

# PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

## Apuntes de Clases

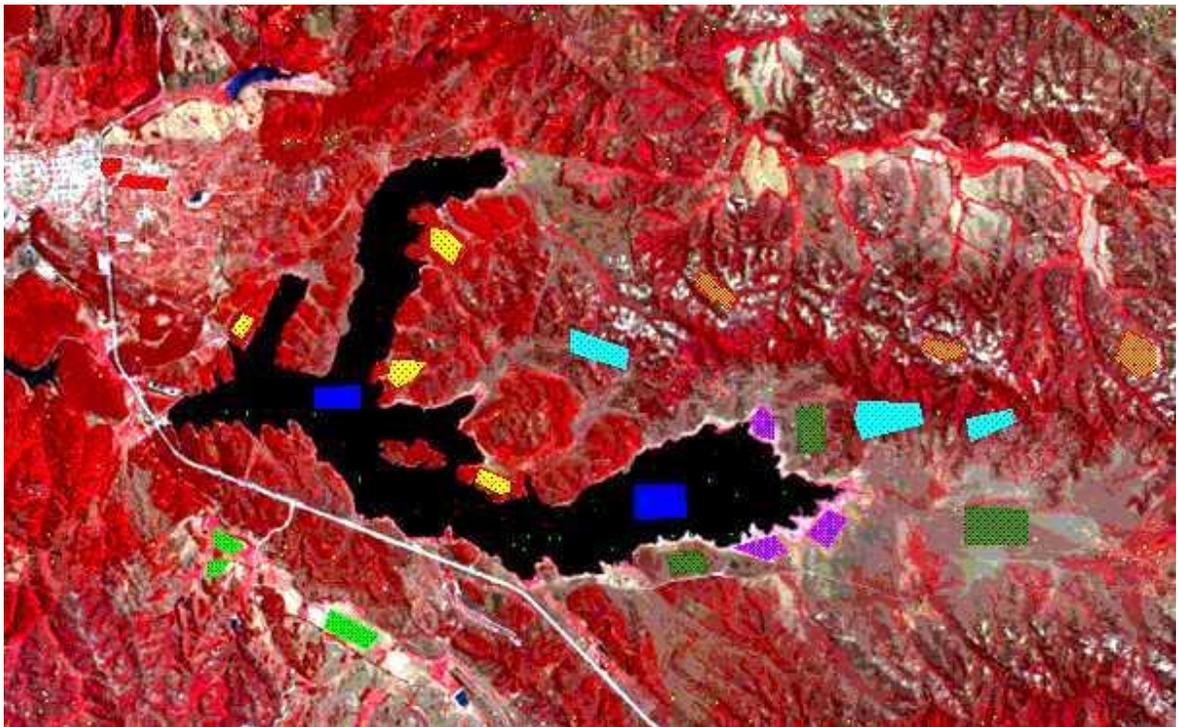
*H. Jaime Hernández Palma*

*Ing. Forestal, Dr. Ingeniero de Montes*

*Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza*

*UNIVERSIDAD DE CHILE*

*Actualización del capítulo "Percepción Remota" publicado en el libro "Manejo y Conservación de Recursos Forestales" en 2007 (Eds. Hernández, De la Maza y Estades).*



## ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
1. FUNDAMENTOS FÍSICOS .....	3
1.1. La Radiación Electromagnética .....	4
1.2. La Radiación en el Origen .....	4
1.3. La Radiación en Propagación .....	5
1.4. La Radiación en el Destino .....	6
1.5. Firmas Espectrales .....	7
2 LOS INSTRUMENTOS .....	13
2.1. Instrumentos formadores de imágenes .....	13
2.2. Resolución del Instrumento .....	15
2.3. Los instrumentos y sus plataformas .....	16
3 LOS MÉTODOS .....	18
3.1. Correcciones y Calibraciones Radiométricas .....	18
3.2. Correcciones Geométricas .....	19
3.3. Mejoramiento de la imagen .....	21
3.4. Reconocimiento de Patrones .....	24
4 APLICACIONES EN BOSQUES .....	34
4.1. Estudios de escala regional .....	35
4.2. Estudios a escala de bosque o rodal .....	36
4.3. Estudios a escala de árboles individuales .....	36
LITERATURA CITADA .....	37

# INTRODUCCIÓN

El conjunto de conocimientos que se agrupan bajo el nombre de Percepción Remota tienen como base fundamental el hecho de trabajar con información descriptiva de fenómenos y objetos, presentes en el universo físico, que ha sido colectada sin entrar en contacto directo con ellos. En otras palabras, percepción remota puede definirse como “la ciencia de la observación a distancia”. Para poder hacer uso de esta información es necesario entender la forma en que se genera, que errores contiene y por sobre todo, que características específicas está describiendo.

## 1. FUNDAMENTOS FÍSICOS

Los seres humanos somos capaces de observar nuestro entorno debido a que poseemos unas células especializadas, llamadas conos y bastones, ubicadas en la retina de nuestros ojos, que son sensibles a la porción de la radiación solar correspondiente a la luz visible. Existen células especialmente sensibles para cada uno de los tres colores primarios (azul, verde y rojo) y debido a un efecto aditivo de ellos se producen toda la gama de colores que somos capaces de diferenciar.

La radiación electromagnética es el medio que permite observar un objeto a distancia, ya sea porque se refleja en él o porque el objeto por sí mismo emite radiación (figura 1):

a) En el primer caso, la radiación proviene de una fuente externa, viaja por el espacio o la atmósfera, impacta sobre el objeto y una porción es reflejada. Dicha porción es la que se puede percibir, ya sea por un instrumento o por un observador. Esta es la forma en que nosotros, los seres humanos, podemos observar nuestro mundo. La radiación solar (fuente externa) viaja por el espacio y la atmósfera sufriendo algunas alteraciones e

impacta, por ejemplo, sobre el suelo desnudo del desierto. Una parte de la radiación incidente es absorbida por el suelo, calentándolo, y otra es reflejada permitiendo ser observada. La porción reflejada, es modificada de acuerdo a las propiedades físicas del suelo, lo cual determina entre otras cosas, el color que podemos observar. Cada objeto, origina un tipo distinto de radiación reflejada, hecho que se utiliza para tener un patrón de identificación del objeto en función de las características de la radiación que refleja. Lo anterior se conoce con el nombre técnico de firma espectral.

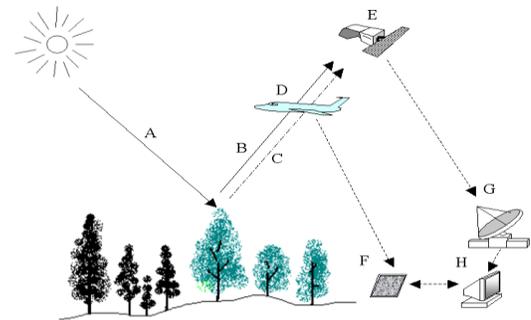


Figura 1: Sistema de percepción remota. La radiación proveniente desde el sol viaja a través del espacio y la atmósfera (A) para alcanzar los objetos sobre la superficie terrestre. Una parte de esta radiación es reflejada (B). Los objetos con temperatura sobre el cero absoluto emiten radiación (C) la cual, al igual que la radiación reflejada puede ser captada por un sensor aéreo (D) o espacial (E). El producto final de un sensor aéreo es una fotografía aérea (F) y el de un sensor satelital es una imagen digital (H) que ha sido adquirida en una estación receptora (G). Los formatos digital y analógico son intercambiables.

b) En el segundo caso, es el propio objeto el que origina la radiación. Todos los cuerpos que tengan una temperatura mayor al cero absoluto son capaces de emitir radiación (Ley de Stefan-Boltzmann). Este tipo de radiación no es visible por ojos humanos pero existen sensores especialmente diseñados para percibir radiaciones térmicas. En el ejemplo, el suelo del desierto emitirá radiación térmica incluso durante la noche, cuando la energía solar no esté presente.

### 1.1. La Radiación Electromagnética

Energía se define como la capacidad para realizar “trabajo” pudiendo ser de carácter químico, térmico, eléctrico o mecánico. Para que el trabajo pueda ser llevado a cabo la energía debe ser transferida de un cuerpo a otro a través de alguno de los siguientes procesos:

- a) **Conducción:** Las moléculas o átomos chocan entre sí.
- b) **Convección:** En este caso la transferencia es de tipo corpuscular, en la cual cuerpos de energía material se mueven en sí mismos.
- c) **Radiación:** La energía electromagnética se desplaza a través de un medio o un vacío.

En el campo de la percepción remota se trabaja fundamentalmente con el tercer tipo de energía, es decir la radiación electromagnética. En física existen dos modelos para explicar sus propiedades:

- a) **Teoría ondulatoria:** establece que cualquier partícula con una temperatura sobre el cero absoluto genera una vibración, que a su vez origina una serie de perturbaciones tipo “ondas” que se desplazan a través del campo eléctrico y campo magnético que rodean a la partícula, perpendiculares entre ellos. Estas ondas actúan como una fuente de radiación y viajan desde la fuente hacia el infinito a una velocidad constante, conocida como la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ). La distancia entre la cresta de una onda y la siguiente es la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación. El número de crestas por segundo pasando por un mismo punto es su frecuencia ( $f$ ) (figura 2).

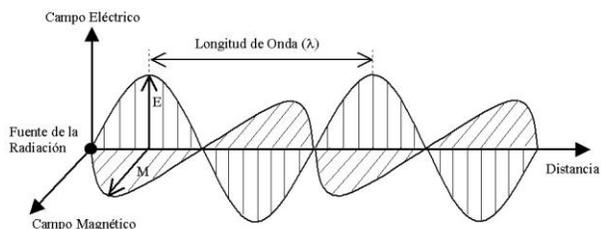


Figura 2: Se muestran los vectores eléctricos (E) y magnéticos (M), perpendiculares entre ellos, de una onda electromagnética. La longitud de onda ( $\lambda$ ) corresponde a la distancia entre dos crestas consecutivas.

- b) **Teoría cuántica:** establece que todo cuerpo radiante es capaz de emitir energía electromagnética de forma discreta y no continua, cuya magnitud es un múltiplo entero de un número específico, llamado *cuanto*.

Mayores detalles de ambas teorías pueden encontrarse en Lillesand y Kiefer (1994), Drury (1997) y Schowengerdt (1997).

Para un mejor entendimiento de las características de la radiación electromagnética es de utilidad distinguir el ambiente dentro del cual se propaga: en el origen, en el espacio o en el destino.

### 1.2. La Radiación en el Origen

El espectro electromagnético es un continuo de energía, de longitudes de onda que varían desde nanómetros hasta metros. Todos los cuerpos emiten energía electromagnética de tal manera que la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de onda a medida que la temperatura del cuerpo aumenta. La figura 3 y la tabla 1 describen las principales características del espectro electromagnético.

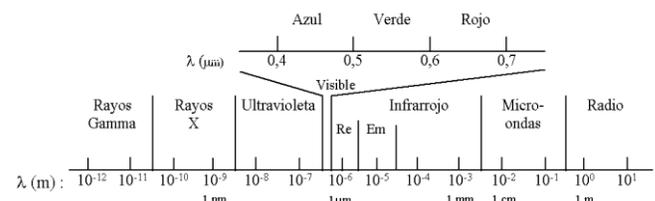


Figura 3: El Espectro electromagnético. Re: infrarrojo reflejado, Em: infrarrojo emitido.

Como ya se ha mencionado anteriormente, todo cuerpo con temperatura sobre el cero absoluto genera y emite a su entorno energía en forma de radiación. Un concepto útil para poder explicar este comportamiento es el de cuerpo negro. Se trata de un cuerpo capaz de absorber toda la radiación que incide sobre él y de emitir la máxima cantidad de energía de acuerdo a su temperatura.

Región o Banda Espectral		Longitud de Onda ( $\lambda$ )	Características
Rayos Gamma		< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se utilizan en teledetección.
Rayos X		0,03 – 30 nm	
Ultravioleta (UV)		0,03 – 0,4 $\mu\text{m}$	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ es completamente absorbida por la capa de ozono de la atmósfera. La radiación con $\lambda$ entre 0,3 y 0,4 $\mu\text{m}$ se transmite a través de la atmósfera y se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles especiales.
Visible (azul, verde, rojo)		0,4 – 0,7 $\mu\text{m}$	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
IR	Infrarrojo reflejado	0,7 – 3,0 $\mu\text{m}$	Radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El rango de longitud de onda de 0,7 a 0,9 $\mu\text{m}$ se puede detectar usando películas fotosensibles y se denomina infrarrojo fotográfico.
	Infrarrojo térmico	3 – 5 $\mu\text{m}$ , 8 – 14 $\mu\text{m}$	Corresponden a dos ventanas atmosféricas en la región térmica. Las imágenes son adquiridas usando sensores óptico-mecánicos y sistemas Vidicom especiales, pero no es posible usar película fotosensible.
Radar (región de la microondas)		0,1- 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio		> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Se utilizan en telecomunicaciones.

Tabla 1: Descripción de la regiones del espectro electromagnético. El concepto de banda se utiliza para referirse a una porción específica del espectro como por ejemplo la banda roja, que va desde los 0,6 a los 0,7  $\mu\text{m}$  (1  $\mu\text{m} = 10^{-6}$  m y 1 nm =  $10^{-9}$  m).

En la naturaleza no existe tal sustancia pero el concepto sirve para la formulación de leyes físicas a través de la comparación con sustancias distintas a un cuerpo negro. Un resumen de las principales leyes descritas en física se presentan en la tabla 2.

Ley física	Ecuación	Descripción
Ley de Stefan-Boltzman	$M = \sigma T^4$	Todos los cuerpos emiten radiación por el hecho de estar a una temperatura mayor al cero absoluto. $T$ es la temperatura en grados Kelvin, $M$ es la intensidad de la radiación y $\sigma$ es la constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w K}^{-4}$ ).
Ley de Kirchhoff	$M = \varepsilon M_b$	Establece la relación entre un emisor perfecto ( $M_b$ ) y un emisor cualquiera ( $M$ ) a través del coeficiente de emisividad ( $\varepsilon$ ). Para un cuerpo negro perfecto $\varepsilon$ es igual a 1.
Ley de Wien	$\lambda_{max} = 2897/T$	Establece que el máximo de la radiación emitida se produce a una longitud de onda ( $\lambda_{max}$ ) que es inversamente proporcional a la temperatura absoluta ( $T$ ).
Ley de Plank	$M_\lambda = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2/\lambda T} - 1)$	Establece la relación entre la temperatura y las propiedades radiativas de un cuerpo negro, donde $M_\lambda$ es la energía emitida por unidad de tiempo y área dentro de un rango de longitudes de onda con centro igual a $\lambda$ . $C_1$ y $C_2$ son constantes universales y $e$ logaritmo natural.

Tabla 2: Leyes físicas para la energía electromagnética

### 1.3. La Radiación en Propagación

Cuando la energía electromagnética entra en contacto con la atmósfera terrestre sufre una serie de alteraciones, debido a la interacción con gases y aerosoles atmosféricos: i) dirección e intensidad de la radiación, ii) longitud y frecuencia de onda, y iii) distribución espectral de la energía radiante. Los procesos que provocan estas alteraciones corresponden a la dispersión, la absorción y la refracción. Es necesario conocer la forma en que estos procesos ocurren para poder diseñar y seleccionar los sensores y los filtros que permitan obtener la información útil.

La dispersión o cambio de la dirección original de los rayos solares, es la resultante de múltiples

interacciones entre la radiación incidente y los gases y partículas atmosféricas. Los procesos principales corresponden a la dispersión selectiva y no selectiva. La dispersión selectiva afecta mucho más a longitudes de onda menores (UV y azul) que al resto de bandas espectrales. Lo cual genera el color azul de los cielos. Se le conoce con el nombre de dispersión Rayleigh, gracias a su descubridor, y es causada por la presencia de partículas con diámetros mucho menores a las longitudes de onda involucradas (Nitrógeno, Oxígeno y CO<sub>2</sub>). Por su parte, la dispersión *Mie* se produce cuando el tamaño de las partículas es similar a la longitud de onda de la radiación, provocando un efecto de neblina que afecta la calidad de las imágenes multiespectrales (Pinilla, 1995). Por último, la dispersión no selectiva afecta a todas las longitudes de onda por igual y es causada principalmente por la presencia de polvo, niebla o nubes que contienen partículas con diámetros mayores a longitudes de onda incidentes.

La absorción ocurre cuando una parte de la energía incidente sobre una partícula es retenida para ser transformada generalmente en calor, después de lo cual, es re-emitada en longitudes de onda mayores. Existen tres gases particularmente eficientes en la absorción de radiación solar: vapor de agua, ozono y dióxido de carbono. La radiación solar incidente o insolación es atenuada a través de su paso por la atmósfera y llega disminuida a la superficie terrestre. Como consecuencia de la absorción selectiva de longitudes de onda, la atmósfera presenta una serie de zonas espectrales en las que tiene un comportamiento transparente a la radiación electromagnética. Estas zonas son llamadas ventanas atmosféricas y es a través de ellas por las que es posible la teledetección de la superficie terrestre (Pinilla, 1995).

Ventana	Banda Espectral (µm)
1	0,3 – 1,3
2	1,5 – 1,8
3	2,0 – 2,6
4	3,0 – 3,6
5	4,2 – 5,0
6	7,0 – 15,0

Tabla 3: Ventanas atmosféricas para la observación terrestre.

La transparencia de la atmósfera es prácticamente nula desde 15 µm hasta 1 mm de longitud de onda, a partir de donde se usan sensores tipo Radar para la observación terrestre.

#### 1.4. La Radiación en el Destino

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre puede ocurrir que sea reflejada, absorbida o transmitida. La parte que es reflejada (reflectancia) suele expresarse en términos de un coeficiente llamado albedo (porcentaje reflejado de la radiación incidente). La tabla 4 muestra algunos albedos típicos para un conjunto de superficies terrestres.

