



Tratamientos estadísticos en imágenes de satélite, realces y mejoras visuales, realces radiométrico, espacial y espectral

Statistical treatments in satellite images, enhancements and visual enhancements, radiometric, spatial and spectral enhancements

Mario Esteban Ramos Flores

RESUMEN:

Los satélites de observación de la tierra han dado paso a una nueva disciplina que se viene utilizando en todas las labores que tienen que ver con los Recursos Naturales. Un aspecto no muy conocido de las imágenes satelitales es su composición, ya que una imagen satelital aparenta ser una fotografía a color, sin embargo, una imagen es una disposición matricial de valores digitales numéricos y como tal susceptible de ser analizados. Estos valores tienen parámetros estadísticos y es en base a estos una imagen puede ser realzada para realizar una mejora visual por medio de ajustes y filtros para una mejor interpretación visual de las imágenes y en la presente revisión, se trata de realizar una aproximación a la descripción de los realces y filtrajes que se realizan en una imagen en base a los componentes estadísticos de una imagen y mejorar la calidad visual de estas imágenes.

PALABRAS CLAVE:

Teledetección. Imagen satelital. Realces. Realce radiométrico. Realce espacial.

ABSTRACT:

Earth observation satellites have given way to a new discipline that has been used in all the work that has to do with Natural Resources. A not very well-known aspect of satellite images is its composition, since a satellite image appears to be a color photograph, however, an image is a matrix arrangement of digital numerical values and as such susceptible of being analyzed. These values have statistical parameters and it is based on these an image can be enhanced to make a visual improvement by means of adjustments and filters for a better visual interpretation of the images and in the present revision, it is a question of making an approximation to the description of the enhancements and filterings that are realized in an image based on the statistical components of an image and to improve the visual quality of this images.

KEY WORDS:

Remote sensing. Satelital image. Highlights. Radiometric enhancement. Spatial enhancement.

AUTOR:

Mario Esteban Ramos Flores: Docente Topografía y Geodesia. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. meramos3@umsa.bo

Recibido: 31/03/17. **Aprobado:** 28/05/17.

CONCEPTOS GENERALES

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina del término “remote sensing”, ideado a principios de los 70 para designar cualquier medio de observación remota¹. La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación y para esto, necesariamente entre la superficie terrestre y el sensor debe existir una interacción energética ya sea por:

- Reflexión de la energía solar.
- Haz de energía artificial.
- Emisión propia.

El haz energético recibido por el sensor ubicado en un vehículo espacial, debe ser almacenado convenientemente, para poder ser interpretado en una determinada aplicación ya que la percepción visual presenta algunas limitaciones y por ello se ha acudido a sensores artificiales, montados sobre plataformas a cierta altitud. Con ellos se tiene acceso a energías no visibles (ultravioleta, infrarrojo, micro – ondas) y, además, desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos (figura 1) (Chuvieco, 2010):

- a. **Fuente de energía:** Origen de la radiación electro – magnética que detecta el sensor. Puede ser un foco externo (teledetección pasiva) o un haz energético emitido por el sensor (teledetección activa). La fuente de energía más importante es el Sol, pero también puede realizarse teledetección a partir de la energía emitida por los propios objetos observados, o desde fuentes artificiales.
- b. **Cubierta terrestre:** Formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo con sus características físicas propias.
- c. **Sistema sensor:** Compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo alberga.

Capta la energía procedente de las cubiertas terrestres, la codifica y la graba o envía directamente al sistema receptor.

- d. **Sistema de recepción – comercialización:** Donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.

- e. **Intérprete:** Convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente.

- f. **Usuario final:** Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se derivan.

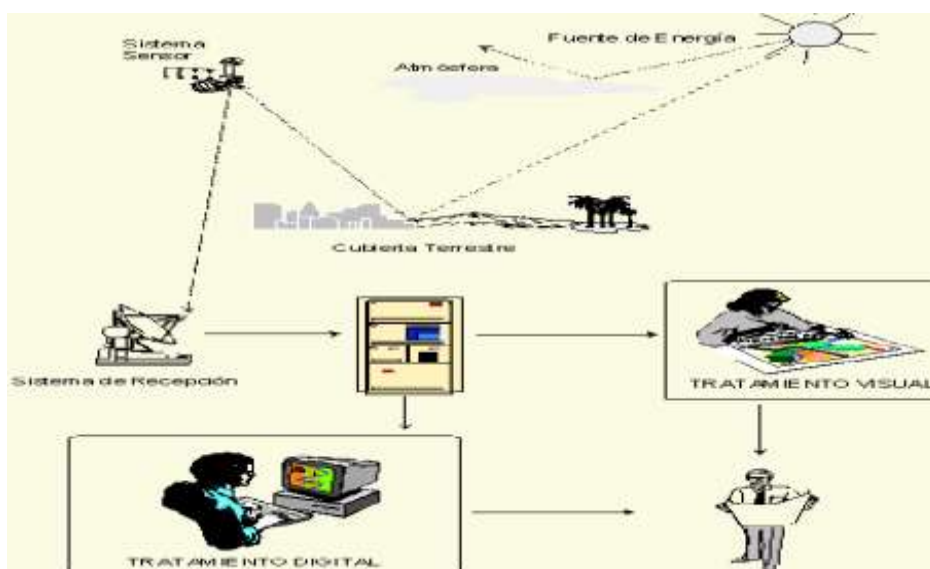


Figura 1. Componentes de la Teledetección

VENTAJAS DE LA OBSERVACIÓN ESPACIAL

La teledetección desde los satélite cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales (fotografía aérea o trabajo de campo, a los que, más que sustituir, complementa

adecuadamente). De estas ventajas podemos destacar (Fernández, 2008; Ayesa y López, 1998):

- a. **Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre:** Los sistemas orbitales permiten tomar información de la práctica totalidad del planeta, en condiciones comparables (mismo sensor, similar altitud). Es una fuente homogénea (el mismo sensor y plataforma para todos los países) y exhaustiva (cubre todo el territorio).

b. **Información sobre regiones no visibles del espectro:** Infrarrojo, micro – ondas. Estas bandas proporcionan una valiosa información para estudios medioambientales, por ejemplo.

- Infrarrojo térmico: Permite estudiar la distribución espacial de las temperaturas, con mayor detalle sobre la superficie marina, gracias a la homogeneidad de su composición.
- Infrarrojo medio: De gran interés para la detección de focos de altas temperaturas, como incendios forestales, que pueden delimitarse con bastante precisión.

c. **Cobertura repetitiva:** Las características orbitales de los satélites de observación terrestre les permiten adquirir imágenes repetitivas de toda la Tierra, en condiciones comparables de observación, lo que resulta idóneo para estudios multitemporales (procesos de desertificación, inundaciones, etc.).

d. **Transmisión inmediata:** La mayor parte de los sistemas de teledetección graban las imágenes en formato digital, lo que permite transmitirlos a las estaciones terrestres en tiempo real.

e. **Formato digital:** El tratamiento digital de las imágenes agiliza el proceso de interpretación, permite generar modelos cuantitativos e integrar los resultados con otro tipo de información geográfica. Este enfoque integrado permite una evaluación más real del paisaje.

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

Fundamentos de la observación remota

Para que la observación remota sea posible es necesario que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Existen tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto (figura 2) (Chuvieco, 1996):

Por reflexión: Es la forma más importante de teledetección, ya que se deriva directamente de la luz del Sol, principal fuente de energía de nuestro planeta.

Por emisión.

Por emisión – reflexión.

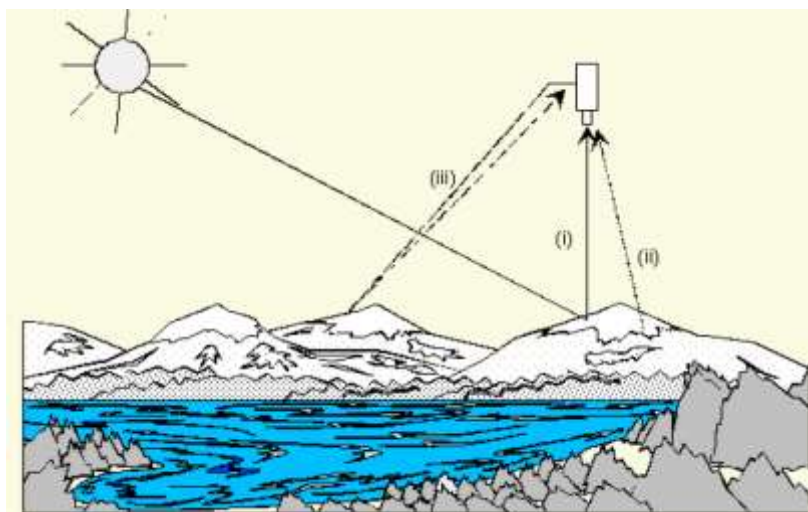


Figura 2. Formas de teledetección: i. reflexión; emisión; iii. reflexión - emisión



El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro – magnética (figura 3) y es precisamente la radiación la que constituye la base de los sistemas de teledetección. Según la teoría ondulatoria, la energía

electro – magnética o radiación se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerza ortogonales entre sí: eléctrico y magnético.

