales representan un promedio entre el valor emitido por el agua y el valor emitido por la vegetación (el objeto adyacente); los píxeles con valores mayores a 110 corresponden a áreas con vegetación.

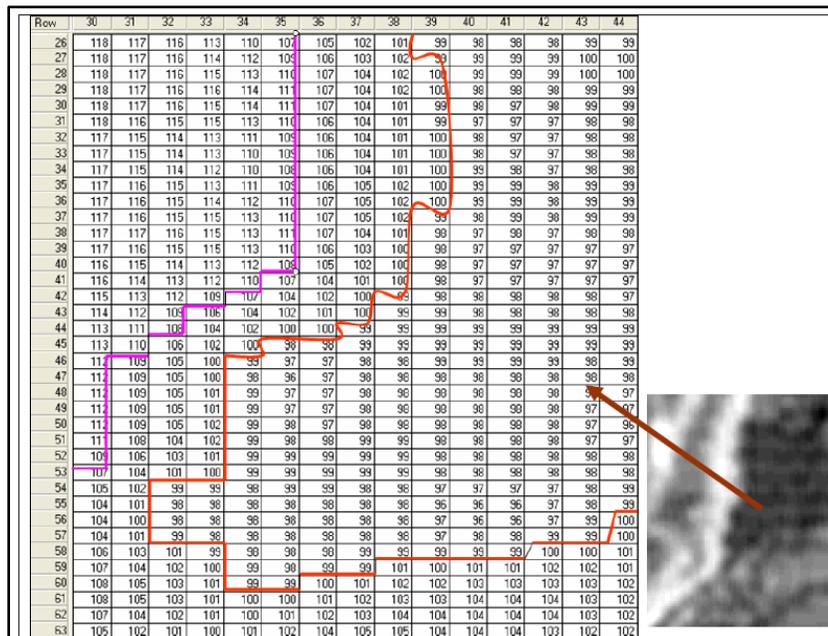


Figura 11. López, D. (2013). Matriz numérica y formato análogo, banda 6, Landsat TM.

En la figura 12 (banda 7), el agua presenta valores entre 5 y 9; los píxeles del borde presentan valores entre 10 y 22. Los valores de 27 y mayores corresponden a las áreas con vegetación.

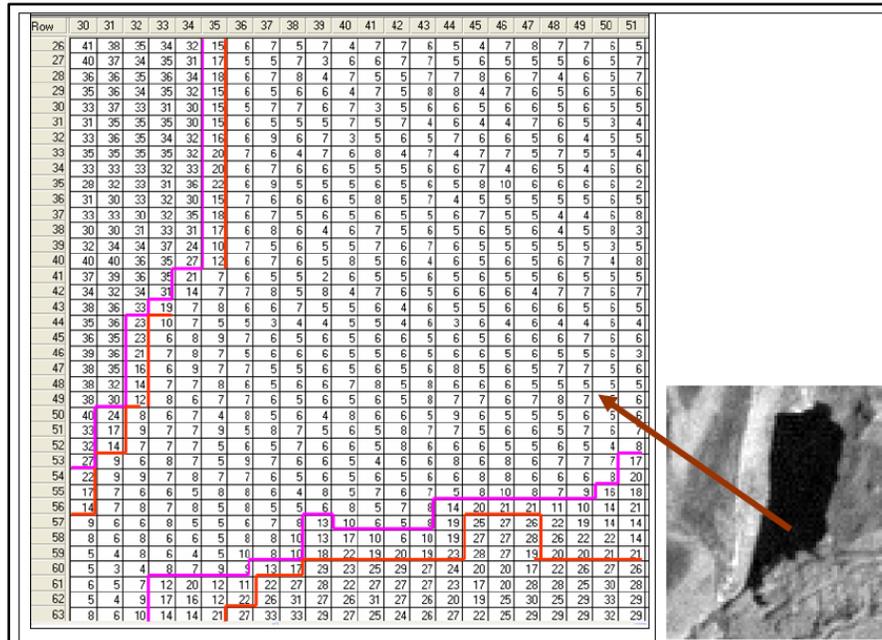


Figura 12. López, D. (2013). Matriz numérica y formato análogo, banda 7, Landsat TM.

La variación que se aprecia en la forma y tamaño del lago (tanto en la matriz como en la imagen) se debe a la diferente resolución espacial de las dos bandas 6 y 7, que es de 60 y 30 metros, respectivamente.

### Interacciones de la radiación electromagnética

La energía registrada en los sensores remotos está sujeta a múltiples interacciones con la atmósfera y la superficie terrestre que se deben entender para interpretar adecuadamente los datos raster.

- **Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera**

La energía solar que incidente en nuestro planeta está cifrada en  $340 \text{ Wm}^{-2}$  (vatios/m<sup>2</sup>). De ella sólo  $173 \text{ Wm}^{-2}$  llegan a la superficie terrestre, esta reducción o albedo se debe tener en cuenta al interpretar la respuesta de los objetos.

La radiación electromagnética, debido a su contacto con la atmósfera, experimenta tres fenómenos: **absorción, dispersión y emisión** (figura 13). Los efectos de la interacción entre la radiación electromagnética y la atmósfera se pueden corregir mediante distintos algoritmos.

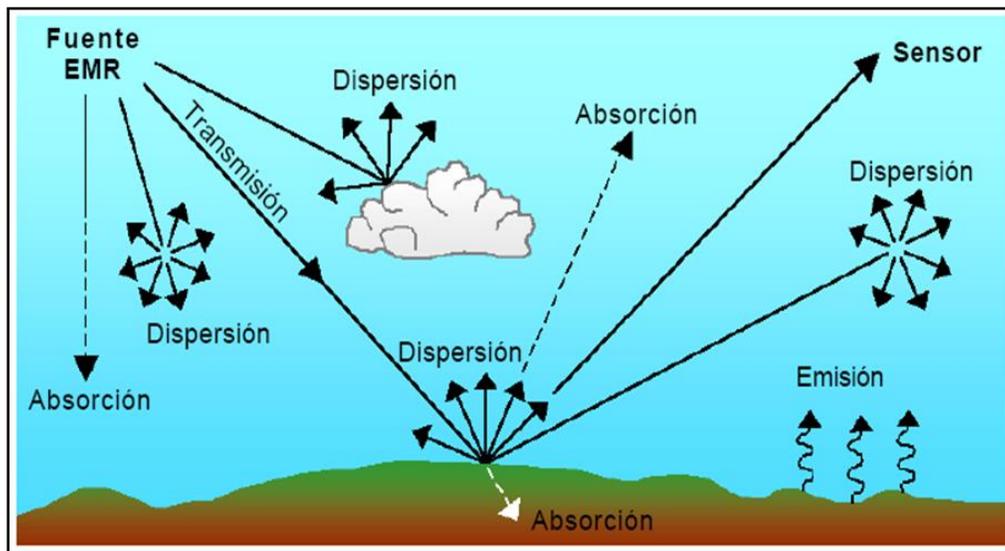


Figura 13. Interacción de la radiación con la atmósfera [imagen], recuperada el 31 de Enero de 2017, de: <http://remote-sensing.net/concepts.html>

- **Fenómeno de absorción**

Proceso por el cual las moléculas y partículas de la atmósfera absorben la energía radiante ( $65 \text{ Wm}^{-2}$ ) y la transforman en energía interna, que posteriormente se emite en el infrarrojo térmico.

