

101177

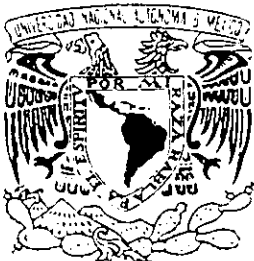
Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota

Tesis

Que para obtener el grado de
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
presenta
Ing. Alba Beatriz Vázquez González

Director de Tesis

Dr. Pedro Martínez Pereda



UNAM
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México




UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*Gracias a Dios que siempre está con nosotros.
A mamá, por ser ejemplo de trabajo y fortaleza.
A Enrique, compañero, amigo y espléndido esposo.
A mis ángeles.*

Agradecimientos

Deseo expresar mi más amplio agradecimiento a todas las personas que desde el inicio, desarrollo y conclusión de este trabajo me brindaron orientación y apoyo. Gracias al Dr. José Luis Palacio del Instituto de Geografía por posibilitar la adquisición del ILWIS 2.1 para windows, y por las facilidades brindadas para la adquisición de la imagen de satélite que fue utilizada en este estudio; al Dr. Jorge Lira del Instituto de Geofísica por su orientación al inicio de este trabajo; al Dr. Zoltán Vekerdy del Instituto Internacional del Estudio del Aeroespacio y las Ciencias de la Tierra, de Holanda, por la impartición del curso que me permitió iniciarme en los Sistemas de Información Geográfica, especialmente por su amplia disposición en la orientación a sus alumnos.

Agradezco al Dr. Pedro Martínez Pereda, por la dirección de la tesis y por su estímulo permanente. Gracias a mis amigos y colegas: M.I. Rosío Ruiz Urbano por contagiarme de su entusiasmo en el conocimiento de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica; al Ing. Miguel Angel González López por su valiosa orientación en la solución de diversos aspectos de cómputo; al M.I. Enrique César Valdez por su apoyo incondicional y por sus comentarios y sugerencias.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por ser una Institución tan extraordinariamente rica en recursos humanos, y porque en ella quien busca conocimiento siempre lo encuentra. Parte fundamental de este trabajo fue posible gracias al año sabático que la UNAM me concedió durante 1998.

Ciudad Universitaria, noviembre de 2000.

Alba Beatriz Vázquez González

Contenido

	Página
Introducción	1.1
Objetivo general	1.2
Objetivos específicos	1.2
Alcances del estudio	1.2
Capítulo 1	Fundamentos de la percepción remota 1.1
1.1	Modelos de radiación electromagnética. 1.2
1.2	Leyes de radiación. 1.5
1.3	Reflectancia 1.7
1.4	Emisividad 1.9
1.5	Percepción remota activa y pasiva 1.10
1.6	Irradiancia solar 1.11
1.7	La atmósfera 1.12
1.8	Cuantificación de efectos atmosféricos 1.14
1.9	Interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra 1.15
Capítulo 2	Sistemas de percepción remota: sensores y plataformas 2.1
2.1	Sensores pasivos y activos 2.1
2.2	Satélites para la observación de recursos terrestres 2.4
2.3	Satélites meteorológicos 2.5
2.4	Características de los sistemas sensores 2.5
2.5	Plataformas espaciales 2.8
Capítulo 3	Procesamiento y análisis de imágenes 3.1
3.1	Estructura básica de una imagen digital 3.1
3.2	Preprocesamiento y rectificación de imagen 3.3

		Página
3.3	Realce de imagen	3.7
3.4	Clasificación digital	3.16
Capítulo 4	Percepción remota en la evaluación de la calidad del agua	4.1
4.1	Panorama general de las aplicaciones de la percepción remota	4.1
4.2	Aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de la calidad del agua	4.3
Capítulo 5	Estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua de la presa El Batán	5.1
5.1	Características generales del área de estudio y del proyecto de la presa	5.1
5.2	Planteamiento teórico del estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán	5.4
5.3	Requerimientos de imágenes, <i>software</i> y <i>hardware</i> para el estudio	5.5
5.4	Metodología	5.5
5.5	Composiciones en color para la imagen original de 2800 km ²	5.5
5.6	Análisis espectral de la imagen	5.9
5.7	Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada	5.12
5.8	Conclusiones del estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán	5.13
	Conclusiones	6.1
	Glosario	G.1
	Referencias	R.1

Introducción

Las interacciones de la sociedad con la atmósfera, litosfera e hidrosfera se han incrementado extensamente, algunas veces para beneficio de la humanidad y el ambiente, sin embargo, frecuentemente con carácter adverso para éste. Estas interacciones se caracterizan por el incremento en la complejidad, diversidad, uso y mal uso de los recursos naturales, cada vez más limitados.

Este conflicto puede resolverse con un manejo cuidadoso de los recursos de la Tierra, que implica el conocimiento de su estado actual, distribución y dinámica. Para lograrlo se requiere que los datos del ambiente se recaben y almacenen permanentemente. De hecho, en mayor o menor medida estos datos se han colectado a través del tiempo mediante estudios de campo y se han tratado empleando técnicas cartográficas para la presentación de las características ambientales de uso del suelo, geología, topografía y muchos otros temas específicos. Estos datos sólo podían usarse en forma cualitativa y carecía de sentido la aplicación de modelos matemáticos para análisis espacial.

Los avances tecnológicos en computación motivaron el cambio paulatino en el escenario descrito, y gracias a ellos ahora se puede lograr el uso cuantitativo de mapas mediante la aplicación de bases de datos.

Sin embargo, la producción de mapas, ya sea en papel o en forma digital, es costosa en términos de tiempo y dinero, por lo que no es frecuente su revisión y actualización. Además, estos mapas sólo pueden cubrir un área limitada de la Tierra. Por el contrario, los sensores instalados en plataformas satelitarias pueden proporcionar datos de prácticamente toda la superficie de la Tierra.

Desde principios de la década de los 70's se han tomado cientos de imágenes terrestres todos los días. Las imágenes pueden usarse tanto para el estudio de los recursos no renovables de la Tierra (combustibles fósiles y minerales, por ejemplo), como para el estudio de los renovables (tales como bosques y cultivos). Las imágenes de satélite pueden procesarse para dar una localización precisa con respecto a la malla geodésica, de manera que puede describirse la posición y relaciones espaciales de las características terrestres. Las imágenes también contienen información relativa a otros atributos de la superficie terrestre como son temperatura y color, y cuando se usan secuencialmente pueden proporcionar datos temporales del área de estudio. La adquisición, procesamiento e interpretación de los datos proporcionados por los sensores de los satélites integran la tecnología de la *percepción remota*.

La cartografía (convencional o digital) puede combinarse con percepción remota en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG están basados en sistemas de almacenamiento de información en computadora, y se han diseñado específicamente para manejar conjuntos de datos e información no gráfica. Los paquetes de software de los SIG permiten realizar un análisis actual de datos espaciales, y pueden usarse para estudiar las interacciones de los procesos ambientales, predecir tendencias y modelar el resultado de diferentes decisiones.

Objetivo general.

El objetivo general que se planteó para el desarrollo de este trabajo es:

Analizar las posibilidades de aplicación de la percepción remota en la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales.

Objetivos específicos.

Asimismo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. *Estudiar los fundamentos teóricos de la percepción remota a través de los cuales es posible la adquisición de la imagen.*
2. *Estudiar los principios y las técnicas más usadas en el procesamiento y análisis de imágenes.*
3. *Investigar respecto a las posibilidades de aplicación de la percepción remota, particularmente en lo relativo a la evaluación de la calidad del agua.*
4. *Ejemplificar la utilidad de la percepción remota en la evaluación de la calidad del agua mediante un caso estudio.*

Alcances del estudio.

1. Se efectuó la investigación documental sobre el tema y sobre otros relacionados a través de la consulta en los acervos de las bibliotecas Enzo Levi (Conjunta de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería e Instituto de Ingeniería de la UNAM); de los Institutos de Geología y Geografía de la UNAM; y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Asimismo se efectuó la búsqueda de información a través de INTERNET.
2. Con respecto al estudio de técnicas usadas en el procesamiento y análisis de imágenes, se participó como alumna del curso "Introducción a los Sistemas de Información Geográfica -con aplicaciones en hidrología y manejo de cuencas-, mediante el ILWIS¹", impartido por el Dr. Zoltán Vekerdy, del Instituto Internacional del Estudio del Aeroespacio y las Ciencias de la Tierra, de Holanda, organizado por el Instituto de Geografía de la UNAM durante 1998.
3. Se estableció comunicación con algunos de los especialistas de nuestra comunidad universitaria, cuya línea de investigación es la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica, con la finalidad de conocer el estado del arte y vislumbrar el potencial de aplicación de esta tecnología en la evaluación de la calidad del agua.
4. Se estructuró el desarrollo de la investigación en cinco capítulos con la finalidad de integrar el informe correspondiente, que se presenta en este trabajo. En los primeros dos capítulos, titulados "Fundamentos de la Percepción Remota" y "Sistemas de Percepción Remota: Sensores y Plataformas", se sientan las bases teóricas de la investigación y a través de su estudio fue posible comprender la manera de obtener información acerca de los objetos situados sobre la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas espaciales, así como las características de los instrumentos usados para coleccionar la información.

En el Capítulo 3, "Procesamiento y Análisis de Imágenes", se estudia cómo usar el procesamiento de imágenes mediante una computadora, para extraer información de dichas imágenes para su análisis posterior.

¹ ILWIS: Integrated Land and Water Information System 2.1 para Windows.

Capítulo 1

Fundamentos de la Percepción Remota

La percepción remota (PR) es la técnica que permite obtener información, mediante sensores instalados en plataformas espaciales, de los objetos situados sobre la superficie terrestre. El proceso para la obtención de información a distancia de los objetos, está gobernado por las leyes de la física y es necesario tener una comprensión básica de algunas de estas leyes. Para que el sensor obtenga las características acerca del objeto remoto, es necesario que exista un flujo de información entre el objeto y el sensor. El medio por el cual se da este flujo entre la cubierta terrestre y el sensor es la radiación electromagnética. Los principales elementos en el proceso de colección de datos en la PR son: el objeto a ser estudiado, el sensor y la radiación electromagnética que hay entre ambos. En todas las etapas del proceso de colección de datos y análisis en PR, aparece la radiación electromagnética. Lo anterior se muestra en la Figura 1.1, donde las flechas indican el flujo de información en un sistema de PR.

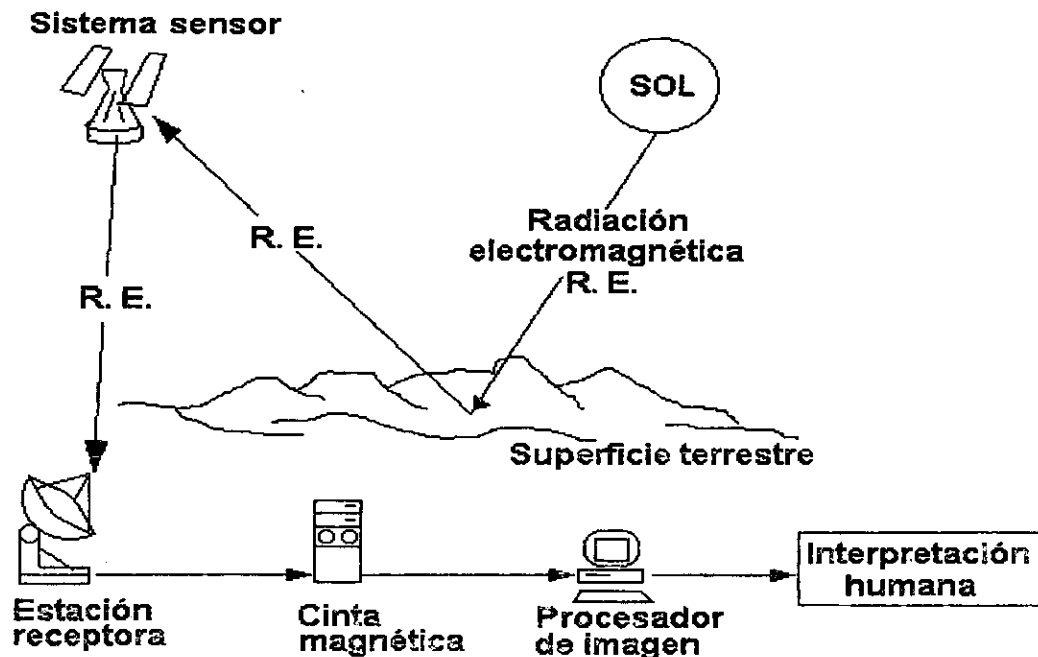


Figura 1.1. Flujo de información en un sistema de percepción remota.
Adaptada de Chuvieco Emilio, Fundamentos de Teledetección Espacial.

1.1. Modelos de radiación electromagnética.

Para explicar las propiedades de la radiación electromagnética se han propuesto dos modelos - aparentemente contrapuestos - : el de la teoría ondulatoria y el de la teoría del movimiento de partículas. De hecho, ambas teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo con ambos patrones.

1.1.1. Modelo ondulatorio.

Según el modelo ondulatorio, al transmitirse la energía electromagnética de un lugar a otro sigue un comportamiento armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: el eléctrico y el magnético⁵ (Fig. 1.2). Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F).