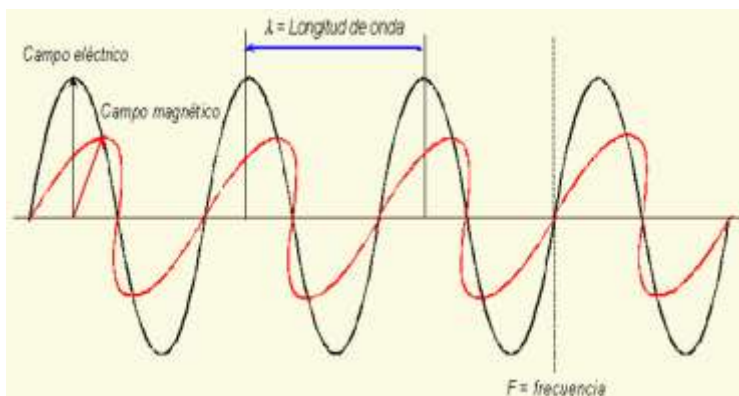


Figura 3. Esquema de una onda electromagnética

Las características del flujo energético pueden describirse por dos elementos:

- Longitud de onda (λ):** Distancia entre dos picos sucesivos de una onda.
- Frecuencia (U):** Número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo.

Ambos elementos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda \times U \quad \{1\}$$

Donde:

c: Velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).
 λ : Longitud de onda, en unidades de longitud, habitualmente micrómetros ($1\mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$) o nanómetros ($1\text{nm}=10^{-9}$).
 U: Frecuencia en Hertzios ($1\text{Hz}=1 \text{ ciclo } \times \text{ segundo}$).

Gracias a la teoría cuántica, se puede calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia (U).

$$Q = h \times U \Rightarrow Q = h \times (c / \lambda) \quad \{2\}$$

Donde:

Q: Energía radiante de un fotón (Julios).
 U: Frecuencia (Hertzios).
 h: Constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$).

De las fórmulas se deriva que, a mayor longitud de onda, o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la energía en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella proveniente de longitudes de onda cortas, de ahí que para longitudes de onda largas sean necesarios medios de detección más refinados.

El espectro electromagnético

De las fórmulas anteriores se deduce que se puede definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. La sucesión de valores de la longitud de onda es continua, pero suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro – magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas se denomina espectro electro – magnético (figura 4). Comprende desde las longitudes de onda más cortas (micrómetros) hasta las kilométricas (tele – comunicaciones). Desde el punto de vista de la

teledetección destacan una serie de bandas (Ayesa y López, 1998; De la Riva, 2009):

a. **Espectro visible** (0,4 a 0,7 μm): Es la única radiación electro – magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima. Dentro de esta región se distinguen 3 bandas:

- A: Azul (0,4 a 0,5 μm).
- V: Verde (0,5 a 0,6 μm).
- R: Rojo (0,6 a 0,7 μm).

b. **Infrarrojo cercano** (IRC: 0,7 a 1,3 μm): Llamado también próximo, reflejado o fotográfico. Parte de él puede detectarse a partir de películas con emulsiones especiales. Tiene gran capacidad para discernir masas vegetales y concentraciones de humedad).

c. **Infrarrojo medio** (IRM: 1,3 a 8 μm): En esta región se entremezclan procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

- En el primer caso se trata del infrarrojo medio de onda corta (**SWIR**: Short Wave Infrared). Se sitúa entre 1,3 y 2,5 μm y es una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o en los suelos.
- La segunda banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (**IRM**). Es determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios, volcanes activos,...).

d. **Infrarrojo lejano o térmico** (IRT: 8 a 14 μm): Incluye la porción emisiva del espectro, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

e. **Micro – ondas** (M: Por encima de 1mm): Con gran interés, por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

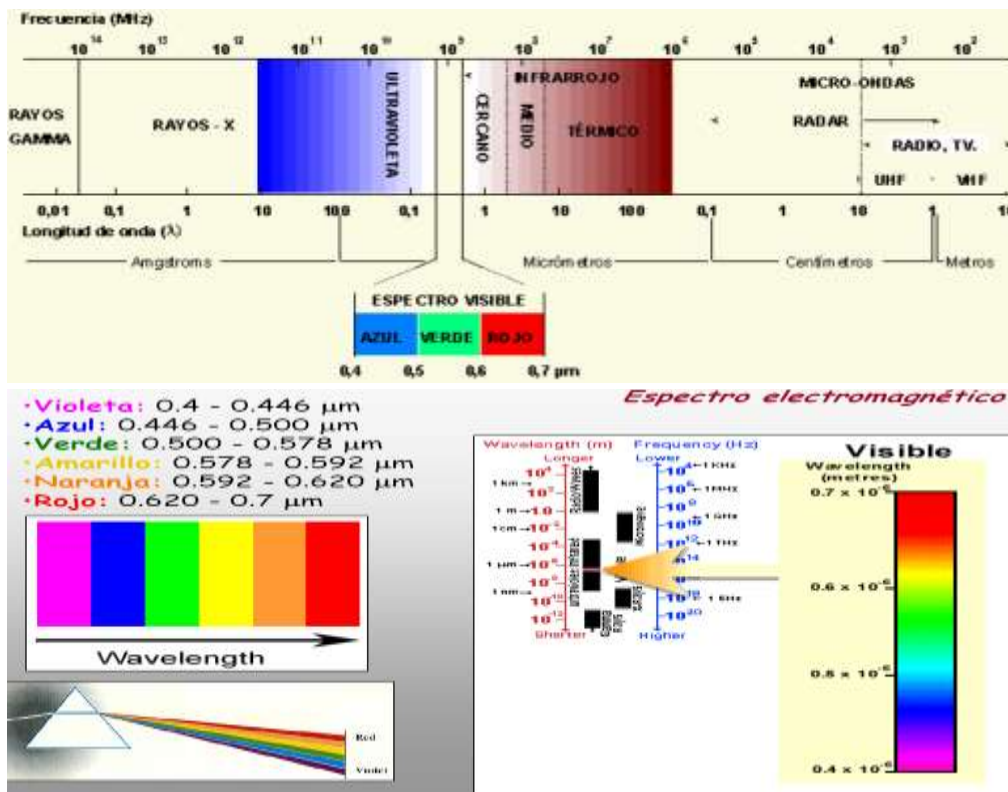


Figura 4. Espectro electromagnético



CONCEPTO DE RESOLUCIÓN

La resolución es la capacidad de un sistema óptico para distinguir señales que están espacialmente próximas o que son espectralmente similares o la habilidad para registrar, discriminándola (información de detalle).

Tipos de resoluciónⁱⁱ

Resolución espacial: Medida de la más pequeña separación angular o lineal entre dos objetos que pueden ser distinguidos por el sensor (figura 5).

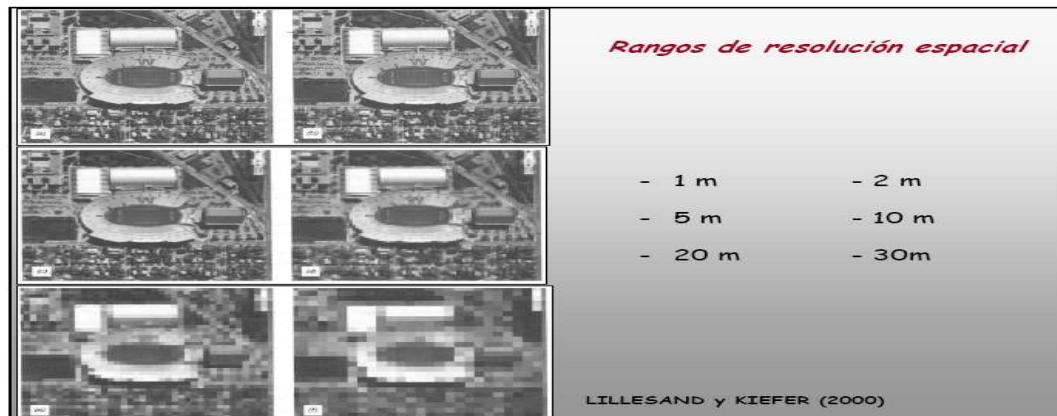


Figura 5. Resolución espacial

Resolución espectral: Número y anchura de bandas de registro (figura 6).

