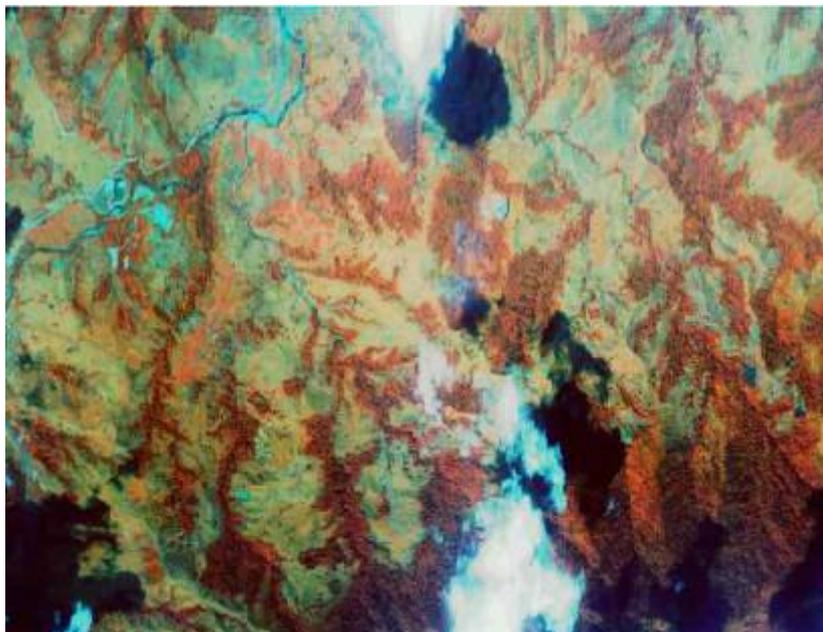
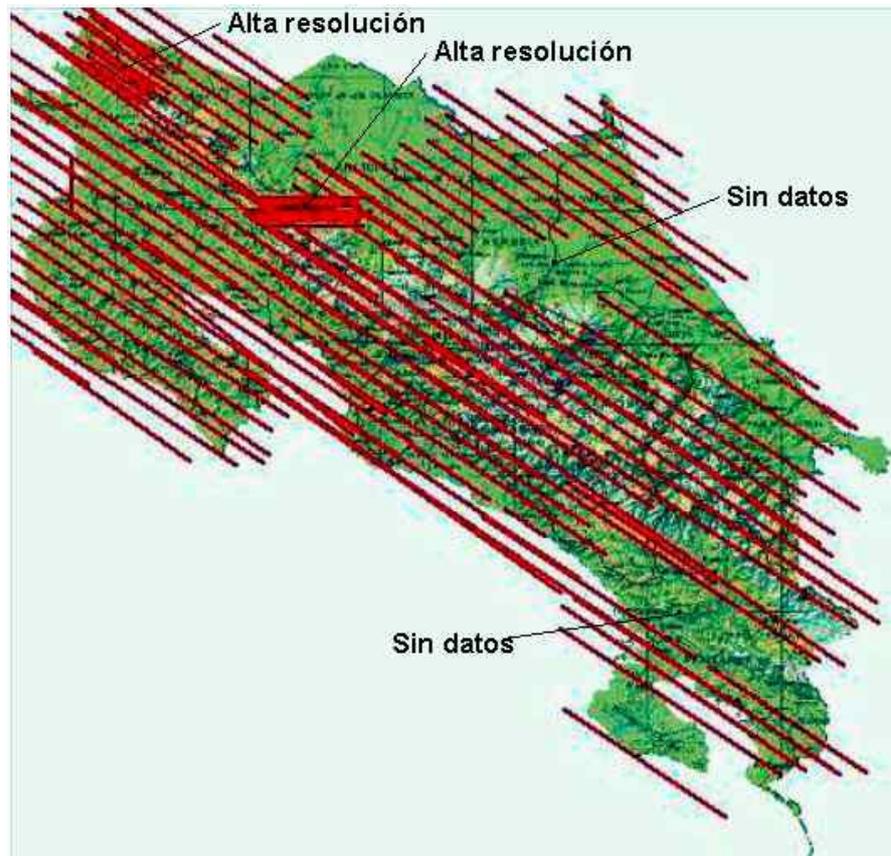


Uso de imágenes multiespectrales MASTER



Jorge Fallas, TELESIG-UNA (jfallas@racsa.co.cr)
Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica
Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales

Indice

¿Qué es percepción remota?	1
La energía electromagnética	5
Interacción energía electromagnética vegetación, suelo y agua	7
Vegetación	9
Suelo Seco	11
Agua	12
Características de las imágenes MASTER	12
Creación de imágenes digitales	17
Procesamiento digital de imágenes	22
Preprocesamiento	22
Realce de la imagen	24
Transformaciones	26
Clasificación y análisis	26
Aplicaciones	26
Bibliografía	27

¿Qué es percepción remota?

La palabra teledetección es un término acuñado en los años 60's y designa a cualquier medio o proceso utilizado para obtener información de un objeto (Ej. cultivos, área urbana) a distancia. (Lillesand y Kiefer,1994). La teledetección es el arte-ciencia que provee la teoría y los instrumentos que nos permiten entender la forma en que los objetos y los fenómenos son detectados, registrados, almacenados y procesados por un sistema-sensor. Por ejemplo, cuando usted lee este texto sus ojos funcionan como un sensor que registra la energía reflejada por las páginas. Su cerebro, utiliza dicha información para determinar que existen elementos de color negro y un fondo de color blanco. Posteriormente, dado su formación (Ej. educación) usted es capaz de interpretar los espacios negros como letras y a partir de ellos crear palabras, a partir de las palabras frases y partir de las frases oraciones y finalmente enter lo que lee. La mayoría de las aplicaciones en teledetección son similares al proceso de leer explicado (Lillesand y Kiefer,1994). El objetivo de todo sensor es obtener *datos* que pueden posteriormente interpretarse para generar *información* (Ej. áreas, formas y tamaños) del medio en estudio.

El presente documento trata sobre sistemas-sensor que registran la energía electromagnética reflejada y/o emitida por la superficie terrestre (sensores pasivos). El sistema-sensor más conocido en esta categoría es la cámara fotográfica.

Los componentes o elementos de un sistema-sensor son los siguientes (Lillesand y Kiefer,1994):

1. **Fuente de energía:** Esta es la fuente que provee la energía detectada por el sensor. En el contexto de un sensor pasivo la principal fuente de energía es el sol.
2. **Propagación de la energía a través de la atmósfera e interacción con la superficie terrestre:** La energía emitida por el sol debe atravesar la atmósfera para llegar a la superficie terrestre (Fig. 1). Una vez en contacto con la superficie puede ser reflejada, absorbida ó transmitida por los objetos. Solamente aquella porción de energía reflejada es registrada por el sensor. En el caso de los sensores térmicos, la energía registrada es aquella emitida por los objetos. La atmósfera (Ej. nubosidad, vapor de agua, ozono, etc) funciona como un filtro para la energía electromagnética.

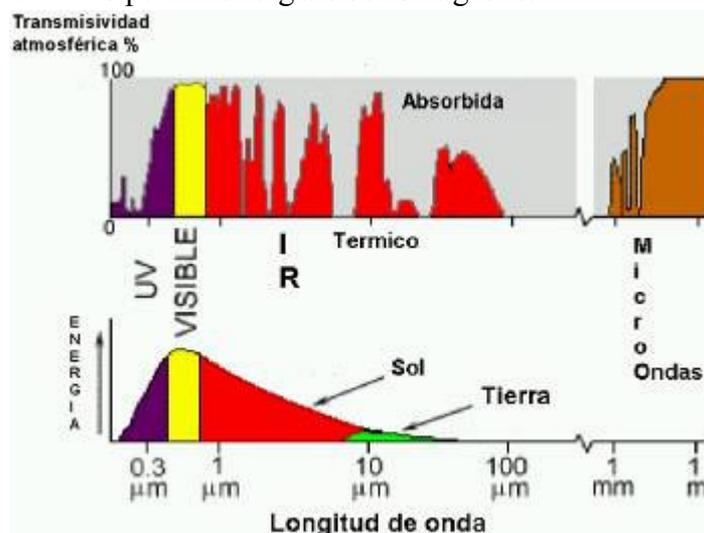


Figura 1: Ventanas atmosféricas utilizadas en teledetección.

3. **Sistema sensor:** Está formado por el sensor y la plataforma que lo sustenta (Ej. avión, satélite). Su *función* es registrar y codificar la energía procedente de los objetos para posteriormente grabarla y enviarla a sistemas de recepción y almacenamiento en tierra.
4. **Recepción-comercialización:** La información electromagnética es recibida, procesada, almacenada y posteriormente distribuida. Los productos típicos de esta fase son cintas de alta densidad, CDs, DVDs, impresiones en papel fotográfico y positivos.
5. **Interpretación y compilación de resultados:** Los usuarios(as) de los productos derivados mediante las técnicas de teledetección pueden ser especialistas o generalistas. Los niveles de energía electromagnética registrados por el sensor y convertidos a niveles digitales (ND) son clasificados en grupos o clases conocidas por el interprete (Ej. clases de ocupación del suelo). Este proceso tiene como objetivo poner al alcance de múltiples usuarios la información generada por el sensor. La información auxiliar o de referencia (Ej. mapas de uso y cobertura del suelo, topográficos, geológicos, etc) es utilizada como un elemento externo al sistema de teledetección que facilita la georeferenciación del material digital, ubicar al intérprete en el área del estudio y en general proveer un contexto para el análisis de los datos. Una ventaja de los mapas digitales es que pueden integrarse fácilmente con otra información cartográfica digital utilizando un Sistema de Información Geográfico (SIG). En general los productos generados pueden clasificarse en:
 - a. **Imágenes analógicas** Por ejemplo fotografías, positivos e impresiones en papel.
 - b. **Imágenes digitales.** La energía reflejada y/o emitida por una superficie y registrada por un sensor es transformada por un convertidor análogo-digital en valores numéricos, los cuales son almacenados en un medio magnético (Ej. cintas de alta densidad, discos compactos, DVDs).
6. **Usuario:** Este es la razón de ser de todo sistema de teledetección. Interpreta los datos registrados por el sensor y toma decisiones basados en dicha información.

El ojo humano sólo es sensible a la porción del espectro electromagnético denominado "visible", el cual se extiende desde $0,4 \mu\text{m}$ (azul) hasta $0,7 \mu\text{m}$ (rojo). Los sistemas-sensor disponibles en la actualidad le permiten al ser humano detectar objetos "invisibles" para su sistema óptico. Los sensores remotos pasivos utilizados en recursos naturales (Ej. cámaras fotográficas, barredores multiespectrales) operan en cuatro bandas del espectro (Fig.2):

- Visible ($\lambda = 0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$)
- Infrarrojo cercano ($\lambda = 0,7$ a $<1,3 \mu\text{m}$)
- Infrarrojo medio ($\lambda = 1,5$ a $2,4 \mu\text{m}$) ($\lambda = 2,5$ a $4,5 \mu\text{m}$ afectada por absorción CO_2)
- Infrarrojo Térmico ($\lambda > 5,3 \mu\text{m}$)

Los sensores disponibles a la población civil pueden registrar la energía reflejada y o emitida por la superficie terrestre en varias bandas del espectro electromagnético. La capacidad de un sensor de registrar calor está directamente relacionada con su habilidad de registrar ondas en la porción del infrarrojo térmico ($\lambda > 5 \mu\text{m}$). Los sensores que operan en las bandas del infrarrojo cercano y medio ($\lambda = 0,7$ a $4,5 \mu\text{m}$) no tienen capacidad de registrar calor (componente térmico del espectro).

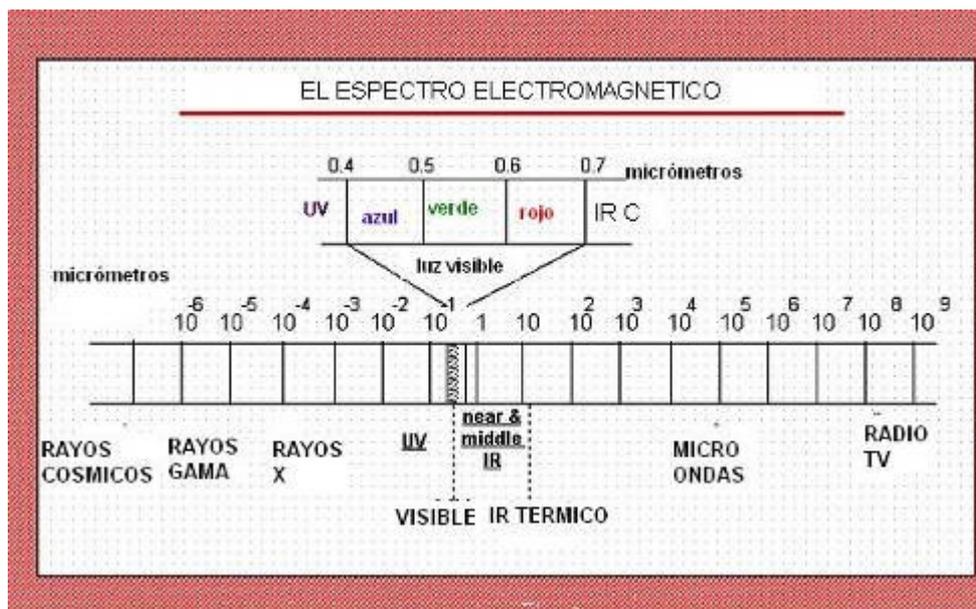


Figura 2: El espectro electromagnético y su división en bandas espectrales.

Las bandas del espectro electromagnético registradas por el sensor MASTER son (Ver. Fig. 3 y 4):

1. **Espectro visible al ojo humano:** El ojo humano puede percibir longitudes de onda entre $0.4\mu\text{m}$ y $0.7\mu\text{m}$; lo cual equivale a los colores primarios azul, verde y rojo; y sus combinaciones. Una foto a color tomada con una cámara de 35mm ó digital es un ejemplo de estas longitudes de onda. Violeta: $0.4 - 0.446\mu\text{m}$, azul: $0.446 - 0.500\mu\text{m}$, verde: $0.500 - 0.578\mu\text{m}$, amarillo: $0.578 - 0.592\mu\text{m}$, naranja: $0.592 - 0.620\mu\text{m}$, rojo: $0.620 - 0.7\mu\text{m}$
2. **Infrarrojo próximo, reflejado o cercano:** Este segmento del espectro comprende longitudes de onda entre 0.7 y $1.3\mu\text{m}$ y puede registrarse con película fotográfica infrarroja. El ojo humano no puede percibir estas longitudes de onda. Esta porción del espectro electromagnético es útil para discriminar diferentes concentraciones de humedad tanto en el suelo como en la vegetación (Ej. bosque caducifolio vs bosque siempreverde).
3. **Infrarrojo medio:** Comprende longitudes de onda entre 1.3 y $6\mu\text{m}$. El ojo humano tampoco puede percibir estas longitudes de onda. Esta banda es producto tanto de la emisión como de la reflectividad de los objetos o cuerpos terrestres. En los sensores multiespectrales existe un traslape entre la banda de infrarrojo medio y cercano o reflejado. Esta porción del espectro electromagnético es útil para estimar el contenido de humedad de la vegetación y detectar áreas de alta temperatura.
4. **Infrarrojo lejano o térmico:** Incluye longitudes de onda entre $8.0\mu\text{m}$ y $14\mu\text{m}$. El ojo humano no puede percibir estas longitudes de onda. Esta banda corresponde a la energía emitida por cuerpos y objetos en la superficie terrestre. Los sensores térmicos pueden registrar el calor proveniente de los cuerpos terrestres.