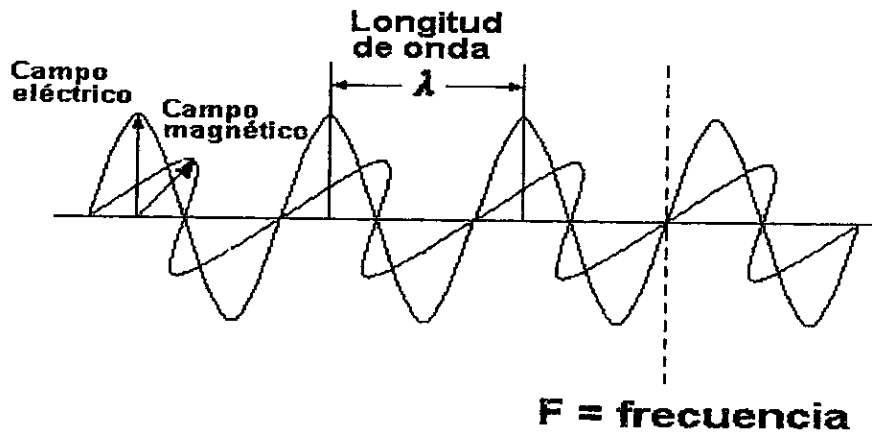


Figura 1.2. Esquema de una onda electromagnética.
Tomada de Lillesand-Klefer, Remote Sensing and Image Interpretation.

Longitud de onda.- La longitud de onda corresponde a los ciclos repetitivos del campo eléctrico en el espacio. Es la distancia ocupada por un ciclo completo o distancia entre dos picos sucesivos de una onda y se denota con (λ). La longitud de onda es medida en metros (m), centímetros (cm), micrómetros (μm) o nanómetros³ (nm).

Frecuencia.- Es el número de ciclos pasando por un punto fijo en la unidad de tiempo; se denota con F y es medida en s^{-1} .⁽³⁾

Velocidad. La velocidad de la onda a través del espacio es constante y está relacionada con la longitud de onda y la frecuencia, como se muestra en la ecuación 1.1⁽³⁾.

$$c = \lambda F \dots \dots \dots (1.1)$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s). De la ecuación (1.1) puede concluirse que a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por ello basta con mencionar sólo (λ) o F para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

1.1.2. Espectro electromagnético.

Como se ha establecido, cualquier tipo de energía radiante puede ser descrita por su longitud de onda o por su frecuencia. Es común que se use la longitud de onda para describir el espectro electromagnético (Fig. 1.3). Aunque la sucesión de valores de la longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

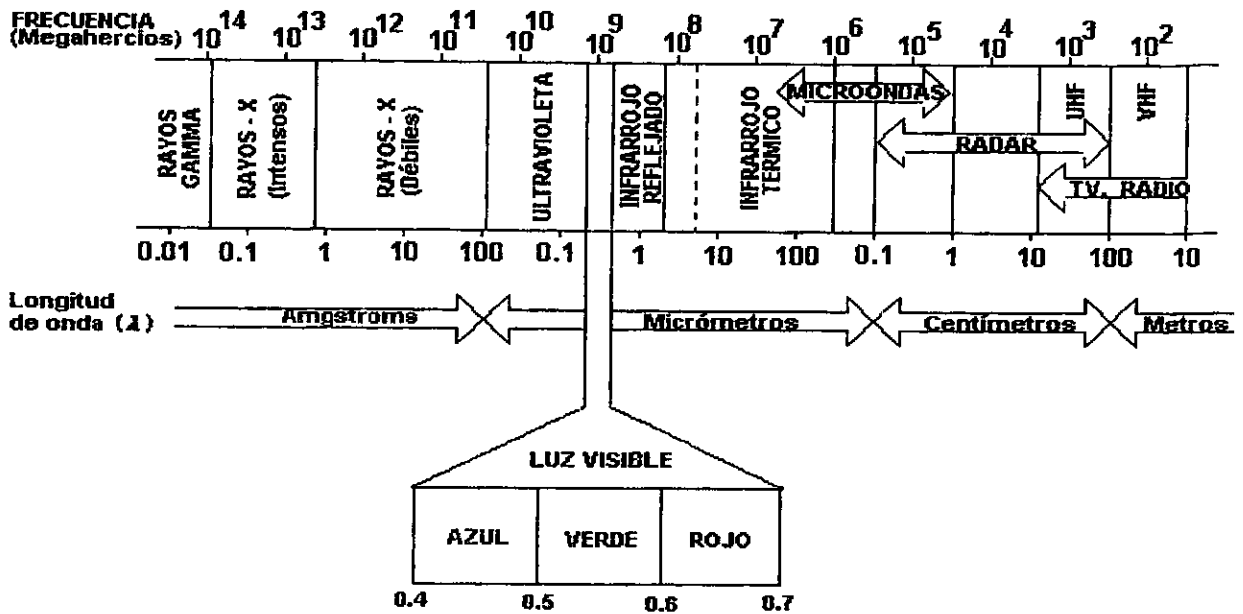


Figura 1.3. Espectro electromagnético.

Tomada de: Apuntes del Curso Agua y Futuro, Iniciación a la Teledetección. Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale.

El espectro electromagnético incluye desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos x en nm), hasta las kilométricas (telecomunicaciones en cm o m), como se observa en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Bandas o regiones del espectro electromagnético.

Nombre de la banda	Ámbito de longitud de onda
Rayos gamma	< 0.03 nm
Rayos x	0.03 nm - 3 nm
Ultravioleta	3 nm - 0.3 μm
Visible	0.3 μm - 0.7 μm
Infrarrojo	0.7 μm - 300 μm
Microondas	300 μm - 20 cm
Radio	> 20 cm

Fuente: Apuntes del Curso Agua y Futuro, Iniciación a la Teledetección. Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale.

Las bandas del espectro electromagnético usadas en PR son principalmente: la visible, la infrarroja y la de microondas. Cada una de estas formas de radiación electromagnética transportan diferente información de un mismo objeto. Por ejemplo, la banda visible podría describir su color, la infrarroja la temperatura, y la de microondas podría describir la rugosidad de su superficie. El Cuadro 1.2 describe con más detalle las bandas del espectro electromagnético más usadas en PR.

Cuadro 1.2. Principales bandas del espectro electromagnético usadas en percepción remota.

Nombre de la banda	Características principales
VISIBLE	0.4 μm - 0.7 μm Única radiación electromagnética percibida por nuestros ojos; la radiación solar es máxima en esta banda. Bandas elementales: Azul: 0.4 a 0.5 μm Verde: 0.5 a 0.6 μm Rojo: 0.6 a 0.7 μm
INFRARROJO PRÓXIMO Denominado también infrarrojo reflejado y fotográfico.	0.7 - 1.3 μm Detectado a partir de films dotados de emulsiones especiales. Permite discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
INFRARROJO MEDIO	1.3 μm - 8 μm Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre.
INFRARROJO TÉRMICO O LEJANO	8 - 14 μm Incluye porción emisiva del espectro terrestre.
MICROONDAS	0.1 cm - 20 cm Energía muy transparente a la cubierta de las nubes.

Modificado de: Apuntes Sistema de Información Ambiental para el Desarrollo Integral Regional, INEGI.

1.1.3. Modelo del movimiento de partículas o cuántico.

El modelo cuántico de la radiación electromagnética, describe el movimiento de energía como el de una corriente de partículas. Estas partículas son llamadas fotones y tienen masa cero. La energía llevada por cada fotón depende de la radiación electromagnética que ha producido el fotón³. La cantidad de energía transportada por un fotón se expresa como:

$$Q = hF \dots \dots (1.2)$$

donde:

- Q = es la energía radiante de un fotón, en julios;
F = es la frecuencia; y
h = es la constante de Planck (6.626×10^{-34} Js)

Sustituyendo (1.1) en (1.2), se tiene:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \dots \dots (1.3)$$

Puede apreciarse que, por ejemplo, un fotón del infrarrojo térmico tiene menos energía que un fotón de la banda visible, debido a que λ es mayor en el infrarrojo térmico que en la región visible, lo que lleva a obtener un valor más pequeño de Q. Esto implica que la radiación en longitudes largas es más difícil de detectar que las longitudes cortas, por lo que la tecnología para detectar ondas largas es más compleja.

1.2. Leyes de radiación.

1.2.1. Ecuación de radiación de Planck.

La ecuación de Planck establece que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273°C) radia energía, y que ésta se incrementa con la temperatura. Además, a mayor temperatura ese objeto radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas⁵. La ecuación de radiación de Planck es una forma de obtener la máxima cantidad de energía que puede ser emitida por un objeto

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp[C_2/\lambda T] - 1)} \dots \dots (1.4)$$

donde:

M_{λ} es la emitancia radiante espectral del objeto medida en $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$
 T es la temperatura absoluta en $^{\circ}\text{K}$.

$C_1 = 3.74 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ y

$C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m}^{\circ}\text{K}$

De la ecuación (1.4) puede verse que M_{λ} representa el índice de energía que es emitida por unidad de área superficial del objeto en una longitud de onda particular. La Figura 1.4 es la representación gráfica de la ecuación (1.4), en la que puede apreciarse que la temperatura de los objetos afecta el nivel de energía emitida en una longitud de onda dada.

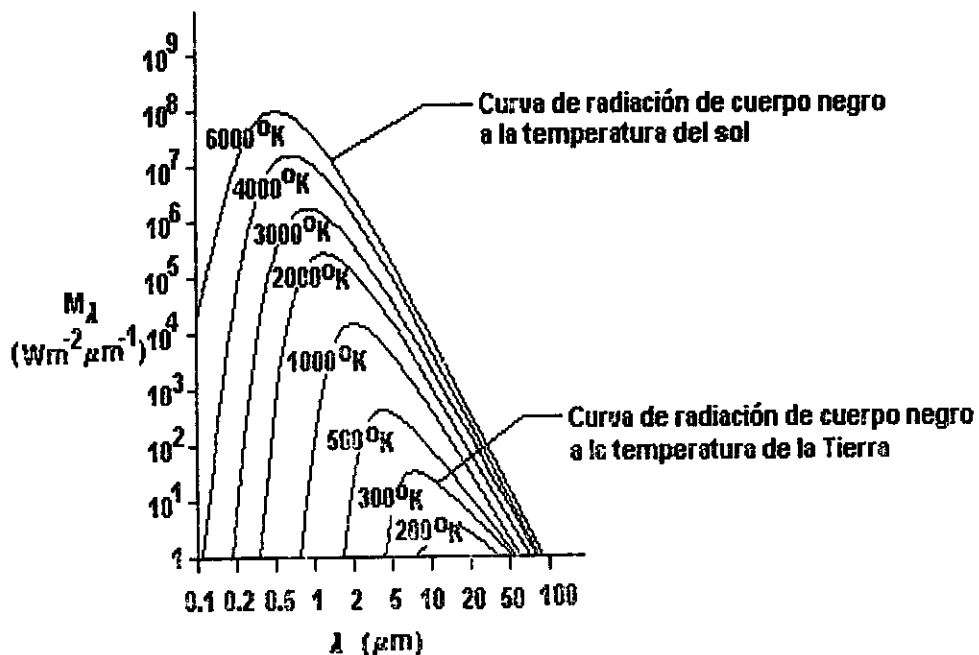


Figura 1.4. Relaciones entre M_{λ} y λ para objetos a diferentes temperaturas.

Tomada de: Belward-Valenzuela, Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resources Management in Developing Countries.

1.2.2. Ecuación de Stefan-Boltzmann.

Para todas las longitudes de onda, puede integrarse la emitancia radiativa espectral a partir de la ecuación (1.4), y obtener el valor de la emitancia radiativa M . Esta se medirá en Wm^{-2} y es la energía total que radia un objeto por unidad de superficie, lo cual se expresa por la ley de radiación de Stefan-Boltzmann⁵

$$M = \sigma T^4 \dots \dots (1.5)$$

donde:

M es emitancia radiante del objeto medida en Wm^{-2} ;

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$;

T es la temperatura en $^{\circ}K$.

La emitancia radiativa M_{λ} se incrementa rápidamente con la temperatura y corresponde al área bajo las curvas descritas por en la Figura 1.4.

1.2.3. Ley de desplazamiento de Wien.

La ecuación del desplazamiento de Wien establece que la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia puede determinarse si se conoce la temperatura del cuerpo.

$$\lambda_{\text{máx}} = A / T \dots \dots (1.6)$$

donde:

$A = 2898 \mu m^{\circ}K$

$\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda máxima (a la que se produce la máxima emitancia).

T es la temperatura del cuerpo en $^{\circ}K$.

La Ley de Wien permite seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado objeto de estudio. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre $275^{\circ}C$ y $420^{\circ}C$, la Ley de Wien permite determinar la banda del infrarrojo medio (5.28 y $4.30 \mu m$), como la más adecuada para su detección. Otro caso es el de la temperatura radiante aproximada de $5700^{\circ}C$ que presenta su emitancia máxima en la región del espectro visible (0.4 a $0.7 \mu m$). En conclusión, cuanto más caliente esté el objeto emisor radiará a longitudes de onda más cortas³.

1.2.4. Terminología y unidades de medida.

Energía radiante (Q). Es el total de energía radiada en todas direcciones³. Se mide en julios (J).

Flujo radiante (ϕ). Es el total de energía radiada en todas direcciones por unidad de tiempo³. Se mide en Watts (W), el cual es Js^{-1} .

Emitancia radiante (M y M_{λ}). Es el total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. M es la emitancia radiante, medida en Wm^{-2} . M_{λ} es la emitancia radiante espectral³, medida en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$.