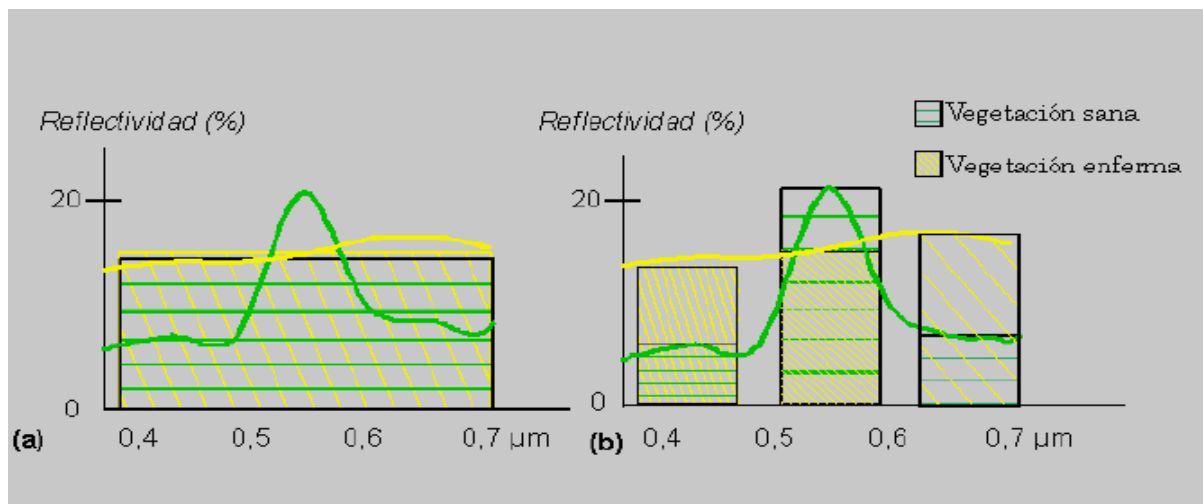


Figura 6. Resolución espectral

Resolución radiométrica: Sensibilidad del sensor, expresada en el número de valores de codificación (figura 7).

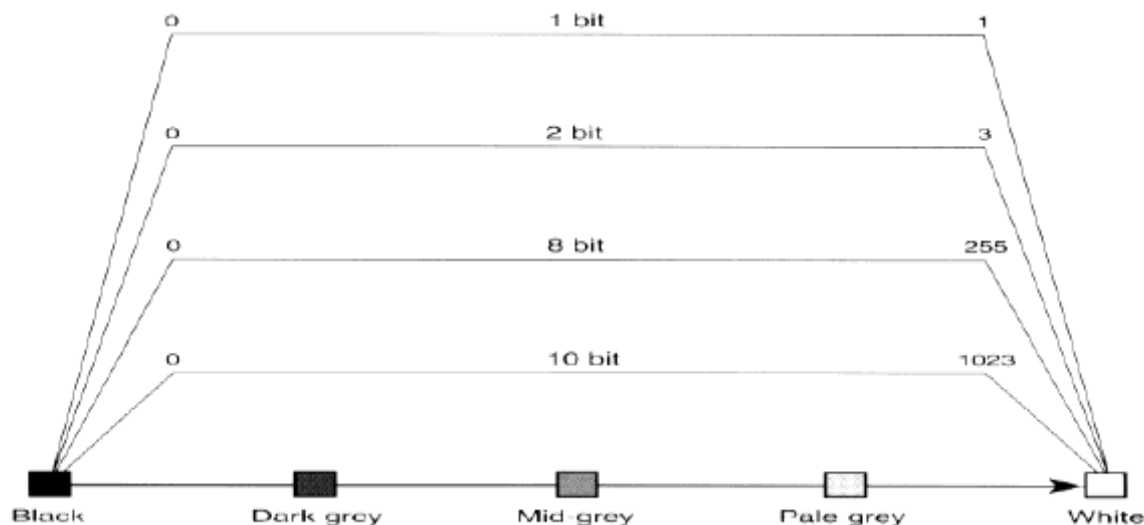


Figura 7. Resolución radiométrica

Resolución temporal: Frecuencia de paso o de transmisión de datos. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

LA RADIACIÓN SOLAR Y SU INTERACCIÓN CON LAS CUBIERTAS TERRESTRES.

En la reflexión, dominio óptico del espectro, el Sol es el emisor y el satélite capta la parte de energía que es reflejada por la Tierra, que tendrá características diversas según la naturaleza de la cubierta. Por ejemplo, un objeto o cubierta que absorbe gran cantidad de energía incidente en una determinada longitud de onda y refleja una pequeña proporciónⁱⁱⁱ. La mayor parte de los cuerpos naturales reflejan una parte del flujo incidente, absorbiendo el resto y transformándolo en calor como lo hacen los cuerpos grises o negros. Si comparamos la radiación solar que llega a la atmósfera terrestre con la que esperaríamos para un cuerpo negro a la temperatura radiativa del Sol, se observa que es sensiblemente baja, dependiendo del lugar y momento. Por tanto, la radiación que capta un sensor en el rango del espectro que estamos considerando depende de la que reflejan las distintas cubiertas terrestres. En el caso del espectro visible, ese comportamiento distinto de los

objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que llamamos color:

- a. Un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto. Dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía solar en el azul, siendo mayor la absorción en el resto.
- b. Será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en las otras.

En ese sentido, a partir de medidas de laboratorio se pueden obtener unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres, que suelen denominarse *signaturas* o *firmas espectrales* (figura 8).

- a. La nieve presenta una reflectividad alta y constante en todas las bandas del visible (de ahí su color blanco), ya que refleja la mayor parte de la energía incidente en esas longitudes de onda.
- b. El agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, ascendiendo esta absorción hacia longitudes de ondas mayores.
- c. La vegetación presenta unos comportamientos muy cromáticos, con valores bajos de

reflectividad en el visible, más elevados en el infrarrojo cercano y menores en el infrarrojo medio.

d. Los materiales de construcción presentan un comportamiento similar en las distintas longitudes de onda.

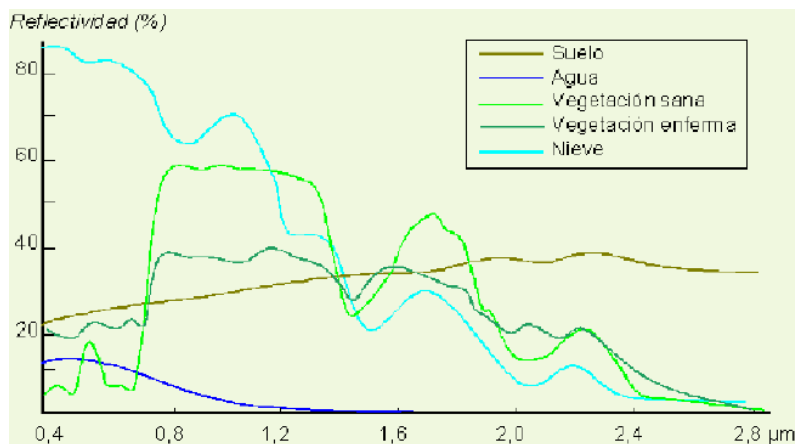


Figura 8. Signaturas espectrales

FORMACION DE UNA IMAGEN SATELITAL

Los satélites de observación de la tierra poseen sensores calibrados para codificar en rango de valores de números enteros (entre 0 y 255) (Figura 10 a) la cantidad de energía que es reflejada por unidad de superficie (reflectancia) y traducirlos en una imagen digital (Figura 10 b). Cada píxel, que es la unidad mínima de muestra de la superficie terrestre (x,y), tiene un valor de reflectancia de acuerdo al elemento o elementos presentes dentro del mismo. En cada pasada del sensor, se obtienen imágenes de un mismo sitio en diferentes segmentos del espectro llamadas “bandas espectrales”, donde los valores bajos de reflectancia se corresponden con tonos oscuros y los valores altos con tonos claros. De esta forma, vinculando la firma espectral con la región captada por la banda (azul, verde, rojo, infrarrojo, etc.) es posible interpretar las imágenes e identificar los elementos de la cobertura terrestre (Figura 10 c)^{iv}. Es decir, recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo en una cierta gama de longitudes de onda, y para transformarla en una señal que permita localizar, registrar y digitalizar la información en

forma de fotografías o imágenes numéricas grabadas en cinta magnética compatibles con una computadora. Los captadores pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multispectral (MSS), radares y láseres. Estos aparatos generan imágenes analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de la superficie terrestre en las longitudes de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta, visible, infrarrojo próximo, infrarrojo técnico, hiperfrecuencias) con el fin de reconocer la variada gama de formas y objetos. En conclusión, esta información que es registrada por los sensores, mide la cantidad de energía reflejada o emitida por los objetos naturales que componen el paisaje (Sacristán, 2006). Debido a su formato digital y a los valores de reflectancia almacenados, sobre éstas imágenes se pueden aplicar procedimientos matemáticos y estadísticos para la clasificación automática de grandes superficies. Mediante el uso de programas especiales de computadora, las imágenes originales son procesadas a través de diversos procedimientos para asignar a cada *pixel* una categoría de uso y cobertura de la tierra^v.