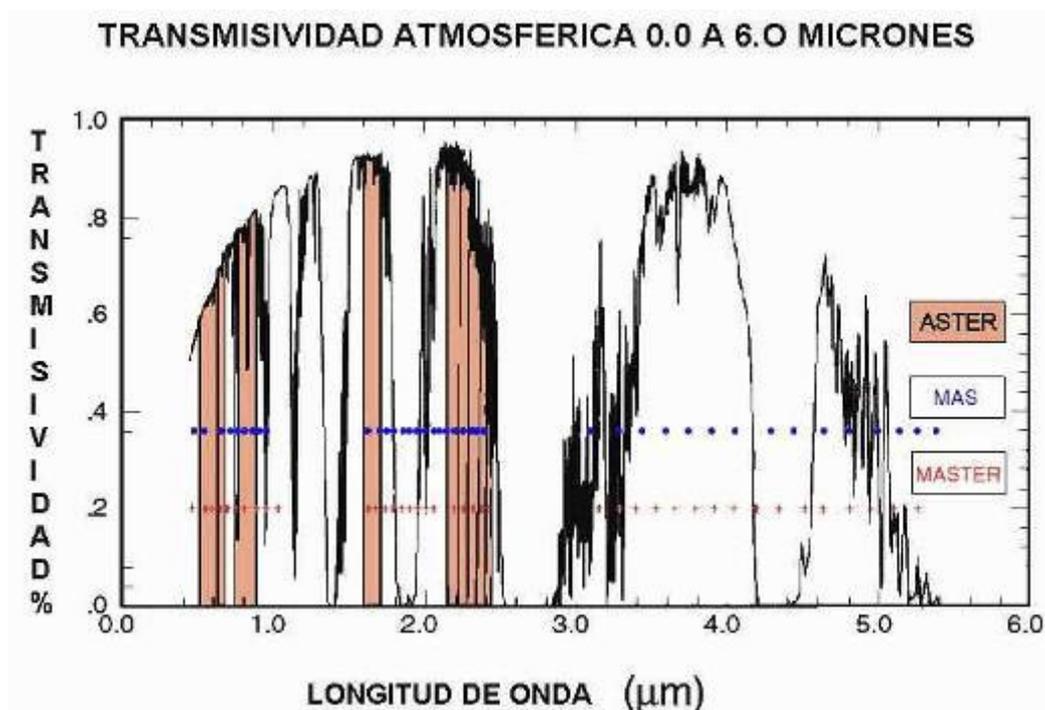


Figura 3: Relación entre la energía electromagnética, ventanas atmosféricas y longitudes de onda registradas por el sensor MASTER en el ámbito 0.0 a 6.0 μm (visible, infrarrojo cercano y medio). Ventanas atmosféricas para espectro visible e infrarrojo cercano: 0.3 a 1.35 μm , Infrarrojo medio: 1.5 a 1.8 μm , 2.0 a 2.4 μm , 2.9 a 4.2 μm y 4.5 a 5.5 μm .

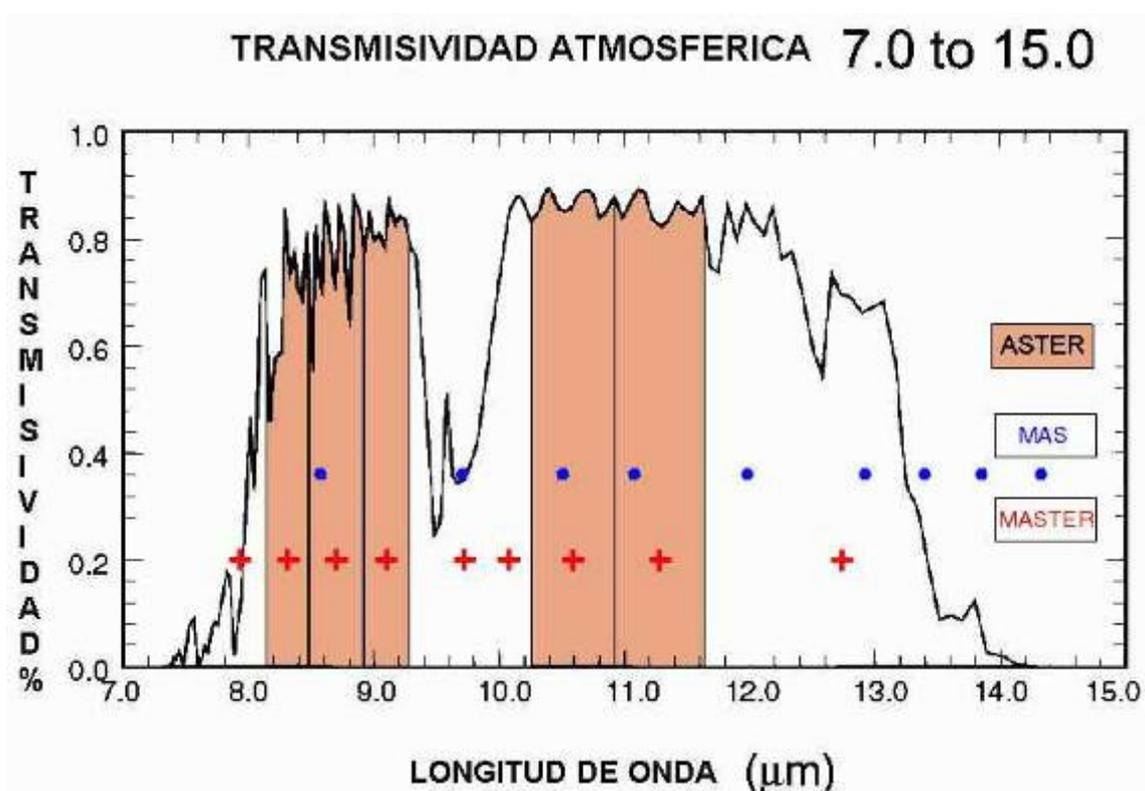


Figura 4: Relación entre la energía electromagnética, ventanas atmosféricas y longitudes de onda registradas por el sensor MASTER en el ámbito 7.0 a 15.0 μm (infrarrojo térmico). Ventana atmosférica para infrarrojo térmico: 8 a 14 μm

Aún cuando no es necesario un conocimiento profundo en teoría cuántica o de ondas electromagnéticas para utilizar las herramientas que provee la teledetección sí es necesario entender los principios básicos que rigen la interacción entre la energía electromagnética y la superficie terrestre. Por esta razón, a continuación se presentan algunos conceptos básicos sobre el tema.

La energía electromagnética

El principio de conservación de la energía indica que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma; por esta razón la energía que llega a un cuerpo terrestre (irradiancia) puede seguir las siguientes rutas (Fig. 5):

$$E_{I(\lambda)} = E_{R(\lambda)} + E_{A(\lambda)} + E_{T(\lambda)}$$

en donde: $E_{I(\lambda)}$: energía que llega al cuerpo o superficie

$E_{R(\lambda)}$: energía reflejada por el cuerpo o superficie

$E_{A(\lambda)}$: energía absorbida por el cuerpo o superficie

$E_{T(\lambda)}$: energía transmitida por el cuerpo o superficie

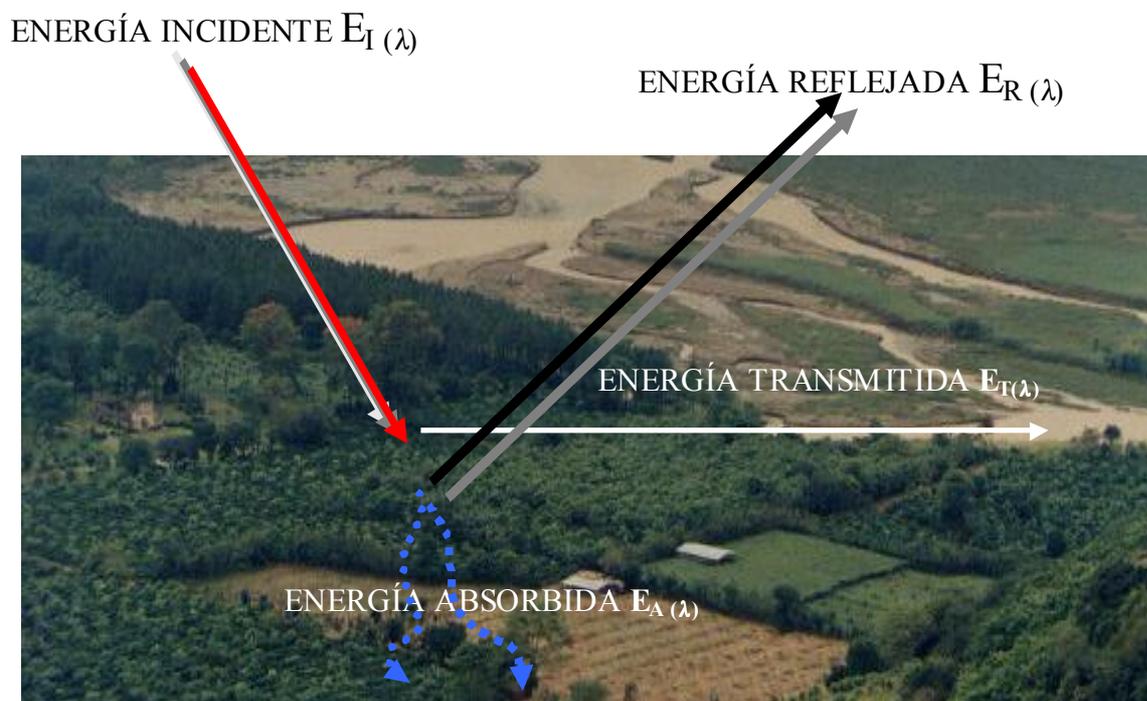


Figura 5: Relación entre energía incidente, reflejada y absorbida por la superficie terrestre.

Algunas implicaciones prácticas de esta ecuación para la teledetección son las siguientes:

- La cantidad de energía reflejada, absorbida y transmitida estará en función de la composición de la superficie y su estado (Ej. vegetación; suelo seco vs suelo húmedo). Esto le permite al sensor registrar la respuesta diferencial de los objetos en la superficie y al analista de la imagen detectar diferentes coberturas en la imagen (Ej. agua, casas, carreteras, cultivos, bosques, etc.). El sensor solo detecta la energía reflejada y/o emitida por la superficie; la interpretación la realiza el (la) analista.
- La interacción entre la energía incidente y la respuesta de la superficie es específica para cada longitud de onda. Por tanto un mismo objeto o superficie tendrá una

"respuesta" diferente en cada una de las bandas del espectro electromagnético. Por ejemplo, una planta turgente tendrá una alta reflectancia en el "infrarrojo" y una baja reflectancia en el rojo.

- El sistema visual humano utiliza la diferencia en reflectividad de los objetos para asignarles un color (Ej. azul, verde, rojo, etc.) y a partir de esto formar una imagen. El "color" que observamos es el resultado de una alta reflectancia en dicha longitud de onda. Por ejemplo, observamos la vegetación de color "verde" porque la vegetación sana tiene una alta reflectancia en la longitud de onda que corresponde a dicho color.

Otro aspecto importante en la interacción energía-superficie terrestre es la geometría del haz de luz. Este expresa tanto el ángulo con que la superficie refleja la energía incidente como el tipo de haz generado; el cual se clasifica en especular, concentrado y Lambertiano o difuso (Fig. 6). El tipo de haz es una función de la rugosidad de la superficie (Ej. laguna vs. vegetación arbustiva vs bosque) y de la longitud de onda que incide sobre ella. Una superficie aparecerá como difusa para cualquier sensor cuando la altura o tamaño de las partículas que la componen es mayor que la longitud de onda incidente. Por ejemplo, para una longitud de onda de 5 cm (radar) una playa con arena fina aparecerá como lisa en tanto que una superficie agrícola recién preparada y con terrones de 10 cm aparecerá como rugosa.

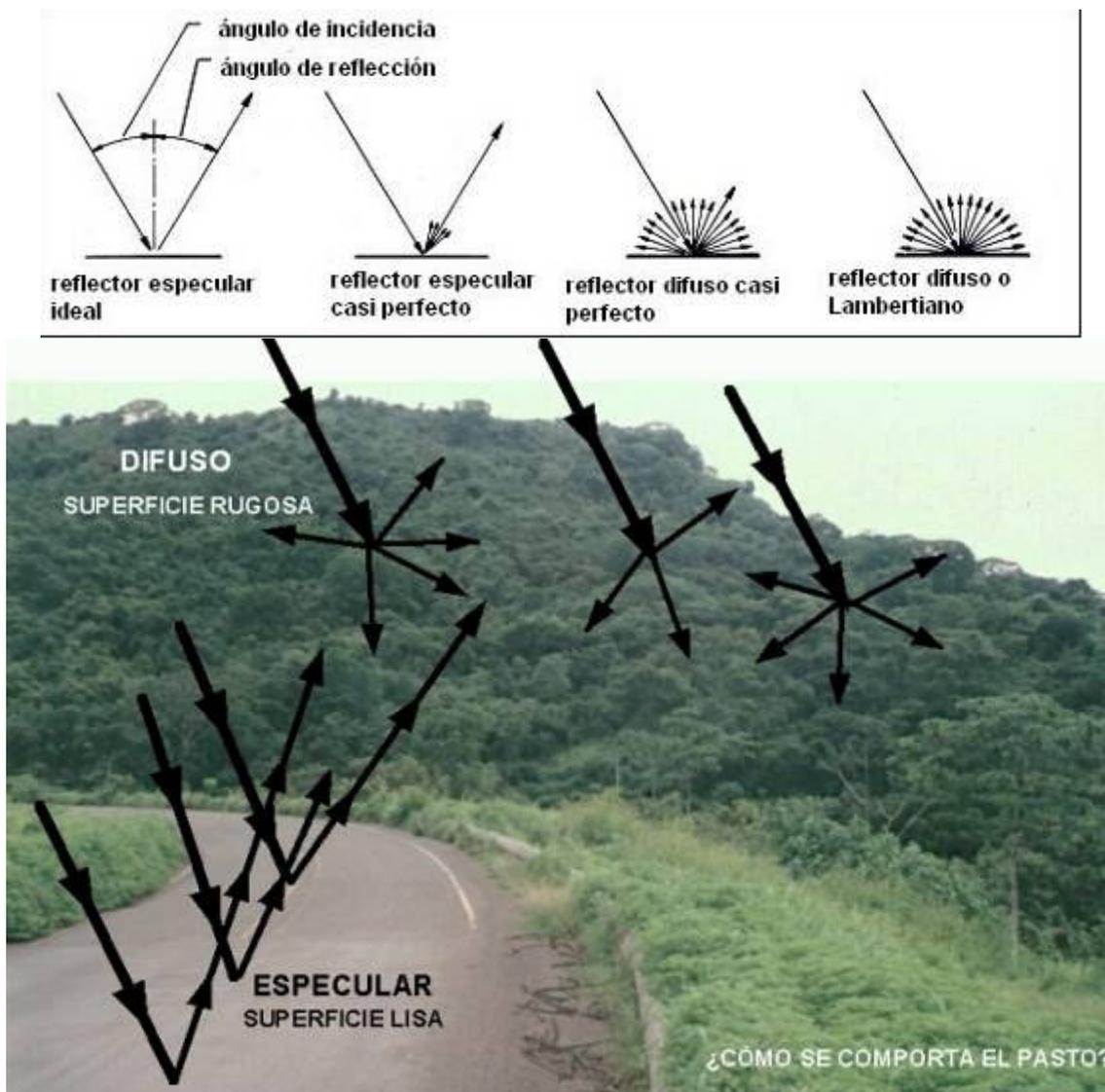


Figura 6: Reflector especular y lambertiano.