El ozono, el bióxido de carbono y el vapor de agua son los constituyentes atmosféricos que en mayor medida absorben la radiación solar. La atmósfera reduce así la observación espacial a ciertas bandas concretas del espectro, llamadas ventanas atmosféricas (figura 14).

Si lo que se pretende estudiar es la atmósfera (satélites meteorológicos), los sensores deben diseñarse para captar la radiación en los lugares donde la absorción atmosférica sea más alta.

De lo anterior se concluye que la atmosfera está esencialmente cerrada en ciertas porciones del espectro, mientras que existen ventanas atmosféricas en otras regiones que transmiten la energía incidente a la superficie terrestre. Es dentro de estas ventanas que operan los sistemas de sensores remotos

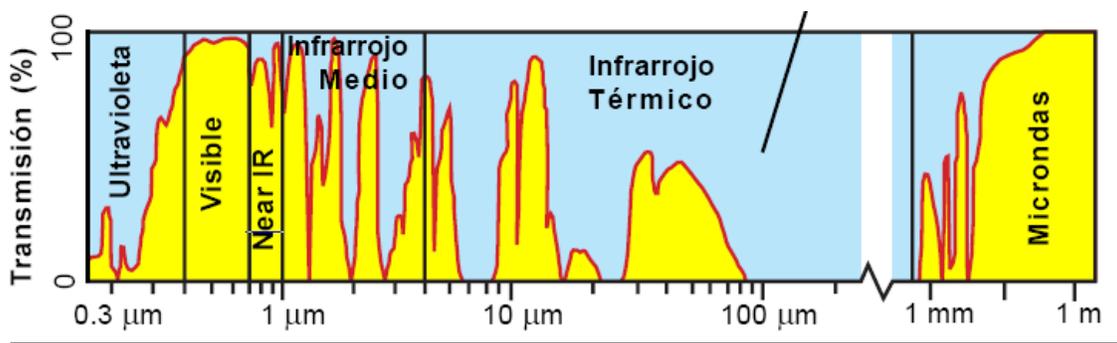


Figura 14. Espectro de absorción de la radiación electromagnética entre 0.3  $\mu\text{m}$  y 1 m., recuperada el 31 de Enero de 2017.

<https://www.google.com.mx/search?q=ventanas+atmosfericas+teledeteccion&source>

[http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/atmos\\_td.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/atmos_td.htm)

- **Fenómeno de dispersión (Scattering)**

Este fenómeno se traduce en un redireccionamiento o ligero desvío de la trayectoria recta que debería seguir la radiación electromagnética al propagarse. Es causado por la interacción de la radiación con gases y partículas atmosféricas.

La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre. Se reduce, por tanto, la radiancia directa y aumenta la radiancia difusa. Los principales causantes de este fenómeno son los aerosoles y el vapor de agua.

- **Fenómeno de emisión**

Cualquier cuerpo con temperatura mayor que  $-273\text{ }^{\circ}\text{K}$  emite su propia radiación, que lógicamente tiene mayor importancia en el infrarrojo térmico. Por tanto, su efecto es fundamental si pretendemos trabajar en la banda del infrarrojo térmico.

Cuando se trabaja en el infrarrojo térmico, el objetivo fundamental es estimar la temperatura de la superficie terrestre. Pero como los datos que llegan al satélite incluyen la emisión de la superficie y de las diferentes capas de la atmósfera, resulta difícil distinguir un efecto del otro. Por fortuna, existen diversas técnicas para solventar este problema a través de la corrección de imágenes.

- **Interacciones de la radiación electromagnética (región visible e infrarroja) con la superficie terrestre**

Existen tres tipos de interacción de la energía incidente con la superficie terrestre. Estas son: **absorción, transmisión y reflexión (reflectancia)**.

Cuando los objetos de la superficie terrestre absorben la energía, se calientan y pueden emitir parte de su energía a la atmósfera. La proporción de energía total incidente que interactúa con la superficie terrestre depende de la longitud de onda, del tipo de material y de la condición de los rasgos sobre la superficie.

En percepción remota, el interés básico se centra en la radiación que es reflejada por los blancos de interacción. La reflexión puede ser de dos tipos:

- a) **Reflexión especular.** Ocurre en superficies que reflejan la radiación solar con un ángulo igual al ángulo incidente
- b) **Reflexión difusa.** Ocurre en aquellas superficies que reflejan la radiación hacia todas las direcciones (superficies lambertianas).

Estas dos posibilidades representan los dos extremos factibles de interacción con un objeto o fenómeno, aunque en la realidad las superficies se relacionan con una mezcla de ambas.

Respecto del proceso de reflexión es importante señalar que tanto la longitud de onda como la rugosidad de la superficie juegan un papel determinante.

Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades tienden a difundir mucho más la energía incidente que en el caso de las longitudes de onda mayores, con comportamiento más especular. Para una misma superficie, el flujo de energía recibido por el sensor no sólo depende de la reflectividad, sino de factores como:

- Angulo de iluminación solar (Depende de la fecha del año y la hora de medición).
- Relieve
- Influencia de la atmósfera (Dispersión y absorción).
- Variaciones medioambientales de la superficie (Asociación con otras cubiertas, homogeneidad).