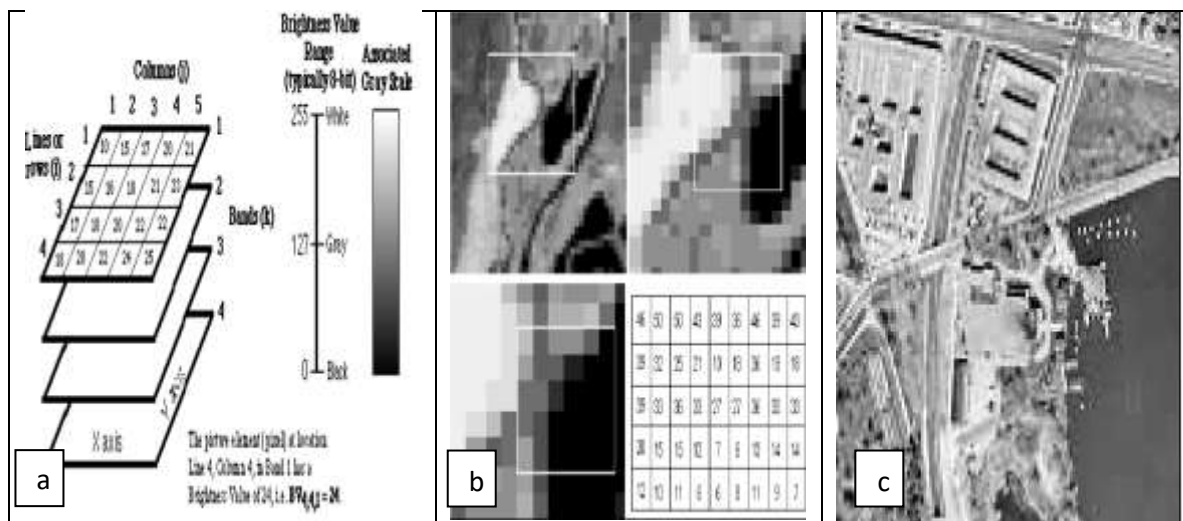


Figura 9. Formación de una Imagen Satelital

Entonces, una imagen satelital no es más que una fuente de datos consistente en una imagen de matriz bidimensional. Un dato particular (x,y) representa un elemento de la escena sobre la superficie de la tierra, llamado elemento imagen y representado como un píxel (Picture element o digital number) o simplemente Nivel Digital (ND) (Chuvieco, 2010). Por tanto, como una imagen satelital es una disposición matricial numérica, entonces es posible realizar análisis estadísticos en las mismas, independientemente del sensor del cual provenga la información.

CÁLCULOS ESTADÍSTICOS E HISTOGRAMAS DE LA IMAGEN

Inicialmente, conviene distinguir el nivel digital (ND) de cada píxel adquirido por el sensor de su nivel visual (NV), que corresponde a la intensidad de gris o color con el que se visualiza ese píxel en el monitor. Normalmente, los NV son efímeros, ya que sólo se utilizan para operaciones de realces e interpretación visual de la imagen, mientras los ND forman la base para las operaciones de interpretación digital,

especialmente cuando se intentan relacionar la información adquirida por el sensor con algún parámetro físico, como por ejemplo la reflectividad o la temperatura.

Generalmente la organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la figura 11. Como se observa, se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a la posición geográfica (absoluta o relativa) de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación Norte-Sud se obtiene variando las filas de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas (*row, line*), mientras el recorrido en el sentido de las columnas (*column*) indica la disposición Oeste-Este de la imagen. En esta matriz, el origen de coordenadas se sitúa en la esquina superior-izquierda (línea 1, columna 1), en lugar del borde inferior-izquierdo, como ocurre en cualquier eje cartesiano. Esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de norte a sur, de acuerdo a la traza del satélite. La tercera dimensión corresponde a las bandas espectrales del sensor: 36 para el MODIS, 7 para el ETM+, o 5 para el AVHRR (Chuvieco, 2010).

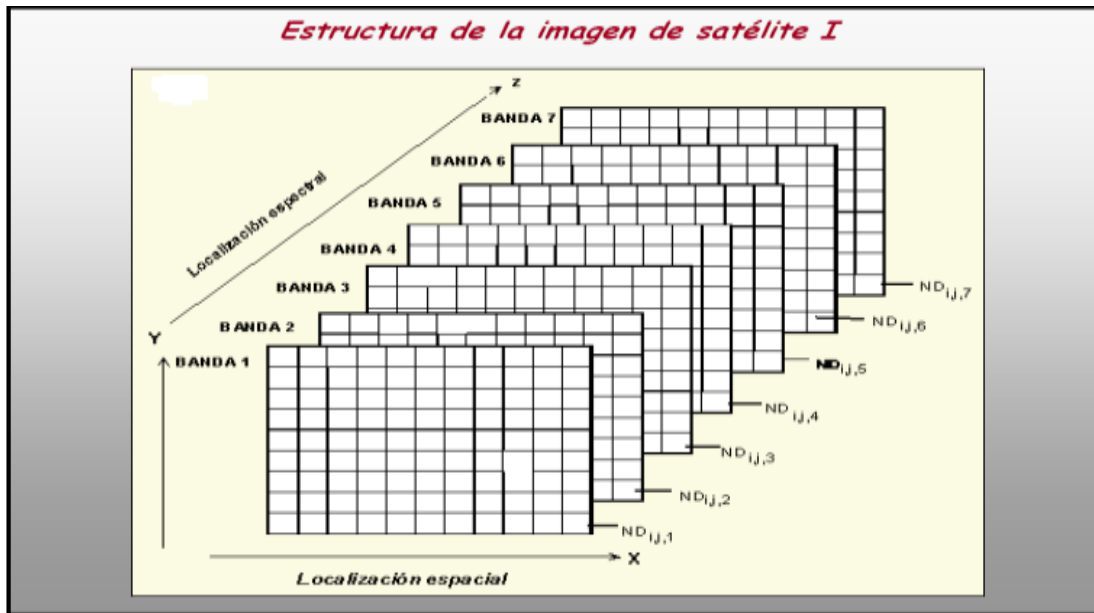


Figura. 10. organización de datos en una imagen digital

Considerando ese carácter matricial de cualquier imagen, son fácilmente comprensibles las posteriores transformaciones aplicadas sobre ellas. Éstas son, en muchos casos, operaciones estadísticas comunes a otras matrices numéricas, mientras en otros son más específicos de la interpretación de datos de satélite. Por ejemplo, en una imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación típica en cada una de las bandas), cambiar su orientación geométrica (rotación de la matriz), realizar combinaciones aritméticas entre bandas (p. ej., cocientes), sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante (componentes principales), o discriminar grupos de ND homogéneos dentro de una matriz (clasificación).

Al igual que cualquier variable estadística, la operación más elemental que podemos realizar con una imagen es describir su tendencia central y dispersión. En otras palabras, conocer cuál es la tendencia general de la radiancia detectada en cada banda, y qué nivel de homogeneidad existe entre los píxeles que la componen. Para ello, cualquier programa de Análisis Digital de Imágenes (ADI) facilita el cálculo de las estadísticas elementales de la imagen, al menos de las medidas de tendencia central

y dispersión más habituales. Recordando aspectos de estadística descriptiva, la media puede definirse como:

$$ND_k = \frac{\sum_{i=1,n} ND_{i,k}}{n_k}$$

Para las k bandas que forman la imagen, y los píxeles que la componen, y la desviación típica como:

$$sk = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,n} (ND_{i,k} - ND_k)^2}{nk}}$$

Estas medidas nos ofrecen una primera valoración sobre el carácter de cada una de las bandas y su grado de homogeneidad. Por ejemplo, de una imagen Landsat, en la siguiente tabla 1, se observa que la banda 1 ofrece el ND más bajo de los mínimos de todas las bandas, lo que puede ser consecuencia del efecto de dispersión atmosférica. Los ND medios son más altos para las bandas 4 y 5, bastante saturadas a juzgar por los valores mínimo y máximo, muy próximos a 0 y 255, respectivamente. La banda 5 acoge también la mayor heterogeneidad, aunque no muy distinta de la banda 4. Por su parte, la banda 1 ofrece la menor dispersión. Lógicamente, estos

valores numéricos se relacionan con los parámetros de calibración del sensor y con las regiones del espectro que abarca. Como resulta evidente, la banda

5 es la más sensible a alteraciones de radiancia, mientras la 1 ofrece el peor contraste en escena.