Irradiancia (E y E_{λ}). Es la energía total radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Tiene las mismas unidades que la emitancia radiante (M) en W/m^2 o emitancia radiante espectral (M_{λ}) en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$, pero la irradiancia se refiere a la energía incidente como (E) irradiancia o (E_{λ}) irradiancia espectral. Cuando la energía es emitida por la superficie del Sol sería descrita usando a la emitancia radiante (M), cuando esta energía ha incidido en la superficie de la Tierra sería descrita usando la irradiancia (E), y finalmente cuando la energía es reflejada por la Tierra nuevamente sería descrita por emitancia radiante³ (M).

Radiancia (L o L_{λ}). Es la energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. El ángulo sólido se trata de un ángulo tridimensional, relativo a la sección completa de la energía transmitida y se mide en

estereo radianes (Fig. 1.5). La energía radiada (L) es medida en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. L_λ es la radiancia espectral en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida, cuyas unidades son⁵ $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$. La importancia de la radiancia estriba en que es lo que mide el sensor. El satélite observa en una dirección específica a la superficie y su detector define un ángulo sólido definido. Por tanto, el número digital registrado en la imagen de satélite corresponde a L y no a M o a Q . Las características físicas del objeto que está siendo medido por el sensor están dadas por M_λ y E_λ , así que es necesario entender cómo es que éstas se relacionan con las mediciones de L .

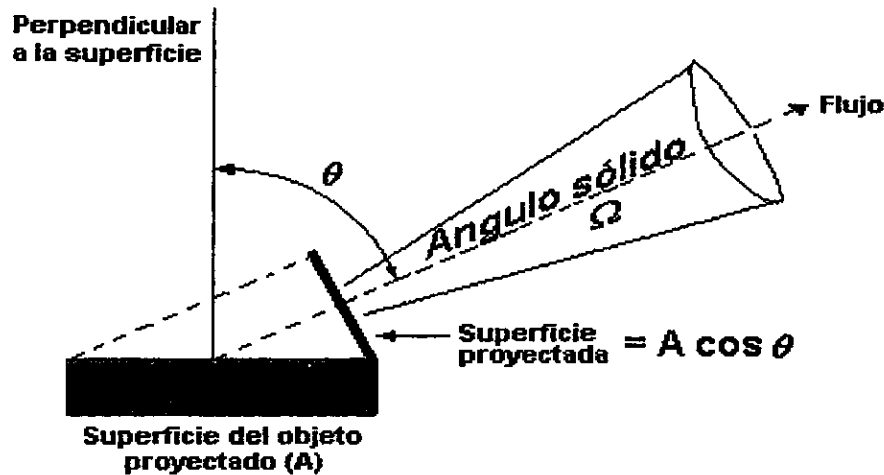


Figura 1.5. Diagrama de un ángulo sólido.
Tomada de: Chuvieco Emilio, Fundamentos de Teledetección Espacial.

Transmisividad (τ). Es la relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie⁵.

1.3. Reflectancia.

La reflectancia (ρ) de un objeto es una propiedad física del propio objeto e independiente de las condiciones de iluminación, es la relación entre el flujo reflejado por la superficie y el incidente³.

$$\rho = \frac{M}{E} \dots \dots (1.7)$$

y la reflectancia espectral está dada por

$$\rho_\lambda = \frac{M_\lambda}{E_\lambda} \dots \dots (1.8)$$

Cuantitativamente el valor de reflectancia siempre es menor que la unidad, debido a que es imposible que sea mayor la energía reflejada que la que incidió en el objeto. La reflectancia es una propiedad muy útil porque describe la característica única de un objeto. Por tanto, es deseable encontrar una relación entre reflectancia ρ y la radiancia L medida por el satélite.

1.3.1. Reflexión especular y difusa.

La cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor. Las leyes geométricas de reflexión están relacionadas con la rugosidad que presenta la superficie del objeto.

Reflexión especular. Una superficie lisa y brillante conduce a una reflexión especular de la radiación, es decir reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (Fig. 1.6). Este tipo de reflexión sería de uso limitado en percepción remota ya que el satélite y el Sol tendrían que estar exactamente a ángulos iguales del objeto⁹. Esto usualmente sólo pasa cuando el Sol es reflejado por el agua dentro del campo de visión del sensor.

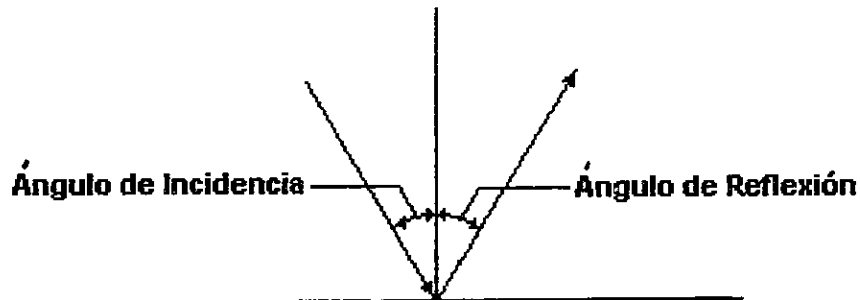


Figura 1.6. Superficie especular.

Modificada de: Lillesand y Kiefer, Remote Sensing and Image Interpretation.

Reflexión difusa. Son aquellas superficies que reflejan la radiación en todas direcciones. Una superficie de reflexión difusa perfecta es aquella donde la radiancia L desde la superficie es constante para cualquier ángulo de observación. Esto es conocido como superficie Lambertiana (Fig. 1.7) y es la situación ideal en percepción remota donde es preferible para la radiancia de un objeto ser independiente del ángulo de observación y de su localización a través de la banda de la imagen⁸.

En general las superficies naturales tienden a comportarse como Lambertianas, y esta consideración es frecuentemente hecha para simplificar los modelos de reflexión.

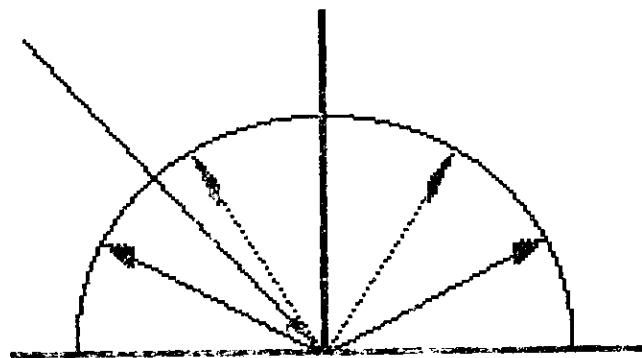


Figura 1.7. Superficie Lambertiana.

Modificada de: Lillesand y Kiefer, Remote Sensing and image Interpretation.

1.3.2. Radiancia y Reflexión.

Para una superficie Lambertiana es posible obtener una relación entre la radiancia y la reflectancia. Por integración del flujo de salida ϕ desde un punto sobre un hemisferio y dividiendo este por el flujo entrante³, se tiene:

$$\rho = \frac{\pi L}{E} \dots \dots (1.9)$$

y en consecuencia que

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_\lambda} \dots \dots (1.10)$$

Si el Sol se encuentra a un ángulo θ de la superficie, entonces la ecuación queda

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_\lambda \cos \theta} \dots \dots (1.11)$$

Las ecuaciones (1.10) y (1.11) permiten calcular la reflectancia de una superficie a partir de la imagen de satélite¹¹. Lo anterior es posible siempre que se pueda calibrar los números digitales del sensor para dar los valores espectrales de radiancia; los datos para la calibración son proporcionados por el distribuidor de la imagen. En cuanto a la irradiancia, es posible calcular el valor para E_λ para un día en particular, en virtud de que las características y movimiento del Sol son conocidos. Por lo tanto, para una superficie Lambertiana y despreciando los efectos atmosféricos, la ecuación (1.11) puede usarse para medir la reflectancia de un objeto a partir de la imagen de satélite.

1.4. Emisividad (ε)

Es la relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura⁵, es decir:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B} \dots \dots (1.12)$$

Se denomina cuerpo negro a aquel objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe⁶. Es frecuente también el uso del término "cuerpo blanco" cuando no absorben nada de la energía incidente, sino que la reflejan por completo ($\varepsilon = 0$). La emisividad ε es una cantidad menor que la unidad, entre 0 y 1.

1.4.1. Emisividad y temperatura

Un sensor que mide la energía emitida por un objeto más bien que la reflejada es capaz de medir tanto la emisividad como la temperatura del objeto³. La ecuación (1.4) para un objeto de emisividad dada, se expresa como:

$$M_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (\exp [C_2/\lambda T] - 1)} \dots \dots (1.13)$$

Considerando una superficie Lambertiana y despreciando los efectos atmosféricos, la emitancia radiante espectral (M_{λ}), se puede mostrar como:

$$M_{\lambda} = \pi L_{\lambda} \dots \dots (1.14)$$

M_{λ} puede obtenerse a partir de las mediciones de L_{λ} del satélite en cuyo caso si ε_{λ} y λ son conocidas, la ecuación (1.13) puede expresarse como:

$$T = \frac{C_2}{\lambda (\ln[\varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} / M_{\lambda}] + 1)} \dots \dots (1.15)$$

Ahora si λ y T son conocidas, entonces la ecuación (1.13) queda como:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda} \lambda^5 (\exp [C_2/\lambda T] - 1)}{C_1} \dots \dots (1.16)$$

Entender los principios físicos de la radiación electromagnética permite al usuario de los datos del satélite aplicar los procesos apropiados a la imagen para obtener ciertas propiedades físicas de los objetos en la imagen. Estas propiedades pueden ser reflectancia, emisividad o temperatura. En particular la información de la reflectancia o emisividad y su variación con la longitud de onda, pueden ayudar en la identificación de un objeto. El conocimiento de la temperatura de un objeto no ayuda necesariamente a la identificación de los constituyentes materiales, pero puede ser importante en estudios de la superficie del mar, pronóstico del clima o para la identificación de riesgos como incendios forestales.

1.5. Percepción remota activa y pasiva.

Cuando el satélite o sistema aerotransportado emite su propio haz de energía se habla de P.R. activa. Cuando la iluminación es independiente del sensor se trata de P.R. pasiva.

El Cuadro 1.3 muestra las principales bandas del espectro electromagnético y su relación con la P.R. activa y pasiva.

Cuadro 1.3. Bandas del espectro electromagnético y su relación con la percepción remota activa y pasiva.

BANDAS DEL ESPECTRO	RELACIÓN CON LA PERCEPCIÓN REMOTA ACTIVA Y PASIVA
Visible e infrarrojo próximo	<p>En general, la P.R. en estas bandas corresponde al tipo pasivo, ya que el Sol es el foco energético, y el sensor colecta la radiación solar reflejada por el objeto observado.</p> <p>Para estas bandas raramente ocurre P.R. activa, en el caso de que una aeronave lleve un láser como foco energético.</p>
Infrarrojo térmico	<p>La P.R. en esta banda corresponde al tipo pasivo, pero en este caso el objeto por sí mismo es la fuente de radiación. El sensor detecta la radiación que ha sido emitida por el objeto.</p> <p>Pueden usarse las imágenes del infrarrojo térmico durante las horas del día o de la noche; sin embargo, las bajas temperaturas de la noche pueden llevar a una señal tenue.</p>
Microondas	<p>La P.R. activa es muy común en esta banda. En este caso el satélite o aeronave emite una señal con una antena; la señal es reflejada por la superficie y a su regreso es detectada por la antena.</p> <p>El equipo más utilizado es el radar, muy usado en aplicaciones militares, así como en el control del tráfico aéreo.</p>

Elaborado por la autora con base en Belward y Valenzuela, Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resources Management in Developing Countries.

1.6. Irradiancia solar.

1.6.1. El Sol.

El Sol es indiscutiblemente la principal fuente de energía en P.R. Por una parte la energía solar es la fuente de potencia eléctrica de los satélites, y además suministra la radiancia para las imágenes en el visible e infrarrojo próximo y medio. La iluminación solar influye en la temperatura de la Tierra, lo cual proporciona radiación en la banda del térmico infrarrojo.

El Sol tiene un diámetro efectivo de 1.4×10^6 km y se encuentra a una distancia promedio de la Tierra de 150×10^6 km. La distancia entre el Sol y la Tierra cambia a lo largo del año, de ahí que el valor de E_λ también cambia. La temperatura radiante del Sol se encuentra próxima a los 6000 °K, lo que implica de acuerdo con la Ley de Wien, que su máxima emitancia espectral M_λ se produce en torno a las $0.48 \mu\text{m}$, que coincide con el color verde apreciado por nuestros ojos. La constante solar se define como la cantidad de irradiancia en una superficie plana normal a la dirección de los rayos solares en el espacio libre y a la distancia media entre el Sol y la Tierra. El valor de la constante solar es³ de 1375 Wm^{-2} .

1.6.2. Intensidad Radiante.

La intensidad radiante (I) es el flujo radiante ϕ que procede de la fuente por unidad de ángulo sólido y en una dirección en particular. Por lo tanto, la intensidad radiante se mide en vatios por estereo-radián Wsr^{-1} . Esta definición lleva a la ecuación (1.17), donde Ω es el ángulo sólido¹¹.

$$\phi = I \Omega \dots \dots (1.17)$$

Si el área A es iluminada por el flujo radiante, entonces se tiene:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \Omega}{A} \dots \dots (1.18)$$

El ángulo sólido se define como el área de un objeto iluminado dividida por el cuadrado de la distancia del objeto a la fuente¹¹. Por tanto

$$\Omega = \frac{A \cos \theta}{S^2} \dots \dots (1.19)$$

donde θ es el ángulo entre la superficie normal al objeto y en la dirección de la fuente. Sustituyendo (1.19) en (1.18), se tiene:

$$E = \frac{I \cos \theta}{S^2} \dots \dots (1.20)$$

La ecuación (1.20) significa que

$$E \propto \frac{1}{S^2} \dots \dots (1.21)$$

De la ecuación (1.21) puede observarse que E disminuye si la distancia Tierra - Sol se incrementa. Si S se duplica entonces E disminuye por un factor de 4. Esto explica los cambios en E y E_{λ} a lo largo del año conforme cambia la distancia entre el Sol y la Tierra¹¹.