La cantidad de energía que se absorbe (absorbancia) es función de la composición y grosor de la sustancia que la recibe. Gran parte de los materiales sobre la superficie terrestre y la atmósfera transforman la energía recibida en calor, aumentando su temperatura, y en consecuencia aumentando también su emisión en las bandas térmicas. De la misma forma, la cantidad de energía que se transmite a través del objeto o medio se define como transmitancia. La suma de reflectancia ( $\phi_r$ ), absorbancia ( $\phi_a$ ) y transmitancia ( $\phi_t$ ) debe ser igual a la radiación incidente ( $\phi_i$ ):

$$\frac{1}{\phi_i} = \frac{1}{\phi_r} + \frac{1}{\phi_a} + \frac{1}{\phi_t}$$

Tipo	Superficie específica	Albedo (%)
Suelos	Arena fina	37
	Suelo oscuro seco	14
	Suelo oscuro húmedo	8
	Suelo arado húmedo	14
Agua	Nieve densa, limpia y seca	86-95
	Hielos oceánicos	36
	Capas de hielo con agua superficial	26
Vegetación	Matorrales desérticos	20-29
	Trigo de invierno	16-23
	Robles ( <i>Quercus</i> )	18
	Bosques deciduos	17
	Bosques de Pinos	14
	Praderas	12-13
Humedales	10-14	

Tabla 4: Albedos típicos de radiación de onda corta para algunos tipos de superficies terrestres (Lockwood, 1974).

Los instrumentos usados en percepción remota son capaces de detectar tanto la energía electromagnética reflejada como emitida (figura 4). La energía reflejada puede ser aquella proveniente de una fuente externa (sensores pasivos), como por ejemplo el Sol, o haber sido generada por el propio instrumento (sensores activos).

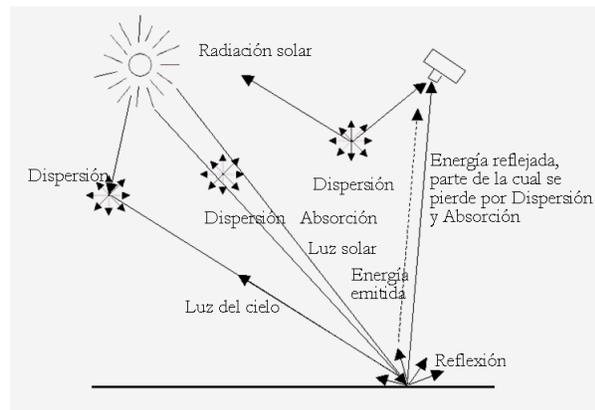


Figura.4: Efectos de la atmósfera y la superficie terrestre sobre la energía electromagnética proveniente del Sol.

### 1.5. Firmas Espectrales

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular. Este comportamiento distintivo de cada tipo de material es aprovechado en procesos de clasificación de imágenes, siendo común referirse a él como “firma espectral”. Su determinación en forma consistente presenta algunas dificultades asociadas a las siguientes razones:

- La vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente. Esto significa que su firma espectral cambia durante el año.
- Las condiciones de iluminación asociadas a la topografía (pendiente y orientación), la posición del sol durante el año (elevación y azimut), y las condiciones de humedad del suelo y la vegetación pueden significar variaciones importantes en el patrón de respuesta espectral.

- Debido a la resolución espacial de la mayoría de los sensores, la información contenida en un píxel es el resultado de una mezcla espectral de varios tipos de materiales. Por ejemplo, en el caso de Landsat TM / ETM+ el área asociada a un único píxel (30 x 30 m) puede estar compuesta por vegetación herbácea, vegetación arbórea, suelo desnudo y pavimento, todo lo cual queda registrado en un único nivel digital.

La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético. Una forma gráfica de estudiar este comportamiento es disponer los datos de reflectancia (%) en el eje Y y la longitud de onda  $\lambda$  en el eje X. Al unir los puntos con una línea continua se origina una representación bidimensional de la firma espectral (Figura 5).

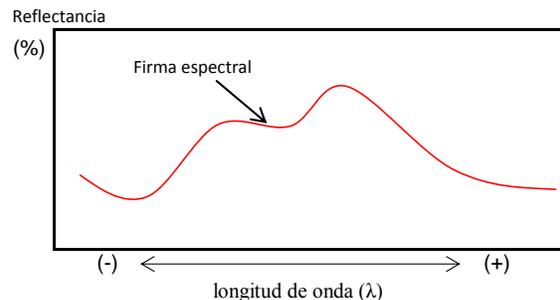


Figura 5: Representación gráfica de una firma espectral una de cobertura de suelo cualquiera (% indica reflectividad).

Los seres humanos somos capaces de percibir a ojo desnudo el patrón de respuesta espectral en el rango visible del EE ( $\lambda = 0,4 - 0,7 \mu\text{m}$ ), el cual interpretamos como el “color” característico del objeto o material observado. La figura 6 presenta ejemplos de firmas espectrales de objetos que percibimos de color azul, verde y rojo. Un objeto verde podría ser la hoja de una planta en primavera que, debido a la actividad de sus pigmentos fotosintéticos, absorbe en mayor cantidad la energía electromagnética de longitudes de onda entre 0,4-0,5  $\mu\text{m}$  (azul) y

entre 0,6-0,7  $\mu\text{m}$  (roja). Lo anterior significa que se refleja una mayor cantidad de luz verde (0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ), debido a que es menos absorbida, dando lugar al color verde con que finalmente la percibimos.

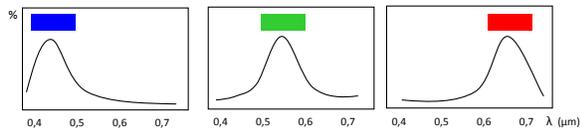


Figura 6: Firmas espectrales en el rango visible del EE que percibimos de color azul, verde y rojo (% indica reflectividad).

Más allá del espectro visible, todos los materiales presentan respuestas espectrales características que se pueden detectar usando sensores óptico-electrónicos capaces de detectar energía en la región infrarroja reflejada y térmica. Estos instrumentos pueden ser usados a nivel terrestre, en campo o en laboratorio, o montados en plataformas aéreas o satelitales. La figura 7 presenta un conjunto de firmas espectrales de referencia general para un conjunto de materiales comunes de encontrar en la superficie terrestre.

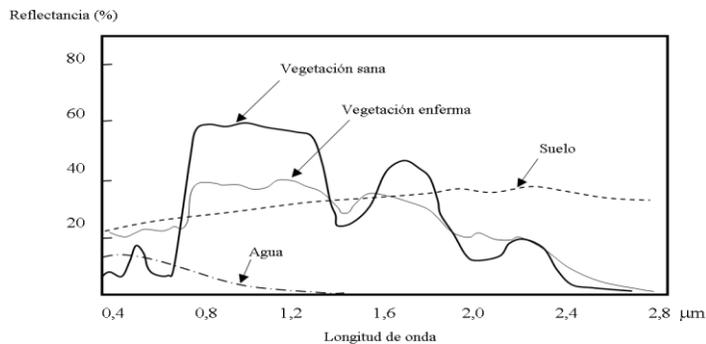


Figura 7: Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo reflejado del EE.

#### CONSTRUCCIÓN DE FIRMAS ESPECTRALES

Poder contar con patrones de reflectancia espectral de referencia es fundamental para lograr resultados confiables cuando se trabaja con imágenes multispectrales o hiperspectrales, provenientes de sensores remotos. Tradicionalmente, se usa el término “verdad de terreno” para referirse a datos colectados en terreno que son usados como

referencia para identificar patrones similares en la imagen. En general, estos datos de referencia se pueden usar para:

- Asistir las labores de interpretación y análisis de los datos de sensores remotos.
- Calibrar instrumentos de teledetección.
- Verificar información extraída de datos teledetectados.

Una de las formas más usadas para obtener datos de patrones espectrales referenciales es efectuar mediciones en terreno de los materiales y superficies de interés. En la práctica, este trabajo puede efectuarse en condiciones controladas de laboratorio o directamente en el campo usando instrumentos capaces obtener estos datos en forma instantánea. Dichos instrumentos, de los cuales existe una gran variedad de alternativas, se agrupan bajo el nombre de espectroradiómetros, o sencillamente radiómetros. En laboratorio, se controlan las condiciones y geometría de la iluminación para obtener datos independientes estandarizados. Sin embargo, al efectuar mediciones de campo se pueden recopilar datos representativos de la variedad de condiciones ambientales reales en que se encuentran los materiales estudiados, las cuales son difíciles de simular en laboratorio. La medición involucra tres pasos:

- Se apunta el instrumento hacia un panel de calibración especial que permite evaluar la radiación incidente (A, figura 8), en ese momento, sobre el sitio de medición. El panel tiene propiedades de reflectancia ideales, capaz de reflejar toda la energía incidente hacia todas las direcciones por igual (reflector lambertiano).
- Se mide la radiación reflejada (B, figura 8) por el material de interés.
- Se calcula la reflectancia como el radio R entre la radiación incidente y la reflejada ( $R=A/B$ ).

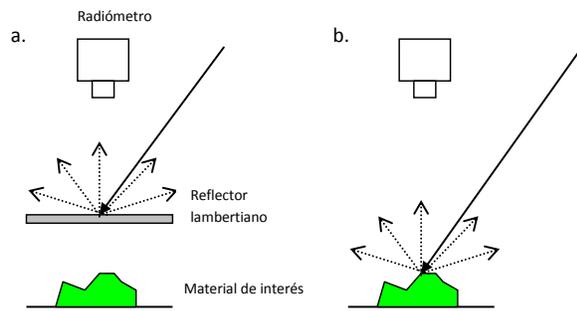


Figura 8: Pasos para la medición de reflectividad usando radiómetros de campo.

La mayoría de los radiómetros de campo son multicanales, lo cual permite efectuar lecturas de radiancia en más de una banda espectral. Además, para un completo estudio de comportamiento espectral es frecuente realizar medidas de reflectancia bidireccional y así caracterizar la cubierta de interés para un conjunto más amplio de condiciones de iluminación. Para ello, se mide la radiancia reflejada en distintos ángulos cenitales  $\theta_0$  y distintas direcciones azimutales  $\phi_0$  (FIGURA 9) y se compara con la radiación incidente sobre la misma cobertura.

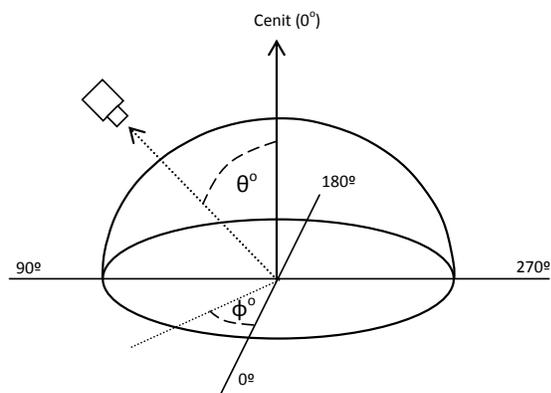


Figura 9: Esquema para mediciones de reflectancia bidireccional en distintos ángulos cenitales ( $\theta_0$ ) y azimutales ( $\phi_0$ ).

## LIBRERÍAS ESPECTRALES

Una vez obtenidos los datos de respuesta espectral es necesario disponerlos ordenadamente en formatos utilizables por otros potenciales usuarios. Esta labor conlleva la creación de librerías espectrales que contienen

los datos de firmas espectrales de una gran variedad de materiales y cubiertas terrestres. La librería espectral de ASTER contiene una compilación de cerca de 2000 firmas espectrales de materiales naturales y hechos por el hombre. Además, incluye datos de otras tres librerías espectrales públicas: Universidad John Hopkins (JHU), Laboratorio de propulsión a reacción de la NASA (Jet Propulsion Laboratory - JPL), y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS - Reston).

A continuación se presenta un conjunto de firmas espectrales ordenadas por tipos de materiales que han sido recopiladas desde distintas librerías públicas.

## COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN

En la vegetación el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. El primero afecta a las longitudes de ondas del espectro visible (0,4-0,7 m) donde el 65% es absorbido por la Clorofila, el 29% por la Xantófila y el 6% por Carotenos. La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesofilo) a su vez aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0,8-1,1 m). Finalmente, entre los rangos 1,4 m-1,8 m (infrarrojo medio) la reflectividad depende del contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados, en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Alonso & Moreno, 1999).

Si se analiza el comportamiento espectral del dosel vegetal, los factores que afectan su reflectividad son la proporción hojas, lignina y el efecto del suelo, la geometría de las hojas y los ángulos de observación de éstas (Manzano, 2004). La figura 10 muestra firmas espectrales para diferentes tipos de vegetación.

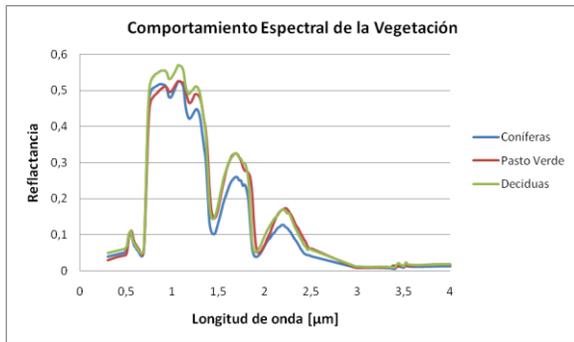


Figura 10: Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de vegetación a distintas longitudes de onda.

COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DEL SUELO

Los principales factores que afectan el comportamiento espectral de los suelos son el color y el contenido de humedad. Cuando los suelos se encuentran secos las tierras ennegrecidas presentan mayor reflectancia, contrariamente cuando se encuentran con un alto contenido de agua poseen en promedio una reflectancia dos veces más débil que los suelos secos registrando las mayores diferencias en la zona de infrarrojo cercano (Scanvic, 1989). Otros factores que modifican la reflectancia de los suelos son: el contenido de materia orgánica, la textura y estructura, disposición vertical y horizontal, así como los ángulos de iluminación y observación de éstos (Manzano, 2004). La figura 11 muestra firmas espectrales para diferentes tipos de suelos.

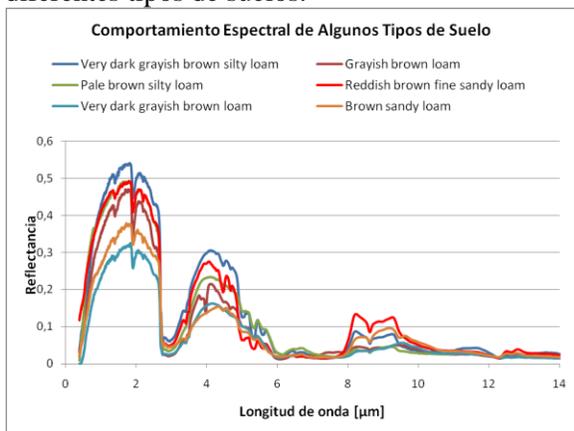


Figura 11: Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de suelos a distintas longitudes de onda.

COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LOS MINERALES

En general, el comportamiento de los minerales está asociado a su color, los minerales blancos presentan una reflectancia muy fuerte contrario a los minerales oscuros, quienes son fuertemente absorbentes y reflejan poca luz en toda la extensión del espectro. Las micas por su parte tienen baja reflectancia particularmente la biotita, una mica negra, que presenta una absorción cercana al 95% (Scanvic, 1989).

El estudio espectral de los minerales permite mediante técnicas geomáticas la detección de minerales de alteración que son de alto interés a la hora de ubicar algunos yacimientos, acumulaciones de minerales y/o zonas de alteración hidrotermal (Riaza, 2000). La figura 12 muestra firmas espectrales para diferentes tipos de minerales.

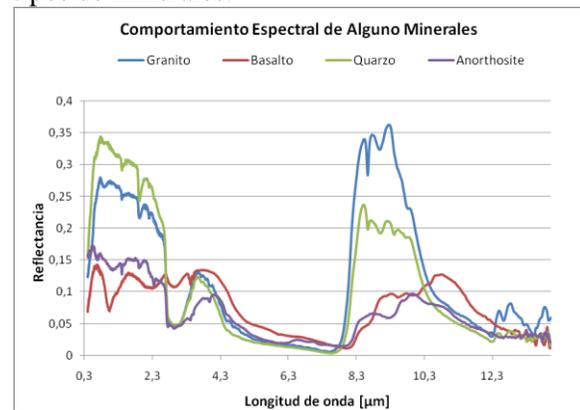


Figura 12: Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de minerales a distintas longitudes de onda.

COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LA NIEVE

La nieve posee un comportamiento altamente reflectivo en la sección visible del espectro electromagnético, disminuyendo fuertemente hacia el infrarrojo cercano. Los factores que afectan este comportamiento son, entre otros, su grado de compactación, el tamaño de los cristales y el grado de pureza (Pérez & Muñoz, 2006). La figura 13 muestra firmas espectrales para diferentes tipos de nieve.

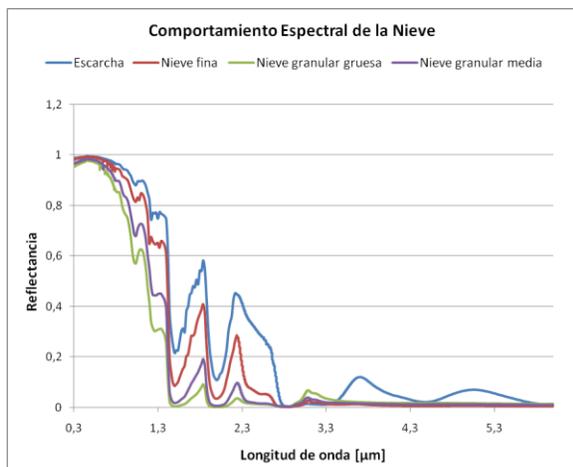


Figura 13: Niveles de reflectividad para los diferentes tipos de nieve a distintas longitudes de onda.

### COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DEL AGUA

La reflectividad que presenta el agua es bastante baja (observar magnitudes de reflectancia en figura 12) y con una tendencia descendente a medida que aumenta la longitud de onda. Se ve afectada por factores como el contenido de Clorofila, materiales en suspensión, rugosidad superficial y profundidad (Manzano, 2004). La figura 14 muestra firmas espectrales del agua en diferentes condiciones.

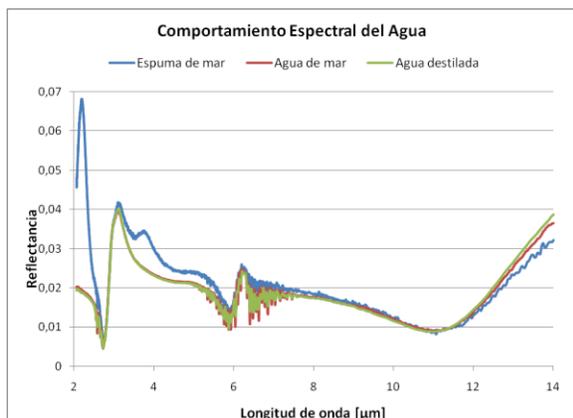


Figura 14: Niveles de reflectividad para el agua en diferentes condiciones a distintas longitudes de onda.

### COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE ELEMENTOS URBANOS DE CONSTRUCCIÓN

Los diferentes elementos del ambiente urbano poseen comportamientos espectrales bastante

diversos de acuerdo a su naturaleza y color, es así como en general los diferentes tipos de asfaltos y cementos, también llamados elementos “calientes” presentan una gran absorción en la sección térmica del EE (Towers & Von martini, 2002). La madera a su vez, varía su comportamiento según su color y la forma e intensidad con la que fue secada (Ananias, et al.2004). La figura 15 muestra firmas espectrales de diferentes materiales de construcción.

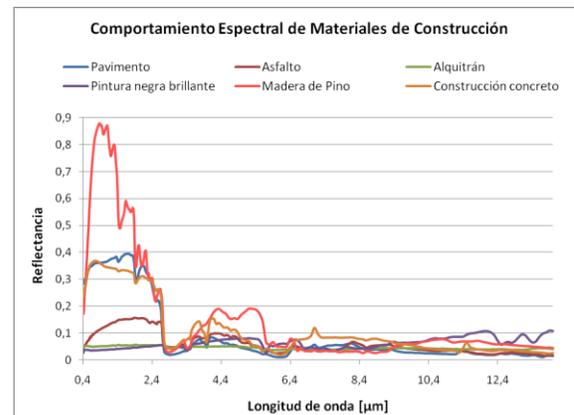


Figura 15: Niveles de reflectividad para diferentes materiales de construcción a distintas longitudes de onda.

### UTILIZACIÓN EN IMÁGENES MULTIESPECTRALES

El reconocimiento de distintos tipos de coberturas, asistido por computador, en función de sus características espectrales se denomina comúnmente clasificación. El objetivo general de la clasificación es asignar un conjunto de píxeles u objetos (conjunto de píxeles) en la imagen digital a un conjunto de clases predefinidas. Ejemplos de clases son tipo de vegetación, suelo desnudo, nieve, o zonas urbanas. Desde este punto de vista, la clasificación puede ser vista como un problema de etiquetación de píxeles u objetos que presentan un patrón espectral similar. Para ello, se construye algo así como una clave de identificación (firma espectral de referencia) con la que se compara la firma espectral a clasificar y se etiqueta con el nombre de aquella a la que "más se parezca" (Figura 16).

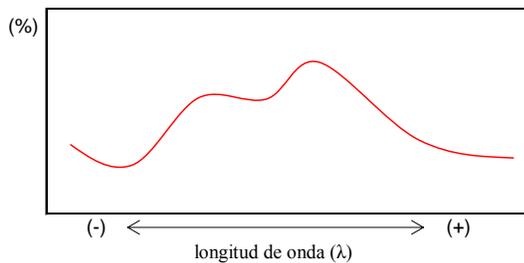


Figura 16: Ejemplo de clasificación de un píxel u objeto, que exhibe la firma espectral representada por la línea roja continua, se compara con las firmas espectrales referenciales de dos clases A y B (por ejemplo: vegetación tipo A y vegetación tipo B). En este caso se clasifica como B debido a su mayor similitud con el patrón espectral referencial B. En procesos de clasificación digital la similitud se mide en términos de distancia euclidiana o estadística n-dimensional, con n igual al número de bandas espectrales disponibles. Es usual dejar sin clasificar aquellos píxeles u objetos que no tienen suficiente similitud con algunas de las firmas referenciales.

Los patrones espectrales a clasificar son obtenidos de las imágenes teledetectadas de acuerdo a dos enfoques básicos: i) píxel a píxel, ii) orientado a objetos. Tradicionalmente, y en especial para imágenes de resolución espacial moderada, por ejemplo Landsat TM / ETM+, Spot HRV o ASTER, la clasificación opera para patrones espectrales asociados a píxeles. Para ello, dado un píxel cualquiera, se obtiene su firma espectral a través de los niveles digitales que presenta en todas las bandas de la imagen multiespectral (A en la figura 17). En cambio, cuando se trabaja con imágenes de alta resolución espacial, por ejemplo QuickBird o IKONOS, es conveniente segmentar la imagen previamente y luego extraer la firma espectral “promedio” del objeto a clasificar (B en la figura 15).

La firma espectral de referencia debe ser definida para todas las clases que se desea identificar y existen dos formas de obtenerlas:

- Librerías espectrales públicas. Esta opción no es siempre factible debido a que diversos tipos de materiales son específicos de algunas regiones o países y no existen patrones espectrales referenciales. Por ejemplo, en Chile algunos tipos de suelo y gran parte de nuestra vegetación nativa son únicos (endémicos) por lo cual no pueden ser encontrados en ninguna librería espectral extranjera.
- A partir de los datos contenidos en la propia imagen. Este enfoque asume que en la imagen a clasificar se pueden distinguir píxeles que corresponden, con un alto grado de certidumbre, a algunas de las clases que interesa clasificar. Para ello, se debe realizar un proceso de entrenamiento de los algoritmos de clasificación usando estos píxeles de muestra para formar las firmas espectrales que serán usadas como referencia (ver figura 17). Existen dos enfoques para lo anterior: supervisado y no supervisado.

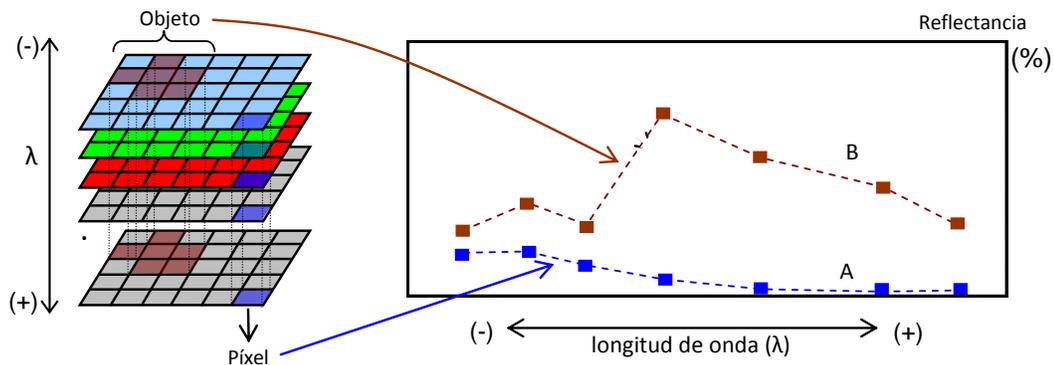


Figura 17 (abajo): Ejemplo de obtención de firmas espectrales a clasificar, en imágenes teledetectadas, asociadas a píxeles individuales (A) o a objetos obtenidos a través de segmentaciones previas (B). La segmentación consiste en la agrupación de píxeles que tienen una similitud espectral, textural o contextual a través de algoritmos matemáticos.

## 2 LOS INSTRUMENTOS

### 2.1. Instrumentos formadores de imágenes

Se usa el nombre de instrumentos formadores de imágenes (“*imaging device*”) debido a que es un concepto general que integra tanto a los dispositivos mecánicos convencionales (cámaras fotográficas) como a los óptico-electrónicos. La diferencia entre ambos radica en el hecho que en una cámara fotográfica la imagen se forma sobre una película fotosensible mientras que en una cámara digital la imagen digital es producida por un sensor que contiene detectores sólidos del tipo CCD (“*charge couple device*”), los cuales forman una matriz de niveles digitales (ND). Una clasificación complementaria a la anterior se presenta en el punto 2.3, en donde se describen los instrumentos pasivos, que requieren de una fuente energética externa, y los instrumentos activos, capaces de generar su propia energía.

#### CÁMARAS Y PELÍCULAS FOTOSENSIBLES CONVENCIONALES

Las cámaras convencionales han sido los instrumentos más usados en fotogrametría aérea. Se instalan sobre un avión que recorre el territorio bajo estudio, siguiendo un plan de vuelo basado en líneas paralelas que aseguran una cobertura total y un traslape tanto entre fotografías contiguas en la línea de vuelo (55-65 %) como entre líneas de vuelo (25-35 %). Se utilizan cámaras con una alta calidad en la geometría de las lentes y con posibilidad de almacenar grandes cantidades de exposiciones en poco tiempo. Las cámaras usadas para estos efectos, denominadas comúnmente “*métricas*”, incorporan sistemas que mantienen su posición relativa perfectamente orientada en los tres ejes principales: i) longitudinal, o en la dirección de la línea de vuelo, ii) transversal, o perpendicular a la línea de vuelo, y iii) eje óptico, que supone la perfecta verticalidad del eje principal de la cámara - se acepta una desviación máxima de tres grados para fotografías verticales. Una descripción detallada de las cámaras

fotográficas usadas en fotogrametría pueden encontrarse en Wolf y Dewitt (2000) y Lillesand y Kiefer (1994).

La película fotosensible se compone de dos partes, la emulsión y el soporte o base. La emulsión generalmente está compuesta por granos de bromuro de plata en suspensión sobre un baño de gel, que reaccionan al contacto con la luz, oscureciéndose más o menos, en función de tipo de tipo de radiación luminosa con que ha reaccionado. El rango del espectro electromagnético posible de ser capturado va desde el ultravioleta (0,3  $\mu\text{m}$ ) hasta el infrarrojo cercano (0,9  $\mu\text{m}$ ).

#### *Películas en blanco y negro (B/N)*

Este tipo de películas tienen una sensibilidad mayor que el ojo humano, lo cual permite obtener un mayor nivel de detalle en los objetos observados - grano muy fino- o un alto poder de resolución espacial. Los tipos de películas pancromáticas son:

- Pancromáticas: Son sensibles a todo el espectro visible (0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$ ) y generan una sola imagen que resume la cantidad de luz presente en ese rango.
- Infrarrojas B/N: Sensibles a la zona del espectro electromagnético comprendida entre 0,25 y 0,92  $\mu\text{m}$  pero se filtra para eliminar la zona UV, azul y verde. A la banda 0,7 - 0,9  $\mu\text{m}$  se le conoce como infrarrojo fotográfico.
- Fotografías UV B/N: Sensibles entre 0,3 y 0,4  $\mu\text{m}$  (ultravioleta fotográfico) Muy poco usadas en teledetección excepto por algunos usos en monitoreo de películas de petróleo sobre agua.

#### *Películas en Color*

- Color Normal : Películas que registran la escena con los mismos colores que los seres humanos somos capaces de ver. Son sensibles entre los 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$  (se utilizan filtros UV para eliminar el efecto *Haze*<sup>1</sup>). Están constituidas por tres capas (amarillo, magenta y cian) sensibles a las longitudes de

<sup>1</sup> Se refiere al color azulado de los cielos o el paisaje producto de la dispersión Rayleigh.

onda correspondientes al azul, verde y rojo. Su superposición permite la obtención de todos colores del espectro visible.

- **Infrarrojas en Color (falso color)** : Sensibles al espectro visible (0,4 – 0,7 μm) y al infrarrojo cercano fotográfico IRc (0,7- 0,9 μm). Se utilizan filtros para eliminar la radiación azul. Los colores se construyen de la siguiente forma (tabla 5):

Zona del Espectro	Color asignado
0,4 – 0,5 μm (azul)	Ninguno (filtro)
0,5 – 0,6 μm (verde)	AZUL
0,6 – 0,7 μm (rojo)	VERDE
0,7 – 0,9 μm (IRc)	ROJO

Tabla 5: Asignación de colores en fotografías falso color.

### CONCEPTO DE IMAGEN DIGITAL

En general, cualquier arreglo de datos de una variable aleatoria medida en puntos regulares sobre una malla<sup>2</sup> bidimensional podría ser considerado como una imagen digital (figura 18). La malla puede estar formada por celdas cuadradas o rectangulares llamadas píxeles<sup>3</sup>. La variable puede ser una medida de la intensidad luminosa reflejada, como es el caso de las imágenes Landsat TM ó SPOT, puede pertenecer al espectro visible o tener una longitud de onda distinta, como en el caso de las imágenes de radar SAR. También podría ser una medida de la radiación emitida por un isótopo radiactivo, o representar el ultrasonido reflejado por un objeto. Puede ser también una medida física de la altitud sobre el nivel del mar, del color, de la textura, de la distancia a un punto definido, del costo asociado a una actividad productiva, o de cualquier variable que pueda ser medida sistemáticamente sobre un espacio bidimensional definido. En percepción remota la imagen por lo general corresponde a radiación reflejada o emitida.

<sup>2</sup> Se usa la palabra *Malla* como traducción de la palabra en inglés "Lattice".

<sup>3</sup> Píxel proviene de la contracción del nombre en inglés "picture element".

132	128	126	123	137	129	130	145	158	170	172	161	153	158	162	172	159	152
139	136	127	125	129	134	143	147	150	146	159	157	158	166	171	173	154	144
144	135	125	119	124	134	121	62	29	16	20	47	89	151	162	158	152	137
146	132	125	125	132	89	17	19	11	8	6	9	17	38	134	164	155	143
142	130	124	130	119	15	46	82	54	25	6	6	11	17	33	155	173	156
134	132	138	148	47	92	208	227	181	111	33	9	6	14	16	70	180	178
151	139	158	117	22	162	242	248	225	153	62	19	8	8	11	13	159	152
153	135	157	46	39	174	207	210	205	136	89	52	17	7	6	6	70	108
167	168	128	17	63	169	196	211	168	137	121	88	21	9	7	5	34	57
166	170	93	16	34	63	77	140	28	48	31	25	17	10	9	8	22	36
136	111	83	15	48	69	57	124	55	86	52	112	34	11	9	6	15	30
49	39	46	11	83	174	150	128	103	199	194	108	23	12	12	10	14	34
26	24	18	14	53	175	153	134	98	172	146	59	13	14	13	12	12	46
21	16	11	14	21	110	126	47	62	142	85	33	10	13	13	11	11	15
17	14	10	11	11	69	102	42	39	74	71	28	9	13	12	12	11	18
18	19	11	12	8	43	126	69	49	77	46	17	7	14	12	11	12	19
24	30	17	11	12	6	73	165	79	37	15	12	10	12	13	10	10	16
24	40	18	9	9	2	2	23	16	10	9	10	10	11	9	8	6	10
43	40	25	6	10	2	0	6	20	0	10	16	18	10	4	3	5	7
39	34	23	5	7	3	2	6	77	39	25	31	36	11	2	2	5	2
17	16	9	4	6	5	6	36	85	82	68	75	72	27	5	7	8	0
4	8	5	6	8	15	65	127	135	108	120	131	101	47	6	11	7	4
2	9	6	6	7	74	144	170	175	149	162	153	110	48	11	12	3	5
11	9	3	7	21	127	176	190	169	166	182	158	118	44	10	11	2	5
8	0	5	23	63	162	185	191	186	181	188	156	117	38	11	12	25	33
3	5	6	64	147	182	173	190	221	212	205	181	110	33	19	42	57	30
5	3	7	45	160	190	149	200	253	255	239	210	115	46	30	25	9	5
9	4	10	16	24	63	93	187	223	237	209	124	36	17	4	3	2	1
7	8	13	8	9	12	17	19	26	41	42	24	11	5	0	1	7	4

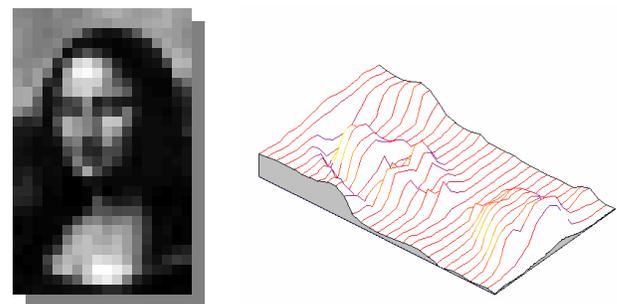


Figura 18: La tabla de arriba representa a la imagen de abajo (izq.), en la cual se asignaron tonos de gris de acuerdo a los niveles digitales (0=negro, 255=blanco). El modelo tridimensional (abajo, der.) muestra una alternativa de representación, en la cual los niveles digitales son usados como alturas sobre un nivel de referencia igual a cero (Fuente: adaptado de Glasbey y Horgan).

### SENSORES ÓPTICO-ELECTRÓNICOS

La imagen digital es producida por un sensor que contiene detectores sólidos y no una película fotosensible. Los detectores más comunes son los llamados CCD ("Charge Couple Device"), que son sensibles a la luz incidente y son capaces de producir una descarga eléctrica proporcional a la cantidad de energía recibida en algún rango específico del espectro electromagnético. Dicha descarga se amplifica y se convierte en una valor numérico, es decir en un nivel digital (ND). Los CCD son microscópicos pudiendo medir tan sólo 5 μm<sup>2</sup>. Para disponerlos en el sensor se les agrupa formando líneas o matrices de detectores sobre un "ship" de silicón, el cual es instalado en el

plano focal del dispositivo a cámara digital – parte electrónica del sistema.

En la mayoría de los casos el sensor contiene elementos similares a los presentes en las cámaras convencionales, esto es, dispositivos para regular el enfoque y controlar el aumento con que se perciben los objetos observados (lentes) – parte óptica del sistema -, controladores del tiempo de exposición (obturador) y cantidad de energía que entra (diafragma).

La forma en que la imagen es formada por el sensor puede ser clasificada en tres tipos:

- a) Marco completo: contienen una matriz de CCD, todos los cuales reciben la luz en un mismo instante, formando el marco completo de la imagen en un solo instante. Las cámaras digitales de uso común son en su gran mayoría de este tipo.
- b) En línea o de empuje: contienen una línea de CCD que, debido al movimiento del sensor y de la plataforma que lo lleva, va formando una matriz de datos que generan la imagen total. El sensor satelital francés usa esta tecnología.
- c) Píxel a píxel o de barrido: sólo tienen un sensor que va formando una matriz de datos debido a dos movimientos complementarios y sincronizados: en sentido de avance del sensor y su plataforma, y perpendicular a este, debido al movimiento de un espejo oscilante que desvía la luz hacia el CCD. Este tipo de sensores se usan cuando se quiere obtener de información para más bandas espectrales, debido a que es posible poner un sensor para cada banda (3, 5, 7, 11, ...) sin mayores complicaciones en el diseño, tarea que resulta más difícil en los casos anteriores. El sensor TM de la serie Landsat de la Nasa usa este tipo de mecanismo.