Tabla 1. Estadísticas elementales de una imagen Landsat

	Máximo	Mínimo	Media	Desv. Típica
Banda 1	100	48	69,26	8,87
Banda 2	90	27	55,63	10,8
Banda 3	120	22	48,5	15,25
Banda 4	160	10	91,13	22,87
Banda 5	170	8	91,86	23,46
Banda 7	135	5	62,21	19,84

Además de estos valores medios, también resulta de gran interés contar con el histograma de frecuencias de cada banda (número de píxeles que cuentan con un determinado ND), que nos informa sobre cómo se distribuyen los ND en una determinada imagen. Con el objeto de facilitar la representación el histograma, las frecuencias absolutas suelen convertirse en relativas, de acuerdo a la siguiente formula.

$$FR(ND_i) = \frac{F(ND_i)}{\sum_{i=1,m} F(ND_i)}$$

Esto es, la frecuencia relativa (FR) de un determinado ND (p. ej., el valor 120) se calcula como el cociente entre el número de píxeles que presentan ese valor ($F(ND_i)$) y el total de píxeles de la imagen. Esa proporción sirve para escalar el histograma, a partir de la frecuencia relativa mayor.

Varios autores han puesto de relieve el interés del histograma para realizar una primera valoración de la imagen. Su localización nos permite deducir la tonalidad dominante de cada banda; su anchura está relacionada con el contraste, mientras la presencia de picos relativos puede ser testigo de determinadas clases de cobertura. Por ejemplo, para el caso de la imagen mostrada en la imagen de la tabla 1 los histogramas de los ND de la figura 51 permiten realizar algunos comentarios interesantes. Por un lado, todos ellos ocupan sólo un pequeño margen del rango de variación ofrecida por el equipo de visualización (0 a 255). Esto implica la conveniencia

de ajustar, de alguna forma, la variación inicial a la máxima permitida, lo que supondrá una mejora del contraste. Entre las bandas aquí incluidas (figura 12), la 4 y la 5 confirman como las que ofrecen mayor dispersión. Recuérdese que poseen la desviación típica más alta, mientras la 1 y la 2 presentan el histograma más estrecho. En cuanto al significado de los distintos picos de frecuencia, resulta muy complicado identificar las cubiertas que los originan. Puede resultar más sencillo, en otros casos.

REALCES Y MEJORAS VISUALES

Los procesos de realce de imágenes consisten de una serie de técnicas cuyo objetivo es mejorar la apariencia visual de una imagen, ya sea en contraste, ruido, escala de grises, distorsiones, luminosidad, falta de nitidez, etc., o bien convertir o mapear la imagen a una mejor forma para su análisis. El principal objetivo del realce de la imagen es procesar una imagen de tal manera que el resultado obtenido sea el apropiado para una aplicación específica (Escalante, 2006). Estas técnicas de realce, son usadas a menudo para la extracción de elementos, estudio y localización de áreas que cumplen determinados criterios y derivación de información útil de las imágenes. Las técnicas usadas en el realce de imágenes dependen de:

- Los datos originales: diferentes bandas de diferentes sensores-satélites permiten detectar diferentes características. El usuario debe conocer los parámetros específicos de esas imágenes antes de realizar el realce.

- El objetivo de las expectativas del usuario: dependiendo de la finalidad del usuario se fijan diferentes secuencias de técnicas de realce.

- La experiencia del usuario: el tener mayor o menos conocimiento en la técnica del realce permitirá que los resultados sean más o menos satisfactorios con

respecto a los objetivos. Existen tres tipos de realce: radiométricos, espaciales y espectrales (García, 2009).

REALCES RADIOMETRICOS O DE EXPANSION DEL HISTOGRAMA

Los realces radiométricos trabajan sobre los valores individuales de cada uno de los píxeles que componen la imagen. Su objetivo principal es hacer más interpretable una imagen para identificar los objetos o cubiertas presentes en ella (figura 15).

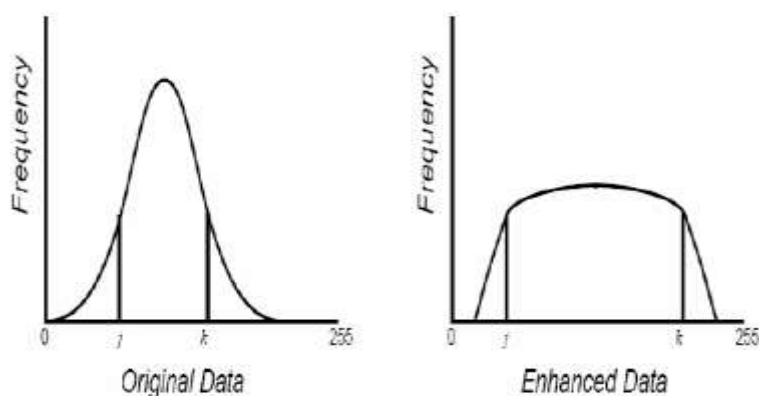


Figura. 11. Histograma de datos realzados radiométricamente.

Los realces radiométricos no modifican los ND originales de los píxeles, sino que solamente se hacen cambios en la correspondencia entre los ND y los valores de brillo o NV (nivel visual) almacenados en la tabla de referencia de color (CLUT) utilizada para la visualización de la imagen.^{vi} Este realce trata de optimizar el máximo las posibilidades de visualización de la información que ofrece el dispositivo de despliegue del programa. Existen múltiples tipos de realce radiométrico (García, 2009; De la Riva, 2009, Chuvieco, 2010).

- Lineal
- No lineal
- Desviaciones estándar
- Ecualización del histograma

Cada banda puede utilizar o necesitar un realce radiométrico diferente debido a las diferentes respuestas espectrales de los elementos en las diferentes bandas. A continuación, se detallan los dos tipos de realce más conocidos: Expansión lineal y ecualización del histograma.

Expansión lineal

Es la forma más elemental de ajustar el contraste de la imagen al permitido por el equipo de visualización. Basta diseñar una CLUT en la que el ND mínimo y máximo de la imagen tengas asociados un NV de 0 a 255, respectivamente, distribuyendo linealmente el resto entre ambos márgenes. En la figura 13a aparece la imagen anteriormente presentada tras aplicarle una expansión lineal de contraste. Como se observa, la imagen aparece ahora más nítida, mejor contrastada

ya que su histograma ofrece una distribución más equilibrada porque las colas se han fijado en los extremos del rango y los valores intermedios están mejor repartidos. La representación gráfica del CLUT

supone una línea de mayor pendiente que la anterior, comprendida ahora entre los ND mínimo y máximo de la imagen.

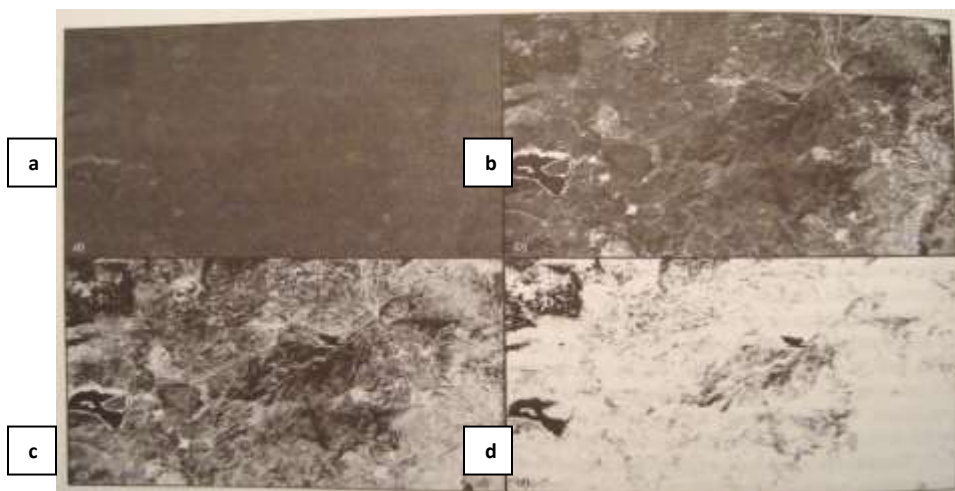


Figura 13. Diversos realces del contraste sobre la banda 1 (a) sin realce; (b) realce lineal; (c) realce frecuencial; (d) realce espacial sobre áreas de baja radiancia