La relación entre la energía reflejada por el objeto con respecto a la cantidad de energía que llega al mismo se denomina *reflectividad espectral* y se expresa en porcentaje como.

$$\rho_{\lambda} = (E_{R(\lambda)} / E_{I(\lambda)}) * 100$$

La gráfica de reflectividad en función de la longitud de onda (λ) se denomina curva de reflectividad y es característica de cada material o tipo de cobertura. La figura 7 ilustra las curvas de reflectividad para coníferas y latifoliadas. La gráfica permite hacer las siguientes observaciones:

- Las dos curvas muestran un patrón similar: ambas tienen una mayor reflectividad en la banda del verde y del infrarrojo cercano.
- La curva es la realidad una banda, lo que indica que la reflectividad, aunque característica de cada tipo de cobertura o superficie, posee cierta variabilidad.
- Si deseamos discriminar entre latifoliadas y coníferas debemos utilizar un sensor que opere en la banda del infrarrojo. Una cámara con película infrarroja podría cumplir con dicho requerimiento. Por ejemplo, de acuerdo a la gráfica en una foto infrarroja en blanco y negro los árboles latifoliados se observarían más brillantes ya que reflejan un mayor porcentaje de energía infrarroja comparada con las coníferas.

Interacción energía electromagnética vegetación, suelo y agua

Los sensores instalados en plataformas aerotransportadas y satelitales están diseñados para medir la cantidad de energía reflejada por la superficie terrestre (Ej. agua, vegetación, suelo, rocas, asfalto, etc). Cada objeto o elemento en la superficie terrestre puede ser identificado por su *respuesta espectral*, la cual es denominada en algunos textos de teledetección como *firma espectral*. Bajo condiciones ideales ésta es equivalente a la huella digital de los seres humanos; sin embargo en la mayoría de los casos dicha respuesta es mas bien difusa y caracterizada por un rango de valores (Fig.7). El sensor registra la forma en que la superficie refleja y/o emite energía a diferentes longitudes de onda; dichos valores son utilizados posteriormente por el analista para asignar una etiqueta o nombre al objeto o superficie registrada por el sensor. Sin embargo, a consecuencia del efecto atmosférico, del relieve y de los errores propios de los instrumentos existe cierto grado de variabilidad en la *respuesta espectral* de una determinada superficie. La figura 8 muestra las curvas espectrales típicas para un bosque de pino, un pasto, una área excavada de arena roja, y agua con sedimentos. Las curvas ilustran la respuesta promedio esperada para las diferentes superficies y por lo tanto la reflectividad en cada imagen variará entre objetos o superficies de un mismo tipo (Ej. Bosque, pasto, etc.).

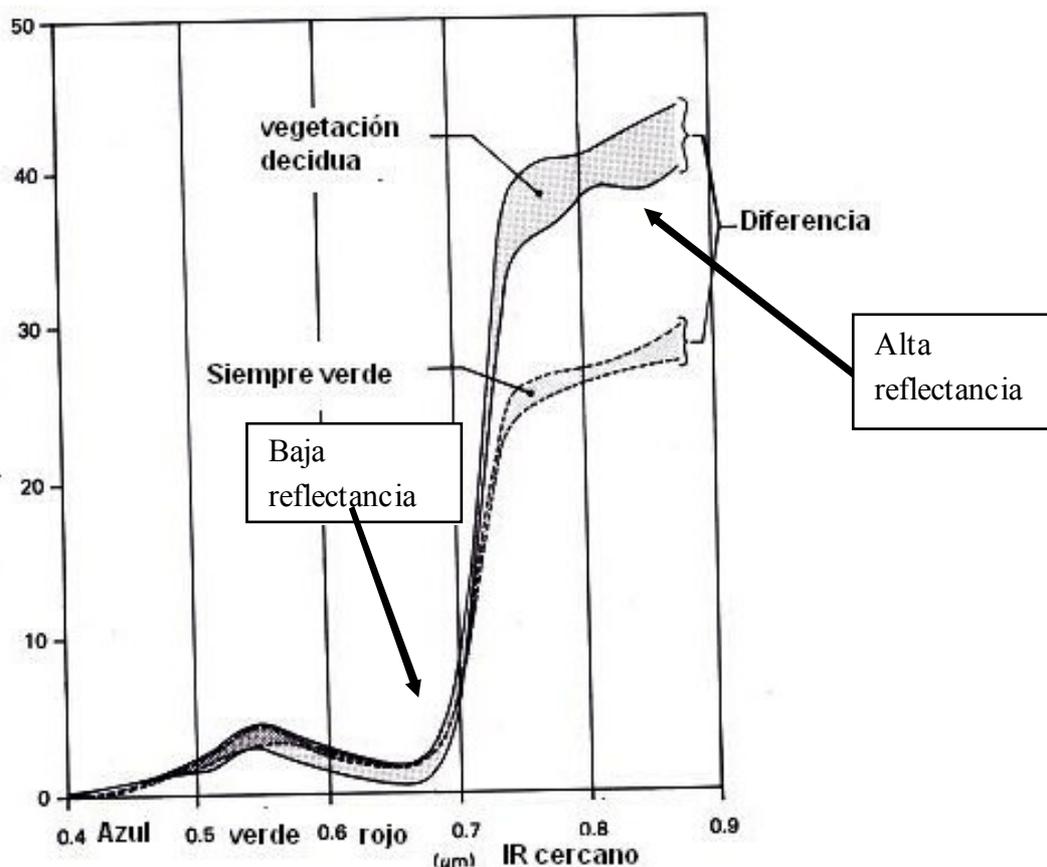


Figura 7: Respuesta espectral de una conifera y de una latifoliada. Fuente: Lillesand y Kiefer, 1994.

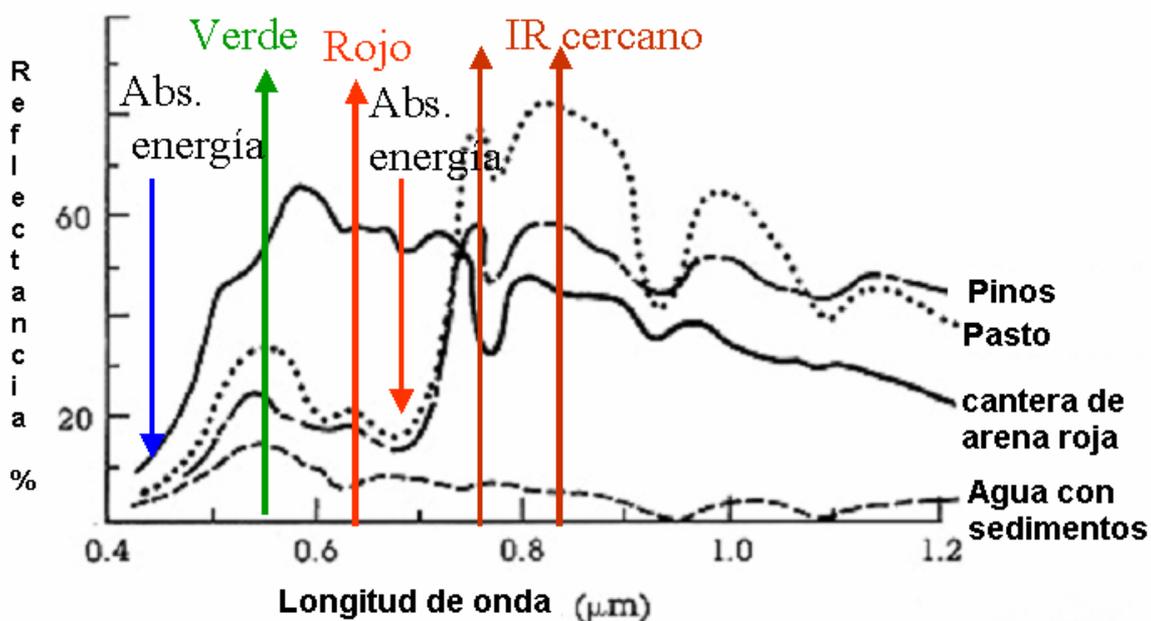


Figura 8: Respuesta espectral de cuatro tipos de cobertura. Fuente: http://ftp.www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter6

De las gráficas anteriores se derivan las siguientes observaciones:

Vegetación

Las cimas y valles típicos de la curva de vegetación sana es un resultado de su estructura y contenido de humedad (Fig.9). La vegetación sana tiene su máxima reflectividad en el espectro visible a $0,55 \mu\text{m}$ (color verde); así como una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (no percibida por el ojo humano). La alta reflectividad de las hojas en el espectro visible se debe a su pigmentación. La clorofila, xantofila y los carotenos absorben energía con una longitud de onda de aproximadamente $0,445 \mu\text{m}$ (azul) y $0,645 \mu\text{m}$ (rojo).

Por otra parte debido a la estructura esponjosa del mesófilo (constituido por células con abundantes cloroplastos que realizan procesos fotosintéticos) las hojas turgentes también tienen una alta reflectividad en las bandas del rojo ($0,645 \mu\text{m}$) e infrarrojo cercano ($0,7$ a $1,3 \mu\text{m}$); sin embargo el valor de la reflectividad en el rojo es menor que la del verde pues parte de la energía es absorbida por la planta. Estas dos bandas son excelentes indicadores de una vegetación sana. La vegetación exhibe baja reflectividad en el infrarrojo medio ($1,40$ a $3,00 \mu\text{m}$) porque la energía es absorbida por el agua contenida en sus tejidos. Cualquier elemento del medio que reduzca el contenido de humedad en la planta (Ej. reducción en evapotranspiración, estrés por falta de agua) incrementará su reflectividad en esta longitud de onda. Entre más fuerte sea la reflectividad de las bandas rojo e infrarrojo cercano mayor será el vigor de la vegetación y más fácil será diferenciarla de otros tipos de cobertura (Ej. rocas, agua, suelo expuesto).

El estrés en las plantas reduce la producción de clorofila y con ella disminuye la absorción de azul y rojo y aumenta la reflectividad en la banda del rojo y la planta se torna amarilla que es una combinación del verde y del rojo; una planta totalmente seca (Ej. pasto seco) tendrá un color azulado-grisáceo en una imagen en falso color. La vegetación sana y turgente refleja entre un 40 y un 50% de la energía que recibe en la banda de $0,7$ a $1,3 \mu\text{m}$ (infrarrojo); por esta razón tiene una apariencia brillante en imágenes infrarrojas (ver Fig. 10). El contenido de agua en las hojas le permite absorber energía en las siguientes longitudes de onda: $1,4 \mu\text{m}$; $1,9 \mu\text{m}$ y $2,7 \mu\text{m}$ (Short, 1982). Estas regiones se conocen como *bandas de absorción de agua*.

Las propiedades estructurales y el estado fisiológico de la vegetación explican su apariencia en imágenes de sensores multispectrales (Ej. MASTER, TM, SPOT, ETM+); por ejemplo la vegetación sana y verde se observará así:

- Tonos oscuros en la banda del azul y en especial en la banda del rojo (baja reflectancia).
- Tonos un tanto más claros en la banda del verde (mayor reflectancia).
- Tonos muy brillantes en las bandas del infrarrojo cercano (bandas 6 y 7 del MSS de Landsat, banda 4 del TM y banda 3 del SPOT; bandas 7 a 11 de MASTER) (alta reflectancia).

Los factores a considerar al identificar cultivos en una imagen multispectral son:

- Tamaño y forma del cultivo
- Tamaño de las hojas, altura de la planta, sombra, espaciamiento, geometría de la plantación (Ej. banano vs legumbres)
- Ciclo vegetativo del cultivo o planta (Ej. recién plantada, madurez, poscosecha).
- Índice de área foliar (IAF): Es la cobertura de un lado de la hoja de la planta o árbol por unidad de área; en el caso de bosques dicho valor es superior a 1 pero inferior a 10. La reflectividad aumentará con el aumento en el índice de área foliar (Fig. 11). La máxima absorción (mínima reflectancia) de energía en el espectro visible se da cuando el IAF alcanza un valor de 2 a 3 (Fig. 11); en tanto que para la energía infrarroja cercana esto sucede cuando la vegetación alcanza un IAF entre 6 y 8.

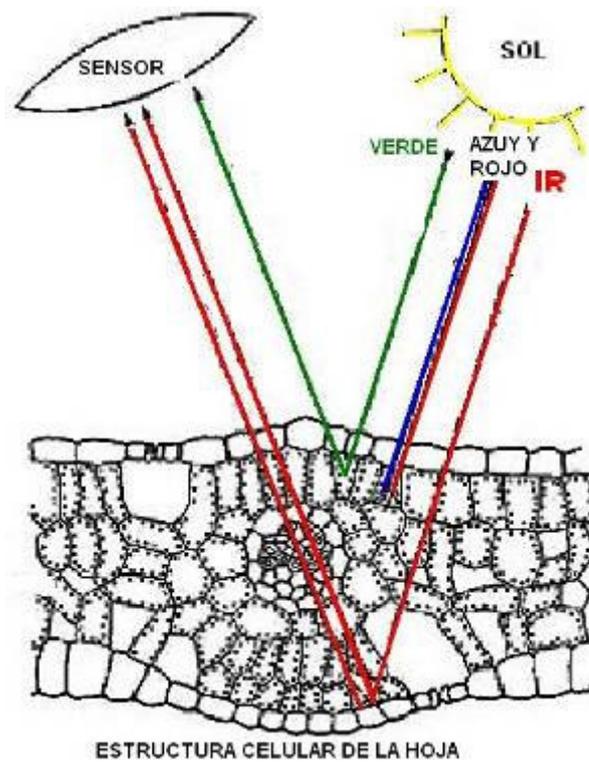


Figura 9: Relación entre la estructura de la hoja y su reflectividad en diferentes bandas del espectro electromagnético. Fuente: Adaptado de Short, M. Nicholas www.rst.gsfc.nasa.gov

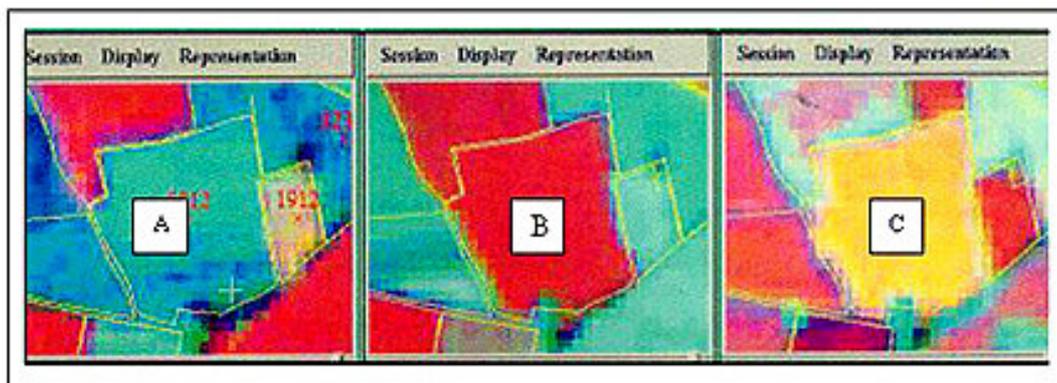


Figura 10: Relación entre reflectancia y grado de desarrollo de un cultivo. A: Suelo preparado B. Cultivo maduro C: Cultivo cenicense. El color rojo indica la alta reflectancia en la banda del infrarrojo. Imagen falso color. Fuente: Short, M. Nicholas www.rst.gsfc.nasa.gov