Sin embargo, la constante solar es conocida, por lo que es posible calcular E a partir de la ecuación (1.21) para otros valores de S. La ecuación (1.20) conduce a la siguiente regla:

$$E \propto \cos \theta \dots \dots (1.22)$$

de donde se puede concluir que E disminuye si θ se incrementa. De otra forma, la irradiancia solar decrece al incrementarse el ángulo solar del zenit llevando al Sol a la parte más baja del cielo. Nuevamente, si la constante solar es conocida, entonces E puede ser vuelta a calcular para cualquier ángulo solar del zenit².

Estas ecuaciones junto con la ecuación de radiación de Planck permiten calcular el valor de E para una imagen de satélite de fecha y hora conocida, de manera que el ángulo solar del zenit y la distancia del Sol a la Tierra pueden calcularse.

1.7 La atmósfera.

En este apartado se discutirán los efectos de la atmósfera en la P.R. La atmósfera es el medio por el que viaja la radiación electromagnética entre el sensor y la superficie terrestre.

1.7.1 Absorción.

La absorción es un mecanismo por el que, para ciertas longitudes de onda, la radiación electromagnética es atenuada por la atmósfera. Esta absorción en la atmósfera es debida a la presencia de tres gases: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y ozono (O₃). El Cuadro 1.4 muestra los efectos de estos gases

en la absorción. La atmósfera es por lo tanto opaca a ciertas longitudes de onda y transparente a otras. Aquellas bandas del espectro para las cuales la atmósfera es transparente se conocen como "ventanas atmosféricas", y son aquellas donde la transmisividad de la atmósfera es alta. El Cuadro 1.5 muestra las longitudes de onda y las bandas de las ventanas atmosféricas. La percepción remota de la superficie de la Tierra no es posible fuera de estas ventanas.

Cuadro 1.4. Gases que atenúan la radiación electromagnética en la atmósfera y sus efectos.

GAS	EFEECTO
Ozono (O ₃).	Se encuentra en una capa entre 20 km y 50 km por encima de la Tierra. Absorbe energía electromagnética en una estrecha banda entre 9 μm y 10 μm en el infrarrojo térmico. Debido a la altitud de la capa de O ₃ , no afecta la P.R. que se realiza en aeronaves, ya que estas operan a no más de 10 km. Su efecto en las operaciones de satélite sí es importante.
Vapor de agua (H ₂ O).	Su distribución decrece exponencialmente con la altitud, y el clima controla la cantidad de agua que puede ser mantenida como gas en la atmósfera. Produce una fuerte absorción entre 6 μm y 7 μm.
Dióxido de carbono (CO ₂).	Es el 0.03% de la atmósfera y está distribuido uniformemente arriba de una altitud de aproximadamente 100 km. Absorbe el infrarrojo térmico (8 μm a 14 μm) y causa efectos importantes en el infrarrojo medio (2.5 μm a 3 μm).

Elaborado por la autora con base en Belward y Valenzuela, Remote Sensing and Geographical Information Information Systems for Resources Managment in Developing Countries.

1.7.2. Dispersión.

Es la interacción entre la radiación electromagnética y los gases, partículas de polvo o gotas de agua. Esta interacción implica un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (radiancia difusa). Los principales tipos de dispersión son: Rayleigh, Mie y la no selectiva.

La dispersión Rayleigh se presenta cuando la longitud de onda λ de la radiación es más grande que el diámetro de las moléculas de gas responsables de la dispersión. La dispersión Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda a la cuarta potencia³

$$\sigma \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Esto significa que las longitudes de onda cortas son más fuertemente dispersadas. La mayor dispersión en longitudes de onda corta explica el color azul del cielo, ya que la luz del Sol interactúa con la atmósfera, la cual dispersa longitudes de onda corta (azul) más que otras longitudes de onda visibles; en consecuencia el cielo se ve azul.

La dispersión llamada Mie se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es similar al tamaño de la partícula de vapor de agua, polvo y aerosoles que producen la dispersión³. El tamaño de las partículas varía entre 0.1 μm a 10 μm y pueden ser detritos de suelo, roca, fuegos forestales, volcánicos y contaminación atmosférica. Estas partículas están suspendidas en capas bajas de la atmósfera y el viento controla su movimiento y distribución. Al igual que en el caso de la dispersión Rayleigh, la dispersión Mie decrece al aumentar la longitud de onda de la radiación. Lo anterior genera que las imágenes del área de estudio sean más claras en longitudes de onda larga, mientras que la región visible del espectro es "ruidosa".

La dispersión no selectiva ocurre cuando la longitud de onda de la radiación es más pequeña que el diámetro de las partículas (gotas de agua)³. Las gotas de agua normalmente tienen un diámetro en el ámbito

de $5 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ y la dispersión se da igualmente en todas las longitudes de onda, por lo que es una dispersión no selectiva respecto a la longitud de onda. En el caso de las microondas, debido a que las longitudes de onda son considerablemente mayores que el tamaño de partículas atmosféricas, el efecto de dispersión no es importante en esta parte del espectro.

El Cuadro 1.5 muestra un resumen de las longitudes de onda del espectro en función de las ventanas atmosféricas y de sus características de absorción y dispersión de la radiación electromagnética.

Cuadro 1.5. Características de absorción y dispersión de las longitudes de onda del espectro, y ventanas atmosféricas.

LONGITUDES DE ONDA	CARACTERISTICAS ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN
Menor que $0.3 \mu\text{m}$	Toda la radiación es absorbida por la capa de ozono responsable de la radiación ultravioleta por abajo de $0.3 \mu\text{m}$.
$0.3 \mu\text{m}$ a $0.4 \mu\text{m}$	La radiación ultravioleta es transmitida a través de la atmósfera, pero severamente afectada por la dispersión Rayleigh.
$0.4 \mu\text{m}$ a $1.3 \mu\text{m}$	La atmósfera es transparente pero la dispersión Rayleigh y Mie pueden afectar la imagen con nubes y niebla. Muchos satélites utilizan esta ventana.
$1.3 \mu\text{m}$ a $1.5 \mu\text{m}$	El vapor de agua causa absorción de la radiación.
$1.5 \mu\text{m}$ a $1.8 \mu\text{m}$	Ventana atmosférica usada por Landsat TM. La dispersión Mie puede ocurrir.
$1.8 \mu\text{m}$ a $2.0 \mu\text{m}$	El vapor de agua causa absorción de la radiación.
$2.0 \mu\text{m}$ a $2.5 \mu\text{m}$	Ventana atmosférica usada por el Landsat TM. La dispersión Mie puede ocurrir.
$2.5 \mu\text{m}$ a $3.0 \mu\text{m}$	El vapor de agua y el dióxido de carbono causan absorción.
$3.0 \mu\text{m}$ a $5.0 \mu\text{m}$	Ventana atmosférica usada por los satélites meteorológicos United States National Oceanic and Atmospheric Administration. En estas longitudes de onda pueden detectarse objetos con alta temperatura (227°C). Ventana que tiene aplicaciones militares.
$5.0 \mu\text{m}$ a $8.0 \mu\text{m}$	Vapor de agua causa absorción de la radiación. El satélite Meteosat usa esta banda para obtener imágenes de la distribución de vapor de agua en la atmósfera.
$8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$	Ventana atmosférica usada por muchos sensores. La dispersión por partículas grandes es importante, y existe absorción por el vapor de agua y dióxido de carbono.
$14 \mu\text{m}$ a 1mm	Vapor de agua y dióxido de carbono causará absorción.
Mayor que 1mm	Ventana atmosférica para la percepción remota por microondas. Las nubes son también transparentes en esta ventana.

Elaborado por la autora con base en Belward y Valenzuela, Remote Sensing and Geographical Information Information Systems for Resources Management in Developing Countries.

1.8. Cuantificación de efectos atmosféricos.

1.8.1. Modelación de la atmósfera.

La transmitancia espectral de la atmósfera (T_λ), el componente difuso de la irradiancia solar causado por la dispersión en la atmósfera (E_{ca}), y la radiancia espectral dispersada o emitida por la atmósfera dentro del campo de visión del sensor (L_{pa}), necesitan ser modelados ya que raramente hay alguna medición directa de las condiciones atmosféricas al tiempo de la adquisición de la imagen³. T_λ puede ser expresada como:

$$T_\lambda = \exp(-\tau_\lambda \sec \theta) \dots \dots (1.23)$$

donde T_λ es conocida como el patrón óptico y tiene los siguientes componentes:

$$T_\lambda = T_{Mie} + T_{Rayleigh} + T_{absorción} \dots \dots (1.24)$$

donde

$$T_{absorción} = T_{H_2O} + T_{CO_2} + T_{O_3} \dots \dots (1.25)$$

Existen programas de cómputo que permiten el cálculo de T_λ . Un ejemplo de estos es el de Lowtran, el cual está basado en modelos estándares de la atmósfera y el uso de algunos datos meteorológicos locales.

El cálculo de $E_{d\lambda}$ y $L_{p\lambda}$ puede ser complejo, ya que se requiere el procesamiento de la ecuación de transferencia radiativa y el conjunto de reflectancias originales del área de estudio³. Varios modelos y programas han sido desarrollados para el cálculo de estos factores.

1.8.2. La necesidad de corregir.

El análisis para las correcciones atmosféricas es complejo. Sin embargo, existen programas de computadora que permiten relacionar propiedades físicas absolutas del objeto de estudio con la radiancia medida por el sensor. No siempre se requiere determinar las correcciones atmosféricas. Una forma común de análisis de datos es la interpretación visual de la imagen, la corrección atmosférica no se requiere si la interpretación está limitada a una imagen, ya que la información obtenida así es esencialmente cualitativa.

Si la imagen analizada va a ser comparada con otra imagen, entonces la corrección atmosférica sí se requiere; esto es debido a que la irradiancia solar, el ángulo del zenit y a que las condiciones atmosféricas cambian de una imagen a otra. La corrección es necesaria si los números absolutos serán extraídos de cada imagen y comparados, o si será llevada a cabo la clasificación de dos imágenes juntas. Sin embargo, si solamente se requieren las diferencias relativas de números, entonces pueden aplicarse técnicas de procesamiento de imágenes para suprimir el efecto atmosférico. Lo anterior es válido también cuando una imagen es comparada con otra; en términos relativos tales técnicas de procesamiento incluyen la sustracción y la obtención de histogramas. Esto balancea los ámbitos en los niveles de gris en las imágenes.

1.9. Interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra.

1.9.1. Conservación de la energía.

Entender cómo interactúa la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra es un importante aspecto de la percepción remota.

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la radiación electromagnética que recibe la Tierra puede expresarse con³:

$$\phi_\lambda = \phi_{i\lambda} + \phi_{r\lambda} + \phi_{a\lambda} \dots \dots (1.26)$$

donde:

$\phi_{i\lambda}$ es el flujo de radiación incidente;

$\phi_{r\lambda}$ es el flujo de radiación reflejado;

$\phi_{t\lambda}$ es el flujo de radiación transmitido; y

$\phi_{a\lambda}$ es el flujo de radiación absorbido.

Conviene expresar la ecuación (1.26) en unidades relativas, para ello se divide (1.26) por ϕ_{λ} :

$$1 = \rho_{\lambda} + t_{\lambda} + \alpha_{\lambda} \dots \dots (1.27)$$

donde ρ , t y α son la reflectancia, transmitancia y absorbancia, respectivamente.

La ley de Kirchoff³ establece que $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$ y la ecuación (1.27) se transforma en:

$$\rho_{\lambda} + t_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} = 1 \dots \dots (1.28)$$

para muchos materiales $t_{\lambda} = 0$ y esto es válido en el térmico infrarrojo, donde:

$$\rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} = 1 \dots \dots (1.29)$$

Considerando lo anterior, se dice que: los buenos emisores son pobres reflectores y viceversa.

El agua no tiene un valor de $t_{\lambda} = 0$ para las longitudes de onda visibles, por lo que la ecuación (1.28) no puede simplificarse a la (1.29), en este caso.

1.9.2. Curvas espectrales.

En el presente capítulo se ha venido utilizando el subíndice λ para indicar que una característica específica puede variar con la longitud de onda. La reflectancia espectral ρ_{λ} puede ser un indicador del tipo y condición del objeto estudiado. Pueden construirse gráficas de reflectancia espectral contra longitud de onda. Estas gráficas hacen referencia al modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja la energía a distintas longitudes de onda, lo que se conoce como "firma espectral"²⁷. Es importante considerar que los factores atmosféricos y de irradiancia solar pueden modificarla; es decir, en torno a un comportamiento tipo denominado firma espectral, cada cubierta presenta una cierta variabilidad espectral, debido a los factores ya comentados, y que dificulta en última instancia su discriminación de otras superficies. Sin embargo, las curvas de reflectividad son muy útiles para hacer una adecuada interpretación de la imagen, además nos permiten seleccionar las bandas más convenientes para la detección de las cubiertas terrestres en estudio.

1.9.3. Características espectrales del agua, suelo y vegetación.

La Figura 1.8 muestra curvas típicas de reflectancia espectral de tres tipos básicos de características terrestres: vegetación, suelo y agua en el ámbito del visible al infrarrojo medio.