La conclusión que se obtiene de la presencia perturbadora de estos factores es que en torno a un comportamiento tipo, denominado **firma o signatura espectral**, cada cubierta presenta variabilidad, debido a los factores comentados, los cuales se deben

tener en cuenta al interpretar una imagen. Las figuras 16 y 16 muestras patrones del comportamiento espectral de los elementos fundamentales del paisaje, mismo que se describen posteriormente:

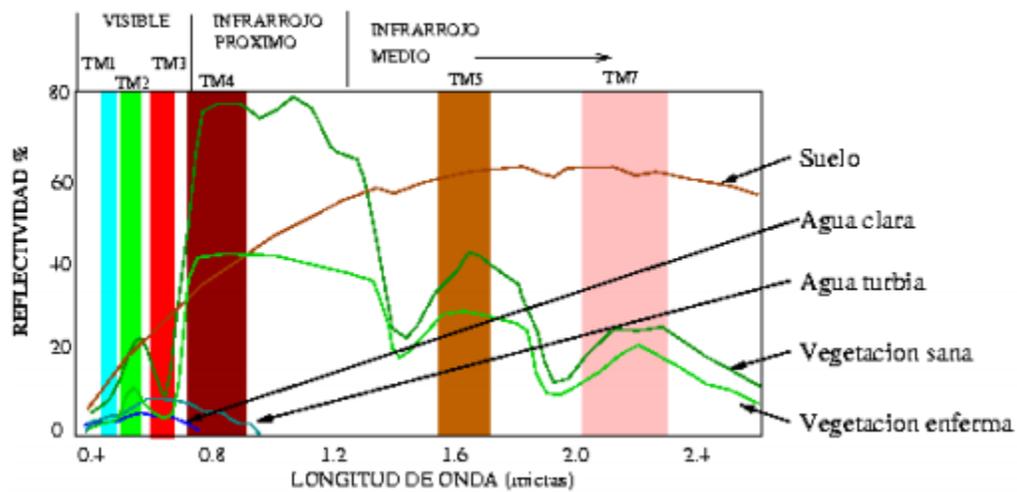


Figura 15. Patrones de curvas de respuesta espectral de diferentes tipos de coberturas. [Ilustración de respuesta espectral. Recuperado el 31 enero 2017 de [http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_10.pdf](http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_10.pdf)]

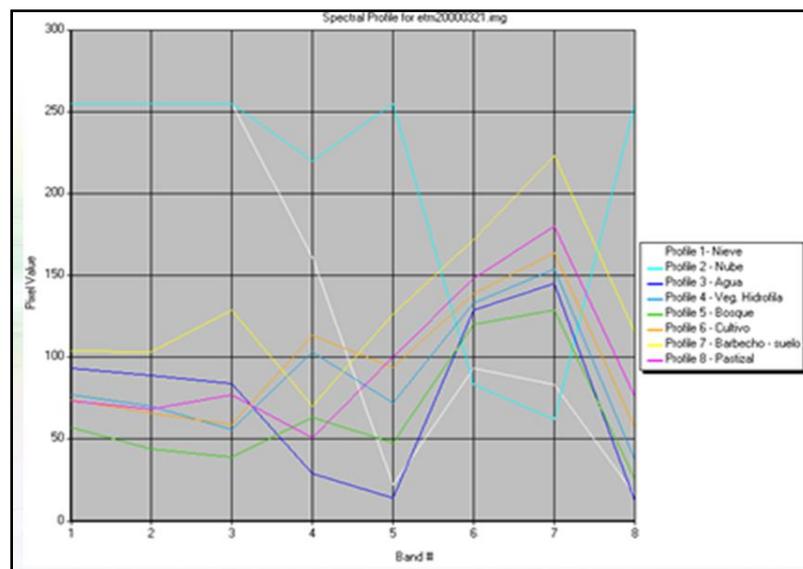
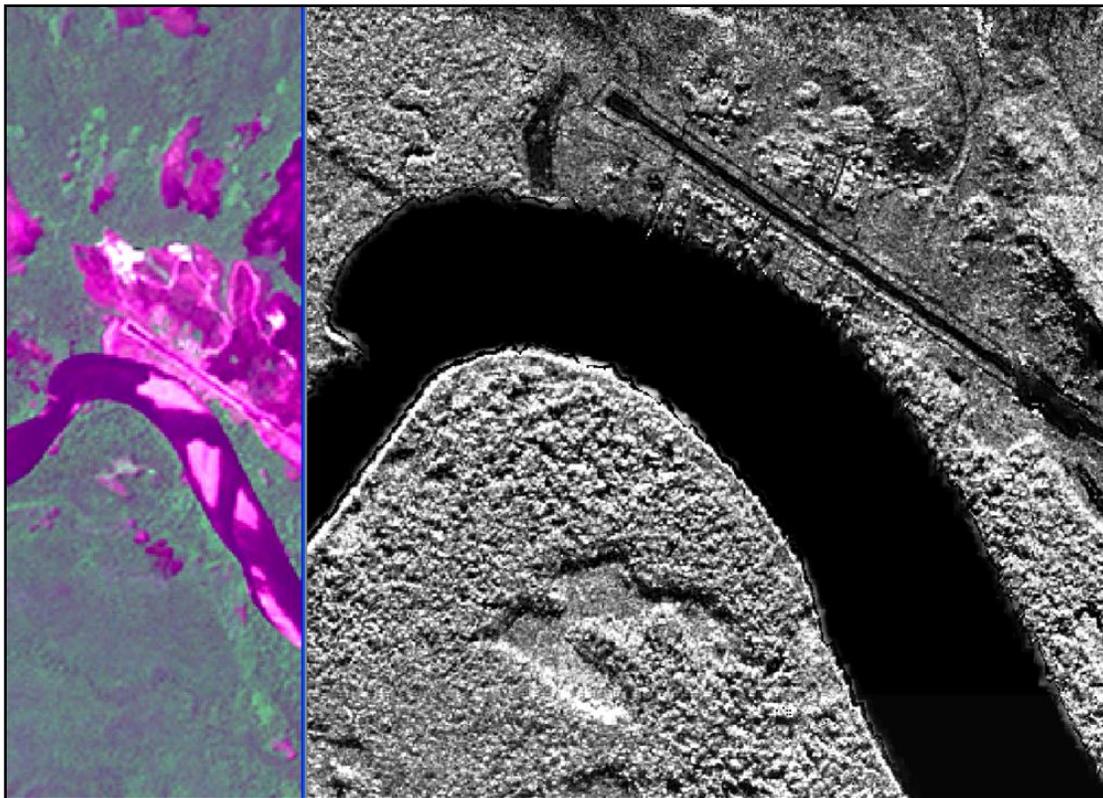


Figura 16. López, D. (2013). Curvas de respuesta espectral de diferentes tipos de coberturas, medidas en una imagen LANDSAT-TM.