#### EL COLOR EN LAS IMÁGENES DIGITALES

Para desplegar las imágenes en el monitor del computador sólo se pueden usar tres bandas a la vez, cada una de ellas para uno de los tres colores aditivos primarios: azul, verde y rojo. En general, podemos obtener un color en particular

de acuerdo a la siguiente expresión – principio aditivo en la formación del color:

La mayoría de las imágenes contienen niveles digitales en el rango (0 -255). De esta forma, si el porcentaje de azul – tono de azul – se asigna en forma proporcional a su nivel digital se tiene que para aquellos píxeles con valores cercanos a cero la cantidad aportada de azul será mínima y para aquellos cercanos a 255, máxima. Lo mismo puede hacerse para los colores verde y rojo. Al combinar en forma aditiva las tres bandas se genera una imagen en la cual cada píxel tiene un color específico dentro de la gama de 255<sup>3</sup> potencialmente disponibles.

#### 2.2. Resolución del Instrumento

Desde el punto de vista de las posibilidades de análisis de la información contenida en una imagen, un aspecto clave es la resolución con que el instrumento (sensor) la obtuvo. Existen cuatro aspectos que la definen: resolución espectral, radiométrica, espacial y temporal.

La resolución espectral se refiere a que partes del espectro electromagnético el sensor es sensible y cuantos rangos, o bandas espectrales, es capaz de diferenciar dentro de ella. Por ejemplo, una película fotográfica a color normal es capaz de captar la radiación entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$  y dentro de esta zona distinguir 3 bandas espectrales: azul, verde y rojo. La resolución radiométrica está definida por el número de tonos de grises (niveles digitales) que el sensor es capaz de diferenciar dentro de la banda del espectro luminoso definida por la resolución espectral. Por ejemplo, las imágenes Landsat TM identifican 256 niveles digitales (0-255) dentro de cada una de sus bandas. La resolución espacial es función del tamaño del mínimo objeto observable y se utiliza el tamaño del píxel - lo que representa en la realidad - para definirlo. De esta forma, la resolución espacial puede ir desde centímetros, en fotografías aéreas digitalizadas, hasta kilómetros, en imágenes del satélite NOAA. Por último, la resolución temporal está definida por el intervalo de tiempo

entre la obtención de una imagen y otra sobre la misma zona geográfica.

### 2.3. Los instrumentos y sus plataformas

Los sensores remotos pueden ser clasificados de acuerdo a si producen una imagen o no, o si son activos o pasivos respecto de la fuente emisora de la energía. A continuación se presenta una clasificación general de los sensores remotos formadores de imagen:

- a) **Pasivos:** requieren de una fuente de energía externa, la cual son capaces de detectar directamente desde su origen (energía emitida) o después de haber reflejado sobre algún cuerpo o superficie.
- b) **Activos:** son capaces de generar su propia energía, la cual emiten y posteriormente detectan aquella porción que se devuelve desde el objeto observado. Si la energía utilizada corresponde a radiación electromagnética de onda corta (0,1-100 cm) se tiene un sensor tipo Radar. Por otra parte, si la energía utilizada corresponde a un haz de energía Láser se tiene un sensor tipo Lidar.

El sensor requiere de una plataforma sobre la cual operar, la cual puede encontrarse a cientos de kilómetros sobre la tierra (satélite), a miles o cientos de metros de altura (avión), o a nivel de suelo (fotografías terrestres). La figura 7 presenta un resumen de los tipos de plataformas usadas en percepción remota.

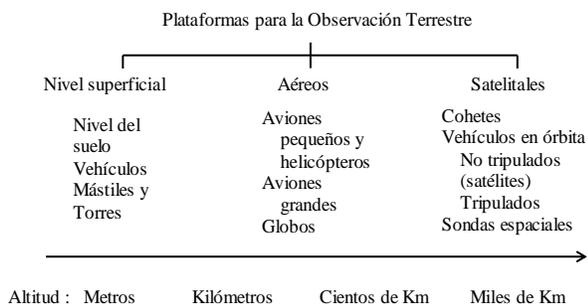


Figura 7: Clasificación de las plataformas usadas en percepción remota (Fuente: adaptado de Barrett y Curtis, 1999).

### INSTRUMENTOS PASIVOS

Los instrumentos pasivos no hacen más que recoger la energía electromagnética que se refleja o emite desde la superficie terrestre. Estos sensores pueden ser de tipo fotográficos u óptico electrónicos<sup>4</sup>. Los sensores fotográficos generan imágenes en blanco y negro B/N (pancromáticas) y en color. En B/N se puede observar el espectro visible o el infrarrojo cercano. En color se puede observar el rango visible (color normal) o visible-infrarrojo (falso color). Los sensores óptico-electrónicos tienen resoluciones espectrales y espaciales diversas de acuerdo a los objetivos para los cuales fueron diseñados. Las tablas 6 y 8 presentan un resumen de algunos de los sensores pasivos de mayor uso en la evaluación y monitoreo de los recursos naturales.

Sensor	Resolución		Principales Características
	Espectral	Espacial	
Cámara Fotográfica	Pan (Visible) Pan (IRc) Color (Visible, 3 bandas) Falso color (IRc, 3 bandas)	Variable según altura de vuelo.	Analógico (película fotosensible). Formato más común: 152 mm de distancia focal y 230 mm para el negativo.
ATM	10 bandas (0,42 – 2,35 μm) 1 banda (8,5 – 13,0 μm)		Angulo de observación de 86°.
MEIS II	8 bandas (0,39- 1,1 μm)		Angulo de observación de 39,66° Tecnología similar a SPOT.
TIMS	6 bandas (8,2- 12,2 μm)		Angulo de observación de 76°

Tabla 6: Características generales de los algunos de los sensores pasivos aéreos más importantes. IR = Infrarrojo. Subíndices: c = cercano, m = medio, t = térmico. Pan = pancromático (B/N). \* : no se incluye.

*Nota: Los sensores hiperespectrales son revisados en otros apuntes.*

<sup>4</sup> A los radiómetros de micro-ondas se les suele denominar sensores de antena constituyendo un tercer grupo.

INSTRUMENTOS ACTIVOS

Radar

Los instrumentos clasificados como activos son diseñados para que las ondas electromagnéticas sean generadas por ellos mismos y además para que sean capaces de recepcionar aquella porción que es devuelta desde los objetos de la escena. Esta es la esencia del sistema de Radar (“radio direction and ranking”). Los sistemas actuales trabajan con longitudes de onda que van desde 1 a 100 centímetros. Las imágenes de Radar son generadas por dos tipos de sensores:

- a) SLAR (*Side-looking Airborne Radar*), el cual usa una antena que se instala bajo un avión apuntando hacia el lado para transmitir y recibir la señal.
- b) SAR (*Sinthetic Aperture Radar*), que usa una antena fija. Están montados sobre plataformas satelitales, y la transmisión/recepción de la señal se realiza en coordinación con el movimiento orbital.

Ambos tipos usan una geometría de observación lateral (“side-looking”). La figura 19 muestra una representación de un sistema SLAR , en donde la imagen se va formando línea a línea a medida que el instrumento va recibiendo la señal reflejada desde la superficie terrestre (“backscatter”).

Las bandas de mayor uso actual en sistemas de Radar se presentan en tabla 7:

Banda	Rango de longitud de onda	Sistema de Radar
X	2,4 – 3,75 cm	USGS SLAR
C	3,75 – 7,5 cm	ERS-1, Fuyo 1
L	15 – 30 cm	SIR-A, B, Almaz
P	30 – 100 cm	AIRSAR

Tabla 7: Bandas de uso común en imágenes de Radar.

Complementariamente, la tabla 9 presenta un resumen con sensores de radar actualmente disponibles.

Plataforma /sensor	Resolución		Principales Características
	Espectral	Es pacial	
Satélite Landsat 5	Multiespectral azul (0,45-0,52 μm) verde (0,52-0,60 μm) rojo (0,63-0,69 μm) IRc (0,76-0,9 μm) IRm <sub>1</sub> (1,55-1,75 μm) IRt (10,4-12,5 μm) IRm <sub>2</sub> (2,08-2,35 μm)	30 m 120 m en la banda termal (IRt)	Ancho de barrido de 185 Km., órbita a 705 Km, resolución temporal de 16 días.
Satélite Landsat 7 /ETM+	Multiespectral azul (0,45-0,515 μm) verde (0,525-0,605 μm) rojo (0,63-0,69 μm) IRc (0,75-0,90 μm) IRm <sub>1</sub> (1,55-1,75 μm) IRt (10,4-12,5 μm) IRm <sub>2</sub> (2,09-2,35 μm) Pancromático (0,52-0,9μm)	30 m 60 m en la banda termal (IRt) 15 m en Pan	Ancho de barrido de 185 Km. órbita a 705 Km, resolución temporal de 16 días.
Satélite SPOT 5 /HRV	Multiespectral verde (0,50-0,59 μm) rojo (0,61-0,68 μm) IRc (0,79-0,89 μm) SWIR (1,58 to 1,75 μm) Pancromático (0,49-0,69 μm)	10 m 2,5-5,0 m en Pan	Ancho de barrido de 60 Km, órbita a 822 Km, resolución temporal de 26 días. Capacidad estereoscópica. SWIR = <i>Short-wave-infrared</i> .
Satélite IKONOS	Multiespectral azul verde rojo IRc Pancromático (0,45-0,9 μm)	4 m 1 m en Pan	Ancho de barrido de 13 Km, órbita a 681 Km, Resolución temporal de 2,9 días.
QuickBird	Multiespectral azul (0,450-0,520 μm) verde (0,520-0,600 μm) rojo (0,630-0,690 μm) IRc (0,760-0,90 μm) Pan (450-900 μm)	2,44 m 0,61 m en Pan	Ancho de barrido de 16,5 Km, órbita a 450 Km, resolución temporal de 1-3 días.
Satélite NOAA /AVHRR	Multiespectral Visible (0,58-0,68 μm) IRc (0,725-0,1,10 μm) IRt <sub>1</sub> (3,55-3,93 μm) IRt <sub>2</sub> (10,30-11,30 μm) IRt <sub>3</sub> (11,50-12,50 μm)	1,1 Km	Ancho de barrido de 2.700 Km, órbita a 833 Km, resolución temporal de 2 veces por día.

Tabla 8: Características generales de los algunos de los sensores pasivos satelitales más importantes. IR = Infrarrojo. Subíndices: c = cercano, m = medio, t = térmico. Pan = pancromático (B/N).

	ERS-1, 2	JERS-1	SIR-A, B	RADARSAT	Almaz-1 (URRS)
Origen	Europa (ESA)	Japón	NASA	Canadá	(URRS)
Resolución espacial (m)	12,5	18	25	10-100	15
Resolución temporal (días)	35	44	-	3	-
Área de la escena (km)	100x100	75x100	30x60	50x50 - 500x500	40x100
Bandas	C	L	L	C	C

Tabla 9: Sensores de Radar actualmente disponibles

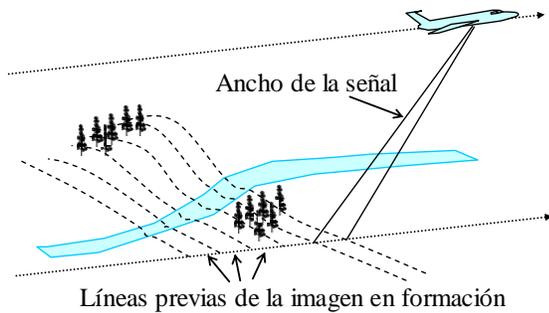


Figura 19: representación de un sistema SLAR.

### Lidar

El Lidar (Radar láser o “ligh detection and ranking”) es un sistema similar al Radar pero que opera con la parte del espectro electromagnético que comprende desde el ultravioleta al infrarrojo cercano. En sistema consiste en un haz de luz denso, o láser, que se emite en forma continua o como pulsos discretos a través de un sistema de colimación. Además, posee un segundo sistema óptico, que es capaz de recopilar la radiación que viene de vuelta desde los objetos de la escena y es enfocada a un detector que la convierte en información digital (ND).

Existen tres sistemas Lidar actualmente en funcionamiento: i) de altimetría, para mapear las alturas del terreno, ii) de escaneo de superficies, para cartografía temática, y iii) estereoscópicos, usados para detectar partículas en la atmósfera o en un espacio cualquiera. En general, el sistema se monta sobre un avión o un helicóptero en forma coordinada con equipos GPS, de tal forma que se obtienen densas redes de puntos X, Y y Z sobre el terreno los cuales se utilizan para elaborar modelos digitales de terreno (MDT) de precisión. En la actualidad la precisión de un MDT vía Lidar es del orden de los 10 a 15 cm y se espera que siga mejorando.

### Aplicaciones de Radar y Lidar para vegetación

El uso de imágenes de Radar tiene la ventaja obtener información sin interferencia atmosférica, lo cual permite observar la

superficie terrestre en forma independiente a la presencia de nubes. Por otra parte, la interpretación no es directa como en el caso de imágenes en el dominio óptico (visible o infrarrojo).

Los nuevos sensores de Radar y Lidar pueden ser usados para medir directamente la altura de la vegetación, y pueden penetrar los distintos doseles de vegetación para poder estimar directamente otros atributos estructurales de la vegetación tales como (Dobson et al. 1992; Bergen, Dobson et al. 1997; Bergen y Dobson 1999; Dobson et al. 1995): i) distribución de tamaños diámetros fustales, ramas y foliaje, ii) orientación espacial de los componentes, iii) cantidad de dichos componentes.

## 3 LOS MÉTODOS

### 3.1. Correcciones y Calibraciones Radiométricas

Previo a cualquier análisis de las imágenes digitales es necesario efectuar una serie de correcciones para eliminar ruidos y cuando se vayan a realizar análisis multitemporales, las calibraciones radiométricas que permitan comparar datos de fechas distintas. Existen tres tipos de factores que modifican las características de la radiación: i) problemas de sensibilidad y mal funcionamiento de los sensores, ii) efectos ocasionados por la topografía, y iii) efectos provocados por la atmósfera.

### REDUCCIÓN DE RUIDOS Y RESTAURACIÓN DE PÍXELES FALTANTES

Los errores presentes en una imagen pueden tener distintos orígenes aunque en general se asocian mayoritariamente a problemas ocurridos en la transmisión de los datos o en los sensores mismos.

**Ruidos en la imagen** : se pueden agrupar los ruidos según su grado de presencia en la imagen en globales o locales, y de acuerdo a su nivel de aleatoriedad en aleatorios o sistemáticos.

En todos los casos, la solución se basa en: i) identificar los niveles digitales defectuosos y, ii) aplicar algún algoritmo para reemplazar sus valores. La identificación puede llevarse a cabo por simple inspección visual de los datos, revisando el histograma de la imagen, aplicación de medidas de correlación espacial y otras técnicas especializadas. El reemplazo puede efectuarse aplicando distintos tipos de filtros de acuerdo a las restricciones de los análisis posteriores: de paso bajo, de moda, conservadores de bordes, etc.

**Bandeado:** ocurre cuando un sensor, o una línea de sensores, se desajusta y es poco frecuente en los sensores modernos. Se han desarrollado algunos algoritmos que permiten solucionar el problema, entre los cuales se tienen (Crispen, 1989): i) convolución entre líneas. ii) aplicación de paso alto. iii) aplicación de análisis de componentes principales.

**Pérdida de líneas completas:** ocurre cuando un sensor, o línea de sensores, falla completamente. En estos casos se reemplaza los niveles digitales faltantes por valores de líneas contiguas.

#### EFECTOS ATMOSFÉRICOS

En realidad los efectos de la atmósfera no son considerados como errores debido a que forman parte de la radiación incidente (Berstein, 1983). Sin embargo, es de suma importancia su remoción, especialmente cuando se realizan análisis de cambios temporales. Los algoritmos para llevar a cabo esta tarea se pueden agrupar en cuatro categorías:

*i) Sustracción de píxeles oscuros.* Se asume que el menor nivel digital (ND), en ausencia de influencia atmosférica, debería ser cero. De esta forma, se procede a restar su valor en todos los píxeles de la imagen llevando el menor nivel digital a cero. Sin embargo, se ha demostrado que este método no tiene una buena base teórica y degrada la imagen en vez de corregirla.

*ii) Conversión de radiancia a reflectancia.* Este método requiere tener conocimiento de la reflectancia real de al menos dos elementos de la

imagen. Esta información puede provenir de mediciones de campo o de tablas de reflectancia estándar para materiales conocidos (Wrigley et al., 1992). A partir de las reflectancias conocidas se calibra el resto de niveles digitales de la imagen.

*iii) Regresiones lineales.* Con la ayuda de gráficos bi-dimensionales, entre los niveles digitales de dos bandas espectrales, se asume que la posición de cualquier píxel en la plano es el resultado de la iluminación recibida. Entonces, la pendiente de curva de regresión entre ambas bandas es igual a la reflectancia relativa entre ellas. Con una iluminación igual a cero la línea de regresión debería pasar por el origen bi-espectral. La distancia o desviación al origen representa la presencia de componentes de influencia atmosférica (Crippen, 1987; Potter y Mendolowitz, 1975; Potter, 1984).

*iv) Modelación atmosférica.* Se trata de desarrollar modelos complejos que requieren conocer el estado de atmósfera en el momento de adquisición de la imagen. El modelo más extendido es el MODTRAN o LOWTRAN (Kneizys et al., 1988), el cual requiere de información de las siguientes variables atmosféricas: presión, temperatura, vapor de agua, ozono, aerosoles, ángulos solares y de observación del sensor (Slater, 1980; Schott, 1996). Un modelo más simple de implementar es el denominado  $\cos(t)$ , propuesto por Chavez (1996), que utiliza un enfoque que funciona bien cuando no se tienen todos los datos atmosféricos requeridos en los modelos más complejos. Incorpora todos los elementos del modelo de sustracción de píxeles oscuros (eliminación de bruma) además de un procedimiento para estimar los efectos de absorción por gases atmosféricos y la dispersión tipo Rayleigh.