El agua tiene una curva característica que puede ser explicada haciendo referencia a la ecuación (1.27). En la región visible del espectro, la transmitancia del agua es significativa mientras que la absorbancia es baja. La reflectancia del agua en la región visible apenas asciende al 5%, los sensores para medir el color del agua tienen detectores más sensibles que aquéllos que se usan para el suelo.

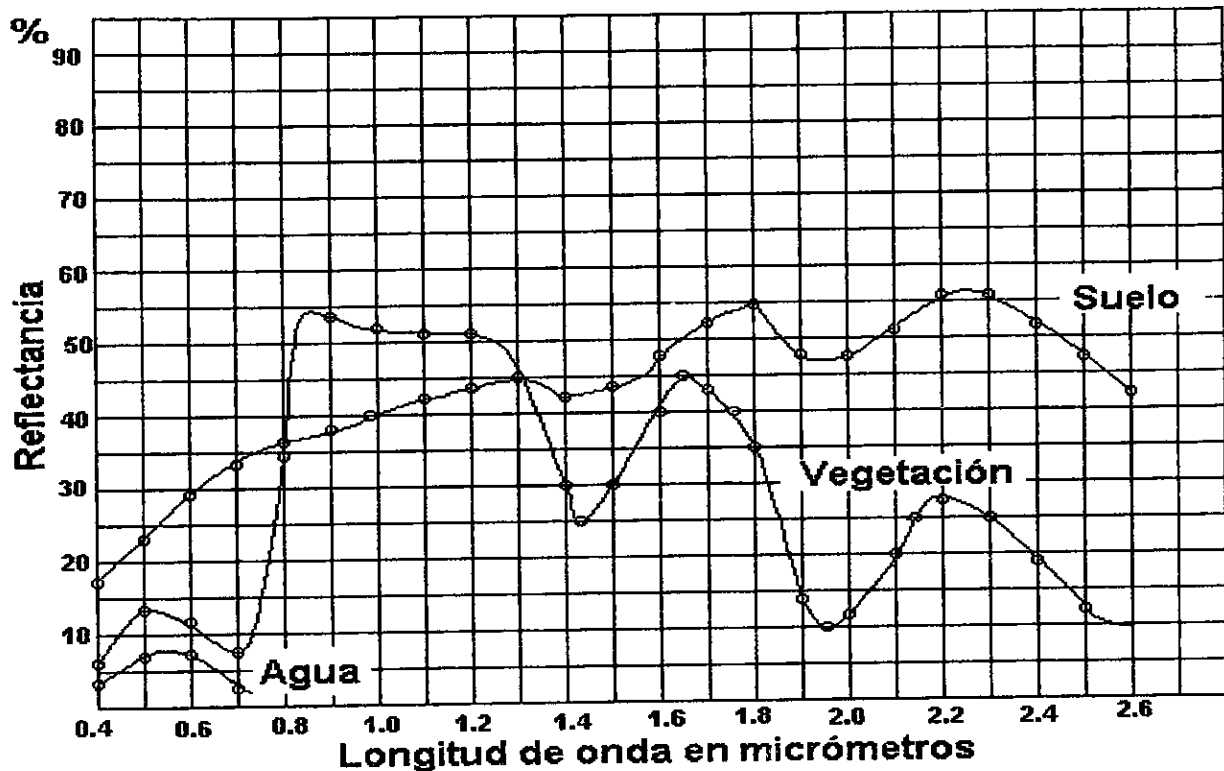


Figura 1.8. Curvas espectrales de vegetación, suelo y agua.

Tomada de: INEGI, Programa Integral de Capacitación, Formación e Investigación, 1993. Sistema de Información Ambiental para el Desarrollo Integral Regional.

La absorbancia del agua asciende rápidamente en el infrarrojo cercano, donde la reflectancia y transmitancia son pequeñas. La señal del agua recibida por el sensor en el cercano infrarrojo pueden usualmente atribuirse al patrón de radiancia atmosférica, más que a la reflexión desde la superficie.

La transmisión de la radiación visible a través del agua significa que si el cuerpo de agua es poco profundo la radiación puede ser reflejada en el fondo, y transmitida de regreso a través del agua y detectada por el sensor. Entonces, no es claro saber, a partir de la imagen visible si la superficie detectada está arriba o abajo del agua. Sin embargo, la revisión de la imagen en el infrarrojo cercano resolverá este problema ya que la superficie sumergida no será detectada porque la transmisión no ocurre.

El suelo tiene varias características diferentes con respecto al agua, la reflectancia espectral ρ_λ del suelo se incrementa con las longitudes de onda en el invisible, lo cual es consistente con la observación de color del suelo por el ojo humano como rojo o café. El nivel de reflectancia del suelo en el visible es del orden del 20% y 30% en el infrarrojo cercano. Por esta razón, la frontera entre suelo y agua es simple de identificar en una imagen de satélite.

La curva espectral de la vegetación verde es más compleja que la del suelo o agua. En la parte azul y roja del espectro la absorbancia es alta debido a la presencia de clorofila en la planta y la reflectancia es baja. Como se espera, la reflectancia espectral asciende en la parte verde del espectro y puede alcanzar un nivel de alrededor del 10%. Esto es bastante claro por el hecho de que el ojo humano aprecia la vegetación con color verde.

La reflectancia de la vegetación alcanza su punto más alto en el infrarrojo cercano donde asciende a más del 50%. El valor de la reflectancia depende de las especies particulares de vegetación y disminuye con el incremento de onda en el infrarrojo medio (1.4 μm a 1.9 μm), lo cual es causado por el agua en la planta. Sin embargo, a partir de 1.8 μm no hay ventana atmosférica, por lo que esto no puede detectarse por el sensor del satélite²⁷.

Capítulo 2

Sistemas de Percepción Remota: Sensores y Plataformas

En las ciencias ambientales el término percepción remota está reservado para el examen de la Tierra y su atmósfera usando información colectada desde la superficie de la Tierra o a varias altitudes sobre ella. Este capítulo trata acerca de los instrumentos usados para obtener la información.

2.1. Sensores pasivos y activos.

Con base en la clasificación presentada en el apartado 1.6 Percepción remota activa y pasiva, puede establecerse una división en sensores activos y pasivos.

2.1.1. Sensores pasivos.

Los sensores pasivos pueden dividirse en tres categorías generales: sensores fotográficos, óptico electrónicos y de antena. En el primer grupo se incluyen las cámaras fotográficas; en el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, y las cámaras de vidicon; por último, los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de microondas.

Sensores Fotográficos.

Las cámaras fotográficas han sido usadas con éxito en plataformas aéreas. Actualmente siguen siendo el medio más utilizado en P.R.. Su funcionamiento está basado en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición.

Exploradores de Barrido.

Los exploradores de barrido combinan una óptica similar a la fotografía, con un sistema de detección electrónica que permite una cobertura sistemática de la superficie terrestre, ya que facilita la transmisión a distancia de las imágenes captadas.

En forma perpendicular a la dirección de la trayectoria del satélite, oscila un espejo móvil, permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados. La radiancia recibida por este componente óptico se envía a detectores que la amplifican y convierten en una señal eléctrica, que se transforma a un valor numérico el cual se almacena a bordo o se transmite a antenas receptoras (Figura 2.1).⁵

La señal enviada por el equipo óptico a los detectores se graba en valor numérico a intervalos regulares. Este intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, denominada pixel; esta señal está íntimamente relacionada con el tipo de cubierta observada.

Los exploradores de barrido multiespectral descomponen la señal recibida en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detector sensible a este tipo de energía.

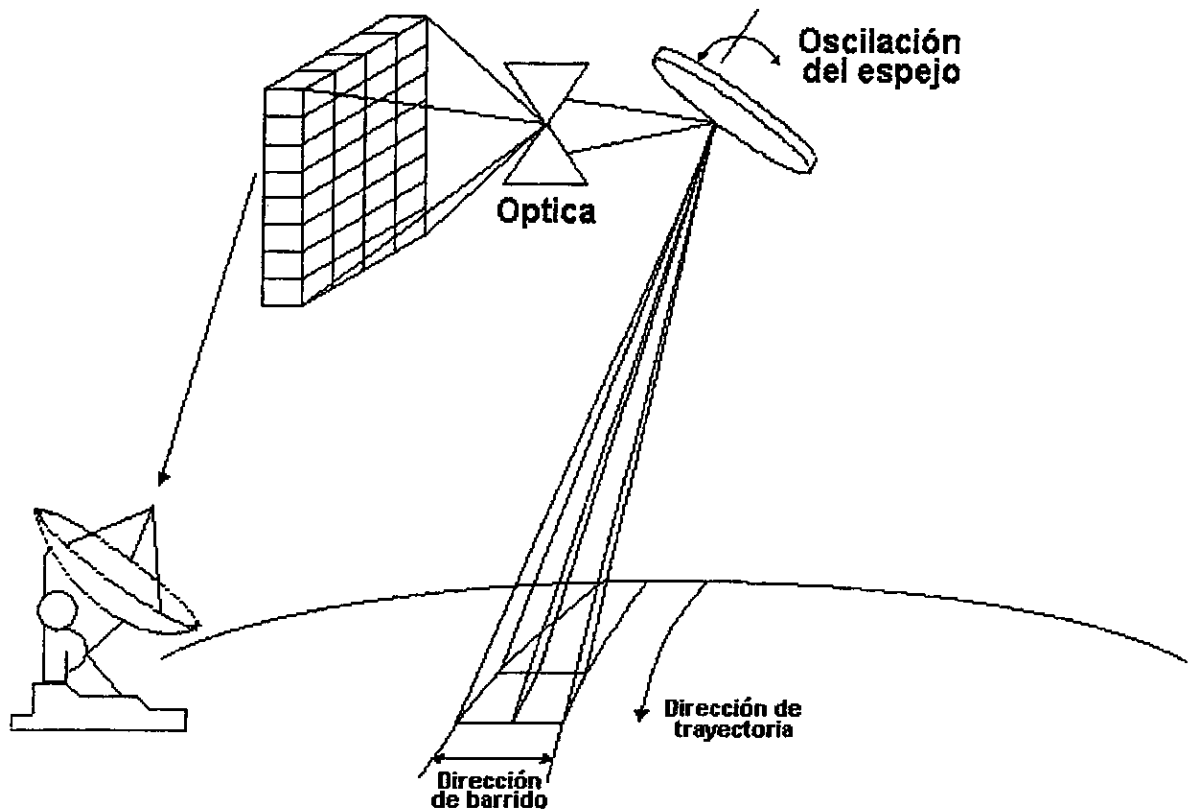


Figura 2.1. Diagrama de un explorador de barrido.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial

Algunas ventajas de los equipos de barrido multispectral con respecto a los sensores fotográficos son:

- Permiten ampliar la banda de espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible (incluyendo el infrarrojo medio y térmico);
- Proporcionan coberturas sistemáticas y de grandes áreas;
- Disponen de grabación digital de la información, lo que permite el tratamiento con computadora; y
- Ofrecen facilidad de calibración y corrección de datos.

Sin embargo, la resolución espacial de los equipos de barrido con respecto a los sistemas fotográficos es menor, aunque en los últimos años se han tenido grandes progresos.

Exploradores de Empuje.

En estos equipos se dispone de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor, eliminándose la necesidad del espejo oscilante (Figura 2.2).⁵

Los detectores sólidos que forman un explorador de empuje se denominan "dispositivos de acoplamiento por carga (CCD, por sus siglas en inglés). A diferencia de los exploradores de barrido, que envían la señal a los detectores por pixel, los de empuje lo hacen por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos. Además, al eliminar la parte móvil se reducen problemas geométricos, debido a la falta de sincronía entre el movimiento del espejo y el de la plataforma. Sin embargo, la calibración de la cadena de detectores en los exploradores de empuje es compleja, ya que se requieren complicados mecanismos de ajuste que permitan

traducir de la misma forma la señal recibida. Otra restricción de los exploradores de empuje es que están limitados al espectro visible e infrarrojo reflejado, no incluyendo el infrarrojo medio y térmico.

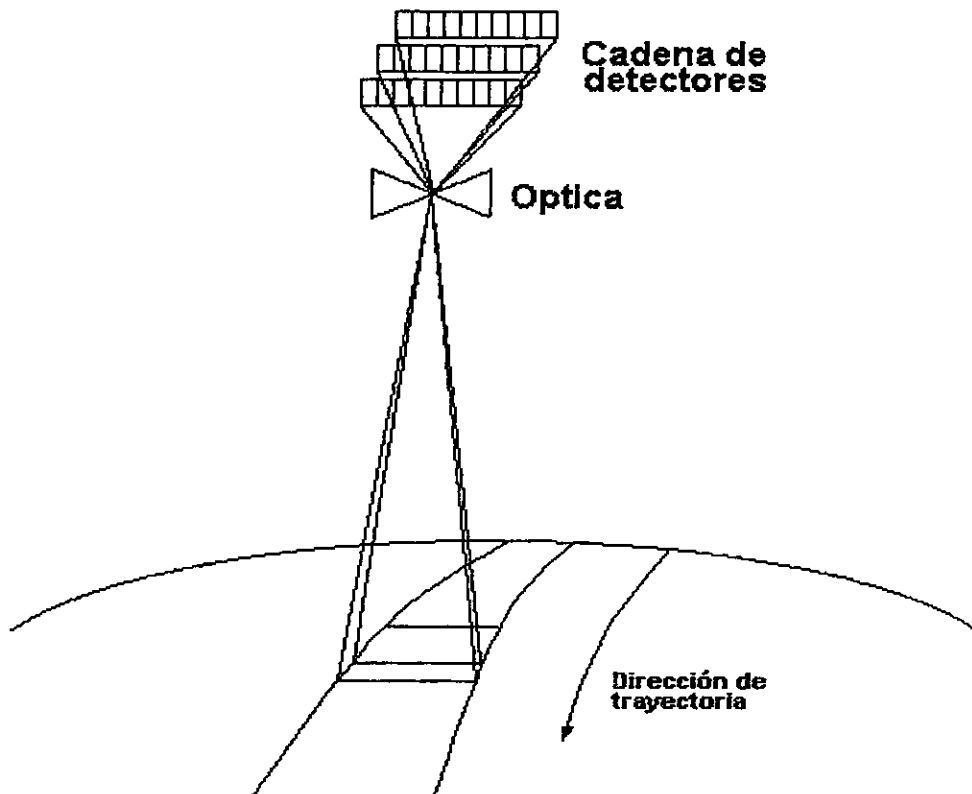


Figura 2.2. Diagrama de un explorador por empuje.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

Tubos de Vidicón.