Para llevar a efecto esta transformación se precisa encontrar una función lineal, que ajuste la relación ND – NV. Esta función nos permite construir una CLUT apropiada, en la que se sustituye la correspondencia NV = ND, por una nueva, en donde los NV ocupen el rango completo de visualización y no solo el que ofrece la imagen original. En definitiva, se trata de establecer una ecuación lineal del siguiente tipo.

$$NV = a + b ND \quad \{5\}$$

En donde cada NV es función de los ND originales, tras aplicarles dos constantes, denominados **a**, sesgo **b**, ganancia. Para conocer el valor de **a** y **b**, basta aplicar un sencillo sistema de ecuaciones. Ya que sabemos que el mínimo y el máximo ND deben igualarse a 0 y 255, respectivamente.^{vii}

Se puede expresarse:

$$0 = a + b ND_{\min}$$

y

$$255 = a + b ND_{\max}$$

Sustituyendo en ambas fórmulas, los cocientes se calculan como:

$$b = 255 / (ND_{\max} - ND_{\min}) \quad \{6\}$$

y

$$a = - 255 * ND_{\min} / (ND_{\max} - ND_{\min}) \quad \{7\}$$

Aunque la transformación puede expresarse en un solo término como:

$$NV = ((ND - ND_{\min}) / (ND_{\max} - ND_{\min})) * 255 \quad \{8\}$$

En lugar de igualar el ND_{max} y el ND_{min} a los valores máximo y mínimo, respectivamente, también pueden extraerse otros valores menos extremos, como los percentiles del 95 y 5 %, o un cierto número de desviaciones típicas por encima y por debajo de la media. Esto permitirá que tengan menos influencia

posibles valores extremos y/o anómalos que presente la imagen.

Tabla 2 Expansión lineal de la imagen ejemplo (media $\pm$ 2 S)

ND	NV	ND	NV	ND	NV	ND	NV
0	0	65	154	130	255	195	255
5	0	70	175	135	255	200	255
10	0	75	196	140	255	205	255
15	0	80	217	145	255	210	255
20	0	85	238	150	255	215	255
30	8	95	255	160	255	225	255
35	29	100	255	165	255	230	255
40	50	105	255	170	255	235	255
45	71	110	255	175	255	240	255
50	91	115	255	180	255	245	255
55	112	120	255	185	255	250	255
60	133	125	255	190	255	255	255

El ejemplo siguiente puede ayudar a comprender mejor el proceso. Para obtener la expansión lineal del contraste antes presentada, se partió de las medidas estadísticas de la banda de la tabla 2 que sirvieron para explicar las fórmulas anteriores. En esta caso, se estableció un umbral mínimo y máximo a partir de la media $\pm$ dos desviaciones típicas. En consecuencia, el rango a expandir se situó entre 28 y 89 ND.

$$b = 255 / (89 - 28) = 4,18 \quad \{9\}$$

$$a = - 255 * 28 / (89 - 28) = -117,05 \quad \{10\}$$

Con estos valores puede construirse la CLUT que aparece en la tabla 2 de acuerdo a la siguiente expresión.

$$NV = ENT (-117,05 + 4,18 ND)$$

La expresión ENT indica el resultado se redondea al número más cercano. Además, NV = 0 cuando NV < 0, y NV = 255 cuando NV > 255, puesto que la tabla de color solo puede estar formada por números enteros entre 0 y 255. Esta tabla puede representarse gráficamente (figura 18), de forma similar a cualquier recta de regresión (Chuvieco, 2010).

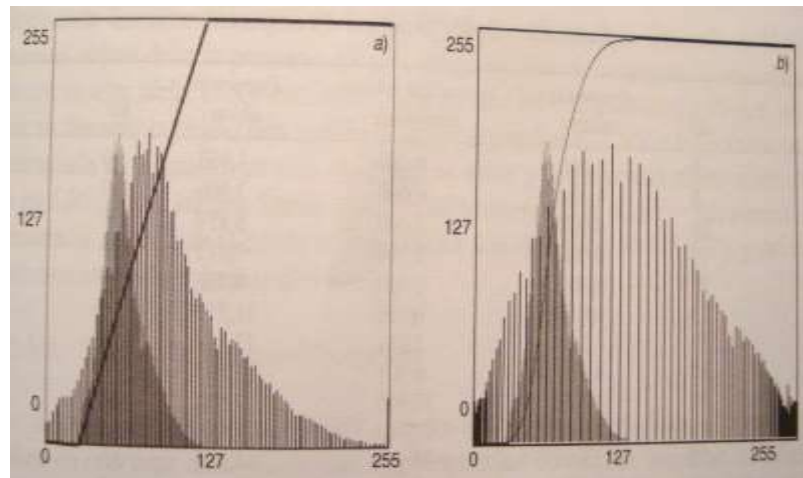


Figura 13. Modificaciones en el histograma de la imagen y el perfil de la CLUT tras la expansión: a) lineal, b) frecuencial. El histograma original aparece al fondo en gris.

Ecualización del histograma

La expansión lineal del contraste no tiene en cuenta la distribución de los ND en una imagen, sino sólo en sus extremos. Parece lógico, sin embargo, tener en cuenta la distribución real de valores, aplicando una expansión proporcional a la frecuencia de aparición de cada uno de los ND. Esto implica generar una CLUT en la cual cada NV tenga, aproximadamente, el mismo número de ND de la imagen. En otras palabras, aquellos ND con mayor número de píxeles serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor rango de NV. Suele ofrecer mejores resultados que la expansión lineal (figura 14a), especialmente si la imagen original presenta una distribución gaussiana.

Como se observa en la figura 13c, la ecuación del histograma ha supuesto un realce más equilibrado, mostrando menos contraste entre las zonas de alta reflectividad y las de baja. A consecuencia de este realce, el histograma de la imagen ofrece una mejor distribución de los datos (figura 14b). También se evidencia que el perfil gráfico de la CLUT no es recto sino curvilíneo, similar al que tendría el histograma acumulado de los ND originales (Chuvieco, 2010).

Para la parte práctica, el programa para manejo de imágenes de satélite ERDAS IMAGINE presenta varias opciones para realizar diferentes tipos de realces. La siguiente figura 15 muestra las opciones que tiene ERDAS para los procesos de realce.

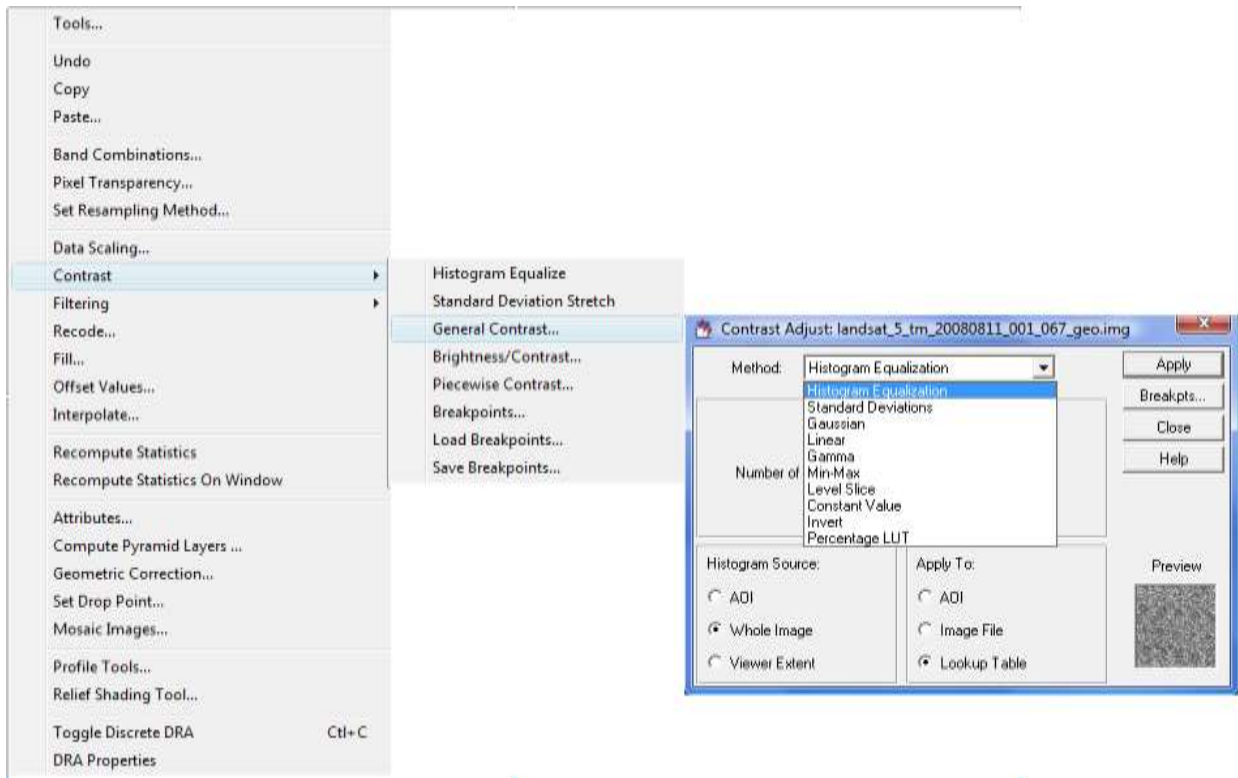


Figura 14. Diferentes opciones de realce o contraste que tiene el programa ERDAS.