### 3.2. Correcciones Geométricas

Las imágenes obtenidas por satélites o aviones son representaciones de la superficie irregular de la tierra. Incluso las imágenes de zonas aparentemente planas contienen distorsiones o errores geométricos. Las variables que contribuyen a estos errores son la orientación de la cámara/sensor, errores sistemáticos asociados

a él, el desplazamiento debido al relieve del terreno (topografía), y la curvatura terrestre. En general, existen dos formas de corregir geoméricamente la imagen:

- **Rectificación** : Transformación geométrica de una imagen para que coincida con un mapa de tal manera de poder efectuar planimetría sobre ella. En fotogrametría tradicional efectuar una rectificación es corregir una fotografía aérea oblicua para transformarla en vertical.
- **Ortorectificación** : Es una forma especial de rectificación que modela la geometría asociada a las fuentes de error para su corrección. En este caso se corrige explícitamente el desplazamiento debido al relieve.

Otros conceptos asociados a los procesos geométricos de uso frecuente son:

- **Registrar / Corregistrar** : Transformación geométrica de una imagen para que coincida con otra. Dos píxeles en una posición específica de ambas imágenes se dicen “**corregistrados**”.
- **Georreferenciar** : proceso de asignar coordenadas cartográficas a una imagen (ejem.: UTM). Dos imágenes corregistradas estarán georreferenciadas solamente si una de ellas lo está.

#### RECTIFICACIÓN POLINÓMICA

La rectificación consiste en el proceso de corrección geométrica de una imagen para que pueda ser representada sobre un plano, de acuerdo a algún sistema de proyección. Esto es, que tenga las mismas características que un mapa. Es decir, es un proceso de transformación de los datos de una imagen desde un sistema coordenado a otro.

Para llevar a cabo este proceso es necesario, primero, disponer de puntos de control visibles en la imagen a corregir y conocer sus coordenadas exactas sobre el terreno, de acuerdo a algún sistema de proyección estándar (ej.: UTM). Dichos puntos deben estar homogéneamente distribuidos sobre la imagen y en un número suficiente para poder resolver el

sistema de ecuaciones que definen a la función de transformación<sup>5</sup>.

Segundo, construir las funciones de transformación y aplicarlas sobre todos los píxeles de la imagen de entrada para obtener sus posiciones en la imagen de salida. En general, las funciones de transformación son de tipo polinómicas y su grado depende de las características de la imagen a corregir.

A mayor orden en el polinomio, mayor es el grado en que la geometría de la imagen cambia:

$$x_0 = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i a_k \cdot x^{i-j} \cdot y^j \quad y_0 = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i b_k \cdot x^{i-j} \cdot y^j$$

Donde  $x_0$  e  $y_0$  son las coordenadas de salida,  $x$  e  $y$  son las coordenadas de entrada, y  $a_k$  y  $b_k$  son parámetros a ajustar por mínimos cuadrados. Si las funciones se aplican a toda la imagen se realiza una transformación polinómica tradicional. Alternativamente, uniendo puntos de control vecinos se puede formar una red de triángulos para cada uno de los cuales se puede efectuar una transformación polinómica independiente. Este último caso se conoce con el nombre de *rubber sheeting* debido a que la imagen de salida parece haber sido estirada o apretada diferenciablemente por subzonas. Mayores detalles acerca de ambos métodos pueden encontrarse en Novak (1992) y Erdas Imagine (1999).

Tercero, debido a que la transformación modifica el tamaño y forma de los píxeles es necesario crear una nueva imagen, con píxeles de tamaño fijo y alineados en sentido horizontal y vertical, utilizando para ello los niveles digitales de la imagen ya transformada. Para poder ir llenando esta nueva imagen es necesario realizar un remuestreo sobre los niveles digitales más cercanos a cada nuevo píxel. El remuestreo final puede efectuarse al vecino más cercano o a través de convolución con vecindades que van desde los cuatro a dieciséis vecinos más cercanos. Cuando interese no modificar los

<sup>5</sup> En general, el número mínimo de puntos es igual a  $[(t+1)(t+2)/2]$ , donde  $t$  es el orden del polinomio.

niveles digitales se opta por utilizar el valor más cercano.

Por último, la bondad de la transformación se evalúa a través la distancia promedio entre la posición de los puntos de control en el origen (subíndice  $o$ ) y su posición transformada (subíndice  $t$ ), conocido con el nombre de error RMS (“Root Mean Square”), que en general no debería ser mayor a la resolución espacial en unidades de distancia de la imagen corregida. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Error\ RMS = \sqrt{(x_t - x_o)^2 + (y_t - y_o)^2}$$

### 3.3. Mejoramiento de la imagen

#### MEJORAMIENTO RADIOMÉTRICO

El mejoramiento radiométrico considera valores de píxeles (ND) en forma individual, lo cual lo diferencia del mejoramiento espacial que considera explícitamente los ND de los píxeles vecinos. Mejoramientos radiométricos con buenos resultados en una banda no lo son necesariamente en otra, por lo cual se procede a realizar una serie de operaciones separadas para cada banda.

El dominio radiométrico tiene que ver principalmente con la capacidad de distinguir entre distintos niveles de radiancia, o entre niveles digitales, dentro de una banda espectral determinada. La capacidad de distinguir distintos niveles digitales en una banda espectral define el contraste con que se puede ver dicha banda. De esta forma, el mejoramiento radiométrico se enfrenta principalmente con el mejoramiento del contraste y su manipulación, ya sea que se trabaje con una o varias bandas, o con una o varias imágenes. A continuación se describen las principales técnicas de manipulación radiométrica.

#### *i) Manipulación del contraste (“contrast stretching”)*

El histograma de una imagen se obtiene cuando se agrupan los niveles digitales (ND) en clases discretas, generalmente de tamaño igual a 1, el rango potencial máximo (0-255), así se tendrá una frecuencia de ocurrencia de cada valor. El histograma se obtiene al graficar cada valor clase versus su respectiva frecuencia.

Si en una banda espectral los niveles digitales máximos y mínimos ( $ND_{max}$ ,  $ND_{min}$ ) definen un rango inferior al rango dinámico capaz de ser utilizado en un monitor estándar (ejem.: 0 a 255 tonos por color), se tendrá un contraste que puede ser mejorado usando la siguiente conversión:

$$ND'_i = [(ND_i - ND_{min}) / (ND_{max} - ND_{min})] * 255$$

Donde  $ND'_i$  es el valor de visualización y  $ND_i$  el valor original. La conversión anterior es una transformación lineal del contraste de la imagen como la que se muestra en la figura 20.

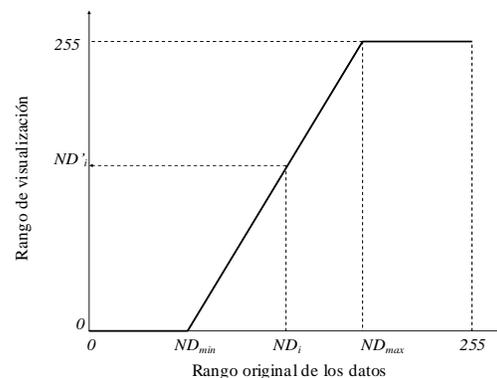


Figura 20: Expansión lineal (—) y no lineal (---) del contraste.

La transformación puede ser lineal o no lineal. Si es lineal, puede ser aplicada a todo el rango de datos o por partes. Este último caso es útil cuando se desea contrastar algunas zonas de la escena más que otras.

#### *ii) Ecuación del histograma*

Corresponde a una transformación no lineal que busca redistribuir los valores ND para que haya un igual número de píxeles por clase, lo cual genera un histograma más aplanado. La

consecuencia de esta ecualización es una mejora en el contraste de los valores cercanos a los máximos del histograma (valores más comunes) los cuales se separan con mayor facilidad en la nueva imagen, pero a la vez disminuye en contraste de los valores extremos de ambas colas del histograma.

iii) Igualado de histogramas

Cuando se requiere comparar dos imágenes tomadas en días distintos o se desea crear un mosaico con fotografías que tienen diferencias en sus contrastes y luminosidad, es de gran utilidad efectuar un proceso previo conocido como igualado de histogramas o “histogram matching”. Para un buen resultado, es necesario que las imágenes usadas posean características similares (histogramas iniciales similares, zonas oscuras equivalentes, etc.).

MEJORAMIENTO ESPACIAL

Para efectuar algún tipo de mejoramiento en el dominio espacial, el criterio general es el de modificar el valor de píxeles individuales en función de los valores de los píxeles de su vecindad. Se trabaja con el concepto de frecuencia espacial, que se traduce como número de cambios que se tienen por unidad de distancia, para una imagen determinada (Jensen, 1986). La principal herramienta para trabajar en el dominio espacial es la aplicación de convoluciones de filtraje, las cuales no son otra cosa que sumas ponderadas de grupos de píxeles de la imagen (vecindades). Para llevar a cabo la operación es necesario primero definir la matriz de filtrado o matriz de convolución, en la cual se especifican los valores que actúan como ponderadores y además determina el tamaño de la vecindad a considerar. Por ejemplo, una matriz de convolución de 3x3 tiene la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \text{ } f_{ij} \text{ es el ponderador en la posición } i, j$$

Una vez definida la matriz de convolución, se aplica a todos los píxeles de la imagen a filtrar (original), haciéndolos coincidir con el valor

central de la matriz. Para completar toda la imagen la matriz se va moviendo columna por columna y fila por fila. Para los píxeles de los bordes existen varias alternativas entre las cuales una de las más populares es agregar, sólo para el cálculo, filas o columnas artificiales repitiendo las que están en los bordes de la imagen (figura 21).

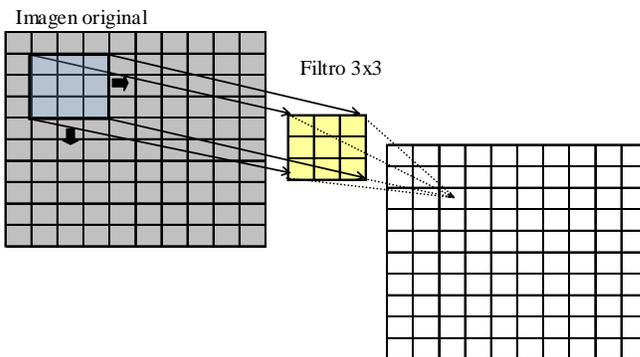


Figura 21: Proceso de filtraje a través de una matriz de convolución de 3x3 píxeles.

La ecuación general para describir el proceso de convolución es:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^d \left( \sum_{j=1}^d f_{ij} \cdot d_{ij} \right)}{F}$$

Donde:

- $f_{ij}$  = ponderador  $i, j$  de la matriz de convolución
- $d_{ij}$  = ND del píxel que corresponde con la posición de  $f_{ij}$
- $d$  = dimensión de la matriz de convolución (impar mayor a 3)
- $F$  = suma de los  $f_{ij}$  (es 1 si la suma es igual a 0)
- $V$  = ND de salida

Algunos ejemplos de filtros de uso común se presentan en el tabla 10:

Nombre del filtro	Ejemplos (3x3)	Usos
De paso bajo	$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	Bajar la frecuencia espacial. Suavizar el contraste de la imagen. Eliminación de ruidos aleatorios.
De paso alto	$\begin{matrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 & -1 & 9 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	Aumentar la frecuencia espacial. Detección de bordes. El primer filtro destaca diferencias en todos los sentidos mientras que el segundo destaca diferencias en sentido NO-SE.
De suma igual a cero	$\begin{matrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	Detección de bordes, deja valores muy bajos igual a cero en zonas con baja frecuencia espacial y valores altos en zonas con alta frecuencia espacial.
Sobel	$\begin{matrix} 1 & 2 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 2 \\ -1 & -2 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{matrix}$	Detección de gradientes locales. El primer filtro es sensible a componentes verticales y el segundo a componentes horizontales.

Tabla 10: Ejemplos de distintos tipos de filtros digitales.

## MEJORAMIENTO ESPECTRAL

Para poder efectuar algún tipo de modificación en el dominio espectral es necesario contar con al menos dos bandas espectrales.

El objetivo de estas operaciones puede ser:

- i) el reducir la dimensionalidad de la información debido a la presencia de datos redundantes en bandas distintas,
- ii) crear nuevas bandas que aumenten la capacidad de interpretación,
- iii) aplicar transformaciones matemáticas de los datos o,
- iv) desplegar en color o falso color información de una gran variedad de fuentes. A continuación de revisan algunas de los métodos más importantes.

### i) Análisis de componentes principales (ACP)

El objetivo principal del ACP es reducir la dimensionalidad de la información y obtener transformaciones ortogonales de las bandas originales. A través de este análisis se consigue obtener un nuevo conjunto de variables, o componentes principales, que son producto de una combinación lineal de la originales y que tienen la deseable característica de ser totalmente independientes unas de otras.

Como máximo puede haber tantos componentes principales como bandas originales, y cada uno explica parte de la varianza total. Así, se puede reducir la dimensionalidad eligiendo aquellos que expliquen la mayor parte de dicha varianza y desechando aquellos con bajo nivel explicativo.

### ii) Decorrelación de componentes principales

El propósito de realizar una mejoría en el contraste es modificar la distribución de los ND originales para que usen el rango de visualización completo (en la mayoría de los casos en forma lineal). La decorrelación mejora el contraste de los componentes principales y luego re-transforma los datos a las imágenes originales.

Imagen original  $\rightarrow$  ACP ( $CP_1, \dots, CP_n$ ):  
expansión del contraste  $\rightarrow$  Imagen mejorada

### iii) Transformación "Tasseled Cap"

La transformación "tasseled cap" fue desarrollada para optimizar la visualización de la vegetación en imágenes multispectrales. En la práctica es similar a un ACP con la diferencia de que los ponderadores de las combinaciones lineales han sido establecidos en base a experimentación y permiten una interpretación más directa de las nuevas bandas (Crist et al., 1986; Crist y Kauth, 1986). Las tres bandas principales se describen en el tabla 11.

Banda nueva	Descripción	Ejemplo para Landsat TM 4
Brillantez	Suma ponderada de todas las bandas. Está definida en la dirección de la variación principal de la reflectancia del suelo.	$= 0,3037 \text{ TM1} + 0,2793 \text{ TM2} + 0,4743 \text{ TM3} + 0,5585 \text{ TM4} + 0,5082 \text{ TM5} + 0,1863 \text{ TM7}$
Verdor	Ortogonal a la anterior. Altamente relacionada con la cantidad de vegetación verde de la escena.	$= -0,2848 \text{ TM1} - 0,2435 \text{ TM2} - 0,5436 \text{ TM3} + 0,7243 \text{ TM4} + 0,0840 \text{ TM5} - 0,1800 \text{ TM7}$
Humedad	Relacionada con la humedad de suelo y del dosel vegetacional.	$= 0,1509 \text{ TM1} + 0,1973 \text{ TM2} + 0,3279 \text{ TM3} + 0,3406 \text{ TM4} - 0,7112 \text{ TM5} - 0,4572 \text{ TM7}$

Tabla 11: Descripción de los tres primeros componentes de la transformación “tasseled cap”.

#### iv) Índices

Una forma alternativa de mejorar la capacidad de interpretación de los resultados es efectuando operaciones entre bandas. Por ejemplo, se puede obtener una nueva banda dividiendo una banda original por otra. Así se obtiene una banda que actúa como un índice que podría mejorar la interpretación de algún tipo de cobertura en particular.

Existen índices adecuados para la interpretación de tipos de minerales, para la detección de humedad o para la caracterización de la vegetación. Los índices de vegetación utilizan las bandas del visible, en especial la banda roja (R), y la banda infrarroja cercana (IRC) debido al comportamiento espectral de la vegetación (ver punto 1.5). Las hojas tienen una gran reflectividad en el visible y mucho más baja en el infrarrojo, lo cual crea una diferencia característica sólo de la vegetación. Cuando la vegetación sufre algún estrés, la reflectividad en el infrarrojo cercano es menor, pero mayor en el rojo, con lo que el contraste entre ambas bandas

es menor. En este principio se basan los índices de vegetación, de los cuales los más utilizados son el cociente simple  $C$  entre bandas y el índice de vegetación normalizado NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad C = \frac{IRC}{R}$$

Sin embargo, se ha demostrado que el NDVI es sensible a la radiación proveniente del suelo, a las condiciones atmosféricas y a la geometría de observación (ángulos de incidencia y observación). Debido a éstos inconvenientes Huete (1988) desarrolló un índice corregido que minimiza la influencia del suelo:

$$SAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + 0,5} 1,5$$

Por otra parte, la atmósfera tiende en general a reducir los valores del NDVI. Si se usan imágenes AVHRR una forma de solucionar el problema es usar valores máximos de una serie temporal dada (7-15 días).

Existen otros índices alternativos propuestos en literatura, pero la mayoría de ellos son modificaciones a los índices tradicionales.

### 3.4. Reconocimiento de Patrones

Los seres humanos somos capaces de reconocer distintos patrones de tonos y colores, de arreglos espaciales o de cambios en el tiempo. Es relativamente fácil discriminar entre el verde de la copa de un pino y la de un roble, o poder distinguir entre una plantación y un bosque natural debido a la disposición ordenada de los árboles en la primera, o ser capaces de darnos cuenta que un bosque ha crecido o ha sido cortado cuando lo visitamos en más de una oportunidad. Lo que nuestro cerebro realiza es una interpretación de lo que está percibiendo de acuerdo al cúmulo de información que tiene almacenada. Estas tareas, que a primera vista parecen simples, son extremadamente difíciles de llevar a cabo por un computador.

En la década de los '60 y los '70, de la mano de investigaciones en el ámbito militar, se desarrolló una serie de ideas y técnicas matemáticas para poder extraer información de las imágenes digitales. Este conjunto de técnicas se agruparon bajo el nombre genérico de inteligencia artificial. En percepción remota el análisis se centra en el reconocimiento de patrones en tres dominios distintos pero complementarios: espectral, espacial y temporal.

#### RECONOCIMIENTO DE PATRONES ESPECTRALES

El reconocimiento de distintos tipos de coberturas, asistido por computador, en función de sus características espectrales se denomina comúnmente clasificación. El objetivo general de la clasificación es asignar un conjunto de objetos en la imagen digital a un conjunto de clases predefinidas. Desde este punto de vista, la clasificación puede ser vista como un problema de etiquetación. En percepción remota, se distingue entre clasificación supervisada y no supervisada de acuerdo a si se utiliza información auxiliar, en la primera, o sólo se usa la información contenida en las imágenes, en la segunda (Niblack, 1985).