Es un sistema análogo a la cámara de televisión, que puede trabajar en forma pancromática (blanco y negro) o multibanda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, contruyéndose una réplica electrónica de la imagen original.⁵

Radiómetros de Microondas.

Son sensores que operan en longitudes de onda larga, normalmente 1 y 100 mm. Los radiómetros están compuestos de un elemento direccional, un receptor que permite la recepción y amplificación de microondas y un detector. Su mayor desventaja se debe a la pobre resolución espacial que proporciona.⁵

2.1.2. Sensores activos.

Los sensores activos pueden dividirse en: rádar y lidar.

Rádar.

El radiómetro activo de microondas trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m. Puede trabajar en cualquier condición atmosférica. La principal desventaja es la pobre resolución espacial, además de que las imágenes se graban en película para su interpretación visual, o su conversión posterior a formato numérico.¹¹

Lidar.

El lidar (Light Detection and Ranging) consiste en un láser de pulso que se emplea como transmisor en la atmósfera. La señal interactúa con las partículas atmosféricas causando dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La energía de retorno se recoge por un telescopio, que a su vez la transmite a un filtro óptico a un foto-detector. Esta señal eléctrica se graba y se almacena en una computadora. Existen tres tipos de sistemas lidar: de resonancia, de absorción diferencial y de fluorescencia inducida.¹¹

El Cuadro 2.1 muestra las principales experiencias desarrolladas en sensores pasivos y activos.

Cuadro 2.1. Experiencias desarrolladas en sensores pasivos y activos.

SENSORES		EXPERIENCIAS DESARROLLADAS
Pasivos	Sensores fotográficos	Primeras fotografías espaciales Misión Mercury-4, seguidas por las cápsulas Géminis y Apollo. Laboratorio espacial tripulado Skylab, uso de cámara multiespectral (1973). Uso de la cámara RMK 20/23 diseñada por Zeiss para fotografías estereoscópicas de gran precisión y cobertura en la misión Spacelab de la Agencia Espacial Europea (1983). Uso de cámara de gran formato diseñada por ITEK de gran cobertura en la misión Space Shuttle (1984). Uso de cámara multiespectral MKF-6 que permite obtener fotografías sobre seis bandas del espectro, del azul al infrarrojo cercano en sensores a bordo de satélites soviéticos (1988).
	Exploradores de barrido	Inclusión en las principales misiones de teledetección, tales como: LANDSAT (MSS, Multiespectral Scanner y TM, Thematic Mapper), TIROS-NOAA (AVH RR, Advanced Very High Resolution Radiometer), NIMBUS (CZCS, Coastal Zone Color Scanner), Skylab (S192), y HCMM (HCMR, Heat Capacity Mapping Radiometer).
	Exploradores de empuje	Satélite francés SPOT, del indio IRS-1 y del japonés MOS-1.
	Vidicon	Uso a bordo de los tres primeros satélites LANDSAT, en el caso de RBV (Return Beam Vidicon), así como en las misiones espaciales: Apollo, Mariner, TIROS, NIMBUS y Bhaskara 1 y 2.
	Radiómetros de microondas	Uso para la cartografía de hielo y nieve. Por ejemplo, en el sensor ESMR (Electrically Scanning Microwave Radiometer) a bordo del NIMBUS 5 y 6.
Activos	Rádar	Radar lateral aerotransportado SLAR (Side Looking Airborne Radar) que mostró gran versatilidad respecto a la fotografía aérea, especialmente para estudios sobre áreas tropicales. Uso del SAR (Synthetic Aperture Radar) en la misión del satélite SEASAT para la investigación oceanográfica. Uso del radar SIR-A y B a bordo del Space Shuttle (1986) en cartografía temática. Uso en el satélite europeo ERS-1, del RADARSAT canadiense y del JERS japonés.
	Lidar	Las experiencias desarrolladas se basan en plataformas aéreas.

Elaborado por la autora basada en Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial

2.2. Satélites para la observación de recursos terrestres.

Las primeras fotografías espaciales de la superficie terrestre fueron tomadas por los satélites de los Estados Unidos: Mercury, Géminis y Apollo. Esas fotografías fueron efectuadas por curiosidad y publicidad, y gracias a los resultados brillantes que proporcionaron, más tarde se usaron para el estudio de los recursos de la Tierra. La agencia espacial norteamericana (NASA) desarrolló una serie de satélites experimentales para la observación de los recursos de la Tierra con el fin de evaluar la utilidad de imágenes obtenidas desde

observación de los recursos de la Tierra con el fin de evaluar la utilidad de imágenes obtenidas desde satélites no tripulados. El primer satélite en esta serie, muy similar al satélite meteorológico NIMBUS, fue lanzado en 1972 con dos tipos de sensores, un sistema de barrido multispectral de 4 bandas denominado MSS (Multispectral Scanner) y 3 cámaras de televisión de vidicon RBV (Return Beam Vidicon). Este fue llamado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y a partir del segundo lanzamiento, en 1975, fue llamado LANDSAT-1. Este satélite operó por casi 6 años hasta enero de 1978; durante este periodo dos sucesores casi idénticos, LANDSAT 2 y LANDSAT, fueron lanzados en 1975 y 1978, respectivamente. El primer programa LANDSAT MSS proporcionó una cobertura territorial de 32 000 millones de km², cifrándose en unas 385 000 imágenes adquiridas por estaciones estadounidenses y en 560 000 las recibidas por estaciones foráneas (Brasil, Canadá, China, Italia, Suecia, Japón, India, Argentina, Sudáfrica y Australia). Cada imagen MSS cubría un área de 185 km por 185 km a una resolución de 79 m, y proporcionaba datos en cuatro bandas espectrales (inicialmente identificadas como 4, 5, 6 y 7, las tres bandas que fueron RBV 1, 2 y 3), cubriendo el verde, rojo y dos partes del cercano infrarrojo.

El LANDSAT también tuvo una banda operando en el térmico infrarrojo (conocida como banda 8). Para asegurar la continuidad en la serie de datos, se ha mantenido el MSS en los dos últimos LANDSAT, con características similares a los satélites anteriores.

En julio de 1982 fue lanzado el primero de los llamados de la "Segunda Generación de Satélites de Observación Terrestre": el LANDSAT 4. En esta segunda generación las cámaras son sustituidas por un nuevo explorador de barrido denominado TM (Thematic Mapper), que proporciona mayor resolución espacial y espectral que los satélites previos MSS. En febrero de 1983, debido a las persistentes fallas técnicas de transmisión del TM, el LANDSAT 4 termina su operación. La operación del MSS, sin embargo, se mantiene, y en marzo de 1984 se lanza el LANDSAT 5 TM.

En 1986 fue lanzado el satélite francés SPOT-1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre), mientras que el segundo se puso en órbita en 1990. Los satélites transportan dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (Haute Resolution Visible). Estos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda.

2.3. Satélites Meteorológicos.

Los satélites meteorológicos se han usado por más tiempo que los satélites para observación de los recursos de la Tierra. El principal uso de los datos colectados por estos sensores ha sido el estudio y predicción del clima en periodos cortos, usualmente horas o días.

La primera generación de estos satélites operó de 1960 a julio de 1966. A esta primera generación le siguieron los instrumentos de la segunda y tercera generaciones, que actualmente están en uso. La tercera generación de estas series incluye los satélites llamados Tiros-N y NOAA-6 al NOAA-13. Estos tienen características orbitales similares al Landsat en cuanto a que su órbita es heliosíncrona, polar, a una altitud de 830 km. Estos satélites transportan el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) que debido a su amplia cobertura y bajo costo se ha usado en el pronóstico del clima y también en aplicaciones ambientales como mapeo de temperaturas en la superficie del mar, estudios de desertificación, y en incendios forestales de gran magnitud. Se ha explorado también el uso de las bandas roja e infrarroja cercana para estudios globales de vegetación y cubierta de suelo a escala continental.

2.4. Características de los sistemas sensores.

Las características de un sistema sensor son: 1) tipo de órbita; y 2) resoluciones radiométrica, espacial, espectral y temporal.⁵

2.4.1. Características orbitales.

La selección de la órbita del sensor está relacionada con los patrones de observación que se pretenden llevar a cabo tales como: monitoreo continuo, cubierta repetitiva a periodos diferentes y mapeo global. Las posiciones orbitales pueden ser geosíncrona (geoestacionaria) y heliosíncrona (polares ecuatoriales). La gran mayoría de las plataformas de percepción remota han sido colocadas dentro de órbitas circulares, de estas las más importantes son órbitas geoestacionarias y polares.

Orbitas geoestacionarias. El caso más importante de órbita geosíncrona es la órbita geoestacionaria. Este propósito se consigue cuando el satélite se sitúa en una órbita circular de gran altitud (35,800 km), localizados arriba del ecuador. El satélite se sincroniza con el movimiento terrestre debido a que la velocidad del satélite compensa la velocidad de rotación de la Tierra y pareciera estar fijo en el cielo.³ En otras palabras, los satélites geoestacionarios observan permanentemente la misma porción de la superficie terrestre. Por supuesto, ninguno de los satélites geoestacionarios pueden observar por completo la superficie terrestre. Dos satélites geoestacionarios colocados en dos lados opuestos del planeta podrían proporcionar una visión de toda la Tierra. Sin embargo, la resolución podría ser burda en los extremos de observación del disco de la Tierra; por lo tanto, para lograr mejorar la resolución en las imágenes se necesitarían más de dos satélites. Es importante enfatizar que independientemente de que muchos satélites se coloquen en órbitas geoestacionarias, nunca se obtendrá una resolución aceptable hacia y sobre las regiones polares. Las órbitas geoestacionarias son utilizadas por los satélites de telecomunicaciones y también por los satélites meteorológicos que tienen como propósito cubrir la Tierra entre los 60°N a 60°S. En la actualidad están en operación los satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) oeste y este de la NASA, Meteosat de Europa, GMS del Japón.

Orbitas polares heliosíncronas. Los satélites de observación de la Tierra operan en órbitas cercanas al polo, circulares y cíclicas, con la excepción de áreas polares sobre aproximadamente 81° proporcionando una cobertura casi global si el plano de la órbita del satélite gira a la misma velocidad de la Tierra alrededor del Sol, y el ángulo entre el plano de la órbita y la línea que conecta el centro de la Tierra con el centro del Sol permanece constante.³ Si la órbita es heliosíncrona el Sol proporciona iluminación constante en el área observada todo el año. Esto se muestra en la Figura 2.3. Los satélites con órbita heliosíncrona y polar son Landsat, SPOT y NOAA.

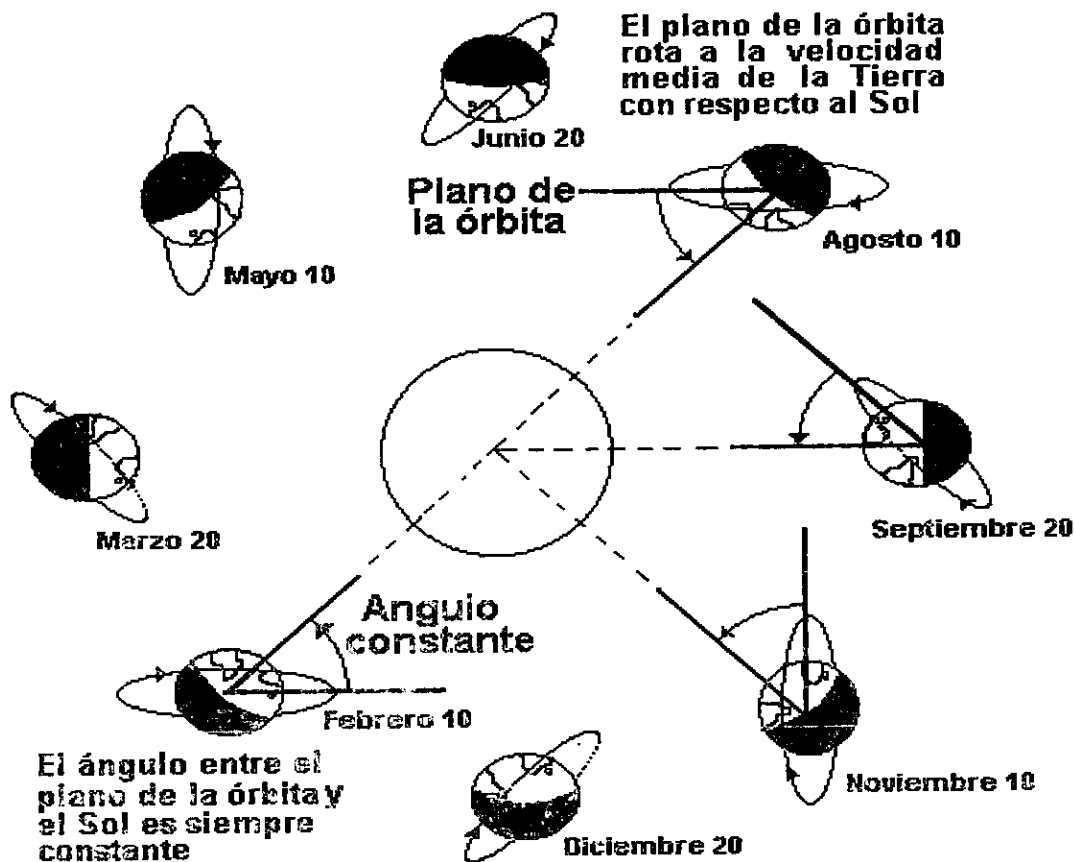


Figura 2.3. Características de la órbita heliosíncrona polar.
 Adaptada de Belward y Valenzuela. Remote Sensing and Geographical Information Systems
 for Resource Management in Developing Countries

2.4.2. Resolución de un sensor.

La resolución de un sistema sensor es su habilidad para discriminar la información de detalle. El concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.¹⁸

Resolución espacial.