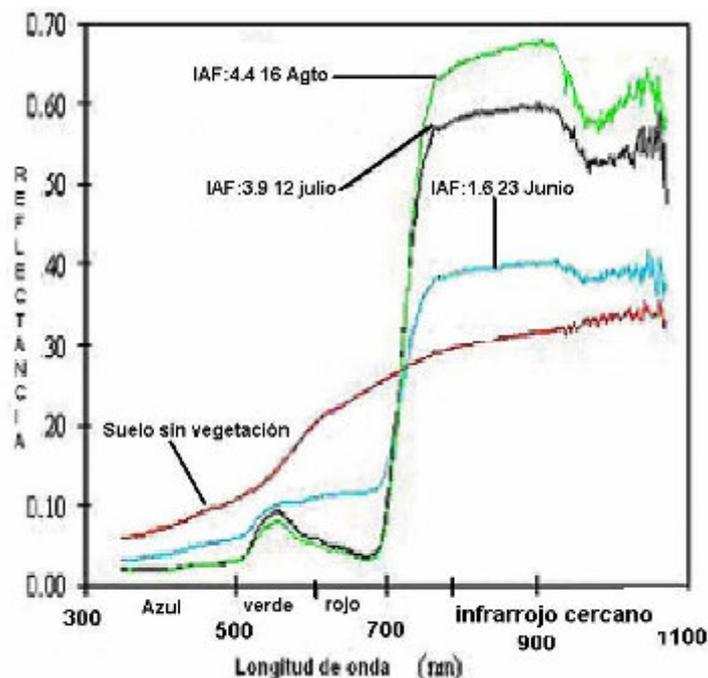


Figura 11: Relación entre la reflectancia y el índice de área foliar. El efecto del IAF en la reflectividad de la vegetación es muy evidente en el área del infrarrojo cercano y medio, no así en las bandas del espectro visible. Fuente: Short, M Nicholas www.rst.gsfc.nasa.gov

Suelo Seco

La curva de reflectancia de un suelo seco tiene menos puntos de inflexión comparada con la curva de la vegetación turgente. Esto es un reflejo de la estructura menos compleja del suelo. En general, la curva presenta una tendencia monótona entre 0.4 y 1.9 μm (Fig. 12), con la presencia de las *bandas de absorción de agua* a 1.4; 1.9 y 2.2 μm . El contenido de humedad del suelo y su textura afectan la curva de reflectancia. Por ejemplo, los suelos arenosos tienen un bajo contenido de humedad y por ende poseen generalmente una alta reflectancia en todas las bandas del espectro visible (lucen de color blancuzco). El aumento en el contenido de humedad del suelo tiende a crear imágenes con colores más oscuros.

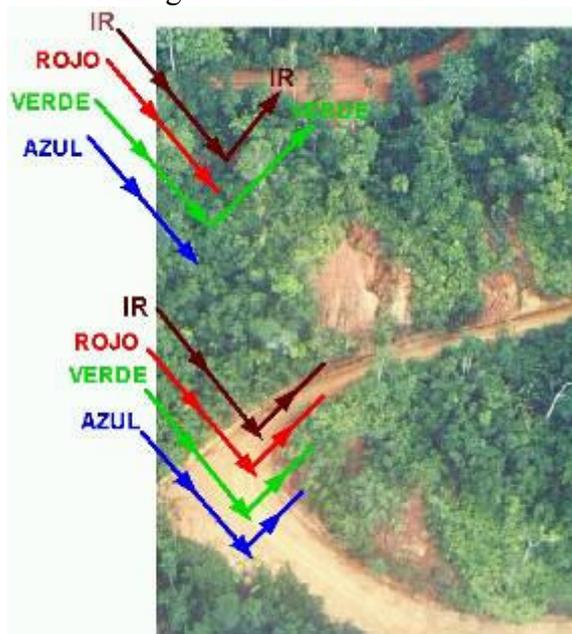


Figura 12 : Reflectancia del suelo seco y de la vegetación turgente.

Agua

La característica más sobresaliente de la curva de reflectancia del agua es su banda de absorción en el área del infrarrojo medio. En general, el agua absorberá la energía en todas las bandas del espectro visible y por tanto lucirá de color negro en una imagen en color verdadero. El contenido de sedimentos en suspensión en el agua modifica su reflectancia; a mayor cantidad de sedimentos mayor reflectancia en el espectro visible y por tanto el agua lucirá de color claro (Ej. café-marrón). El agua absorbe una mayor cantidad de energía en las longitudes de onda mayores del espectro visible (verde, rojo) así como en el infrarrojo. Por esta razón el agua limpia tiene una apariencia azulada o verde azulada y oscura si se observa en rojo o en el infrarrojo. Los sedimentos en suspensión le dan una apariencia brillante al agua (mayor reflectividad). La clorofila en las algas absorbe energía en el azul y rojo y refleja en el verde y por esta razón el agua tiene una apariencia mas verduzca (Fig13). La profundidad del cuerpo de agua y la topografía del lecho modifican la apariencia del agua.



Figura 13: Efecto del contenido de algas en la reflectancia de cuerpos de agua. Imagen IKONOS.

Características de las imágenes MASTER

Las imágenes MASTER (Simulador MODIS/ASTER; <http://masterweb.jpl.nasa.gov>) fueron adquiridas en marzo del 2003 como parte del proyecto CARTA2003; el cual se realizó entre el Centro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica (CENAT) y la NASA-USA. El objetivo de la misión fue adquirir imágenes multiespectrales de Costa Rica utilizando el simulador MODIS/ASTER a bordo del avión WB-57 (Figs. 14). El sensor MASTER registra la energía electromagnética reflejada/emitada por la superficie terrestre entre 0.440 (visible) y 13.00 μm (térmico) en 50 bandas con una amplitud espectral que varía entre 0.04 μm para las bandas del espectro visible (V), infrarrojo cercano (IRC) y 0.7 μm para el infrarrojo térmico (IRT) (Figs. 15, 16 y 17 y cuadros 1 y 2). La resolución espectral de MASTER es similar a los

sensores MODIS y ARTER a bordo del satélite TERRA de la NASA (<http://www.visibleearth.nasa.gov/Sensors/Terra/>). La resolución espacial de las imágenes depende de la altura de vuelo del avión y varía entre 5-6m y 75 metros.

Cuadro 1: Características espectrales del sensor MASTER a bordo del avión WB-57. Misión CARTA-2003. Costa Rica.

Banda espectral	Espectro	Resolución (μm)	Long. onda (μm)	Observaciones
1 a 6	Visible	0.040	0.440-0.68	Similar a Landsat 5-7, SPOT 4-5, IKONOS, IRS
7-11	IRC	0.040	0.72-0.924	Similar a Landsat 5-7, SPOT 4-5, IKONOS, IRS
12 a 23	IRC/IRM	0.050	0.925-2.285	Similar a Landsat 5-7, SPOT 4-5
24-25	IRM	0.065	2.297-2.427	Similar a Landsat 5-7
26-40	IRM	0.15	3.075-5.325	Baja relación señal/ruido
41-46	IRT	0.4	7.70-10.30	Energía emitida por la superficie terrestre
47	IRT	0.65	10.3-10.95	Similar a Landsat 5-7
48	IRT	0.7	10.95-11.65	Similar a Landsat 5-7
49-50	IRT	0.5	11.80-13.00	Energía emitida por la superficie terrestre

Basado en: CARTA-2003; Hook Simon J. et. al. 2001.

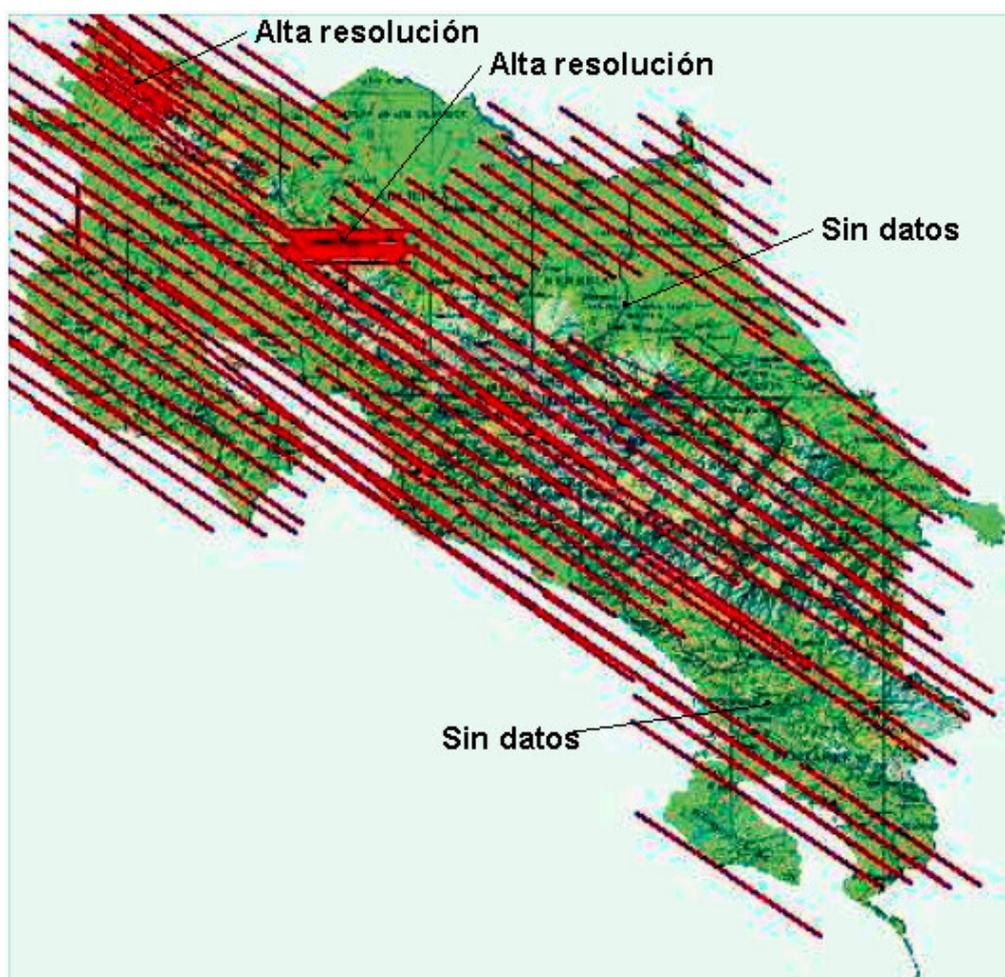


Figura 14: Líneas de vuelo de imágenes MASTER.

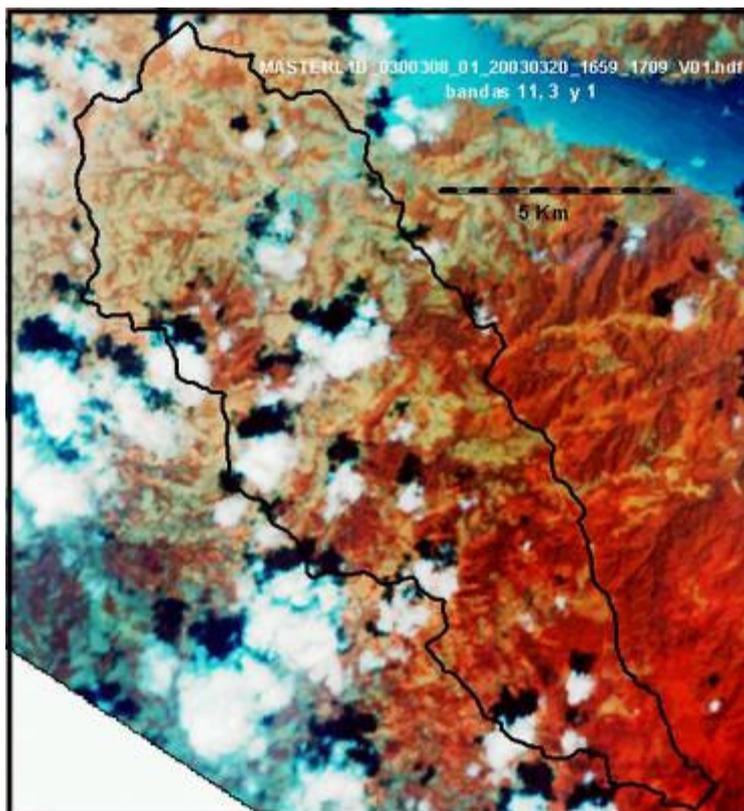


Figura 15: Muestras de imágenes MASTER. Compuestas en falso color. Resolución 43m. Cuenca del río Chiquito-Cordillera de Tilarán-Embalse Arenal. Bandas 11, 3 y 1.

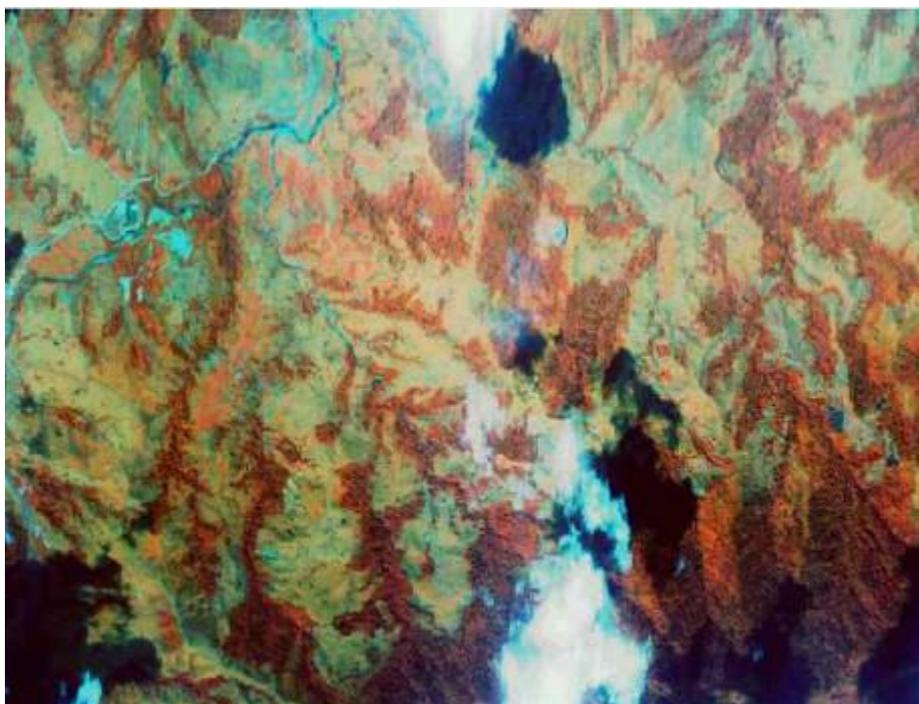


Figura 16: Muestras de imagen MASTER de alta resolución. Compuestas en falso color. Resolución 5m. Río Chiquito, Tilarán, Guanacaste.