##### *i) Clasificación Supervisada*

La clasificación supervisada se utiliza cuando se conoce *a priori* para un subconjunto de píxeles de la imagen a que clase pertenecen y pueden ser utilizados como *áreas de entrenamiento* para los algoritmos de etiquetación. Es necesario contar con áreas de entrenamiento para todas las clases predefinidas. A partir de esta información se construye algo así como una clave de identificación numérica con la que se compara cada píxel de la imagen y se etiqueta con el nombre de aquella a la que "más se parezca".

En la elección de las áreas de entrenamiento es necesario actuar con rigor para obtener los resultados deseados. Es deseable tener muestras puras en las que el conjunto de píxeles corresponda a un sólo tipo de objeto y minimizar la presencia de píxeles ajenos que contaminen la muestra. Sin embargo, es necesario considerar

simultáneamente la variabilidad que puedan exhibir los objetos, especialmente cuando se trata de coberturas vegetales, debido a distintos factores ambientales como la pendiente, la orientación, tipo y humedad de suelo, o las gradientes ecológicas. De acuerdo a Showengerdt (1983) se requiere una muestra con un mínimo de  $m+1$  píxeles para cada clase, siendo  $m$  el número de bandas que se usarán en el análisis, pero se recomienda superar tanto como sea posible este mínimo. Diversos autores recomiendan entre 10 a 100 píxeles por clase y por banda de la imagen. Para imágenes SPOT XS que contiene tres bandas, y considerando 10 clases, se requiere entre 300 y 3.000 píxeles muestrales. Por otra parte, Lillesand y Kiefer (1994) indican que dependiendo de la naturaleza de las clases a utilizar en la clasificación y de la complejidad de la zona geográfica bajo estudio es común recopilar información de entrenamiento de 100 o más áreas de entrenamiento. Así, el tamaño medio de cada área de entrenamiento para el caso de SPOT XS variará entre 3 y 30 píxeles (300 píxeles/100 áreas y 3.000 píxeles /100 áreas, respectivamente). La figura 22 muestra un ejemplo de selección de área de entrenamiento en la Reserva Forestal Lago Peñuelas.

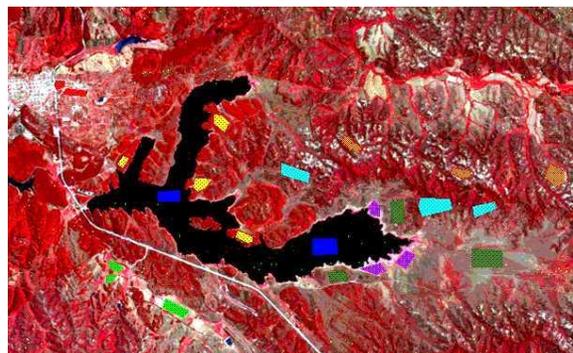


Figura 22: Ejemplo de áreas de entrenamiento para la zona de la Reserva Forestal Peñuelas. Los colores se definen en función de las clases: Agua, Plantaciones, Ciudad/vías, Agrícola, Pastizales, Espinal/matorral, Bosque nativo, y Zonas de suelo blanco. La imagen corresponde a una Landsat TM RGB 432 de Enero de 1986.

Una vez obtenidas las áreas de entrenamiento, se pueden calcular una serie de estadísticas para analizar el grado de discriminabilidad entre las coberturas y el grado de error que se cometería al efectuar la clasificación (Chuvieco, 1996). Existen métodos gráficos y numéricos para

evaluar las estadísticas de entrenamiento. Entre los primeros, el más utilizado es un gráfico de firmas espectrales en donde el eje  $x$  corresponde a las diferentes bandas y el eje  $y$  a los valores digitales  $Nd$  promedios para cada clase de cobertura. Se analizan en él, visualmente, los comportamientos de cada curva en términos de su separabilidad y de comportamientos peculiares. Líneas paralelas y próximas indican que las coberturas se solapan, en cambio líneas que se interceptan indican que las coberturas son distinguibles una de otra.

Entre los métodos numéricos, uno de los más extendidos es el propuesto por Swan y Davis (1978), que se basa en calcular la distancia normalizada entre cada clase de cobertura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$dn_{A_i, B_i} = \frac{|\overline{Nd}_{A_i} - \overline{Nd}_{B_i}|}{s_{A_i} + s_{B_i}}$$

Donde  $\overline{Nd}$  es el promedio de los niveles digitales para las categorías A y B, "i" es la banda espectral, y "s" es la desviación estándar para cada conjunto de datos. El cálculo se realiza para cada par de bandas que se promedian para obtener una matriz de separabilidad.

### ii) Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada se aplica cuando no se tienen áreas de entrenamiento disponibles, y se desarrolla a través del análisis de "clusters". En primer lugar, se agrupan los datos de acuerdo a su tendencia natural, y en segundo lugar, se identifica cada grupo por comparación con información de campo (Townshend y Justice, 1981).

Las clases homogéneas se crean asignando cada píxel a la *semilla* o *centroide* adecuada, de acuerdo a un criterio de minimización la varianza residual entre clases, dentro de un proceso iterativo que acaba cuando no se puede mejorar la separación. La forma en que las semillas se seleccionan y la forma en que los píxeles son asignados a dichas semillas da origen a los diferentes algoritmos de agrupamiento o "clustering". He y Wang (1987)

proponen localizar las semillas coincidiendo con los picos del histograma de los  $Nd$  de la imagen, sin embargo, el criterio más extendido es el llamado *ISODATA* ("interactive self-organizing data analysis") que selecciona las semillas de forma sistemática a lo largo del rango total de valores  $Nd$  para las bandas de la imagen.

### iii) Fase de Asignación

Existen varios criterios para asignar cada píxel a una categoría o clase determinada, cada uno con diferente filosofía de trabajo. Un clasificador es una regla, o un conjunto de reglas, mediante los cuales se asigna cada píxel a una clase predefinida. A continuación se detallan los más importantes:

a) Clasificador de mínima distancia (vecino más cercano): es el criterio más sencillo, y consiste en asignar cada píxel a la clase más cercana. Para ello se mide la *distancia* entre el vector de características del píxel en cuestión y la media del agrupamiento de píxeles para cada clase (figura 23). Existen varias formas de calcular esta distancia y entre las más usadas esta la distancia euclidiana  $d_c$  para cada clase, que se calcula como la sumatoria de la raíz cuadrada de las diferencias al cuadrado, para cada banda espectral  $i$ , entre los niveles digitales  $Nd_i$  del píxel y el promedio de los niveles digitales de la clase  $Nd_{C_i}$ :

$$d_c = \sqrt{\sum (Nd_i - \overline{Nd}_{C_i})^2}$$

En general, este clasificador no es considerado suficientemente preciso para ser usado como método principal y suele ser relegado a tareas de post-clasificación (Booth y Oldfield, 1989).

b) Clasificador de paralelepípedos: en este método se fijan unas *áreas de dominio* para cada clase, que forman hipercubos si el espacio es  $n$ -dimensional, o simplemente paralelepípedos si el espacio es *bi*-dimensional. La asignación de cada píxel se efectúa al comprobar la pertenencia a alguna de estas áreas de dominio. De esta forma, se asignará el píxel  $x$  a la clase A si sus  $Nd$  en

las distintas bandas ( $Nd_{x,i}$ ) están incluidos en el área de dominio de esa clase:

$$\overline{Nd}_{A,i} - R_{A,i} \leq Nd_{x,i} \leq \overline{Nd}_{A,i} + R_{A,i}$$

En donde  $R_{A,i}$  corresponde al rango de dispersión para la clase  $A$  en cada banda  $i$  (figura 23). En el uso de este clasificador debe considerarse el hecho de que puede que no todos los píxeles de la imagen sean clasificados, por no pertenecer a ninguna de las áreas de dominio, o que haya confusión en la clasificación por tener traslapes en los paralelepípedos o hiper-cubos (Mather, 1987).

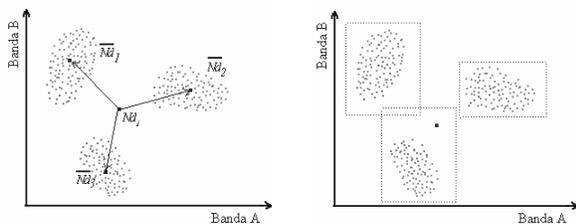


Figura 23: Gráficos que explican la forma de operar del clasificador de mínima distancia (izquierda) y de paralelepípedos (derecha).

c) Clasificador de máxima probabilidad (CMP): es el clasificador más usado y corresponde a una aplicación de la teoría de decisión bayesiana. El método evalúa la varianza y la covarianza de cada clase espectral para decidir acerca de la pertenencia de cada píxel a cada una de ellas. Para lo anterior, se asume que cada conjunto de datos en las áreas de entrenamiento sigue una distribución normal (Lillesand y Kiefer, 1994). Bajo este supuesto, la ley de distribución de los  $Nd$  de las clases puede ser completamente definida a través del vector de medias y la matriz de covarianzas. Una vez obtenidos los parámetros se puede calcular la probabilidad estadística de que un píxel en particular pertenezca a una de las clases. Existen dos requerimientos estadísticos que deben cumplirse para obtener resultados confiables. Primero, las distribuciones de las clases deben unimodales, y segundo, debe

haber un número suficiente de muestras para aproximarse a la distribución estadística de las clases. Por lo anterior, se recomienda obtener entre 10  $m$  y 100  $m$  muestras por cada clase, con  $m$  igual al número de bandas (Jensen, 1986).

- d) Clasificadores no paramétricos: Se han desarrollado métodos alternativos al CMP debido a que frecuentemente no se puede cumplir el requisito de normalidad y a que se debe ser muy cuidadoso al extraer las estadísticas de entrenamiento para no violar el supuesto de unimodalidad. Los clasificadores de mínima distancia y de paralelepípedos podrían ser incluidos dentro de este tipo de clasificadores. Skidmore y Turner (1988) desarrollaron un clasificador supervisado no-paramétrico que mostró mejores resultados que los métodos supervisados tradicionales al usarse para clasificar plantaciones forestales australianas con imágenes SPOT XS. Por último, destacan los trabajos de Strahler et al. (1980) que han probado modelos logísticos sobre imágenes Landsat-TM con buenos resultados en la clasificación de coberturas vegetales.
- e) Clasificadores en árbol, redes neuronales y Clasificación borrosa (*Fuzzy*) son otras alternativas de asignación que pueden ser revisadas en la literatura especializada.

#### UN NUEVO PARADIGMA: CLASIFICACIÓN ORIENTADA A OBJETOS

La alternativa a una clasificación píxel a píxel, enfoque tradicional descrito en los puntos anteriores, es agrupar píxeles para formar "objetos" y luego clasificarlos. El primer paso en la clasificación orientada a objetos es la segmentación de la imagen. Consiste en subdividir la imagen en regiones homogéneas más pequeñas llamadas Objetos (o Imagen-Objeto), según sus características espectrales, forma, posición, textura y la información de los píxeles vecinos (Definiens, 2006). Los objetos se definen como grupos de píxeles contiguos que poseen un comportamiento similar (Galera et al., 2007; Volante et al., 2007). Estos se agrupan en clases organizadas jerárquicamente que permiten

a las clases inferiores heredar propiedades de las clases superiores de las que proceden (Castilla, 2003).

La calidad de la segmentación es importante, puesto que tiene directa relación con la precisión en los resultados de la clasificación (Chen et al., 2003. El Software *Definiens professional*®, líder en la implementación de este enfoque, considera varios tipos de algoritmos de segmentación, desde reglas simples de agregación de píxeles hasta métodos muy sofisticados que integran varios algoritmos en una sola aplicación. Entre los algoritmos de mayor uso se puede mencionar:

- a) Segmentación tabla de ajedrez: divide el dominio de los píxel (filas y columnas) en objetos cuadrados (figura 24, arriba).
- b) Segmentación *Quadtree-Based*. Se basa en la delimitación de objetos cuadrados de distintos tamaños de acuerdo a criterios de homogeneidad (figura 24, medio).
- c) Segmentación por separación de contraste (*Contrast Split*). Se basa en la separación de objetos entre distintos grados de regiones claras u oscuras.
- d) Segmentación multi-resolución. Minimiza localmente la heterogeneidad de los objetos de la imagen. Integra píxeles en forma consecutiva para formar los objetos (figura 24, abajo).



Figura 24: Ejemplos de segmentación. Fuente: eCognition, 2010.

- e) Segmentación basada en la diferencia espectral. Se basa en las diferencias observadas de los niveles digitales (intensidad) de píxeles vecinos.
- f) Segmentación Multi-umbral. Se basa en la definición de valores umbrales en el dominio de los niveles digitales.
- g) Segmentación de contraste de filtros. Se basa en la aplicación de filtros que son sensibles a los contrastes y los gradientes de los niveles digitales.

El tamaño y la forma de los Objetos resultantes del proceso de segmentación dependen de varios parámetros, los que se utilizan dependiendo de los resultados que se quieran obtener. *Definiens professional*® propone dos premisas a tener en cuenta para lograr una óptima segmentación:

- a) Se debe producir Objetos lo más grande posibles.
- b) Se debe utilizar el mayor valor posible para el criterio “color”, manteniendo el criterio “forma” tan alto como sea necesario .

La figura 25 El siguiente esquema resume el proceso de segmentación.

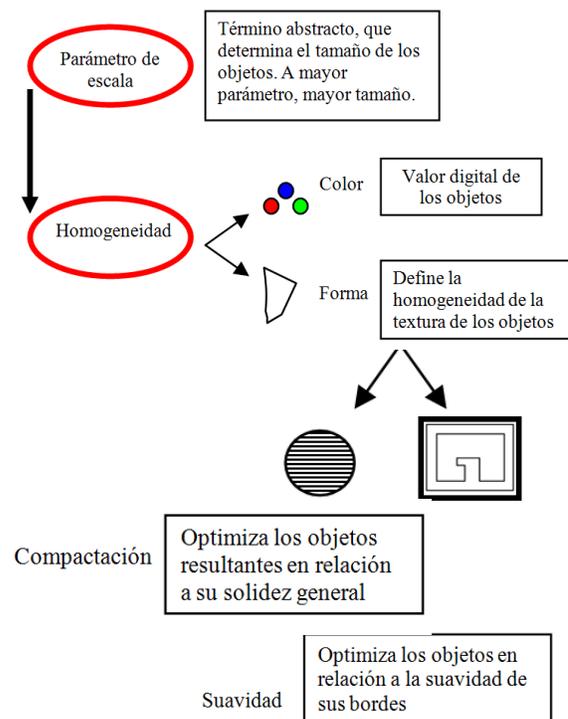


Figura 25: Proceso de segmentación.

El parámetro de escala es un término abstracto que determina la máxima heterogeneidad permitida por los Objetos resultantes (Definiens, 2006). Tiene estrecha relación con el tamaño de los Objetos, pero no es el único determinante. El mismo parámetro de escala puede producir diferentes resultados cuando es usado en imágenes con distinta resolución espacial o cuando se utilizan distintas combinaciones para el criterio de homogeneidad.

Criterio de homogeneidad se utiliza como sinónimo de reducir al mínimo la heterogeneidad. Para obtenerlo hay que considerar dos criterios: color y forma, y a su vez este, último se compone de los criterios suavidad y compactación.

- a) Color: Corresponde al valor digital de los Objetos. Éste se define indirectamente al modificar el criterio de forma, ya que la suma entre color y forma es igual a 1.
- b) Forma: Define la homogeneidad de la textura de los objetos. El valor de forma no puede ser mayor que 0,9 (la suma de color y forma es igual a 1). Utilizar un valor alto en el criterio de forma puede reducir la calidad de los resultados de la segmentación
  - Suavidad: Se utiliza para optimizar los objetos en relación a la suavidad de sus bordes.
  - Compactación: Optimiza los objetos resultantes en relación a su solidez general. Varía indirectamente con el criterio de suavidad, la suma de ambos es 1.

Una vez obtenido los objetos se pasa a la fase de clasificación, la cual funciona conceptualmente de la misma forma que en enfoque píxel a píxel.

VERIFICACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN

El resultado de una clasificación, supervisada o no supervisada, contendrá errores en la asignación de los píxeles a alguna de las clases. Los errores pueden ser de dos tipos: i) errores de omisión, que se producen cuando un píxel no es asignado a la clase que verdaderamente pertenece, y ii) errores por comisión, que se

generan cuando un píxel es asignado a una clase cuando realmente no pertenece a ella.

Para poder estimar el tamaño de ambos tipos de error es necesario contar con datos reales, en la práctica muestrales para un conjunto de píxeles. La estrategia de muestreo a utilizar para obtener dichos datos puede ser un diseño al azar, sistemático, estratificado o aquel que se estime adecuado.

En la mayoría de los casos, para resumir los resultados de la verificación, se construye una matriz cuadrada en la cual las columnas recogen las clases entregadas por la clasificación y las filas las clases reales (verdad de terreno). De esta forma, cada casilla de la matriz tendrá un número que representa la cantidad de píxeles de la muestra que fue clasificado en cada clase definida por las columnas. Ante la presencia de una clasificación perfecta sólo habrá números en la diagonal. El tabla 12 muestra una matriz de confusión de ejemplo para una categorización sólo en tres clases, en cuya primera fila se tienen todos los píxeles de deberían haber sido clasificados como clase “bosques”, sin embargo tres de ellos fueron clasificados como clase “matorrales” y cuatro como clase “herbáceas”.

		Clases definidas en la clasificación			Error de omisión
		B	M	H	
Clases verificadas en terreno	B	23	3	4	7
	M	3	22	5	8
	H	0	1	29	1
Error de comisión		3	4	9	

Tabla 12: Ejemplo de matriz de confusión simplificada para una categorización de la imagen en tres clases (B=bosques, M=matorrales, y H=herbáceas). El tamaño de la muestra se asume de 30 puntos (píxeles) por clase los cuales deben haber sido verificados en terreno.