**Agua.** En el dominio óptico, el agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por tanto presentará una curva espectral plana, baja y de sentido descendente, con una respuesta muy baja en el infrarrojo (absorbe) y nula reflectancia en las microondas (figura 17). Los factores que afectan la respuesta espectral del agua son la longitud de onda, la profundidad (en aguas poco profundas, la reflectividad aumenta), el contenido de constituyentes en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y la rugosidad de la superficie (factor extremadamente importante).



*Figura 17. López, D. (2013). Efecto de la longitud de onda en la respuesta espectral del agua. Imagen LANDSAT vs imagen de RADAR. Venezuela.*

Otros factores que afectan la respuesta espectral del agua son su estado físico y la turbulencia. La nieve ofrece un comportamiento completamente diferente al del agua, con una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose drásticamente en el infrarrojo medio (ver figura 18).

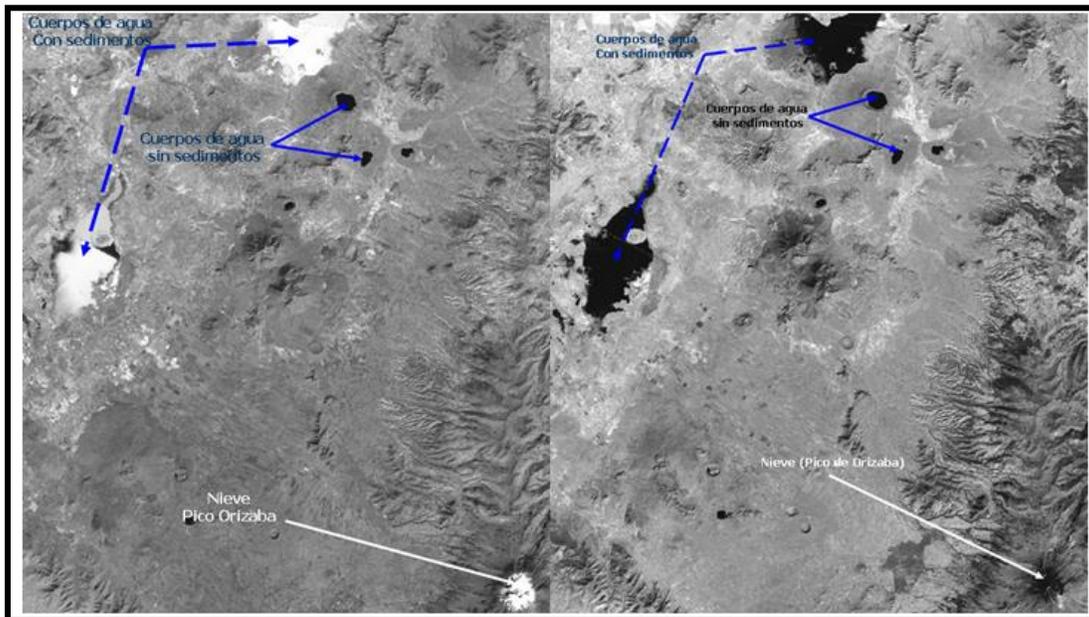


Figura 18. López, D. (2013). Efecto del estado físico y contenido de sedimentos en la respuesta espectral del agua. Imágenes LANDSAT-TM (Banda 4 a la izquierda y banda 5 a la derecha). Puebla-Veracruz, México.

En la figura 19 (izquierda) se puede observar el efecto de los sedimentos en la respuesta espectral del agua. La pluma de sedimentos se genera en la desembocadura al mar del río Magdalena (la principal corriente fluvial en Colombia). También se puede apreciar en esta figura la típica respuesta espectral del agua causada por las olas cuando irrumpen en la costa. La influencia de la longitud de onda se muestra en la figura 19 (derecha), donde se comparan las respuestas de una imagen LANDSAT-TM (infrarrojo cercano y medio) y una de radar (microondas). Donde en la imagen LANDSAT es posible detectar algunos bancos de arena, que no son visibles en el radar; se presume que dichos bancos están parcialmente sumergidos, razón por la cual no se observan en la imagen de radar.

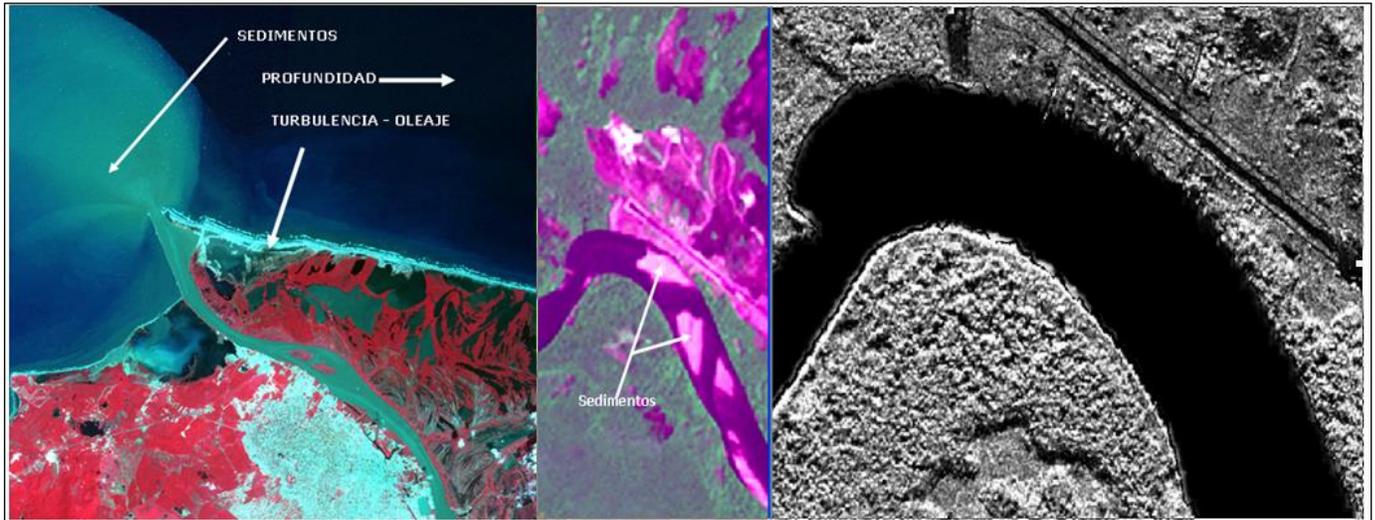


Figura 19. López, D. (2013). A la izquierda el efecto de la profundidad, contenido de sedimentos y turbulencia en la respuesta espectral del agua. Imagen Spot- cc 3-2-1; Barranquilla, Colombia. A la derecha (imagen de radar), el efecto de la longitud de onda en la respuesta espectral del agua. Venezuela. En el centro en una imagen LANDSAT-TM, la misma área cubierta por la imagen de radar; en la imagen LANDSAT, se puede apreciar bancos de sedimentos que no son vistos en la imagen de radar.