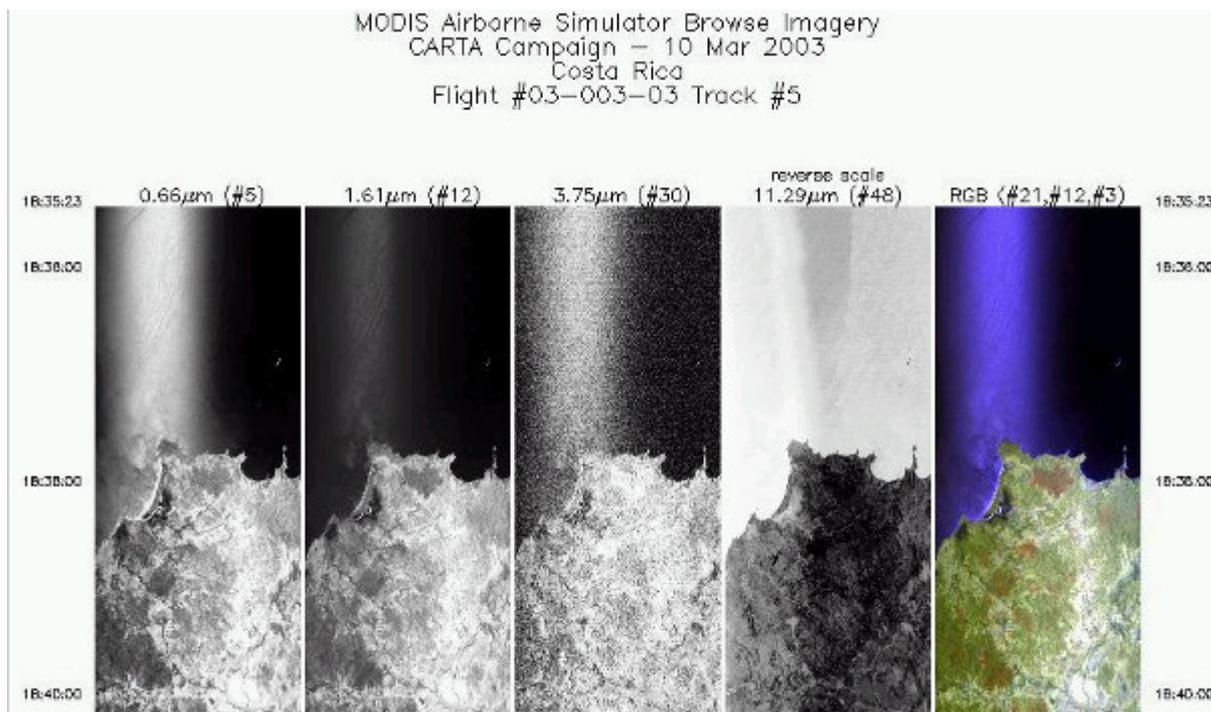


Figura 17: Muestras de imágenes MASTER que usted puede bajar del sitio web de NASA <http://masterweb.jpl.nasa.gov/data/> . Misión CARTA-2003

Cuadro 2: Características radiométricas de las bandas del sensor MASTER.

A. Espectro visible

Banda	Long. media onda (μm)	Observaciones
1	0.457	Espectro visible, azul. Diseñada para penetrar cuerpos de agua, mapeo de áreas costeras, discriminar entre suelo y vegetación de origen antropogénico (Ej. ciudades). Esta es una banda de absorción de cloro fila.
2	0.498	Espectro visible, verde. Permite capturar la reflectividad máxima de la vegetación (cloro fila) y estudiar el vigor de la vegetación; así como la identificación de elementos de origen antropogénico (Ej. ciudades).
3	0.540	
4	0.581	
5	0.660	Espectro visible, rojo. Permite detectar la banda de absorción de la cloro fila y por lo tanto puede utilizarse en la detección de tipos de vegetación y en la identificación de elementos de origen antropogénico (Ej. ciudades).

Absorción de agua alrededor de $0.6 \mu\text{m}$

B. Infrarrojo cercano

Banda	Long. media onda (μm)	Observaciones
6	0.711	Infrarrojo cercano. Banda de reflectividad máxima de la vegetación sana (40 a 50%). Las diferencias en reflectividad pueden utilizarse para discriminar entre tipos de vegetación y para detectar grados de estrés en la vegetación. También puede utilizarse para estudiar la humedad del suelo y en el mapeo de cuerpos de agua.
7	0.750	
8	0.800	
9	0.866	
10	0.906	
11	0.945	Absorción de agua; discrepancia de 25% en pruebas de calibración reportadas por NASA*

* <http://masterweb.jpl.nasa.gov/validation/Dec1998/Dec1998.htm>

C. Infrarrojo medio

Banda	Long. media onda (μm)	Observaciones
12	1.609	Esta es una banda sensible al contenido de humedad tanto del suelo como de la vegetación. También puede utilizarse para detectar cuerpos de agua ya que prácticamente toda la energía es absorbida
13	1.665	
14	1.720	
15	1.775	Baja reflectancia, discrepancia de -19% en pruebas de calibración reportadas por NASA*
16	1.828	<i>Baja reflectancia, discrepancia de -283.3% en pruebas de calibración reportadas por NASA*</i>
17	1.875	<i>Baja reflectancia, discrepancia de -1943% en pruebas de calibración reportadas por NASA*. No usable en imagen MASTER-2003</i>
18	1.924	<i>Baja reflectancia, discrepancia de 436% en pruebas de calibración reportadas por NASA* No usable en imagen MASTER-2003</i>
19	1.981	<i>Baja reflectancia, discrepancia de -26.4% en pruebas de calibración reportadas por NASA*</i>
20	2.081	Bandas sensible al contenido de humedad de la vegetación . También se utilizan en aplicaciones geológicas y edafológicas. * http://masterweb.jpl.nasa.gov/validation/Dec1998/Dec1998.htm .
21	2.160	
22	2.211	
23	2.258	
24	2.328	
25	2.394	

D. Infrarrojo medio

Bandas	Long. media onda (μm)	Observaciones **
26	3.1477	<i>No usable en imagen MASTER-2003</i>
27	3.2992	
28	3.4538	
29	3.6088	Baja reflectancia, alta relación ruido/señal; o sea no se logran distinguir los elementos del paisaje.
30	3.7507	
31	3.9134	
32	4.0677	
33	4.2286	<i>No usable en imagen MASTER-2003</i>
34	4.3786	
35	4.5202	Los datos de validación de NASA indican que estos canales tienen problemas de ruido. En el informe (1998) se menciona que se está adicionando un filtro lineal al sensor para remediar esta limitante.
36	4.6684	
37	4.8233	
38	4.9672	
39	5.116	
40	5.2629	

Absorción de anhídrido carbónico para algunas longitudes de onda entre 2.5 y 4.5 μm

** Las observaciones se basan en datos publicados por NASA para validaciones realizadas en 1998; sección referente a datos obtenidos a una altura de 6000 msnm.

E. Infrarrojo térmico

Banda	Long. media onda (μm)	Observaciones
41	7.760	Presencia de emitancia y reflectividad. Si se considera la emitancia de la superficie terrestre el infrarrojo térmico se inicia alrededor de los $8\mu\text{m}$ y se extiende hasta los $14\mu\text{m}$. Estas son bandas sensibles al calor emitido por los cuerpos en la superficie terrestre. Utilizada para estudiar el contenido de humedad tanto del suelo como de la vegetación. Superficies poco reflectivas tienen una alta emisividad (Ej. agua). La mayor emisividad se da en vegetación densa y en cuerpos de agua; mientras que los valores más bajos corresponden materiales arenosos. (Chuvieco, 1996).
42	8.168	
43	8.632	
44	9.094	
45	9.700	
46	10.116	
47	10.633	
48	11.329	
49	12.117	
50	12.878	

Fuente: <http://masterweb.jpl.nasa.gov/validation/> ; Lillesand and Kiefer, 1996.

Creación de imágenes digitales

Hasta el momento se ha tratado el tema de la radiación electromagnética, de cómo esta interacciona con la atmósfera y con la superficie terrestre. El sensor está equipado con un instrumento que registra la energía reflejada y/o emitida por la superficie terrestre; la cual es posteriormente convertida a niveles digitales utilizando una escala numérica de 8 (0 a 255 valores) o más bits (Ej. 0 a 65535 valores) (Fig.18). Estos *niveles digitales (ND)* se denominan también *valor del pixel*, *valor de brillantez* o *niveles de grises*. Estos niveles digitales son útiles para realizar una clasificación digital de la imagen sin embargo no tienen ninguna utilidad para realizar una interpretación visual de la imagen. Por esta razón los ND son transformados en *niveles visuales (NV)* y representados en tonos de gris o en colores utilizando un programa de computo. Los colores y tonos de grises son manipulados por el usuario y por lo tanto no tienen ningún valor intrínseco (escala de medición nominal).

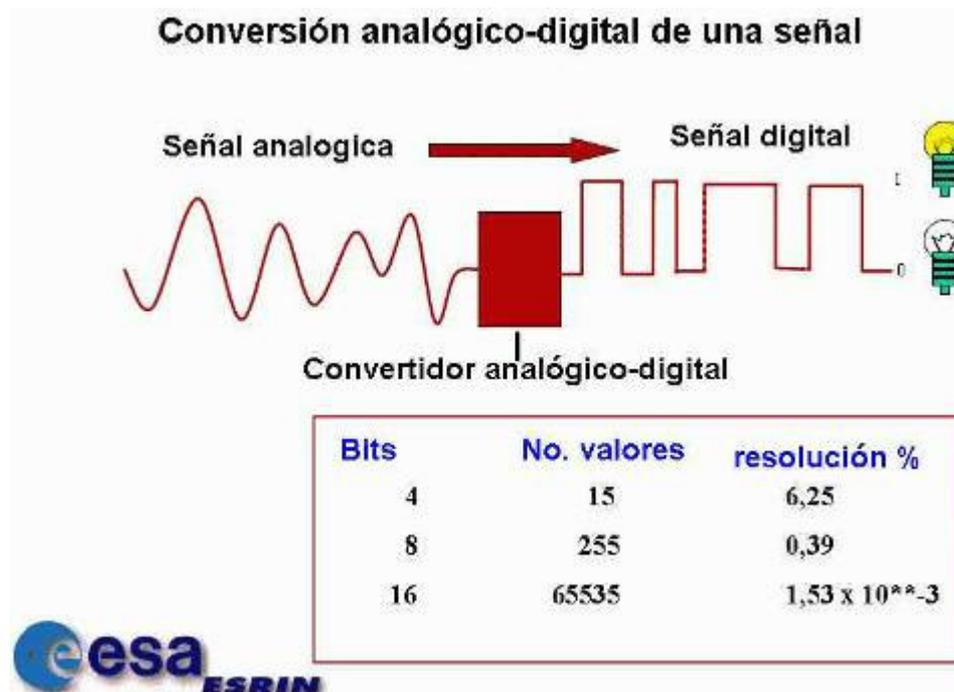


Figura 18: Conversión analógica digital.

El color que percibe el ojo humano es el resultado de la reflectividad selectiva de los objetos que observamos. Por ejemplo, la vegetación luce de color verde porque refleja una mayor proporción de energía en la longitud de onda del verde (0.5-0.6 μm) y absorbe la correspondiente al azul (0.4-0.5 μm) y rojo (0.6-0.7 μm). A estos tres colores se les denomina *primarios* y mediante su combinación se generan todos los otros colores del arco iris. Para crear colores se pueden utilizar dos procesos:

Proceso aditivo: Los colores se crean por la suma de los tres colores primarios (rojo, verde y azul). Los colores complementarios son:

Azul+verde:	ciana	
Azul+rojo:	magenta	
Verde+rojo:	amarillo	
Azul+verde+rojo:	blanco	
Otras combinaciones de colores son:		
amarillo+rojo:	Naranja	
azul+rojo:	Púrpura:	

Proceso sustractivo: Los colores se crean a partir de la absorción de luz por parte de los colores complementarios (efecto de filtro).

<ul style="list-style-type: none"> • Ciana absorbe al color rojo • Magenta absorbe al color verde • Amarillo absorbe al color azul 	
---	--

El modelo de color aditivo es el utilizado por el monitor de las computadoras y por otros sistemas de visualización tales como los televisores y por tanto es el utilizado en el análisis visual computarizado de imágenes. Por otra parte, el modelo de color sustractivo es utilizado por las impresoras para crear copias analógicas de las imágenes. El software utilizado para imprimir se encarga de convertir los datos de un modelo de color al otro.

El *tono* en la imagen indica la intensidad de energía medida por el sensor en una determinada banda del espectro. En un producto fotográfico un objeto de tono oscuro indica que el sensor detectó una débil radiancia (poca energía) del mismo (Ej. agua); en tanto que uno de tono claro indica que recibió una mayor cantidad (Ej. nubes). En general, el tono es un indicador del comportamiento espectral de las diferentes superficies que conforman la imagen.

Las composiciones a color pueden ser en *color verdadero o natural* ó en *falso color o infrarrojo color*. En el primer caso se representan las bandas del espectro utilizando el modelo de color aditivo y el código de colores percibido por el ojo humano (azul, verde y rojo) (Cuadro 3). Esta combinación de bandas del espectro visible (azul, verde y rojo) da la impresión de estar observando una fotografía a colores (Fig.19). En general, esta combinación de bandas ofrece poca capacidad de discriminar entre diferentes tipo se cobertura. En esta imagen se observa la sección oeste del Valle Central (San José, Heredia, Alajuela; ver fig. 19). En la esquina superior izquierda se observa el aeropuerto Juan Santamaría y la ciudad de

Alajuela. En la esquina inferior derecha se observa el lago de la Sabana y una porción de la ciudad de San José. Hacia el noreste (esquina superior derecha) se observan las ciudades de Heredia y San Rafael y cultivos de café. Las líneas de color ciana corresponden a carreteras asfaltadas. Las bandas sinuosas y de color oscuro corresponden a bosques riberinos. Las áreas blancuzcas indican sitios de alta reflectividad (Ej. urbanizaciones).

En la imagen en falso color (Fig. 20) se asignó el color azul a una banda visible (verde), el color verde a la banda del rojo y el color rojo a una banda del infrarrojo cercano (cuadro 3). La visualización en falso color o infrarrojo facilita la identificación de masas vegetales, ciudades, cuerpos de agua, terreno desnudo, nubes y sombras. El cuadro 4 describe la relación entre el color-tonalidad de los elementos en una imagen en falso color infrarrojo y su posible significado en la realidad. En la figura 19 usted puede observar que las ciudades de San José, Heredia y Alajuela tienen una tonalidad ciana; el bosque riberino tiene un color rojizo; las áreas con pasto seco tienen un tono marrón y las áreas con pasto verde tienen un tono rosado fuerte. La combinación en color infrarrojo es muy común en imágenes multispectrales tales como MASTER, Landsat MSS, TM, ETM+, SPOT, IRS, MOS y NOAA. Al combinar tres bandas con un ámbito de valores de 0 a 255 por banda se crea una imagen con un máximo de 16.7 millones de colores; a esta imagen se le conoce como color verdadero.

Cuadro 3: Combinación de bandas utilizadas para crear una composición en color y en falso color.

Color	Combinación de bandas	
Color natural	Azul ----->	Azul (Ej. banda 1 de MASTER)
	Verde ----->	Verde (Ej. banda 2 a 4 de MASTER)
	Rojo ----->	Rojo (Ej. banda 5 ó 6 de MASTER)
Falso color infrarrojo tradicional	Azul ----->	Verde (Ej. banda 2 a 4 de MASTER)
	Verde ----->	Rojo (Ej. banda 5 ó 6 de MASTER)
	Rojo ----->	Infrarrojo (bandas 7 a 14 de MASTER)
Falso color	Azul ----->	Verde o rojo
	Verde ----->	Infrarrojo medio ó rojo
	Rojo ----->	Infrarrojo cercano, infrarrojo medio ó térmico

Cuadro 4: Clave para la interpretación de una imagen en falso color (infrarrojo tradicional).