Conceptualmente, la matriz de confusión corresponde a una forma de tabla de contingencia a partir de la cual se puede extraer información de la calidad del proceso de clasificación digital. La medida más simple de cálculo de la confiabilidad es a través de la siguiente expresión:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}}$$

Donde,  $x_{ii}$  es cada elemento de la diagonal de la matriz y  $x_{ij}$  es cada elemento de todas las celdas de la matriz. Para la matriz ejemplo del cuadro 3.12 la medida de confiabilidad F es igual a 74/90 o 0,82 (82% de correcta clasificación).

#### RECONOCIMIENTO DE PATRONES ESPACIALES

Los patrones espaciales pueden ser estudiados a través de los conceptos de textura, contexto, y estructura. Las características texturales de una imagen describen las variaciones de los niveles de gris en alguna banda del espectro. Las características contextuales contienen información derivada de ámbito general, o vecindad, en el que se encuentra un determinado nivel digital. Por último, el orden – o falta de él – en que los objetos se disponen en el espacio se estudia a través de medidas estructurales.

Gurney (1982) describe contexto como la relación entre un píxel y el resto de la imagen. Los métodos que utilizan el contexto pueden ser categorizados de acuerdo a si son aplicados a datos en “bruto” o clasificados, a píxeles individuales u objetos (grupos de píxeles), o a distintas formas de relaciones espaciales entre píxeles.

La textura es una medida de la variación del nivel de gris de una imagen. Se han usado medidas de la textura digital para ayudar en la discriminación de coberturas que tiene un comportamiento espectral similar. Existen diversas formas de medición, pero todas ellas indican el grado de variación de los  $Nd$  a lo largo de la imagen. La forma más común de efectuar los cálculos es a través del análisis local, mediante el cual se obtiene una medida de la textura para el píxel central de una vecindad, que influye en su valor. Una forma sencilla de cálculo local es asignar la varianza de una vecindad (ventanas de 3x3, 5x5 o 7x7 píxeles) al píxel central (San Miguel-Ayanz y Biging, 1996). Existen al menos tres tipos de métodos para realizar descripciones de la textura: estadísticos, sintéticos e híbridos (Sonka et al., 1993).

La Matriz de Co-ocurrencia muestra la relación existente entre un píxel y sus vecinos (Molina y Chuvieco, 1996), los cuales se encuentran separados a cierta distancia y en cierta orientación (arriba, abajo, izquierda, derecha) (Zhang *et al*, 2003); por esto también es conocida como la Matriz de Dependencia Espacial de los niveles de grises (Hall-Beyer, 2000). En la Figura 24 se muestra un ejemplo gráfico de ventana de 5x5 píxeles expresada en niveles digitales y la matriz de co-ocurrencia producida para el píxel de referencia y su inmediato inferior.

4	6	8	5	4
5	5	8	7	6
6	7	7	7	9
8	8	4	8	6
9	8	9	5	6

Ventana de una imagen

↓

		VALOR DEL PIXEL					
		4	5	6	7	8	9
4		0	1	1	1	0	1
5		1	0	2	2	1	0
6		1	2	2	0	1	2
7		1	2	0	2	3	0
8		0	1	1	3	4	1
9		1	0	2	0	1	0

Figura 24: Ejemplo de Matriz de Co-Ocurrencia (Fuente: adaptado de Molina y Chuvieco, 1996).

A partir de la matriz de co-ocurrencia es posible calcular al menos ocho índices textuales (Zhang *et al*, 2003).

Es necesario tener en cuenta que algunos factores como el tamaño de la ventana (*Kernel*), las estadísticas de textura elegidas, la distancia y orientación Inter-píxel y la resolución espacial de la imagen, entre otros, determinan la calidad de los resultados obtenidos a partir de los índices calculados en la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (Hall-Beyer, 2000).

Índice Textural	Fórmula
Mide la homogeneidad local y el valor resultante puede ser muy alto si los elementos de la matriz de co-ocurrencia están concentrados en la diagonal principal.	$HOM = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1+(i-j)^2}$
Contraste (CON): Mide la frecuencia espacial local; si la matriz de co-ocurrencia tiene elementos diagonales de alto valor, la ventana local tiene un alto contraste.	$CON = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j} (i-j)^2$
Disimilaridad (DIS): Es similar al contraste, un alto contraste de la ventana local indica un valor alto de Disimilaridad.	$DIS = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j}  i-j $
Media (MED): Mide el valor de la media en términos la matriz de co-ocurrencia.	$MED = \mu_i = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} iP_{ij}$
Desviación Estándar (DE): Mide el valor de la desviación estándar en términos la matriz de co-ocurrencia.	$DE = \sigma_i = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - \mu_i)^2}$
Entropía (ENT): Mide el desorden de la imagen.	$ENT = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} -P_{i,j} \ln P_{i,j}$
Segundo Momento Angular (SMA): Indica la uniformidad local	$SMA = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{i,j}^2$
Correlación (COR): Mide la dependencia lineal de los niveles de grises en píxeles vecinos.	$COR = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j}$

Tabla 13: Índices texturales derivados de la matriz de co-ocurrencia. Donde  $N$  es el número de niveles de gris,  $P$  es la matriz de co-ocurrencia simétrica normalizada de la dimensión  $N \times N$  y  $P_{i,j}$  es el “ $i, j$  esimo” elemento de  $P$ .

Por otra parte, el estudio de la estructura tiene sentido cuando se analizan objetos discretos sobre el territorio. De la mano de la ecología del paisaje se han desarrollado una serie de técnicas para describir los patrones espaciales de subzonas del territorio comúnmente llamadas “parches”, los cuales se clasifican o etiquetan usando un número finito de clases. Un caso común es el usar el tipo de formación vegetal para definir los límites de estas unidades, sin embargo existen múltiples criterios para definirlos. McGarigal y Marks (1994) proponen un conjunto de índices para la cuantificación de la estructura del paisaje. Cada una de ellas puede ser aplicada en tres niveles jerárquicos de percepción: parches, clases, o paisaje. A nivel de parches las métricas el análisis se centra en el carácter espacial de parches individuales. A nivel de clases interesan los conjuntos de parches del mismo tipo - similar al modelo de

islas biogeografías. Y por último, a nivel de Paisaje se incorporan todos los parches de todas las clases. Independientemente del nivel de aplicación, las métricas pueden ser agrupadas en ocho categorías que a continuación se describen.

#### *Métricas de área, densidad y bordes*

Las métricas de área, densidad y borde son las más básicas en la descripción del paisaje. Tienen que ver con tamaño, cantidad, densidad de parches y sus bordes. De cierta forma, entregan información valiosa por sí misma para muchos procesos ecológicos, sin embargo se refieren a la composición del paisaje más que a su configuración, por lo que deben complementarse con otras métricas. Otra limitación de estas métricas es que dependen de la escala, de modo que se deberá escoger con cuidado la escala de medición para que sea adecuada al fenómeno en estudio.

#### *Métricas de forma*

Las métricas de forma utilizan primordialmente la relación entre el área y el perímetro de los parches. Parches de igual tamaño pueden contener hábitat en suficiente cantidad para soportar determinadas poblaciones, si tienden a ser compactos o circulares, o ser insuficientes si son muy estrechos o con una excesiva cantidad de efecto de borde. Tienen directa relación con el tamaño de los parches, con su nivel de aislamiento y fragmentación.

#### *Métricas de área núcleo*

El área núcleo se define como el área dentro de un parche más al interior de la influencia específica del borde o ancho de la zona de amortiguamiento. Se utiliza en la determinación del carácter y función del parche en un paisaje considerando o no el “efecto borde”.

#### *Métricas de proximidad o aislamiento*

Este tipo de métricas se desarrolló de la mano de la teoría de islas biogeográficas y metapoblaciones en donde se modela a los parches como si fuesen islas dentro de un paisaje

dominado por una matriz relativamente homogénea y conocida (el océano). Gran parte de los índices de esta categoría utilizan criterios como el distancia al vecino-más-cercano para evaluar el grado de aislamiento de los parches.

#### *Métricas de contraste*

El contraste es una magnitud que establece diferencias entre tipos de parches adyacentes con respecto a uno o más atributos ecológicos a una escala determinada para un organismo o un proceso ecológico. El contraste entre un parche y su vecino puede influir en un número importante de procesos ecológicos, entre los cuales la influencia de los bordes adquiere especial relevancia.

#### *Métricas de contagio e interspección*

El término contagio está referido a la tendencia de tipos de parches para estar espacialmente agregados. Interspección, se refiere a la entremezcla de parches de diferentes tipos y está basada solamente en la adyacencia (como celdas opuestas) de los parches. Ambos términos son aspectos de la textura del paisaje.

#### *Métricas de conectividad*

La conectividad del paisaje se puede abordar desde dos perspectivas: estructural y funcional. La conectividad estructural está relacionada con la continuidad física de un tipo de parche a través de un paisaje y puede ser evaluada a través de la combinación de medidas tales como extensión del hábitat, su subdivisión y grado de contagio. Básicamente, está relacionada con la configuración espacial del paisaje.

Por otra parte, la conectividad funcional depende tanto del organismo o proceso de interés como de la estructura del paisaje, pudiendo existir parches que aparecen conectados para cierta especie o proceso pero aislados o desconectados para otra. Por lo tanto, lo que en última instancia va a determinar la conectividad del paisaje desde la perspectiva de un organismo es la escala a la que percibe el paisaje y sus patrones de movimiento respecto de él (With et al., 1999).

#### *Métricas de diversidad*

Las medidas de diversidad han sido utilizadas ampliamente en una variedad de aplicaciones ecológicas; comúnmente la medición de la diversidad está dirigida hacia especies de plantas y animales. En métricas de paisajes, los índices se encuentran influenciados por dos componentes:

- Riqueza: Se refiere al número de tipos de parches presentes (clases).
- Equitatividad (“Evenness”): Se refiere a la distribución del área entre las diferentes clases.

De esta forma, la diversidad del paisaje está definida por la relación entre la composición (Riqueza) y la estructura (Equitatividad). Algunos índices (por ejemplo el de Shannon) son más sensibles a la riqueza que a la equitatividad, por lo cual, las clases “raras” tienen una influencia desproporcionada en la magnitud del índice. Otros índices (ejem.: Simpson) son relativamente menos sensibles a la riqueza y así colocan más peso a los tipos de parches “comunes”. Estos índices de diversidad han sido aplicados por los ecólogos del paisaje para medir un aspecto de la estructura del paisaje: la composición.

#### RECONOCIMIENTO DE PATRONES TEMPORALES

La detección y seguimiento de cambios tanto en ambientes naturales como artificiales se ha convertido en una de las grandes necesidades del mundo actual. Esto puede ser ejemplificado desde una perspectiva global (ejem.: cambio climático) hasta una local (ejem.: cambio de usos de suelo) y puede ser aplicado sobre procesos temporalmente discretos, como el caso de un incendio forestal, o sobre procesos continuos, como el caso de la desertificación.

Cualquiera sea nuestro objetivo es necesario contemplar un esfuerzo adicional en el tratamiento de las imágenes que se vayan a emplear para asegurar la confiabilidad de los resultados. Antes de efectuar el análisis, las imágenes deben someterse a los siguientes procesos:

- Correcciones geométricas, para asegurar que las comparaciones de un píxel entre dos fechas distintas involucran exactamente a la misma porción del territorio.
- Homogeneización radiométrica, para asegurar que los niveles digitales de dos fechas distintas de un mismo píxel son comparables en forma independiente a las condiciones atmosféricas en cada una de ellas (ver punto 3.1).

Una vez efectuadas las correcciones, existe un conjunto de técnicas que pueden ser aplicadas, algunas de las cuales se resumen a continuación:

#### *i) Composiciones multitemporales*

Se basa en la construcción de una composición en falso color usando imágenes de tres fechas distintas. Si se usa la fecha más antigua como canal rojo, la intermedia como canal verde, y la más reciente como azul, los colores que se forman tienen una interpretación directa. Los tonos grises serán las zonas estables, los tonos rojos serán zonas que disminuyeron sus niveles digitales, y los tonos azules aquellas que los aumentaron. Si se utiliza tres imágenes de NDVI para formar la composición en falso color los aumentos y disminuciones de los niveles digitales pueden relacionarse con cambios en las características de la vegetación presente en la escena (figura 26).

#### *ii) Diferencia entre imágenes*

Se trata de una operación de sustracción simple entre dos imágenes de fechas distintas. Si a los niveles digitales más recientes se les resta los niveles digitales más antiguos la imagen resultante tendrá interpretación directa en los siguientes términos: las zonas con valores negativos serán aquellas que disminuyeron sus niveles digitales y aquellas con positivos serán aquellas que los aumentaron. También

pueden usarse imágenes de NDVI de distintas fechas y las interpretaciones pueden relacionarse directamente con la evolución de la vegetación en la zona de estudio.

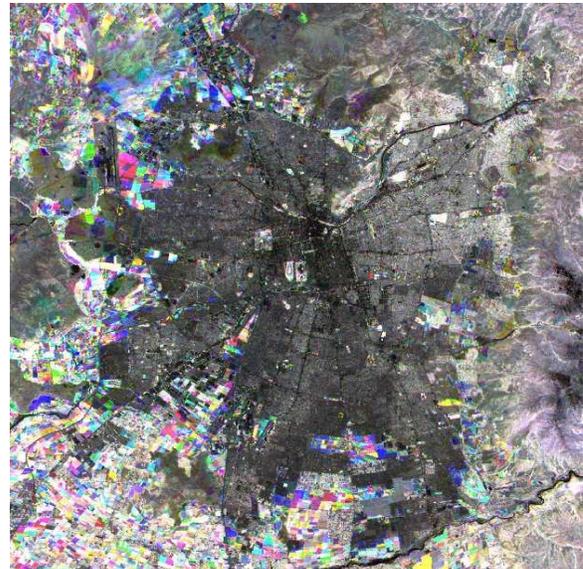


Figura 26: Composición multitemporal de índices de vegetación (NDVI) para las fechas 2003 (rojo), 2001 (verde) y 1998 (azul), obtenidas a partir de imágenes de la serie Landsat. La imagen es equivalente a un mapa temático, en donde cada color puede ser interpretado directamente. Los tonos grises representan distintos estados de vegetación que no cambiaron significativamente durante el período. Los tonos cian son zonas que se mantuvieron estables hasta el 2001 y luego disminuyeron el estado de su vegetación (procesos de urbanización y crecimiento de la ciudad). Los tonos amarillos indican una recuperación de la vegetación desde el año 2001 hasta el 2003. Los tonos magenta significan que la vegetación tiene el mismo estado los años 1998 y 2003, pero no el 2001, en donde se encontraba muy disminuida, lo cual puede ser producto de actividades temporales, incendios u otro tipo de actividades discretas en el tiempo.

#### *iii) Componentes principales*

El análisis de componentes principales (ACP) se utiliza para eliminar información redundante (común) entre un conjunto de variables, en este caso bandas espectrales, y generar un conjunto de nuevas bandas no correlacionadas entre ellas. Cuando se aplica el ACP a un conjunto de bandas de varias fechas, los primeros componentes contienen la información que es común a las bandas de todas las fechas, esto es, lo que ha

permanecido estable. Por el contrario, los últimos componentes principales contienen información no común entre las bandas y por lo tanto lo que ha cambiado.

#### *iv) Detección de cambios sobre imágenes clasificadas*

Las técnicas descritas anteriormente tratan con diferencias o tendencias de niveles digitales en sus rangos originales (variables continuas), encontrando valores positivos o negativos de distinta magnitud. Qué magnitud umbral se escoge para determinar si el cambio es significativo o no es un problema de difícil tratamiento y se debe recurrir a datos empíricos y a la experiencia de los expertos en el tema. Es de utilidad recurrir a sectores en donde se tiene información fidedigna de modificaciones y calibrar los valores usados para umbralizar las imágenes de valores de cambio.

El problema anterior no existe cuando se analizan imágenes de fechas distintas que ya han sido clasificadas. En este caso, pueden utilizarse estadísticas simples para determinar la cantidad de píxeles que cambiaron y hacia qué clase lo hicieron de forma similar a como opera la matriz de confusión después de una clasificación.

## 4 APLICACIONES EN BOSQUES

El estado actual de las ciencias forestales ha sido posible, en parte, gracias al desarrollo de las técnicas e instrumentos de percepción remota. El manejo forestal, el manejo de áreas silvestres protegidas, la recreación, el manejo de cuencas, el manejo integrado de ecosistemas forestales, la evaluación y monitoreo de la flora y vegetación son, entre otras, campos de amplia y continua aplicación de ellas. A modo de ejemplo, se revisan algunas de las aplicaciones más comunes.

Para ordenar la presentación se ha pensado en separarlas de acuerdo a su escala de trabajo de acuerdo a si son de carácter regional, local o detallado. Las de carácter regional son aquellas que tienen un ámbito nacional o abarcan grandes regiones geográficas, en donde los estudios de tipo multitemporales que usan índices de vegetación – en conjunto con indicadores de biomasa o área foliar – son el caso más representativo. Las de carácter local son aquellas que se centran en un bosque específico o en algunos rodales, de manera de poder estimar los parámetros de interés, por ejemplo el volumen de madera por hectárea. Por último, las de carácter detallado buscan la identificación del árbol y la extracción de atributos individuales tales como su altura y diámetro de copa que permiten efectuar estimaciones de las variables de interés como el volumen total del fuste y los volúmenes por productos. Para poder usarlos adecuadamente, se debe tener claridad acerca de las potencialidades y limitaciones de los instrumentos disponibles. No es raro encontrarse con estudios que basan su información en un instrumento que no es recomendado para la escala de trabajo usada. El tabla 14 presenta las posibilidades de uso de algunos de los sensores remotos de mayor uso en ciencias forestales.

Sensor	Resolución espacial				
	Árboles individuales	0,5 ha	1 ha	10 ha	100 ha
Fotografías 1:5.000 – 1:10.000	P	P	P	P	P
Fotografías Color IR 1:30.000	N	P	P	P	P
Fotografías B / N 1:75.000	N	T	P	P	P
Sensores aéreos multispectrales (ATM, Deadalus, MEIS-II)	T	P	P	P	P
QuickBird	P	P	P	P	P
IKONOS	P	P	P	P	P
SPOT – HRV	N	T	P	P	P
Landsat 5 TM – 7 ETM	N	N	T	P	P
NOAA – AVHRR	N	N	N	N	T

Tabla 14 Posibilidades de uso de algunos sensores en áreas forestales. N = no es posible, T = teóricamente posible (51-80 % de los píxeles son correctamente clasificados), P = posible (al menos un 80 % de los píxeles son correctamente clasificados).