**Cobertura vegetal.** La respuesta de la vegetación es especialmente variable, depende de múltiples factores, como la longitud de onda, el estado fenológico, contenido en humedad, estado fitosanitario, relieve (pendiente) o la especie vegetal (pigmentos y estructura celular). En el caso de los cultivos influyen aspectos de manejo, como la densidad de la siembra y su orientación.

Tal como se muestra en la figura 20, tres parámetros fundamentales como la cantidad de pigmentos, la estructura celular y el contenido en agua, explican la respuesta espectral de la vegetación. Por lo tanto, con estos parámetros se puede distinguir una especie de otra, así como su nivel de desarrollo o su estado sanitario

De manera general, se puede decir que la vegetación presenta una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la región del verde (0.55

$\mu\text{m}$ ). Debido al efecto absorbente de los pigmentos fotosintéticos de las hojas, entre ellos la clorofila, que absorbe en la zona del rojo y del azul. Por eso en la vegetación no vigorosa, cuando la clorofila no absorbe demasiado, la hoja parece amarilla (verde + rojo).

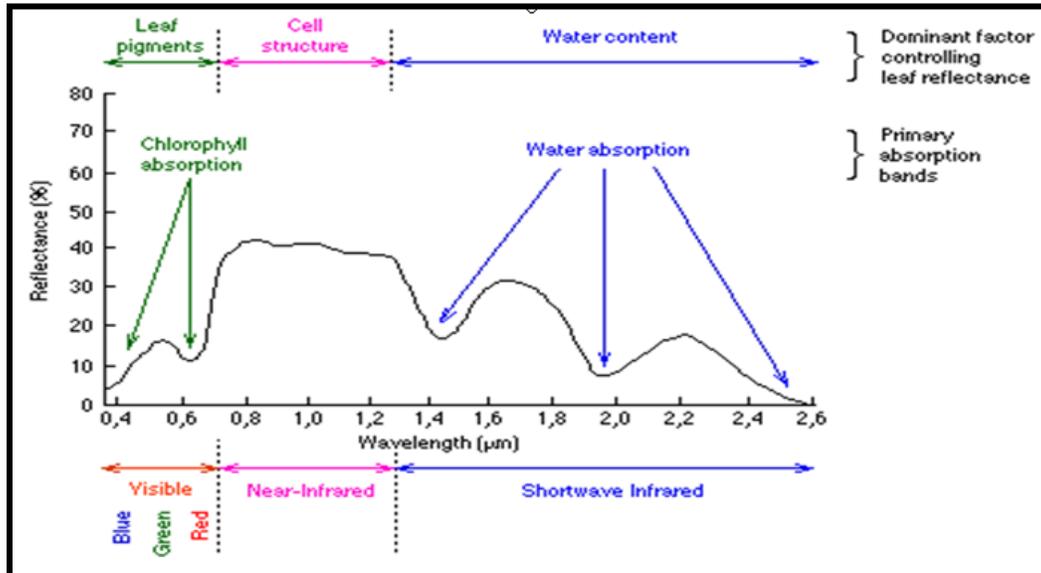
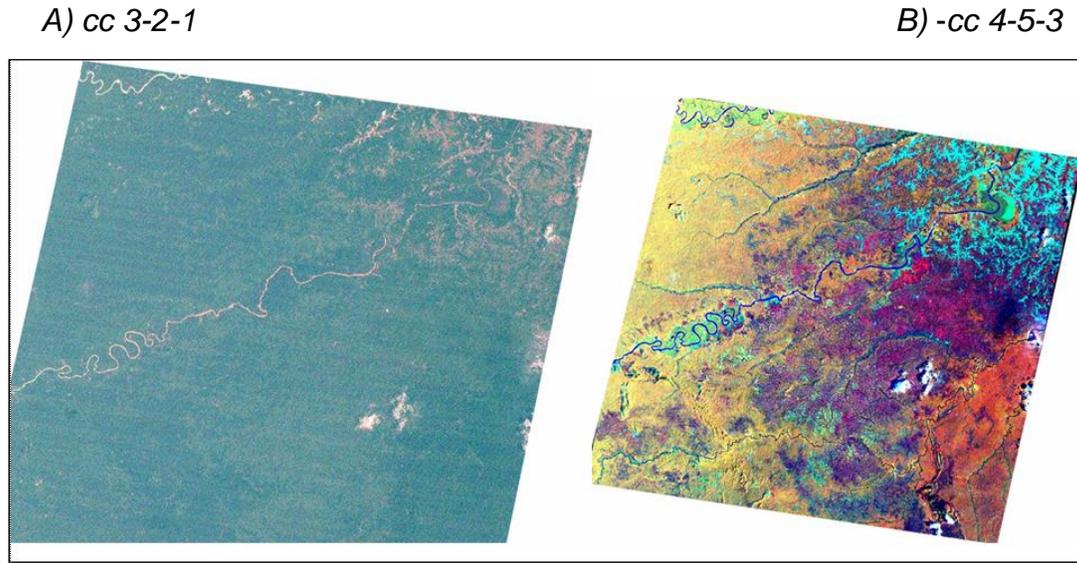


Figura 20. Respuesta espectral de la vegetación. Factores determinantes en el rango visible a infrarrojo medio. [Ilustración de firma espectral. Recuperada de <http://laotraopinion.net/tecnologia/teledeteccion/firma-espectral/>]

La estructura celular interna proporciona una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, que luego se reduce paulatinamente hacia el infrarrojo medio. Por tanto, el contraste más nítido se presenta entre las bandas visibles (especialmente rojo) y el infrarrojo cercano; cuanto mayor es el contraste, mayor será el vigor de la vegetación.

En la figura 21 se ilustra una mayor respuesta espectral de la vegetación en el infrarrojo y, por lo tanto, su importancia en la cartografía y monitoreo de la cobertura vegetal.