COLOR	DESCRIPCIÓN
Rojo-Magenta	Vegetación vigorosa: bosques, cultivos bajo riego.
Rosado	Vegetación menos densa y/o en las primeras fases de crecimiento. Áreas suburbanas con mezcla de zonas verdes y áreas de concreto, asfalto.
Marrón	Vegetación arbustiva/pasto. Su tonalidad dependerá de la densidad, estado vegetativo y tonalidad del sustrato.
Beige-dorado	Áreas de transición: pastos secos asociados con arbustos poco densos.
Gris a azul metálico	Áreas urbanas densas, afloramientos rocosos, arena.
Azul oscuro a negro	Cuerpos de agua (lagunas, embalses, ríos, océano), coladas de lava, sombras (por ejemplo de nubes, efecto del relieve)
Blanco	Áreas de alta reflectividad: carreteras de concreto, arena seca, nubes, suelo desnudo y seco, roca expuesta.

Con una imagen del satélite Landsat 5 (TM) y Landsat 7 (ETM+) se pueden realizar 20 combinaciones de tres bandas a la vez si no se utilizan las bandas del infrarrojo térmico (una en TM y dos en ETM+). Jensen (1996) utilizando el “Índice de Factores Óptimos” propuesto por Chavez et. al. (1982, 1984) sugiere que las mejores combinaciones de bandas son las siguientes:

Imagen	bandas (RGB)	Comentario
1	5,4,1	Combinación óptima de bandas
2	5,4,2	Segunda mejor combinación
3	5,4,3	Tercer mejor combinación

En general, las mejores combinaciones de bandas incluyen una banda en el espectro visible (bandas 1 a 6 de MASTER), una banda en el infrarrojo cercano (bandas 7 a 11 de MASTER) y una banda en el infrarrojo medio (bandas 12 a 16, 19 a 25 y 29 a 29 de MASTER). Una vez elegida la combinación que proporciona la mayor información visual, el usuario(a) debe realizar los realces del caso para mejorar la detectabilidad o segregación de las coberturas existentes en la imagen.

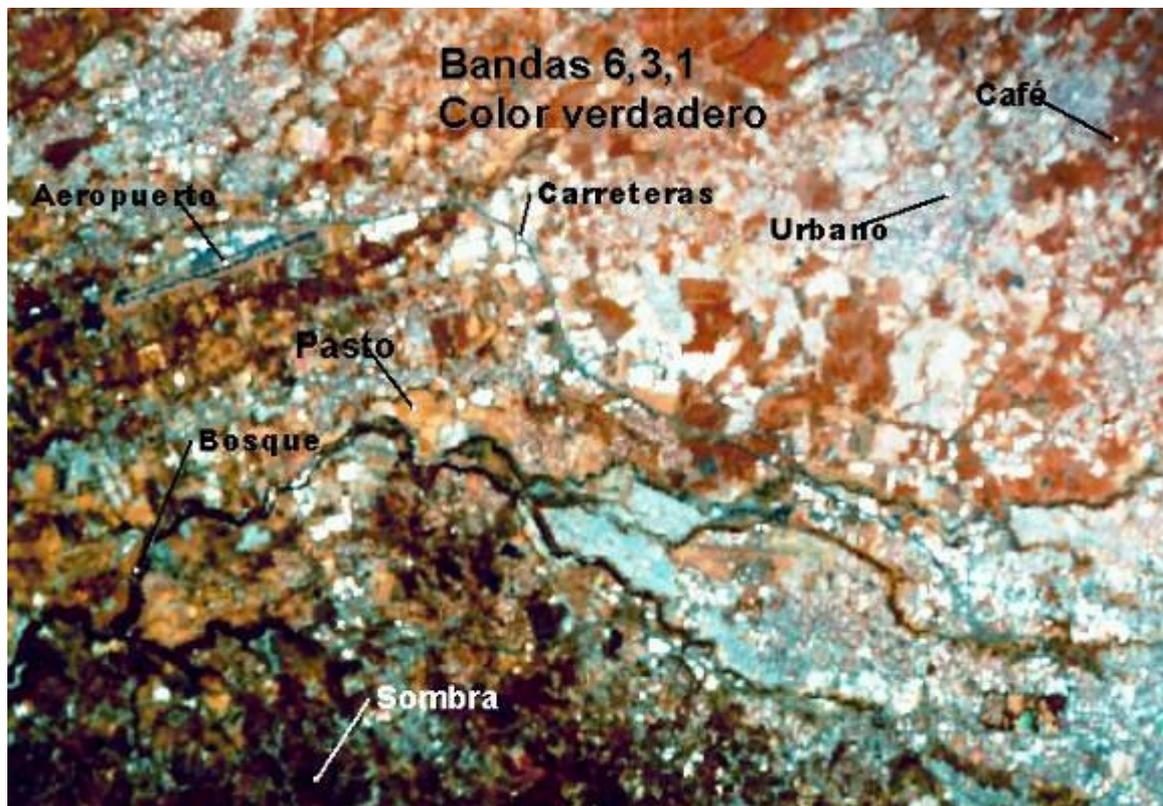


Figura 19: Imagen MASTER Combinación en color verdadero (bandas 6,3,1; R,G,B). Área ubicada al Sur Oeste de San José, marzo del 2003. Píxel 45 metros.

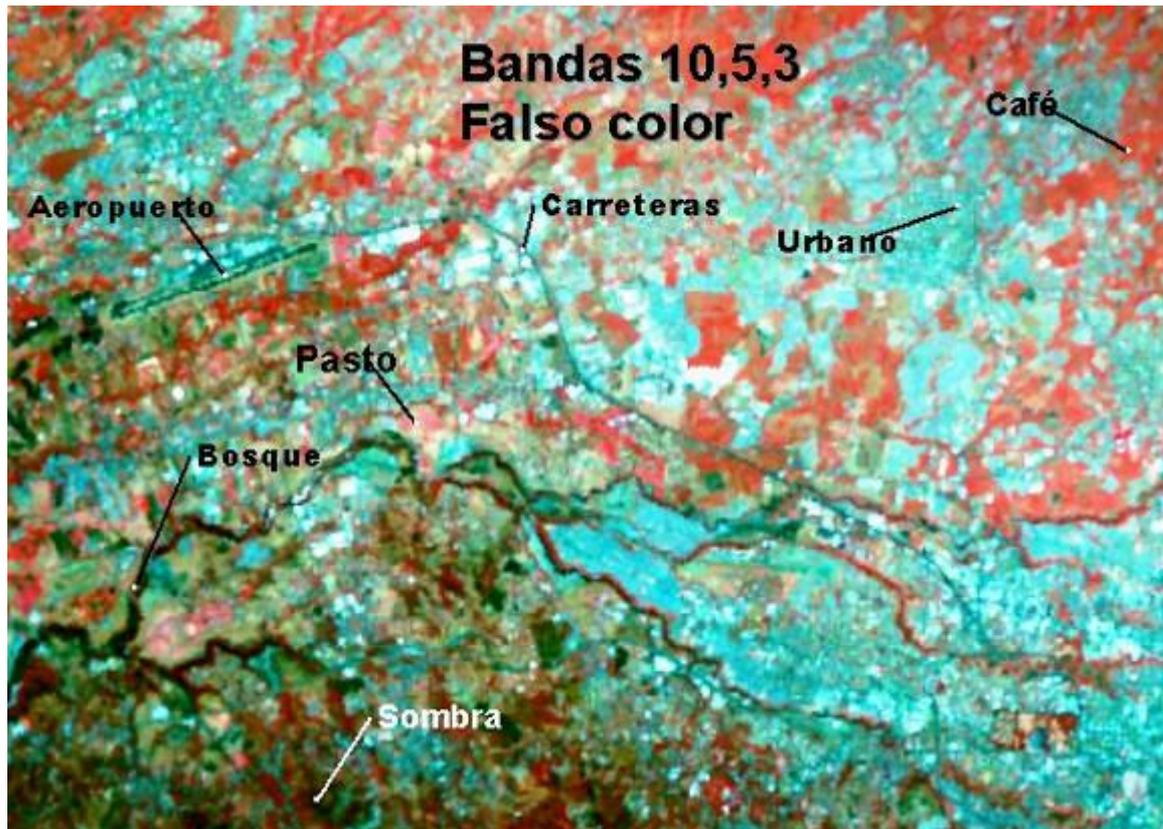


Figura 20: Imagen MASTER Combinación en falso color o infrarrojo (bandas 10,5,3; R,G,B). Área ubicada al Sur Oeste de San José, marzo del 2003. Píxel 45 metros.



Figura 21: Área cubierta por imágenes MASTER de las figuras 19 y 20. El área total es de aproximadamente 188 km^2 ($16.3 \times 11.5 \text{ km}$)

Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de las imágenes incluye los siguientes aspectos: preprocesamiento, realces, transformaciones, clasificación y análisis.

Preprocesamiento

A estas operaciones también se les conoce como restauración y rectificación de la imagen y tienen por objetivo corregir las distorsiones radiométricas y geométricas de la imagen debido al sensor o a la plataforma que lo sustenta (Fig. 22).

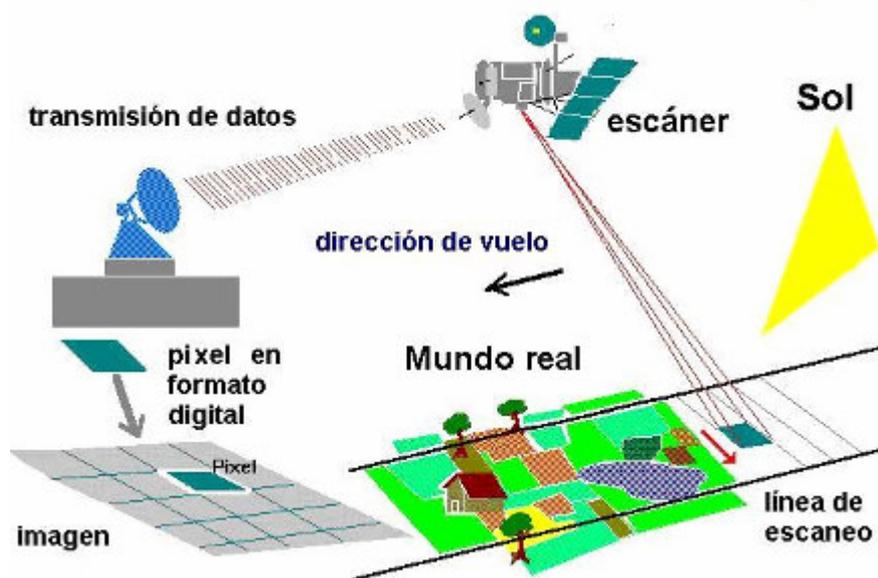


Figura 22: El preprocesamiento de la imagen le asegura al usuario (a) que el producto que recibe es un fiel reflejo de la realidad.

Correcciones radiométricas

Estas correcciones son realizadas por la compañía que provee la imagen y consisten en la eliminación de distorsiones en la imagen debidas al sensor (Fig. 23), el efecto de la topografía o al efecto de la atmósfera y la conversión de la energía registrada por el sensor a valores digitales (conversión analógica-digital). En los sensores modernos se realiza calibración de los detectores (energía medida Vs energía emitida o reflejada por un cuerpo de referencia) para asegurarse de que operan correctamente.

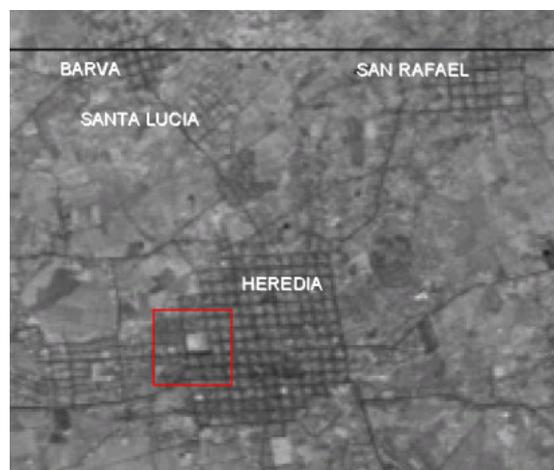


Figura 23: La línea negra en la parte superior de la imagen es un ejemplo de un error en uno de los detectores del sensor. SPOT III.

Correcciones geométricas

Las correcciones geométricas tienen como objetivo corregir las distorsiones ocasionadas por variaciones en la geometría del sensor y de la Tierra; así como la asignación de coordenadas a cada uno de los píxeles (Ej. latitud, longitud). Una imagen corregida geoméricamente debe representar correctamente la superficie de la Tierra (Fig. 24). Los errores geométricos tienen su origen en uno o más de los siguientes factores:

- Movimiento en el sistema de escaneo y de la plataforma que sustenta el sensor
- Perspectiva de los elementos ópticos del sensor
- Cambios en la altitud de la plataforma
- Relieve del terreno
- Curvatura y rotación de la Tierra

Las variaciones sistemáticas o predecibles asociadas al sensor pueden corregirse con modelos que describen su movimiento y el de la plataforma que lo sustenta así como de las relaciones geométricas entre la plataforma y la Tierra. Estos se conocen como modelos de sensor (Ej. Landsat, SPOT, IKONOS, etc) y los programas comerciales los utilizan en el proceso de georeferenciación de la imagen. El otro tipo de errores es no sistemático y depende de las condiciones particulares del terreno y por esta razón se requiere un modelo digital del terreno para eliminarlos (proceso conocido como ortorectificación ó corrección diferencial).

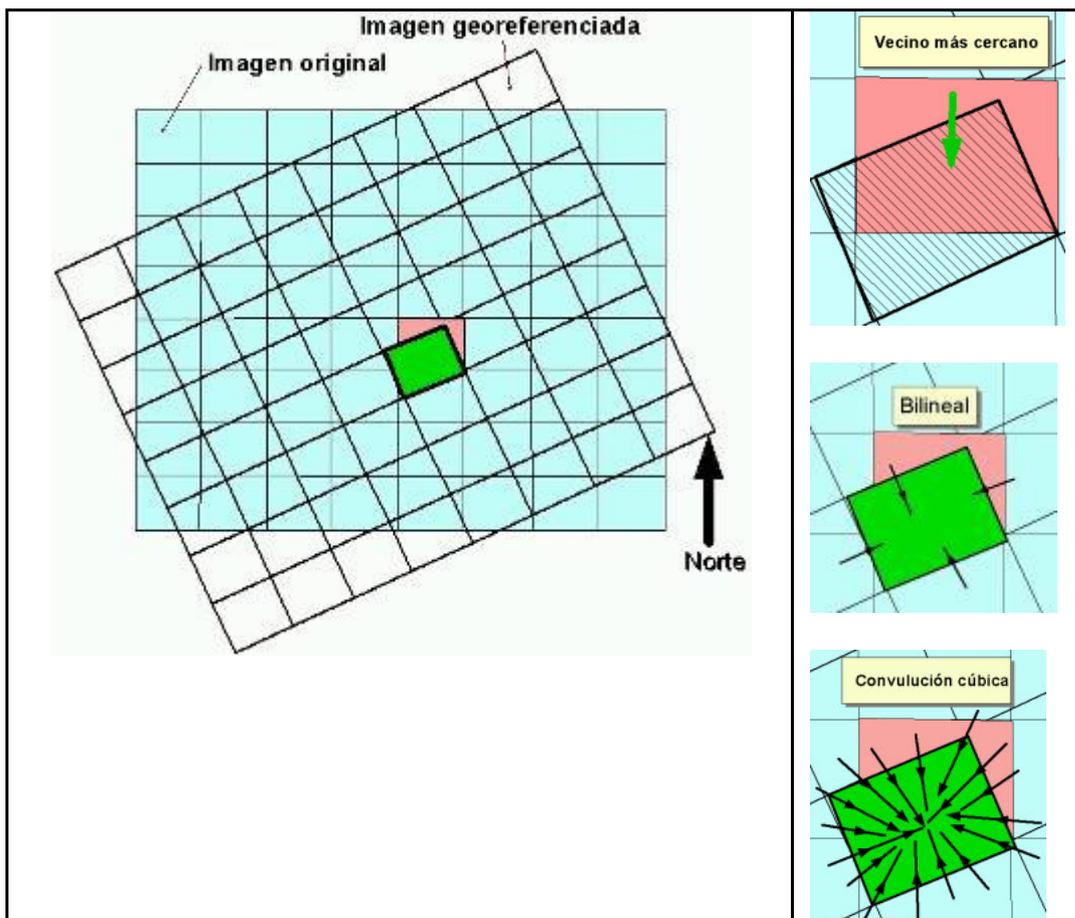


Figura 24: Georeferenciación de una imagen. Observe que en la imagen georeferenciada la ubicación de los píxeles cambia con respecto a los originales. Por esta razón se utiliza un método de remuestreo para asignar el nuevo valor de reflectancia al píxel de la imagen georeferenciada. Los métodos de remuestreo son vecino más cercano, bilineal y convulsión cúbica.