Realces espaciales

Los realces espaciales se aplican en el análisis digital de imágenes de satélite para matizar o aislar distintos componentes de la imagen que resultan de interés. Se basan en el análisis de frecuencia espacial y buscan

reforzar o suavizar los contrastes espaciales entre píxeles contiguos (es decir, remarca o suaviza las diferencias entre píxeles vecinos) (figura 16) (García, 2009). Se define a la frecuencia espacial como el número de cambios en los valores de brillo por unidad de distancia para cualquier parte de una imagen.

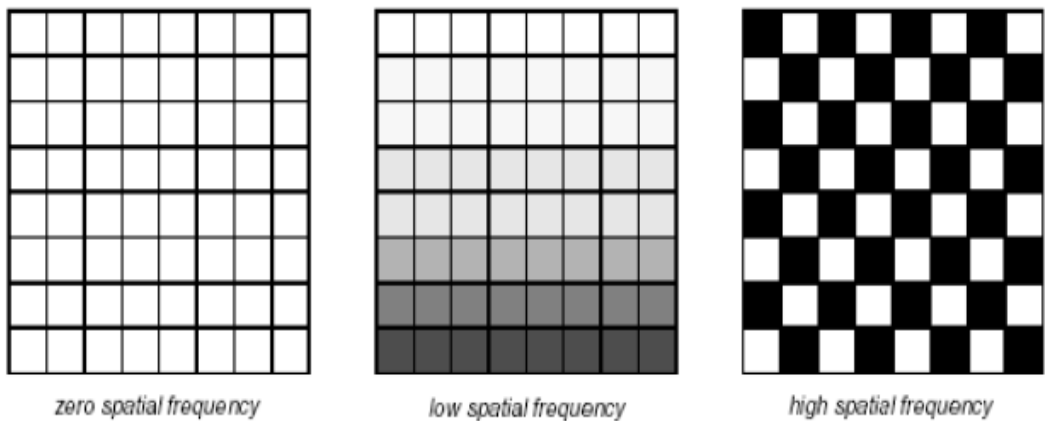


Figura. 15. Diferentes frecuencias espaciales en tres imágenes de un mismo tamaño

Esto implica que existen diferencias con respecto a los realces espectrales:

- Los realces espaciales, a diferencia de los espectrales sí tienen en cuenta los valores radiométricos de los píxeles contiguos.
- El análisis de las relaciones espaciales implica la modificación de los ND originales. Esta modificación se realiza en función de los valores de los píxeles vecinos.

La aplicación de filtros espaciales digitales se realiza mediante la utilización de una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF) o Kernel (García, 2009). El objetivo principal del filtraje es que los ND de la imagen se asemejen o diferencien más de los píxeles que les rodean. Al trazar un perfil radiométrico de una imagen se observan numerosos picos y valles, a consecuencia de cambios espaciales bruscos en las características radiométricas de la cubierta del suelo como en cualquier serie estadística, esa línea podría considerarse como una suma de dos componentes: las bajas frecuencias, que indicarían la tendencia general de la variación, y las altas frecuencias, que señalarían los contrastes más locales. Por tanto, el objetivo principal de un filtraje digital es la de retener unas u otras frecuencias, en función del objetivo que persigue el intérprete. Se denominan, respectivamente, filtros de paso bajo y paso alto. Hay dos procedimientos para llevarlos a cabo:

- a. Aplicar a todos los píxeles de la imagen una operación matemática que tenga en cuenta el valor de los inmediatos (filtros en el dominio espacial).
- b. Retener ciertos componentes de las frecuencias de la imagen.

Los primeros resultan bastante sencillos de comprender y aplicar, mientras que los segundos son

más complicados ya que requieren de las transformadas de Fourier.

La finalidad de los filtrajes son la de mejorar la visualización de las imágenes, ya sea para eliminar valores anómalos o para resaltar rasgos lineales de interés. El filtraje implica modificar los ND originales, y no solo la forma en que se representan visualmente los NV almacenados en la CLUT, sino también los ND de la imagen.

La forma de realizar este proceso de filtraje, es la de aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF) también llamado por otros autores *Kernell*. Esta matriz puede tener un tamaño variable en función del número de píxeles vecinos que queramos aplicar en el proceso. Lo habitual es que se trate de una matriz de 3 x 3, que se aplica sucesivamente a todos los píxeles de la imagen. Puede disponerse también de matrices de filtraje mayores, 5 x 5, 7 x 7, etc. Cuanto mayor será esta, el efecto de suavizado o realce espacial es más intenso, al considerar como vecino un mayor número de píxeles.

El procedimiento matemático de filtraje consiste en relacionar cada píxel con sus vecinos, de acuerdo a unos coeficientes determinados por el usuario. En el caso de una matriz de 3 x 3 CF, la fórmula para obtener el ND filtrado sería:

$$ND'_{ij} = \frac{\sum_{p=-1,1} \sum_{q=-1,1} ND_{i+p,j+q} CF_{f+p,c+q}}{\sum_{p=-1,1} \sum_{q=-1,1} CF_{f+p,c+q}}$$

Donde ND $_{ij}$ indica el ND original del píxel $_{ij}$; ND' $_{ij}$, de salida para ese mismo píxel; CF, el coeficiente de filtraje, y f y c la fila y columna central de la matriz de filtraje. El resultado de esta fórmula se aproxima al entero más cercano. El proceso abordado en un filtraje puede ilustrarse con un sencillo ejemplo. Se pretende aplicar un filtro de paso bajo a una pequeña imagen de 5 x 6 píxeles (fig. 17).

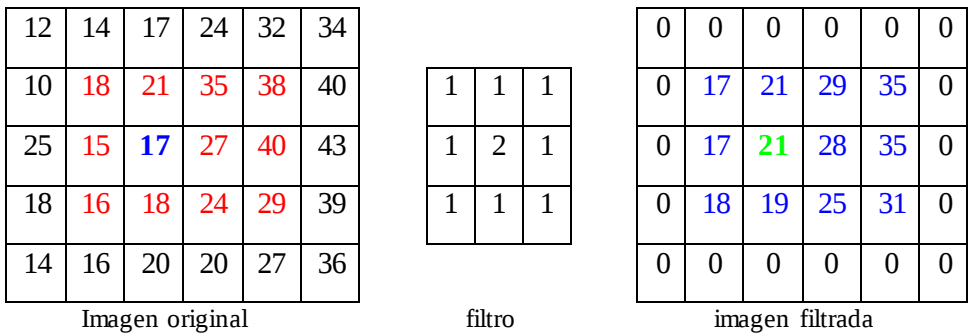


Figura 16. Ejemplos de filtraje

Se constata que el área filtrada se limita a los píxeles centrales. Los píxeles de borde no se afectan por el proceso, puesto que no tienen los 8 vecinos necesarios para realizar el cálculo. Esta característica es común a cualquier filtraje, ya sea de paso bajo o alto. En una matriz de 3 x 3 se pierden la primera y última fila y columna. El siguiente cálculo con la fórmula 12 muestra el proceso para la obtención del ND filtrado (Chuvieco, 2010).

$ND'_{3,3} = (18+21+35+15+2 \times 17+27+16+18+24)/10 = 20,8 \rightarrow 21$

Filtros de paso bajo

Tiene por objetivo suavizar los contrastes espaciales presentes en la imagen. En breves palabras, se trata de asemejar el ND de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la

escena (De la Riva, 2009). En términos visuales, esto supone que la imagen filtrada ofrece perfiles menos nítidos y más difuminados. Estos filtros de paso bajo (*low pass filtering*) retienen las bajas frecuencias y, por tanto, tienden a destacar el componente de homogeneidad en la imagen, subrayando la variación regional de los ND. También se utilizan para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, fruto de un defecto en la adquisición o recepción de datos. Así mismo, se ha empleado para reducir la variabilidad espacial de alguna categoría, como paso previo a la clasificación. En este caso, se pretende atenuar el denominado “ruido de la escena”, producido por las zonas altamente heterogéneas en relación con la resolución espacial del sensor. El filtro de paso bajo puede obtenerse a partir de diversas matrices de filtraje. Algunos de los más habituales son:

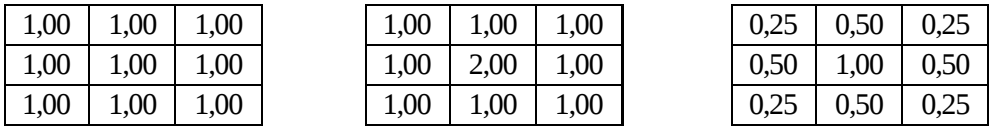


Figura 17. Diversas matrices de filtraje.