La imagen de la izquierda corresponde a la composición a color de las bandas visibles del espectro (cc 3-2-1); la imagen de la derecha incluye dos bandas del infrarrojo (cc 4-5-3), donde se puede visualizar claramente hasta tres especies forestales.



*Figura 21. López, D. (2013). Influencia de la longitud de onda en la respecta espectral de la vegetación. Imagen Landsat-TM; cuenca del río Inírida, Amazonas, Colombia.*

En la figura 21 se ilustra el efecto de la estructura celular, los perfiles 1 y 2 corresponden a dos especies de pastos que presentan curvas de respuesta espectral muy diferente, particularmente en las bandas 4 y 5.

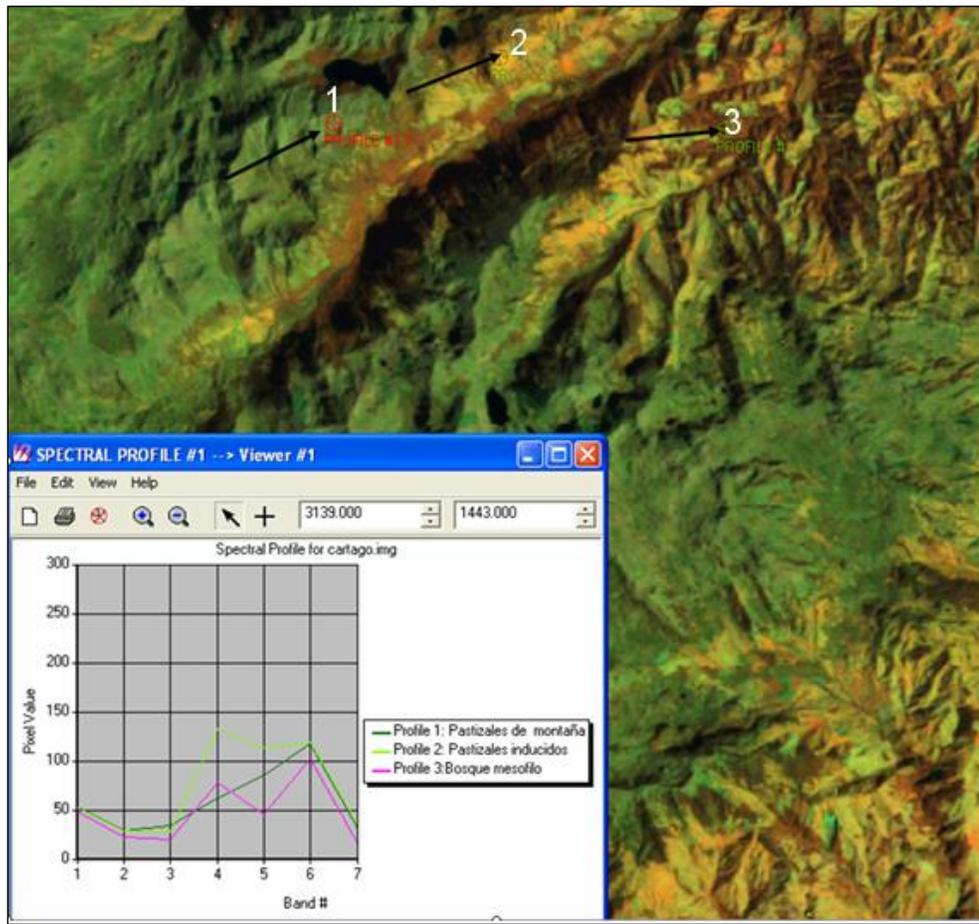
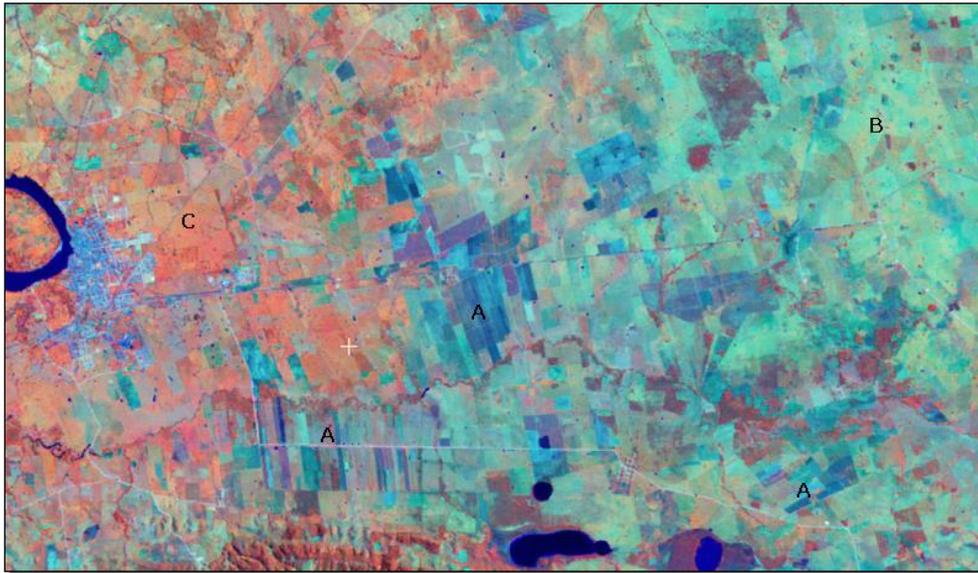


Figura 22. López, D. (2013). Efecto de la estructura celular en la respuesta espectral de la vegetación. Los perfiles espectrales 1 y 2 corresponden a pastizales, y el perfil 3 corresponde a un bosque mesófilo. Nótese la diferencia en las curvas de respuesta espectral, incluso para los pastizales. Imagen Landsat-TM, cc 4-5-3; parque Los Nevados, Colombia.