Por otra parte, es necesario tener claridad acerca del tipo de información que puede ser extraída de las imágenes. Obviamente, el volumen fustal no es una variable directamente extraíble a partir

de una fotografía aérea o de una imagen satelital. Por ello, se usan algunas variables auxiliares, de alta correlación con las variables de interés, las cuales son factibles de evaluar sobre las imágenes. La tabla 15 presenta un resumen de variables auxiliares y de interés usadas en evaluación del recurso forestal.

Origen de los datos	VARIABLES AUXILIARES	VARIABLES DE INTERÉS
Fotografías o imágenes aéreas Escala entre 1:1.000 - 1:25.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diámetro de copa</li> <li>✓ Altura total</li> <li>✓ Bosque / No-bosque</li> <li>Variables de rodal (Altura dominante, Número de árboles por hectárea, Cobertura (%), Tipo forestal, Clase de edad y E° de desarrollo)</li> <li>✓ Variables topográficas: Altitud, Pendiente, Orientación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Volumen individual del árbol</li> <li><u>Atributos del área o rodal:</u></li> <li>✓ Volumen</li> <li>✓ Área</li> <li>✓ Volumen por hectárea</li> <li>✓ Volumen por especies</li> <li>✓ Volumen por productos</li> <li>✓ Etc.</li> </ul>
Imágenes de satélite Resolución espacial entre 10 m - 1 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bosque / No-bosque / Incierto</li> <li>✓ Tipo Vegetacional, Tipo forestal, Clase de edad / E° de desarrollo</li> <li>Atributos forestales (Volumen por hectárea, Cobertura (%))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Atributos del área o rodal:</u></li> <li>✓ Volumen</li> <li>✓ Área</li> <li>✓ Volumen por hectárea</li> <li>✓ Volumen por especies</li> <li>Volumen por productos</li> </ul>

Tabla 15: Variables auxiliares y de interés usadas en evaluación del recurso forestal (adaptado de Kleinn y Dees, 1996).

Para las aplicaciones en manejo forestal tradicional – que en general se trabajan a una escala de entre 1:10.000 a 1:20.000 - existe cierto consenso en que de las imágenes de sensores actualmente disponibles, las fotografías aéreas son las que ofrecen la mejor combinación de características deseables: alta resolución espacial, capacidad estereoscópica, rango amplio de escalas, versatilidad en tipos de cámaras, filtros y películas fotosensibles, además de un costo moderado. De todas maneras, la tendencia actual es establecer sistemas con fuentes de información múltiples (*multi-source*) e integrarlos en ambiente SIG. Por otra parte, los nuevos sensores espaciales de alta resolución espacial como Ikonos y Quickbird han aumentado significativamente su participación y constituyen un buen sustituto de fotografías aéreas convencionales con ventajas respecto de ellas debido a sus capacidades multiespectrales (la banda infrarroja es muy apreciada), menor efecto por la topografía, regularidad y confiabilidad, además de precios muy competitivos (figura 27).

#### 4.1. Estudios de escala regional

Los sensores espaciales ofrecen la posibilidad de monitorear los recursos forestales a escala continental e incluso global. En las zonas tropicales se han llevado a cabo exhaustivos proyectos de evaluación de los recursos naturales con especial énfasis en incendios forestales y áreas de explotación a tala rasa (Malingreau et al., 1993; Achard y Estreguil, 1995). Los bosques de los Estados Unidos, en su totalidad, también han sido cartografiados de acuerdo a tipos forestales en conjunto con áreas forestadas (Zhu y Evans, 1994). En el otro extremo del hemisferio norte, los bosques de la ex unión soviética también han sido cartografiados usando el índice de vegetación global (GVI) para formar un total de 42 clases (Gaston et al., 1994).



Figura 27: Imágenes Ikonos del Río Simpson, XI Región, durante el verano 2004-2005. Arriba: falso color estándar. Abajo: color normal.

El sensor AVHRR del satélite NOAA ha sido el más utilizado para estos propósitos, debido a sus ventajas combinadas en cuanto a resolución espacial, cobertura global, y la frecuencia con que recopila las imágenes. Los procedimientos

utilizados muestran una predominancia en el uso de índices espectrales de vegetación tales como el índice de diferencia normalizada (NDVI). Sin embargo, en años recientes se ha demostrado que la inclusión de temperaturas superficiales – derivadas de imágenes de satélite - mejora la discriminación entre distintos tipos de vegetación y usos de suelo (Roy et al., 1996).

#### 4.2. Estudios a escala de bosque o rodal

El método más usado para estimar el volumen fustal por unidad de superficie - la biomasa vegetal o el área foliar -, ha sido la predicción vía regresión usando los datos multiespectrales como variables predictivas, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + \xi$$

En donde  $v$  es alguna expresión del volumen por hectárea ( $vha$ ,  $vha^{-1}$ ) y las variables  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) son niveles digitales de alguna de las bandas espectrales (XS1, TM3, TM4, etc.) o algún cociente entre ellos (NDVI, SVI, etc.).

Como ejemplo tradicional del uso de la percepción remota en la evaluación y monitoreo de las existencias nacionales se puede citar el caso de Finlandia, en donde, a través de la utilización de imágenes SPOT y Landsat TM, como complemento a las parcelas de terreno, se mantiene al día el inventario nacional forestal (Tomppo, 1991). En Finlandia, a fines de la década de los ochenta, el inventario nacional forestal fue reformulado para integrar información remota con los datos de campo con el fin de mejorar la eficiencia del sistema. El método se basa en la utilización de imágenes satelitales (Landsat TM), mapas digitales auxiliares de variables de interés tales como suelo, clima y topografía en conjunto con los datos obtenidos en terreno. Se desarrolló de manera tal que todas las estimaciones pueden ser obtenidas para cada píxel (30 m). De esta forma, por agregación se obtienen estimaciones para zonas pequeñas, rodales, regiones o para todo el país (Tomppo, 1996). A pesar de los buenos resultados obtenidos en la estimación de

parámetros de rodal al usar imágenes de la zona óptica del espectro como Spot y Landsat TM – visible al infrarrojo reflejado -, existen fuertes limitaciones para la extracción de información operacional con las siguientes situaciones: cuando se trabaja con rodales mixtos, con topografía abrupta, existencia de abundante sotobosque, claros con matorrales o rodales cercanos a quebradas (Le Toan et al., 1992).

Por otra parte, la baja capacidad de los sensores ópticos para penetrar las nubes, en el rango espectral en el que trabajan, ha llevado a efectuar una serie de investigaciones con métodos basados en sensores tipo radar (ERS, JERS, RadarSat). Trabajos recientes han desarrollado métodos que combinan ambos tipos de información y potencian las capacidades de extracción de atributos de rodal. La tabla 16, muestra una comparación de las precisiones alcanzadas en inventarios forestales realizados a nivel de rodales:

Método / instrumento	Error (m <sup>3</sup> /ha)	Error (%)
Inventario ocular de terreno (Päivinen et al., 1993).	30,0	16,0
Combinación de imágenes de radar y fotografías aéreas.	29,4	21,7
Perfiles de rodal usando imágenes de radar (Hyypä et al., 1996).	31,0	26,5
Espectrómetro AISA generador de imágenes.	42,4	29,8
Fotografías aéreas (Päivinen et al., 1993).	55,6	29,4
Landsat TM (Päivinen et al., 1993).	84,2	44,5
ERS-1 SAR (Tomppo et al., 1996)	90,0	58,4

Tabla 16: Comparación de varios métodos de inventarios forestales a nivel de rodal (modificado de Hyypä, 1996).

#### 4.3. Estudios a escala de árboles individuales

En tratamiento digital de imágenes con aplicaciones forestales, a nivel de árboles individuales, se busca la identificación de árboles a través de la delimitación de sus copas basados en la aplicación de técnicas de segmentación vía aplicación de algoritmos estadísticos, texturales y/o morfológicos

(Fournier, Edwards y Eldridge, 1995; Gougeon, 1995a; Gougeon, 1995b; Zheng, Gong y Strome, 1995). En las imágenes digitales de fotografías aéreas, con alta resolución espacial, un rodal luce similar a un paisaje montañoso cuando se visualiza en tres dimensiones (figura 28). Las copas de los árboles aparecen más iluminadas, mientras que los espacios intermedios se ven más oscuros debido principalmente a la direccionalidad de la reflectancia y al sombreado entre copas vecinas (Gougeon, 1995a; Gougeon, 1995b), aunque aún persisten algunos problemas asociados a la arquitectura de las copas y su interacción con la luz. Por ejemplo, a menudo se confunden en una sola copa dos árboles que están muy juntos – error por omisión - o se separan en dos copas, árboles con ramas muy grandes y visibles desde el avión, que se reconocen como copas separadas – error por comisión.

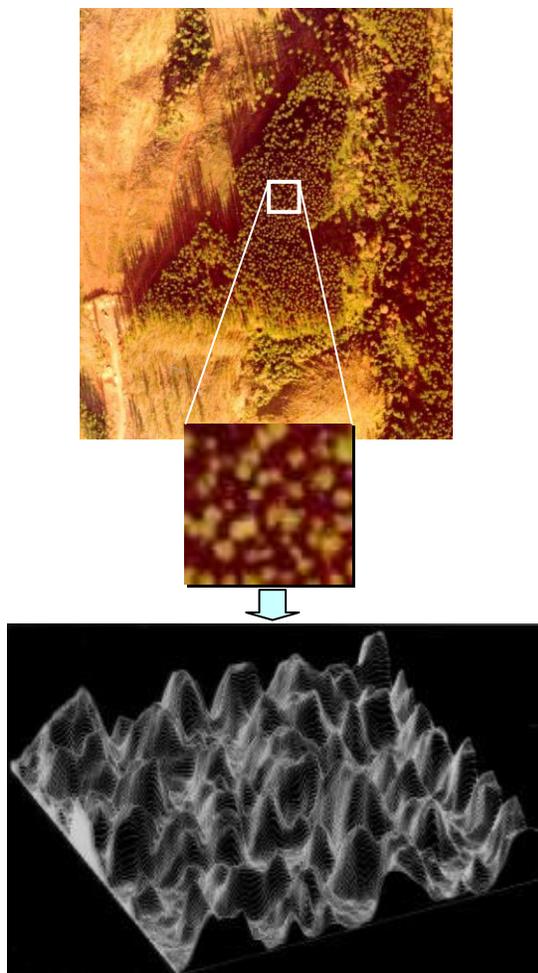


Figura 28: Cultivo de una fotografía aérea digital, para observar las copas de pinos presentes en una zona de un rodal y su aspecto de paisaje montañoso cuando se visualiza en tres dimensiones.

## LITERATURA CITADA

- ACHARD, F., Y ESTREGUIL, C. 1995. Forest Classification of Southest Asia Using NOAA AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment* 54, p. 198-208.
- BERGEN, K. M. AND M. C. DOBSON. 1999. "Integration of remotely sensed radar imagery in modeling and mapping of forest biomass and net primary production." *Ecological Modelling* 122(3): 257-274
- BERGEN, K. M., M. C. DOBSON, ET AL. 1997. "Effects of Within-Season Dielectric Variations on Terrain Classification Using SIR-C/X-SAR." *Proc. Int. Geosci. Rem. Sens. Symp.*
- CASTILLA, G. 2003. Object-Oriented analysis of remote sensing images for land cover mapping: Conceptual foundations and segmentation method to derive a baseline partition for classification. Tesis doctoral en Economía y Gestión Forestal. Universidad politécnica de Madrid. Madrid, España. 204p.
- CHAVEZ, P.S. 1996. "Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 9, 1025-1036.
- CHEN, Q., J. LUO AND C. ZHOU. 2003. A geo-statistic based segmentation approach for remotely sensed images. In: *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing ACRS and 2003 International symposium on remote sensing*. Busan, South Korea. 3-7 Noviembre 2003. Busan, South Korea.
- DEFINIENS. 2006. *Definiens professional 5: User Guide*. Versión 5.0.6.2. 249 pp
- DOBSON, M. C., F. T. ULABY, ET AL. 1995. "Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(4): 877-895
- DOBSON, M. C., F. T. ULABY, ET AL. 1992. "Dependance of radar backscatter on coniferous forest biomass." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(2): 412-415.
- ECOGNITION DEVELOPER © 2010 Trimble Germany GmbH, TrappentreustraÙe 1,80339 Munich, Germany
- FOURNIER, R, EDWARDS, G. Y ELDRIDGE, N. 1995. A Catalogue of Potential Spatial Discriminators for High Spatial Resolution Digital Images of Individual Crows. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 3, pp. 285-297.
- GALERA, J.I., J. RAMÍREZ Y A. FERNÁNDEZ. 2007. Cartografía de combustibles de alta resolución mediante integración de clasificación orientada a objetos y técnicas geoestadísticas. In: *4th International Wildland fire conference (Wildfire 2007)*. Sevilla, España 13-14 de mayo, 2007. Sevilla, España.
- GASTON, G., JACKSON, P., VINSON, T. KOLCHUGINA, T., BOTCH, M. Y KOBAC, K. 1994. Identification of carbon quantifiable regions in the former Soviet Union using unsupervised classification of AVHRR global vegetation index images. *International Journal of Remote Sensing* 15(16):3199-3221.

- GOUGEON, F., 1995A. Comparison of Possible Multispectral Classification Schemes for Tree Crowns Individually Delineated on High Spatial Resolution MEIS Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9.
- GOUGEON, F., 1995B. A Crown-Following Approach to the Automatic Delineation of Individual Tree Crowns in High Spatial Resolution Aerial Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 3, pp. 274-284.
- HALL-BAYER, M. 2000. GLCM textura: a tutorial. [en línea] <http://www.ucalgary.ca/~mhallbey> [consulta: 15 Marzo2005]
- ERDAS Imagine Inc. 1999. Field Guide (5a Edición). Erdas Inc. 672 p.
- HYYPÄ, J., INKINEN, M. Y HYYPÄ, H. 1996. Applying multi-source remote sensing data for forest inventory. En: *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring (Proceedings)*. FIRS, Space Applications Institute. Vienna, Austria.
- INKINEN, M. Y HYYPÄ, J. 1996. Feasibility of ERS-1/2 Interferometry for Forest Inventory. *ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry*, 30 September to 2 October 1996.
- KASSER, M. Y EGELS, Y. 2002. *Digital Photogrammetry*. Taylor & Francis. 351 p.
- KLEINN, CH. Y DEES, M. 1996. Multiphase Sampling for Forest Monitoring. En: *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring (Proceedings)*. FIRS, Space Applications Institute. Vienna, Austria.
- LE TOAN, T., BEAUNDOIN, A., RION, J. Y GUYON, D. 1992. Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30: 403-411.
- LILLESAND, T. Y KIEFER, R. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation (3a Edición)*. Wiley & Sons, Inc. 750 p.
- LOCKWOOD, J.G. 1974. *World Climatology: An Environmental Approach*. Ed.: Edward Arnold. London
- MCGARIGAL, K. Y MARKC, B. 1994. *Fragstats, Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis. 141 pp.
- MALINGREAU J.P., ACHARD, F. D'SOUZA, G. STIBIG, H. D'SOUZA, J., ESTREGUIL, C. Y EVA, H. 1993. AVHRR for Global Tropical Forest Monitoring: The Lessons of the Trees Project. En: *Proceedings 6th AVHRR Data Users Meeting*, Belgirate, Italy.
- MOLINA, Z. Y CHUVIECO, E. 1996. Evaluación de índices texturales para discriminar morfología urbana: análisis de la ciudad de Maracay (Venezuela). *Revista de Teledetección* 7: 1-8.
- NOVAK, K. 1992. Rectification of Digital Imagey. En : *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58 (1992), N° 3, pp. 339-344.
- PAIVENNEN, R., PUSSINEN, A. Y TOMPPO. 1996. Airborne imaging spectrometry in national forest inventory. *Proceedings of IGARSS'96 Conference*, 27-31 Mayo, Lincoln, Nebraska.
- ROY, D., KENNEDY, P. Y FOLVING, S. 1996. An operational methodology for mapping european forest cover using low spatial resolution satellite data. En: *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring (Proceedings)*. FIRS, Space Applications Institute. Vienna, Austria.
- SCHEER, L. 1996. Assessment of forest condition employing two-phased satellite remote sensing. En: *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring (Proceedings)*. FIRS, Space Applications Institute. Vienna, Austria.
- TOMPPO, E. 1991. Satellite image based national forest inventory of Finland. *Proc. of the symposium on Global and Environmental Monitoring, Techniques and Impacts*, Sep. 17-21. Victoria, BC, Canada. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 28, Part 7-1, p. 419-424.
- TOMPPO, E. 1996. Application of remote sensing in finnish national inventory. En: *Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring (Proceedings)*. FIRS, Space Applications Institute. Vienna, Austria.
- VOLANTE, J., C. CAMPOS, Y. NOÉ Y H. ELENA. 2007. Método de Clasificación "Por-parcela" para la Detección de Cultivos: Aplicación al Área Agrícola de Las Lajitas (Salta, Argentina), Campaña Agrícola de Invierno 2006. In: XII Congreso de la asociación española de teledetección. Mar del Plata, Argentina 19-21 de septiembre, 2007. Mar del Plata, Argentina.
- WITH, K., CADARET, S. Y DAVIS, C. 1999. Movement responses to patch structure in experimental fractal landscape. *Ecology* 80: 1340-1353
- WOLF, P. Y DEWITT, B. 2000. *Elements of Photogrammetry, with Applications in Gis (3a Edición)*. Mc Graw Hill. 608 p.
- ZHANG, Q., WANG, J., GONG, P. Y SHI, P. 2003. Study of urban spatial patterns from SPOT panchromatic imagery using textural analysis. *Int. J. Remote Sensing (24) 21: 4137-4160*.
- ZHENG, X., GONG, P. Y STROME, M., 1995. Characterizing Spatial Structure of Tree Canopy Using Colour Photographs and Mathematical Morphology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 4, pp. 421-429.
- ZHU, Z Y EVANS, D. 1994. U. S. Forest Cover Types and Predicted Percent Forest Cover from AVHRR Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60, No. 5, p. 525-531.