Realce de la imagen

El objetivo de las operaciones de realce en la imagen es mejorar su apariencia visual con el objetivo de facilitar su interpretación visual. A través de las operaciones de realce se modifican los valores de brillantez de la imagen de tal forma que se facilite la separación visual entre coberturas (Ej. bosque vs pasto vs carreteras). Estas operaciones se aplican generalmente a una sola banda (Figs. 25 y 26)

Mejorar contraste

Esta operación tiene como objetivo mejorar la separación entre tonos en una imagen; por ejemplo se pueden aclarar áreas muy oscuras y oscurecer áreas muy claras (sobresaturadas).

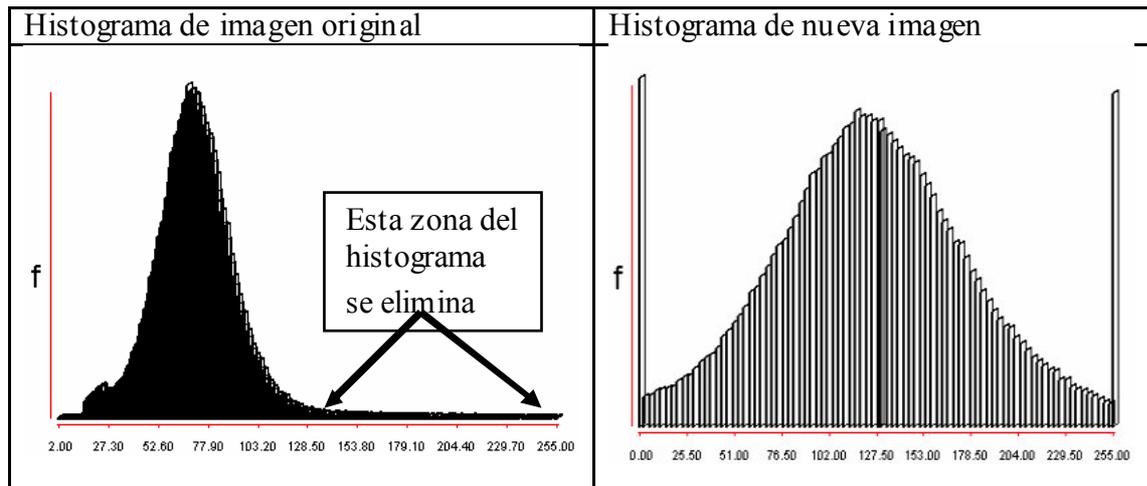


Figura 25: Ecuilización del histograma.

Mejora del contraste utilizando InfanView



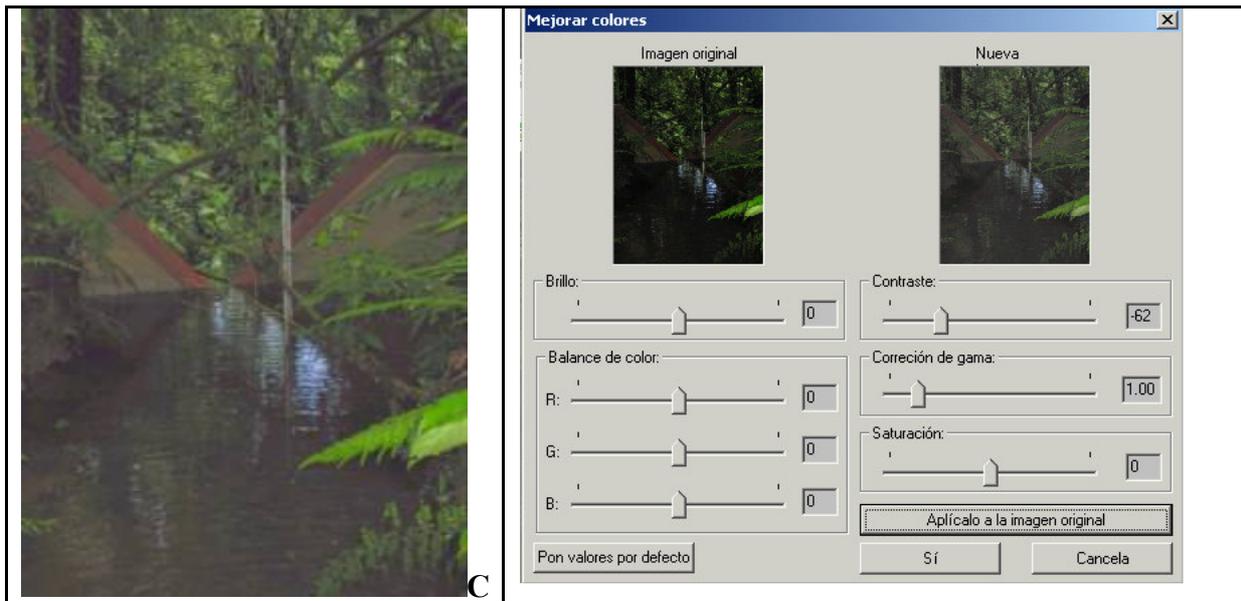


Figura 26: Mejora en el contraste de una imagen modificando el contraste, la corrección gama y la saturación. A: imagen original. B: Realce mediante mejora en el contraste. C. Mejora del contraste, ajuste de corrección gama y de saturación

Filtros espaciales

El objetivo de los filtros digitales es resaltar o suprimir un patrón espacial particular en la imagen basado en su frecuencia espacial (concepto relacionado con la textura de la imagen) o sea la frecuencia de las variaciones en tonalidad en la imagen. Las áreas homogéneas tienen una baja frecuencia espacial y por tanto sus valores de brillantes son muy similares (baja variabilidad); en tanto que zonas con cambios abruptos en tonalidad tienen una frecuencia alta (baja variabilidad). Es común utilizar una ventana móvil de 3x3, 5x5 ó 7x7 píxeles para realizar el filtrado. El procedimiento consiste en reemplazar el valor central de la matriz de filtrado por un valor derivado de los valores de brillantes de los píxeles vecinos y de una operación matemática (Ej. moda, promedio, mediana, etc.). Luego la ventana es desplazada un píxel en el sentido de las columnas e hileras y el procedimiento de cálculo se repite. La ventana continúa moviéndose hasta completar el filtrado de toda la imagen (Fig. 27). Los **filtros bajos** tienden a homogenizar la apariencia de la imagen (utilizan moda, mediana ó promedio); en tanto que los **filtros altos** tiende a resaltar las diferencias entre los límites de diferentes zonas en la imagen (resalta valor de píxeles limítrofes). Otra forma de aplicar un filtro alto es aplicar primero un filtro bajo a la imagen y luego restar la nueva imagen de la imagen original. Los filtros **direccionales o de borde** están diseñados para resaltar elementos lineales tales como carreteras o los límites entre campos de cultivo. También pueden utilizarse para resaltar elementos lineales con una determinada dirección (Ej. fallas o zonas de contacto en formaciones geológicas).

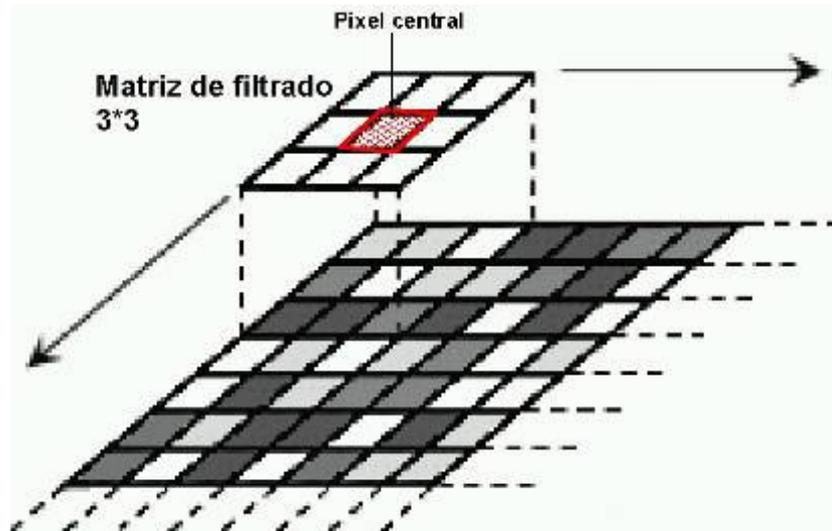


Figura 27: Matriz de filtrado de 3*3.

Transformaciones

Las transformaciones son operaciones similares a las de realce con la diferencia de que normalmente se aplican a un grupo de bandas espectrales y no a una banda individual. Dos de las transformaciones más comunes son el crear nuevas imágenes basados en razones de bandas (Ej. índices de vegetación) y el análisis de componentes principales (combinación lineal de bandas). El objetivo de las transformaciones es crear nuevas bandas que muestren mejor los elementos presentes en la imagen (Ej. separación entre vegetación enferma y sana).

Clasificación y análisis

Estas operaciones se utilizan para identificar y clasificar los píxeles de la imagen. Los algoritmos de clasificación digital utilizan la reflectancia de cada píxel en diferentes longitudes de onda y un criterio estadístico para asignarlo a una clase espectral (Ej. bosque, pasto, urbano, etc.). Existen varios procedimientos para la clasificación de imágenes por cuanto en las presentes notas solo se mencionan dos de los más comunes: clasificación no supervisada y clasificación supervisada.

Clasificación no supervisada

En este caso el algoritmo de clasificación decide a cual clase de información (Ej. pasto, bosque, cultivo, urbano, etc.) asigna cada píxel.

Clasificación supervisada

En este caso el usuario(a) seleccione en la imagen zonas representativas de las clases de información que desea utilizar en su clasificación (Ej. pasto, bosque, cultivo, urbano, etc.). Posteriormente el algoritmo de clasificación crea estadísticos para estas áreas y utiliza los resultados para clasificar el resto de la imagen.

Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones más comunes de la teledetección son:

- Crear mapas de uso-cobertura
- Actualizar cartografía
- Estimaciones de productividad en cultivos
- Mapeo de áreas afectadas por eventos naturales extremos (Ej. Inundaciones, erupciones volcánicas)

- Monitoreo de cambio en la cobertura y uso del suelo
- Monitoreo de biomasa
- Mapeo geológico
- Mapeo de estrés en vegetación
- Monitoreo forestal
- Aplicaciones militares
- Mapeo de incendios forestales
- Hidrología
- Irrigación
- Monitoreo marino y costero

Bibliografía

I. Publicaciones recientes

Toutin Th. **DTM Generation from IKONOS In-track Stereo Images Using 3D Physical Model**; (submitted to) Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , 2004.

Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods (review paper); International Journal of Remote Sensing , Vol. 25, No 10 , May , 2004 , pp. 1893-1924.

Latifovic R. , Zhu Z-L , Cihlar J. , Giri C. , Olthof I. **Land Cover Mapping of North and Central America - Global Land Cover 2000**; Remote Sensing of Environment , Vol. 89, No 1 , 2004 , pp. 116-127.

Touzi R. , Charbonneau F. , Hawkins R. K., Vachon P. W. **Ship Detection and Characterization using Polarimetric SAR**; (in press) Canadian Journal of Remote Sensing (RADARSAT 2 Special Issue) , June , 2004.

Fraser R. , Hall R. J., Landry R. , Lynham T. , Raymond D. , Lee B. , Li Z. **Validation and Calibration of Canada-wide Coarse-resolution Satellite Burned Area Maps**; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , Vol. 70, No 4 , April , 2004 , pp. 451-460.

Staenz K. , Hollinger A. **A Canadian Hyperspectral Spaceborne Mission - Applications and User Requirements**; 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May , 2003 , 6p.

Touzi R. , Livingstone C. E. **A General Method for the Calibration of the C-band Convair-580 SAR**; ASAR'03, Montreal, Canada, 25-27 June , 2003 , 12 p.

Fernandes R. A. , Leblanc S. G., Simic A. **A Multi-Scale Analytical Canopy (MAC) Reflectance Model Based on the Angular Second Order Gap Size Distribution**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 3 p.

Zhang Y. , Chen W. , Cihlar J. **A Process-based Model for Quantifying the Impact of Climate Change on Permafrost Thermal Regimes**; Journal of Geophysical Research , Vol. 108, No 22, 2003.

Teillet P. M. , Gauthier R. P., Fedosejevs G. , Mabley M. , Chichagov A. , Ainsley G. **A Soil Moisture Monitoring Sensorweb Demonstration in the Context of Integrated Earth Sensing**; Earth Observing Systems VIII, edited by: William L. Barnes, Vol. 5151 , November, SPIE , 2003.