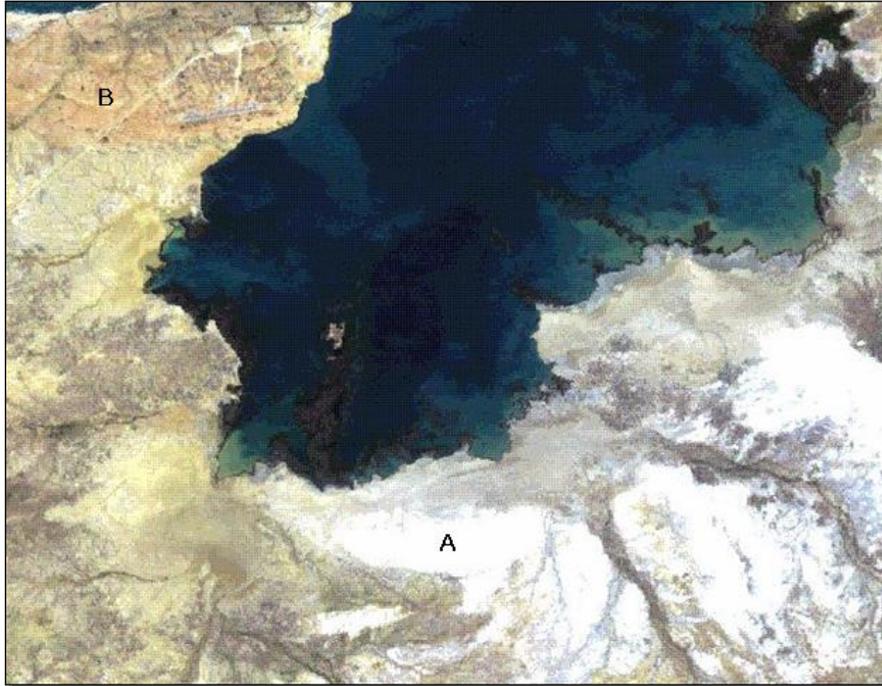
En la figura 23 se muestra el efecto del estado fenológico sobre la respuesta espectral de cultivos de caña de azúcar (A), así como la influencia del contenido de humedad en la respuesta espectral de la cobertura de pastos. El punto B corresponde a pastos con bajo contenido de humedad, y el punto C corresponde a pastos con alto contenido de humedad.



*Figura 23. López, D. (2013). Efecto de la humedad y del estado fenológico en la respuesta espectral de los cultivos de caña de azúcar (A) y pastos (B y C). Imagen Landsat-TM, cc 4-5-3; Tenosique, Tabasco, México.*

En el dominio del infrarrojo térmico la vegetación presenta propiedades, en general, bastante complejas. Como absorbe energía solar durante el día y la devuelve por la noche, está más fría que su entorno y más caliente que el aire a su alrededor, respectivamente.

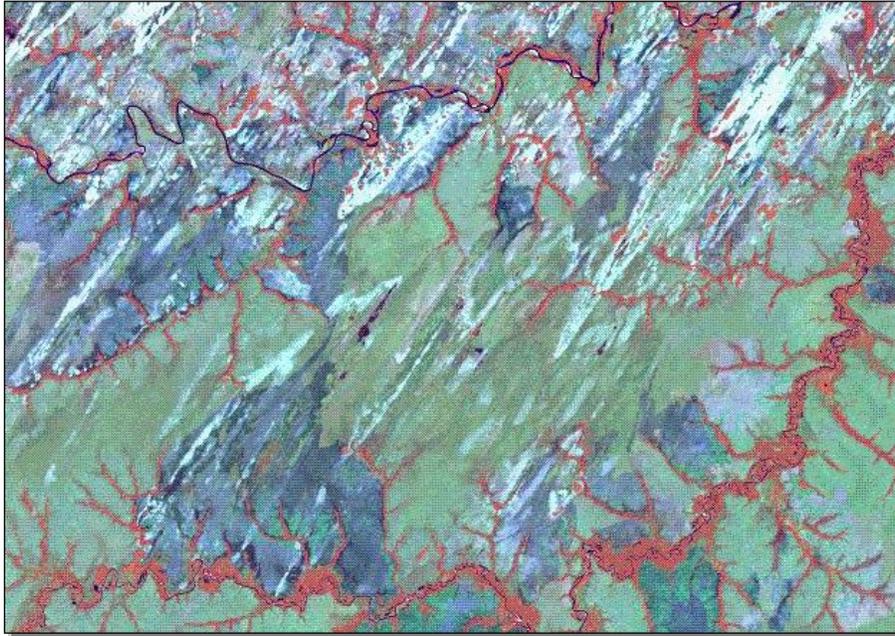
**Suelos.** Los suelos muchas veces son invisibles, debido a la vegetación; en cambio, en el caso de los suelos desnudos, el comportamiento espectral es mucho más uniforme. Los principales factores que intervienen en la respuesta espectral de los suelos son su composición química, textura y estructura y el contenido de humedad. Por ejemplo, un suelo de origen calcáreo o con alto contenido de sales tiende al color blanco (ver figura 24), indicando una alta reflectividad en todas las bandas visibles; en cambio los suelos arcillosos ofrecen una mayor reflectividad en el rojo, por su contenido de óxido de hierro.



*Figura 24. López, D. (2013). Efecto de las propiedades químicas en la respuesta espectral de los suelos. En "A", suelos con alto contenido de sales; en "B", suelos con alto contenido de minerales ferro-magnesianos. Imagen Landsat-TM, cc. 4-5-3; La Guajira, Colombia.*

La reflectividad espectral presenta mayores valores en suelos de textura gruesa, secos y sin materia orgánica, como es el caso de los suelos derivados de depósitos eólicos (ver figura 25).

Tal como sucede con la vegetación, el contenido de humedad en los suelos es uno de los elementos que más influye en la reflectividad de las longitudes de onda largas (infrarrojo medio), así que los suelos con alto contenido en humedad darán una reflectividad baja en esa banda. Cuanto más seco y apelmazado es un suelo, mayor será su reflectividad.



*Figura 25. López, D. (2013). Efecto de la textura en la respuesta espectral del suelo. En la imagen, los tonos blancos corresponden a depósitos arenosos de origen eólico.*

Imagen Landsat-TM cc 4-5-3; Llanos orientales, Colombia.

En el infrarrojo térmico para los suelos y el agua, el factor que más influye es la humedad. A mayor humedad, más frío estará durante el día y más cálido durante la noche, con respecto a los suelos secos. El agua posee la mayor inercia térmica por su alta conductividad, de modo que es más difícil que cambie su temperatura.

En el dominio de las microondas, la señal de retorno depende mucho de la rugosidad de la superficie. Por ejemplo, los suelos rugosos y secos tendrán un mayor coeficiente de retro-difusión y, por tanto, aparecerán en tonos más claros en las imágenes radar.

**Infraestructura.** Los asentamientos humanos y las carreteras no pavimentadas (terracerías) presentan una mayor reflectividad en las bandas del visible, especialmente en el azul y el verde, y menor en el infrarrojo.