Las características espaciales de un sensor se refieren al área cubierta en una escena y al detalle que puede ser visto dentro de la escena. El área cubierta por una escena depende de la velocidad de exploración, número de detectores y las características orbitales del sensor, de tal forma que los satélites geoestacionarios pueden observar la mitad de la Tierra en una única escena y los de órbita polar lo hacen en imágenes por fila. En cuanto al objeto más pequeño que puede distinguirse en una imagen se define al píxel que corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen. La resolución espacial de los sensores de observación terrestre varía en un amplio ámbito. Por ejemplo, los satélites de recursos naturales, destinados a obtener información sobre áreas muy heterogéneas, pueden tener resoluciones de cierto detalle: desde 10 m x 10 m (sensor SPOT - HRV (P)) hasta los 80 m x 80 m (sensor Landsat - MSS). Otro grupo de satélites orientado hacia aplicaciones más globales, como NIMBUS - CZCS, NOAA - AVHRR, tienen un tamaño de píxel comprendido entre 500 y 1100 m por lado. El caso extremo correspondería a los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (METEOSAT, GOES, GMS) que manejan tamaño de píxel de hasta 5 km.

Resolución espectral.

Se refiere al número y amplitud de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Mientras mayor número de bandas proporcione un sensor será más fácil la caracterización espectral de los tipos de cubierta. Por otra parte es deseable tener bandas estrechas, ya que bandas amplias registran un valor promedio, lo que dificulta la diferenciación espectral de las cubiertas de interés.

Dependiendo de los objetivos de aplicación, los sensores operan con un número y amplitud de bandas específicos. Por ejemplo, un sensor para fines meteorológicos incluirá una sola banda en el visible puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes, una o dos bandas en el térmico que permitan conocer la temperatura de las nubes, y otra en el infrarrojo medio, en donde pueda apreciarse el contenido de humedad de la atmósfera.

Resolución radiométrica.

Es la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Por ejemplo, en el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica se indica por el número de niveles de gris recogidos en la película. Como se estableció al inicio de este capítulo, los sensores óptico - electrónicos convierten la radiancia recibida en un valor digital. El número de niveles digitales de la imagen se identifica con la resolución radiométrica del sensor. Inicialmente los Landsat - MSS ofrecían un ámbito de 128 niveles de codificación por píxel. En la actualidad, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel (de 0 a 255), con la excepción del NOAA - AVHRR que opera con 1024 niveles. La interpretación de la imagen será mejor mientras mayor sea la resolución radiométrica. Sin embargo, es conveniente mencionar que si la interpretación es visual, el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris, y no más de 20 000 tonalidades.

Se considera que para lograr un análisis visual adecuado basta con 16 niveles por color (4096 tonalidades), por lo que parece excesivo contar con 256 niveles digitales por banda (16 millones en una combinación coloreada de tres bandas). Sin embargo, si se realiza una clasificación digital, la resolución radiométrica puede aprovecharse mejor.

Resolución temporal.

La resolución temporal se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Esto depende de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación), así como del diseño del sensor (ángulo de observación y apertura).

Nuevamente dependiendo de los objetivos de aplicación del sensor, varía la frecuencia de cobertura. Por ejemplo, los satélites meteorológicos observan fenómenos de rápido cambio, por lo que se requieren imágenes frecuentes. Satélites geoestacionarios como el METEOSAT proporciona una imagen cada 30 minutos, los de órbita polar, como el NOAA cada 12 horas. Mientras que los satélites de recursos naturales como el Landsat tiene una periodicidad de 16 días y el SPOT de 26 días.

Conviene expresar que al aumentar la resolución espacial, espectral y radiométrica de los sensores (últimos satélites) hay un incremento considerable en el volumen de datos que no es posible grabar a bordo y es preciso que el satélite esté continuamente conectado a la red de satélites de comunicación (Tipo TDRSS), a través de los cuales se envían las imágenes a las antenas receptoras. La Figura 2.4 muestra las relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para varios sensores.

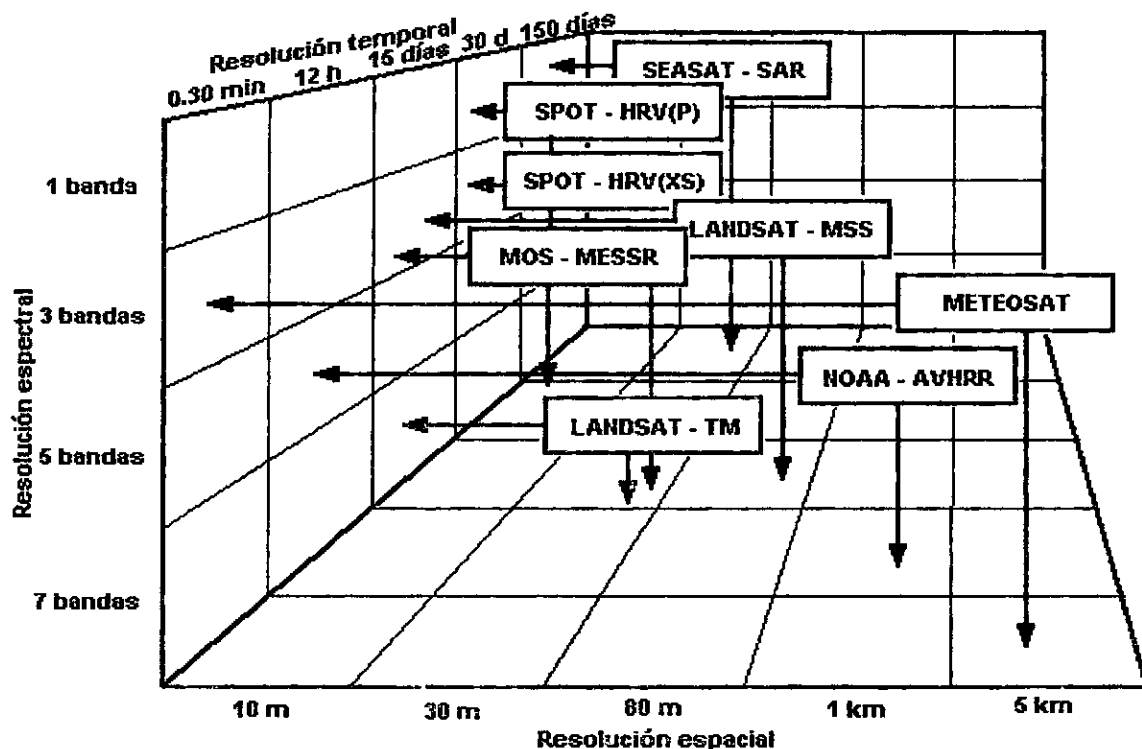


Figura 2.4. Resolución espacial, espectral y temporal para varios sensores.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

2.5 Plataformas espaciales.

A continuación se presentan las características relevantes de los proyectos más importantes usados para la percepción remota. Se presenta la información básica que puede obtenerse de las plataformas espaciales. El Cuadro 2.2 resume las características de los principales sensores y plataformas espaciales empleadas en percepción remota.

Cuadro 2.2. Sensores y plataformas espaciales empleados en percepción remota.

PLATAFORMA DATO	FECHA DE LANZAMIENTO	ALTURA PROMEDIO SOBRE LA TIERRA (km)	PERIODO DE LA ORBITA (En minutos, excepto donde se indique otra)	PERIODO DE COBERTURA (En días, excepto donde se indique otra)	TAMAÑO DEL ELEMENTO DE RESOLUCION	TAMAÑO DE LA IMAGEN	BANDAS ESPECTRALES
PRINCIPALES SATELITES DE PERCEPCION REMOTA							
Skylab	Febrero 1973	435	93	Irregular	Variable y comparable a los Landsat 1 y 2	Variable	13 bandas espectrales entre 0.4 y 12.5 μm .
Landsat 1, 2	Julio 1972 Enero 1975	920	103	18	57 x 79 m ²	185 x 185 km ²	1) 0.5 - 0.6 μm . 2) 0.6 - 0.7 μm 3) 0.7 - 0.8 μm 4) 0.8 - 1.1 μm
Landsat 3	Marzo 1975	912	103	18	57 x 79 m ² y 238 x 238 m ² para la 5a. banda.	185 x 185 km ²	1) 0.5 - 0.6 μm . 2) 0.6 - 0.7 μm 3) 0.7 - 0.8 μm 4) 0.8 - 1.1 μm 5) 10.4 - 12.6 μm
Landsat 4,5	Julio 1982 Marzo 1984	700	90	16	30 x 30 m ² y 120 x 120 m ² para la 6a. banda.	185 x 185 km ²	1) 0.45 - 0.52 μm 2) 0.52 - 0.60 μm 3) 0.63 - 0.69 μm 4) 0.76 - 0.90 μm 5) 1.55 - 1.75 μm 6) 10.4 - 12.5 μm 7) 2.08 - 2.35 μm
Spot 1,2	Noviembre 1985	822	101	26	20 x 20 m ² y 10 x 10 m ² para la 4a. banda.	60 x 60 km ²	1) 0.5 - 0.59 μm . 2) 0.61 - 0.69 μm 3) 0.70 - 0.90 μm 4) 0.51 - 0.73 μm
PRINCIPALES SATELITES DEL MEDIO AMBIENTE Y RADAR							
Nimbus 7	Octubre 1978	955	107		825 x 825 m ²	1.566 x 1.566 km ²	1) 0.43 - 0.45 μm 2) 0.51 - 0.53 μm 3) 0.54 - 0.56 μm 4) 0.66 - 0.68 μm 5) 0.70 - 0.80 μm 6) 10.5 - 12.5 μm
Goes 7	Septiembre 1989	35773	24 hr	30 min	900 x 900 m ² para la 1a. banda y 3.6 x 3.6 m ² para la 2a. banda.	18 x 20 km ²	1) 0.45 - 0.7 μm 2) 3.0 - 14.0 μm
NOAA 11	Diciembre 1989	854	102	4	0.5 x 0.5 m ² para la 1a. banda y 1 x 1 m ² para las bandas 2 - 5.	2.94 x 2.94 km ²	1) 0.58 - 0.68 μm 2) 0.73 - 1.10 μm 3) 3.55 - 3.93 μm 4) 10.3 - 11.3 μm 5) 11.5 - 12.5 μm
Seasat	Junio 1979	790	100		25 x 25 m ²	80 x 80 km ²	25 cm (banda L)
ERS - 1	Mayo 1991	785	100	3	30 x 30 m ²	185 x 185 km ²	5.7 cm (banda C)

Modificado de Lira J. Análisis Digital de Imágenes y Percepción Remota.

2.5.1. Landsat (Sensor MSS y TM).

El Landsat MSS y TM son sistemas de imagen multispectral del tipo de exploradores de barrido. Los dos sistemas tienen configuraciones similares -excepto por el mayor número de bandas y la alta resolución espacial del TM-, ambos operan simultáneamente desde las plataformas espaciales del Landsat - 4 y 5.

El sensor TM (Thematic Mapper) colecta datos con una resolución radiométrica de 256 niveles de radiancia y una resolución espectral de 7 bandas y ofrece una resolución espacial de 30 por 30 m en las seis bandas reflectivas, y de 120 x 120 m en el canal infrarrojo emisor térmico.

Un espejo explorador mueve la vista del telescopio montado en el sensor continuamente a través de la trayectoria de la Tierra durante la cual el sensor TM registra los datos. La trayectoria espectral para las primeras 6 bandas consiste de 16 líneas, las cuales corresponden a una serie de 16 detectores por canal espectral a lo largo de la trayectoria. En comparación, el Landsat MSS tiene solamente 6 detectores por banda. La séptima banda registra en el térmico infrarrojo y tiene un arreglo de 4 detectores. Así que por cada explorador se mapean simultáneamente 16 trayectorias lineales (y 4 para el térmico infrarrojo).³

Las características de los sensores MSS y TM se resumen en la Figura 2.5.