- Teillet P. M. , Gauthier R. P. , Pultz T. J. , Deschamps A. , Fedosejevs G. , Maloley M. , Ainsley G. , Chichagov A. **A Soil Moisture Sensor web for Use in Flood Forecasting Applications**; Remote Sensing 2003, Proceedings of SPIE 10th International Remote Sensing meeting, Barcelona, Spain, 8-12 September , 2003 , 12 p.
- Toutin Th. **Block Bundle Adjustment of IKONOS Images**; International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No 4 , 2003 , pp. 851-857.
- Toutin Th. **Block Bundle Adjustment of Landsat-7 ETM+ Images Over Mountainous Areas**; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , Vol. 69, No 12 , 2003 , pp. 1341-1350.
- Chen W. , Zhang Y. , Cihlar J. , Smith S. L. , Riseborough W. **Changes in Soil Temperature and Active Layer Thickness During the Twentieth Century in a Permafrost Region in Western Canada**; Journal of Geophysical Research , Vol. 108, No 22 , 2003.
- Du Y. , Vachon P. W. **Characterization of Hurricane Eyes in RADARSAT-1 Images with Wavelet Analysis**; Canadian Journal of Remote Sensing , Vol. 29, No 4 , 2003 , pp. 491-498.
- Fraser R. , Latifovic R. **Coarse Resolution Satellite Mapping of Insect-induced Tree Defoliation and Mortality**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 1.p.
- Toutin Th. **Compensation par segment et bloc d'images panchromatiques et multibandes de SPOT**; Canadian Journal of Remote Sensing/Journal canadien de télédétection , Vol. 29, No 1 , 2003 , pp. 36-42.
- Toutin Th. **DEM Extraction from High Resolution Imagery**; Geospatial Today , Vol. 2, No 3 , July/August , 2003 , pp. 31-36.
- Toutin Th. **Error Tracking in IKONOS Geometric Processing Using a 3D Parametric Modelling**; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , Vol. 69, No 1 , 2003 , pp. 43-51.
- Neville R. A. , Sun L. , Staenz K. **Detection of Spectral Line Curvature in Imaging Spectrometer Data**; Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX , Vol. 5093 , SPIE, The International Society for Optical Engineering , 2003.
- Lamontagne M. **Earthquakes in the Charlevoix Seismic Zone, Québec, Canada**; International Journal on Hydropower and Dams , Vol. 10, No 2 , 2003 , pp. 98-99.
- Leblanc S. G. , Chen W. , Fernandes R. A. **Forest Cover Indicator Based on Multi-scale Remote Sensing Information**; 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Honolulu, Hawaii, November 10-14 , 2003 , 4 p.
- Cihlar J. , Guindon B. , Beaubien J. , Latifovic R. , Peddle D. , Wulder M. , Fernandes R. A. , Kerr J. T. **From Need to Product: A Methodology for Completing a Land Cover Map of Canada with Landsat Data**; Canadian Journal of Remote Sensing , Vol. 29, No 2 , 2003 , pp. 171-186.
- Toutin Th. **Geometric Correction of Remotely Sensed Images**; Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies (Chapter 6), edited by: M.A. Wulder, S.E. Franklin , Kluwer Academic Publishers , 2003 , pp. 143-180.
- Beauchemin M. , Fung K. B. **Image Thresholding Based on Spatial Variation Attribute Similarity**; 25th Canadian Remote Sensing Symposium & 11th Congress of the Association québécoise de télédétection, Montréal, Québec, Canada, October 14-17 , 2003 , 8 p.

Kerr J. , Cihlar J. **Land Use and Cover with Intensity Assessment for Canada from Satellite and Census Data**; Global Ecology & Biogeography , Vol. 12, No 2 , 2003 , pp. 161-172.

Kerr J. T. , Cihlar J. **Land Use Mapping**; Encyclopedia of Social Measurement , Academic Press , 2003 , 16 p.

Fernandes R. A. , Butson C. , Leblanc S. G., Latifovic R. **Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ based accuracy assessment of leaf area index products for Canada derived from SPOT-4 VEGETATION data**; Canadian Journal of Remote Sensing , Vol. 29, No 2 , April , 2003 , pp. 241-258.

Toutin Th. , Chénier R. , Carbonneau Y. **Multi Sensor Block Adjustment**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 3 p.

Fraser R. , Fernandes R. A., Latifovic R. **Multi-temporal Mapping of Burned Forest over Canada Using Satellite-based Change Metrics**; Geocarto International , Vol. 18, No 2 , 2003 , pp. 37-48.

Toutin Th. **Path Processing and Block Adjustment with RADARSAT-1 SAR Images**; IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing , Vol. 41, No 10 , 2003 , pp. 2320-2328.

Cheng P. , Toutin Th. , Zhang Y. **QuickBird - Geometric Correction, Data Fusion, and Automatic DEM Extraction**; Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing & 2003 International Symposium on Remote Sensing, Busan, Korea, 3-7 November , 2003.

Cheng P. , Toutin Th. , Zhang Y. , Wood M. **QuickBird..Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion**; EOM , Vol. 12, No 3 , May , 2003 , pp. 24-30.

Lukowski T. I. , Yue B. **Synthetic Aperture Radar for Search and Rescue: Studies at Natural Resources Canada-Update**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 3 p.

Touzi R. , Charbonneau F. **The SSCM for Ship Characterization Using Polarimetric SAR**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 3 p.

Simic A. , Fernandes R. , Brown R. , Romanov P. , Park W. M., Hall D. **Validation of MODIS, VEGETATION, and GOES+SSM/I Snow Cover Products over Canada Based on Surface Snow Depth Observations**; IGARSS 2003, Toulouse, France, July 21-25 , 2003 , 3 p.

Simic A. , Fernandes R. , Brown R. , Romanov P. , Park W. M. **Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES+SSM/I Snow Cover Products over Canada Based on Surface Snow Depth Observations**; Hydrological Processes , Vol. 18, No 6 , 2003 , pp. 1089-1104.

Toutin Th. , Chénier R. , Carbonneau Y. , Alcaïde N. **3D Mapping with High Resolution Images**; 22nd EARSel Symposium, Prague, Czech Republic, June 4-6 , 2002.

Toutin Th. , Chénier R. , Carbonneau Y. **3D Models for High Resolution Images: Examples with Quickbird, IKONOS, and EROS**; ISPRS Commission IV Symposium, Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, July 8-12 , Vol. 34, No 4 , 2002 , pp. 547-551.

Toutin Th. , Cheng P. **A Comparison of Automated DEM Extraction Results Using Along-Track ASTER and Across-Track SPOT Stereo Images**; Optical Engineering , Vol. 41, No 9 , 2002 , pp. 2102-2106.

Beauchemin M. , Fung K. B., Geng X. **A Method Based on Local Variance for Quality Assessment of Multiresolution Image Fusion**; Symposium on Photogrammetric Computer Vision 2002, Graz, Austria, September 9-13 , International Society for Photogrammetry and Remote Sensing , 2002.

Butson C. , Fernandes R. , Latifovic R. , Chen W. **A Robust Approach for Estimating LAI from Landsat TM/ETM+ Imagery**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002.

White H. P. , Sun L. , Champagne C. , Staenz K. , Leblanc S. G. **BRDF Normalization of Hyperspectral Image Data**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002 , pp. 2572-2574.

Singhroy V. , Molch K. , Bulmer M. **Characterization of Landslide Deposits using SAR Images**; IGARSS 2002, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002 , pp. 185-187.

Touzi R. , Charbonneau F. **Characterization of Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002.

Leblanc S. G. **Correction to the plant canopy gap-size analysis theory used by the Tracing Radiation and Architecture of Canopies instrument**; Applied Optics , Vol. 41, No 36 , 2002 , pp. 7671-7678.

Assouad P. , Singhroy V. **Correlating Airborne Hyperspectral Images with Geological Field Data at Red Lake Ontario**; Astro 2002, Ottawa, Canada, November 12-14 , 2002.

Abuelgasim A. , Fraser R. **Day and night-time active fire detection over North America using NOAA-16 AVHRR Data**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002.

White H. P. , Deguise J.-C. , Schwarz J. W., Hitchcock R. , Staenz K. **Defining Shaded Spectra by Model Inversion for Spectral Unmixing of Hyperspectral Datasets - Theory and Preliminary Application**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002.

Toutin Th. **DEM from Stereo Landsat 7 Data Over High Relief Areas**; International Journal of Remote Sensing , Vol. 23, No 10 , 2002 , pp. 2133-2139.

White H. P. , Sun L. , Staenz K. , Fernandes R. A., Champagne C. **Determining the Contribution of Shaded Elements of a Canopy to Remotely Sensed Hyperspectral Signatures**; Proceedings of the 1st International Symposium on Recent Advances on Quantitative Remote Sensing, Torrent, Valencia (Spain), 16-20 September , 2002.

Singhroy V. , Ohkura H. , Glenn N. **Earth Observation for Landslide Assessment: CEOS Report Summary**; IGARSS 2002, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002 , 3 p.

Trishchenko A. , Cihlar J. , Li Z. **Effects of Spectral Response Function on Surface Reflectance and NDVI Measured with Moderate Resolution Satellite Sensors**; Remote Sensing of Environment, Vol. 81, No 1 , 2002 , pp. 1-18.

Champagne C. , Staenz K. , Bannari A. , White H. P. , Deguise J.-C. , McNaim H. **Estimation of Plant Water Content of Agricultural Canopies Using Hyperspectral Remote Sensing**; 1st International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Torrent, Valencia (Spain), 16-20 September , 2002.

White H. P. , Miller J. R., Chen J. M. **Four-Scale Linear Model for Anisotropic Reflectance (FLAIR) for Plant Canopies II: Partial Validation and Inversion using Field Measurements**; IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing , Vol. 40, No 5 , 2002 , pp. 1038-1046.

Adair M. , Cihlar J. , Park W. M., Fedosejevs G. , Erickson A. , Keeping R. , Stanley D. , Hurlburt P. **GeoComp - n, an advanced system for generating products from coarse- and medium-resolution optical satellite data. Part 1: System characterisation**; Canadian Journal of Remote Sensing , Vol. 28, No 1 , 2002 , pp. 1-20.

Cihlar J. , Chen J. M., Li Z. , Latifovic R. , Fedosejevs G. , Adair M. , Park W. M., Fraser R., Trishchenko A. , Guindon B. , Stanley D. , Morse D. **GeoComp-n, an advanced system for the processing of coarse and medium resolution satellite data. Part 2: Biophysical products for northern ecosystems**; Canadian Journal of Remote Sensing , Vol. 28, No 1 , 2002 , pp. 21-44.

Deschamps A. , Greenlee D. , Pultz T. J., Saper R. **Geospatial Data Integration for Applications in Flood Prediction and Management in the Red River Basin**; IGARSS 2002, Toronto, Canada, June 24-28 , 2002.

Du Y. , Guindon B. , Cihlar J. **Haze Detection and Removal in High Resolution Satellite Image**; IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing , Vol. 40, No 1 , 2002.

Nota: estas referencias se pueden obtener en:

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci_pub/biblio_e.html Este es un sitio web de la Agencia Canadiense de Teledetección; tiene 3100 registros sobre diferentes aspectos de teledetección. Usted puede realizar búsquedas por tema, autor, año.

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci_pub/resors_e.html

RESORS Bibliographic Database (**RE**remote**S**ensing**O**n-line **R**etrieval System). Esta base de datos contiene publicaciones 97000 documentos publicados entre 1950 y 1995.

II. Publicaciones generales

Adeniyi, P.O. 1980. Land use changes analysis using sequential aerial photography and computer techniques. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 46 (11): 1447-1464.

Alaric, S.V (Ed).1994. Remote sensing and GIS in ecosystem management. American Forests. Island Press, Washington, D.C.369p.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS).1994. Proceedings: 12th Pecora Remote Sensing Symposium: Land Information from Space based Systems. August 24-26, 1993. Sioux Falls, South Dakota, U.S.A. 585p.

Anderson, J.R. 1971. Land use classification schemes. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, Vol. 37: 379-387.

Aronoff, Stan. 1982. Classification accuracy: A user approach. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, Vol. 48: 1299-1307.

Avery, T.E. and G.L. Berlin. 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. 5th. ed., Macmillian, New York.

Avery, T.E. 1977. Interpretation of aerial photographs. Third. Ed. Minneapolis, Minnesota. Burges. 392p.

Baker, R.D., et. al. 1979. Land use/land cover mapping from aerial photographs. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 45 (5): 661-668.

Barr, D. J. and Miles , R.D. 1970. SLAR imagery and site selection. Photogrammetric Eng. 36: 1155.

- Befort, W. 1986. Large-scale sampling photography for forest habitat-type identification. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 52(1): 101-108.
- Chuvieco, E. 1995. *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialph, Madrid. 568p.
- Cowardin, L.M. V. Carter, F.C. Golet and E.T. LaRoe. 1979. A classification of wetlandas and deepwater habitat of the United States. WSFWS/OBS-79/31. Washington, D.C.
- Crandall, C. 1969. Radar mapping in Panama. *Photogrammetric Eng.* 35:641.
- Everitt, J., et. al. 1991. Airbone video system for agricultural assessment. *Remote Sensing of Environment* 35:(2/3): 231-242
- Footy , G.M. ; Campell, N.A.; Trodd, N.M. and Wood, T.F. 1992. Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum-likelihood classification. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*. Vol. 58: 1335-1342.
- Ghosh,S.K. 1971. Photo/model/map scale. *Photogrammetric Eng.* 32:1154.
- Hannah, M. 1981. Error detection and correction in digital terrain models. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 47(1): 63-69.
- Hothimer, J. 1961. Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs. *Photogrammetric Eng.* 27:136.
- Hudson, W.D. 1991. Photo interpretation of Montane forests in the Dominican Republic. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 57(1): 79-84.
- Kratky, V. 1972. Image transformations. *Photogrammetric Eng.* 38:463
- Lillesand, T.M. y Kiefer, R. W.1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Willey & Sons, USA.750p.
- Lyons, J.G. and Greene, G.R. 1992. Use of aerial photographs to measure the historical aerial extent of Lake Erie coastal wetlands . *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*. Vol. 58:1355-1360.
- Mead, R.A., and P.t. Gammon. 1981. Mapping wetlands using orthophoquads and 35-mm aerial photographs. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 47(5): 649-652.
- Moffitt, F.H. and Mikhail, E.M. 1980. *Photogrammetry*. Third Ed. Harper & Row, New York. 648p.
- Mussio, L. and Light, D. L: 1995. ISPRS Commission I: Sensors, Platforms, and Imagery Symposium. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 61(11): 1339-1344
- Nazarenko,D.; Staples, G.; and Aspden, C. 1996. RADARSAT: first images. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 62 (2):143-146.
- Philipson,W.R. and T. Liang. 1982. An airphoto key for major tropical crops. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 48(2): 223-233.
- Sabins, F., Jr. 1987. *Remote sensing: principles and interpretation*. Second Ed. New York. Freedman. 449p.
- Sabins, F., Jr. 1973. Recording and processing thermal imagery. *Photogrammetric Eng.* 39:839.

Sanders, R.G. 1945. Stereoscopy, its history and uses. *Photogram. Engineer.* 11:101-113.

Scarpace, F.L., et. al. 1981. Wetland mapping from digitized aerial photography. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 47(6): 829-838.

Short, N. M. 1982. The Landsat tutorial workbook: basics of satellite remote sensing. NASA Scientific and Technical Information Branch, Washington, DC.

Spurr, S.H. 1952. Three-dimensional prints from color film. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 18:827-830.

Spurr, S.H. 1953. Use of color film in making anaglyphs from black and white prints. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 21:518-527.

Spurr, S.H. 1960. *Photogrammetry and photo-interpretation*. 2nd. Ed. Ronald. New York. 472p.

Treadwell, J.H. 1995. Behind the scenes: Land satellite information in the next decade. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 61(8):989-991.

Vlcek, J. 1969. Systematic errors of image coordinates. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 35: 585

Witmer, R.E. 1978. U.S. Geological Survey land use and land cover classification system. *Journal of Forestry*, 76:661-666.

Ziemann, H. 1971. Sources of image deformation. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 37: 1259.

Sitios de interés

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tour/tour_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/imgact_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/rd_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci_pub/biblio_e.html

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/definition/convdef_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/definition/unconvdef_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/fun/radiation/radiation_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/apps/landcov/rad/emrad_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/man/rman01_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/nwt/rnwt01_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/pei/rpei01_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/ana/cnfdbrig/confed_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/radarsat/images/uk/ruk01_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/pass_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/gss_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/cc_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/stations/grss_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tour/16/16ns_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbc580_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/data/satsens/airborne/sarbro/sbmain_e.html

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/apps/marine/pei/link/bridge_e.html

www.tec.army.mil/tio/spin2.html
www.netlib.org/spinnews/images
www.spin-2.com
www.spot.com
www.ldem.usgs.gov/
www.usgs.gov/public/press/public_affairs/press_releases/pr1455m.html
www.rsi.ca
www.spot5.cnes.fr
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/fundam_e.html
<http://www.hdf.ncsa.uiuc.edu/hdf-java-html/hdfview/>

Sitios visitados el 30 mayo 2004.