En la figura 26 (izquierda) se puede observar el alto contraste que ofrecen los asentamientos humanos (puntos A y B) en la banda 1 de SPOT, mientras que esos mismo puntos (A y B) en la banda del infrarrojo no son visibles (figura 26 derecha). Por el contrario, la carretera pavimentada (punto C) se visualiza mejor en la banda del infrarrojo. El punto "D" corresponde a un río, que en la banda del visible muestra una tonalidad clara, debido a la presencia de los sedimentos.

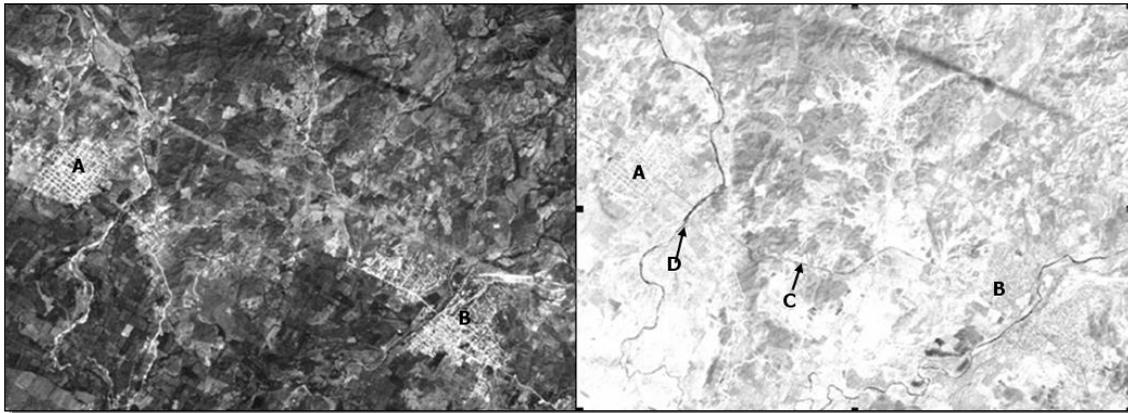


Figura 26. López, D. (2013). Respuesta espectral de asentamientos humanos y vías en el visible e infrarrojo cercano. Imagen SPOT, bandas 1 y 3; Tecpan, Guerrero, México.

### Corrección radiométrica

Para extraer información confiable de las imágenes de percepción remota, algunas veces se deben corregir defectos sistemáticos o características indeseables del sensor. Hay un gran número de razones para calibrar los datos de percepción remota. Los datos crudos del sensor (ND) son simplemente números, sin unidades físicas. Cada sensor tiene sus propios parámetros de "ganancia y offset" que se aplican a los registros para generar los niveles digitales (ND).

Si se requiere hacer comparaciones de datos entre diferentes sensores, dichos datos se deben convertir a radiancia medida en el sensor. Si se desea cotejar los rasgos de

una superficie a través del tiempo, será necesario corregir los datos debido a las condiciones de la atmosfera, ángulos solares y topografía.

La figura 27 muestra varios niveles de corrección radiométrica; en el primero se convierten los NDs a radiancia en el sensor, para lo cual se requiere información sobre su calibración. A este paso se le denomina calibración de los datos en el sensor. El segundo nivel consiste en la transformación de las radiancias en el sensor a radiancias en la superficie terrestre. Esto es más difícil de lograr, puesto que se requiere información de las condiciones atmosféricas correspondientes a la fecha de toma de la imagen. El nivel final de calibración se logra mediante la corrección por el efecto topográfico (en áreas montañosas), irradiancia espectral solar y transmitancia atmosférica (Schowengerdt R. A., 2007).

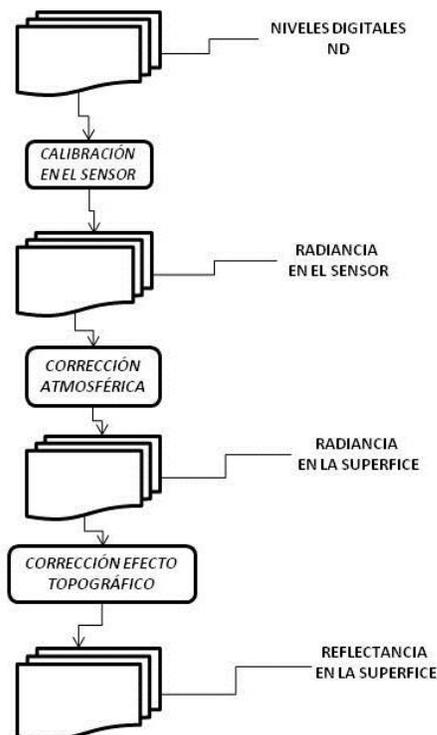


Figura 27. Schowengerdt, R. (2007). Flujo para la calibración de datos de percepción remota a unidades físicas.

**Corrección de efectos atmosféricos.** La corrección de los efectos de la atmósfera se puede hacer en términos absolutos o relativos.

**a) Corrección atmosférica relativa.** No requiere variables atmosféricas. Se realiza de manera empírica mediante algunos de los siguientes métodos:

- Sustracción de píxeles oscuros
- Normalización de imágenes a partir del ajuste de histogramas
- Normalización de la imagen con modelos de regresión basados en la información de fechas múltiples
- Normalización empírica con información de imágenes de fechas múltiples

**b) Corrección radiométrica absoluta.** Requiere del modelado atmosférico, que incluye variables como la temperatura del aire, humedad relativa, presión, visibilidad y altitud.

## Referencias

Las notas fueron realizadas por el M. Daniel López y se realizó una adecuación.

- López, D (2010). *I. Fundamentos y principios físicos de percepción remota*. Percepción remota y procesamiento digital de imágenes. México: CentroGeo.
- López, D. (2010). *II. Análisis digital de imágenes*. Percepción remota y procesamiento digital de imágenes. México: CentroGeo.
- Canada Centre for Remote Sensing. (1997). *Fundamentals of Remote Sensing*. Canada: Natural Resources Canada.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp, Madrid: Rialp.
- Datcu, M., Seidel, K; D'Elia, S. y Marchetti, P. (2002). *Knowledge driven Information Mining in Remote Sensing Image Archives*. ESA bulletin 110.
- Towards a Prioritized Research Agenda. Technical Report 93-4. University of California, Santa Barbara. IN: the 25th International Symposium, Remote Sensing and Environmental Change, Graz, Austria, 4-8 April 1993.