La primera es un simple promedio de los 9 píxeles que componen la ventana de filtraje, mientras las dos siguientes ponderan un poco el valor central para evitar una excesiva pérdida de detalle (Chuvieco, 2010).

Filtros de paso alto

Por su parte, los filtros de paso alto (*high pass filtering*) se dirigen a realzar los componentes de alta frecuencia (García, 2009): esto es, aquellas áreas de alta variabilidad, donde el contraste espacial es intenso. Este tipo de filtros pretende aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. En términos espaciales, esto supone remarcar digitalmente los contrastes espaciales entre píxeles

vecinos, enfatizando los rasgos lineales presentes en la imagen, como carreteras, parcelas, o accidentes geológicos. En definitiva, se intenta reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando cualquier discontinuidad.

Varios métodos pueden conseguir este objetivo. El más sencillo pasa por restar de la imagen original la obtenida por un filtro de paso bajo. La razón es bastante obvia: si lo que se pretende es aislar los componentes de alta frecuencia (alta variabilidad) basta restar de la imagen original aquellos correspondientes a la baja frecuencia, con lo que sólo quedarían los requeridos, que se añadirían a la imagen original. En suma:

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} - ND_{L,i,j}) \quad \{11\}$$

Donde ND' corresponde al ND de salida, ND al original, y ND_L al resultado de un filtro de paso bajo. Más común es, sin embargo, emplear matrices de filtraje, similares a las anteriormente analizadas. En

este caso, los CF se disponen de tal modo que se refuerza al contraste entre el píxel central y los vecinos. Dos matrices frecuentemente utilizadas son (Chuvieco, 2010):

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Figura 18. Matrices de refuerzo.

Ambos se derivan del análisis de gradientes de cambio en la imagen. El segundo filtro, denominado Laplaciano, se recomienda par el realce de rasgos lineales en áreas urbanas o rasgos geológicos. También son utilizados los filtros direccionales con el propósito de reforzar aquellas líneas que sigan determinadas orientaciones. Basta disponer adecuadamente los CF, distribuyéndose en sectores de la matriz. Algunos ejemplos de matrices de filtraje para conseguir este análisis direccional son (De la Riva, 2009):

Norte	Sur	Este	Oeste
1 1 1	-1 -1 -1	-1 1 1	1 1 -1
1 -2 1	1 -2 1	-1 -2 1	1 -2 -1
-1 -1 -1	1 1 1	-1 1 1	1 1 -1

Sureste	Noroeste	Suroeste	Noreste
-1 -1 1	1 1 1	1 -1 -1	1 1 1
-1 -2 1	1 -2 -1	1 -2 -1	-1 -2 1
1 1 1	1 -1 -1	1 1 0	-1 -1 1

Figura 19. Matrices de filtraje para realizar análisis direccional.

Al igual que para los realces radiométricos, el programa ERDAS IMAGE tiene diferentes métodos para realizar los realces espaciales mediante

filtros. Existen tres posibilidades de aplicar filtros espaciales en ERDAS (figura 20).

1. Viewer→Raster→Filtering 2. Menu Interpreter→Spatial Enhancement 3. Model Maker

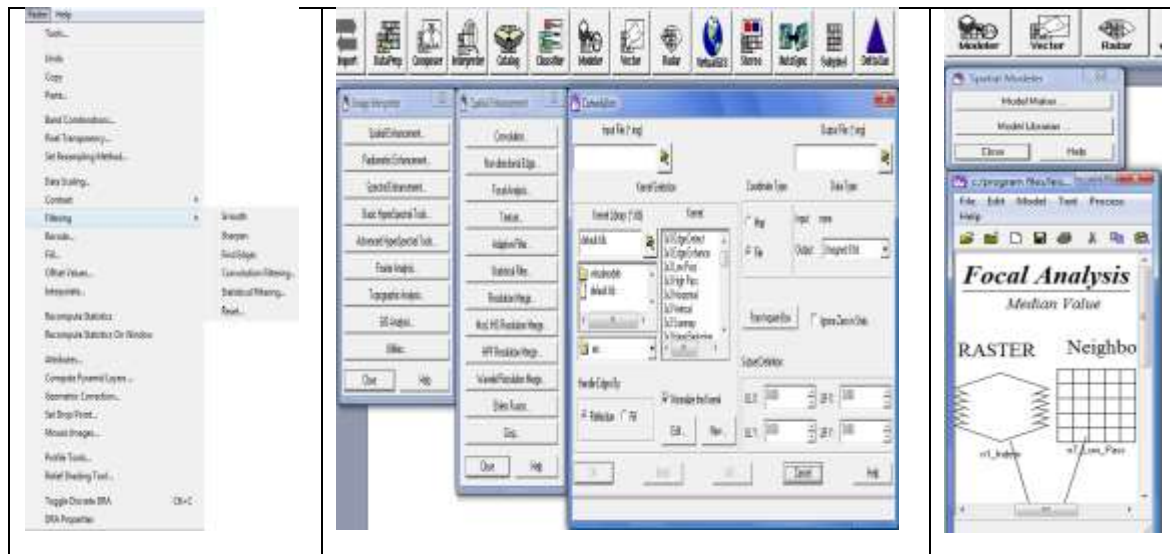


Figura 20. Diferentes tipos de filtraje que tiene ERDAS IMAGINE

Realces espectrales

Por último, tenemos los realces espectrales que son técnicas de mejoras o realces que requieren más de una banda para ser aplicadas. Son utilizadas para comprimir bandas de información que son similares y extraer nuevas bandas de datos que sean más interpretables para el ojo humano. Aplican algoritmos y transformaciones matemáticas y desplegar un mayor rango de variedad de información en los tres cañones de color disponibles (R, V, A). Entre los tipos de realce espectral o de transformación se tienen (ERDAS, 2002):

- Análisis de componentes principales
- Transformación Tasseled Cap
- Transformaciones IHS
- Índices
- Componente principal inverso
- Componentes independientes
- Ajuste de correlación
- RGB a IHS
- IHS a RGB
- Color natural
- Reflectancia Landsat 7
- Mixtura espectral

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ayesa A. y López R. (1998): *Teledetección Aplicada a la Evaluación de Recursos Naturales*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Bariloche. Laboratorio de Teledetección – SIG. Área de Investigación en Recursos Naturales. III Curso. 8 al 12 de Junio de 1998. 43 p. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/bariloche/info/catalog/Teledeteccion/ManuCurso98.pdf>

Chuvieco E. (1996): *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ra. Ed. RIALP S.A Madrid, España. 568 p.

Chuvieco E. (2010): *Teledetección Ambiental*. 1ra. Ed. Planeta S.A Barcelona, España. 590 p.

De la Riva J. (2009): *Fundamentos de Teledetección*. Apuntes de curso. Tecnologías de la Información Geográfica Para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Universidad de Zaragoza. España. 54 p.

ERDAS (2002): *ERDAS FIELD GUIDE*. Copyright by ERDAS LLC. Fifth edition translation. Leica Geosystems GIS&Mapping Division. Atlanta USA. 759 p.

Escalante B. (2006): *Procesamiento Digital de Imágenes*. Apuntes del curso. 17 p. Disponible en: <http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Capitulo4.pdf>.

Fernández T. (2008): *Introducción a la Teledetección*. 2º Curso de IT en Topografía. EPS Jaén. Tema 1. 27/02/2008. Disponible en: http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/tel/tel_tfc_archivos/Tema1.pdf

García A. 2009 *Tratamiento digital de las imágenes de satélite: realces, corrección radiométrica, extracción de parámetros físicos y transformaciones aplicadas a las imágenes*. Apuntes de curso. Tecnologías de la Información Geográfica Para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Universidad de Zaragoza. España. 43 p.

<http://www.innovanet.com.ar>: Disponible en <http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/teledete.htm>

ⁱ (<http://www.innovanet.com.ar/>).

ⁱⁱ (<http://www3.udg.edu>; De la Riva, 2009; Chuvieco, 2010):

ⁱⁱⁱ (<http://ceagi.org/portal/>).

^{iv} (<http://www.portalplanetasedna.com.ar>)

^v (<http://www.portalplanetasedna.com.ar>)

^{vi} (<http://ocw.upm.es>)

^{vii} (<http://www.innovanet.com.ar>)