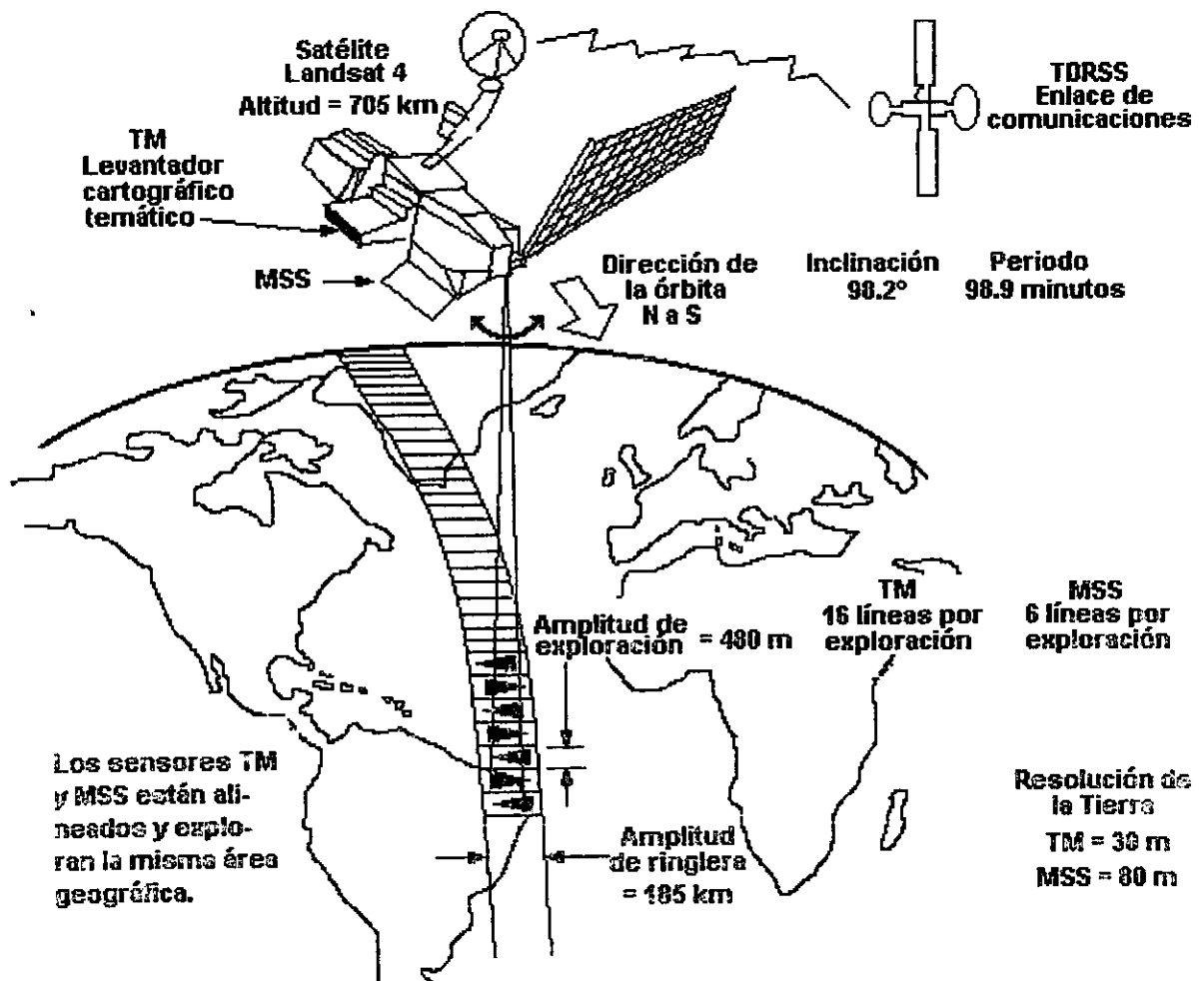


Figura 2.5. Características de las plataformas Landsat 4 y 5.
Adaptada de Belward, Valenzuela. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries.

Los satélites MSS y TM operan en una órbita polar heliosíncrona, circular y repetitiva a una altitud de 705.3 km. Circundan a la Tierra cada 98.9 minutos, completan 14.6 órbitas por día y vuelve a la misma porción de la Tierra en 16 días. Esto significa que cada sitio terrestre es visto al menos una vez cada 16 días. Las imágenes del sensor tienen franjas de terreno de aproximadamente 185 km de largo y exploran un ancho de 480 m.

2.5.2. Spot.

Los dos satélites SPOT HRV con equipos de exploración por empuje pueden obtener imágenes en modo pancromático o multiespectral. Cada explorador tiene 6000 detectores individuales. En el modo pancromático todos los detectores suministran una resolución espacial de 10 m. En el modo multiespectral solamente uno de los detectores proporciona una resolución espacial de 20 m. Los exploradores de empuje HVR adquieren datos multiespectrales, en tres bandas espectrales, cubriendo en la porción visible del espectro: verde (XS1, 0.50 - 0.59 μm), rojo (XS2, 0.61 - 0.68 μm) y en el cercano infrarrojo (XS3, 0.79 - 0.89 μm). El canal pancromático cubre un ámbito espectral de 0.51 a 0.73 μm . Cada HVR cubre una franja de terreno de 60 km aproximadamente, una vez que ambos HVR están operando en modo de vista nadir, pueden proporcionar una máxima franja de terreno de 117 km, como se muestra en la Figura 2.6A.²⁵

La órbita de los satélites SPOT es polar y heliosíncrona a una altitud de 832 km. La inclinación de la órbita es de 98.7°, su periodo es de 101.4 minutos y completan 14.2 órbitas por día. Esto implica que cada 26 días se vuelve a observar la misma porción de la Tierra. Una característica espacial de los sensores HVR es que pueden variar el ángulo de observación a 27° a cada lado de la trayectoria terrestre, lo que se observa en la Figura 2.6B. Esto permite obtener imágenes estereoscópicas, lo que añade a su potencial temático una gran capacidad topográfica. La posibilidad de variar el ángulo de observación permite además observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes (de 26 días a 2-9 días según latitudes). Esto se representa en las Figuras 4C y 4D.

El modo pancromático, junto con la posibilidad de adquirir datos estereoscópicos, se está usando principalmente en la actualización de cartografía a escalas mayores a 1: 50 000, mientras que el modo multiespectral es más utilizado para estudios ambientales.

Aún no se ha concluido en cuanto a la superioridad de los satélites SPOT respecto a las imágenes TM. Es decir, no se ha evaluado qué implica la mejora en resolución espacial *versus* la pérdida espectral para identificar tipos de cubierta. Sin embargo, en lo relativo a estudios ambientales, el sensor TM mantiene ventaja por cuanto la dimensión espectral es básica.

2.5.3. TIROS-N/NOAA AVHRR.

Los satélites TIROS-N/NOAA AVHRR de la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera de los E.U.A. tienen órbita polar heliosíncrona a una altitud de 830 km. La inclinación orbital es de 99.09°, y la duración es de 102 minutos, la cual corresponde a 14.1 órbitas por día. Los satélites repiten su ciclo cada 9 días. Estos satélites transportan el AVHRR, diseñado para proporcionar imágenes con una resolución de 1.1 km en cinco bandas del espectro, cubriendo en una imagen un área aproximada de 3 000 km de lado. El NOAA-11 proporciona imágenes por las tardes, mientras que el satélite NOAA-10 proporciona imágenes por las mañanas.

El sensor AVHRR percibe la radiación en el rojo visible (0.58 - 0.68 μm), cercano infrarrojo (0.72 - 1.1 μm), corto infrarrojo (3.55 - 3.93 μm), y dos en térmico infrarrojo (10.3 - 11.3 μm , 11.5 - 12.5 μm).

2.5.4. Satélites geoestacionarios.

Los satélites geoestacionarios sirven para la observación meteorológica, formando una red que cubre el globo terrestre. La organización meteorológica mundial coordina la red de satélites geoestacionarios norteamericanos, europeos y japoneses.

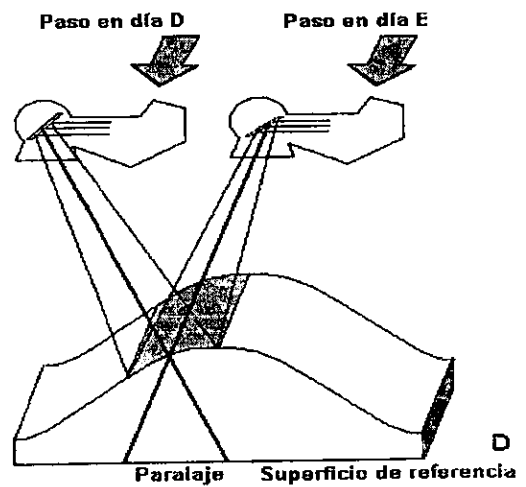
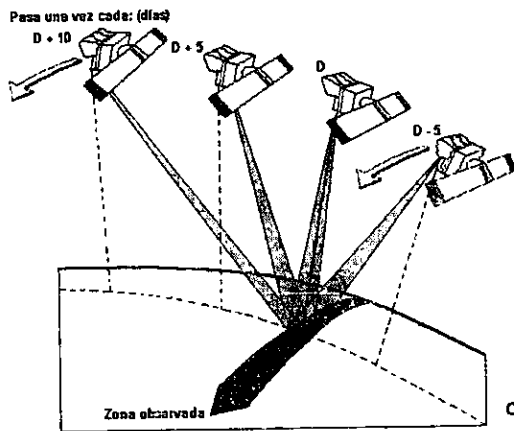
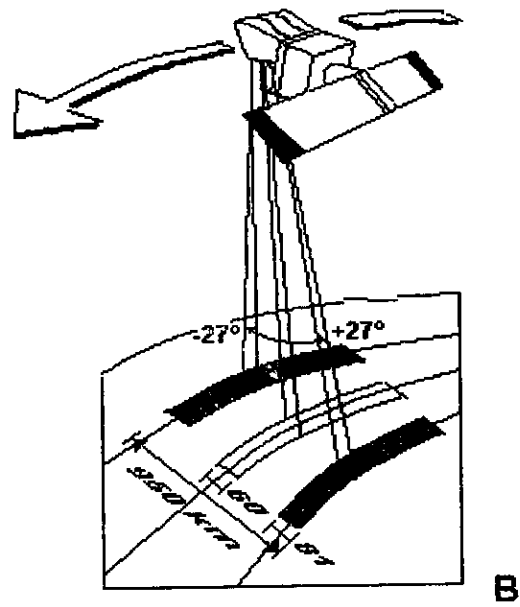
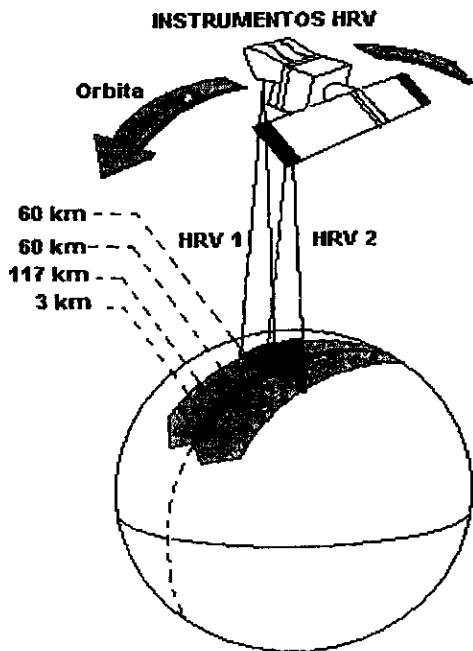


Figura 2.6. Características del sistema Spot.
 Adaptada de Belward, Valenzuela. Remote Sensing and Geographical Information
 Systems for Resource Management in Developing Countries.

La NASA lanzó en 1966 el primer satélite geostacionario denominado a partir de 1975 como GOES. De esta serie se cuenta con tres satélites que cubren el territorio de E.U.A. y el Atlántico norte. El GOES ofrece imágenes cada 30 minutos en el espectro visible e infrarrojo térmico, e incluye un sensor de barrido (VISSR).

En 1977 fue lanzado el satélite europeo METEOSAT, sustituido por METEOSAT 2, en 1981. Cuenta con tres bandas del espectro: 0.4 a 1.1 μm (medios de comunicación), 5.7 a 7.1 μm (estudia el contenido de vapor de agua y 10.5 a 12.5 μm (discriminación de nubes y temperaturas de superficie). El sensor que usa es del tipo de barrido, la resolución espacial es de 2.5 a 5 km, apropiada para la observación de grandes espacios.

Características similares tienen el satélite japonés GMS, el indio Insat y el ruso GOMS; todos estos satélites tienen aplicaciones meteorológicas fundamentalmente.

2.5.5. MOS-1 Y IRS-1.

En 1987, la agencia espacial japonesa (NASCA) lanza el primer satélite MOS-1 (Marine Observation Satellite) y fue diseñado en principio para la investigación oceánica. Cuenta con dos sensores: uno de exploración por empuje MESSR (Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer) con resolución de 50 m y cuatro bandas espectrales, dos en el visible y dos en el infrarrojo cercano; un explorador de barrido VTIR (Visible and Thermal Infrared Radiometer) con una banda en el visible y tres en el infrarrojo térmico (resolución espacial de 900 a 2700 m, respectivamente); y un radiómetro de microondas.

Para estudios del ambiente destaca el MESSR, que tiene tecnología similar al HRV-SPOT, al MSS en cuanto a resolución espectral, e intermedio entre éste y el TM respecto a resolución espacial. El ciclo completo de recubrimiento es de 17 días y ofrece imágenes de 100 x 90 km.

En 1988 la agencia espacial india lanzó el satélite IRS-IA (Indian Remote Sensing Satellite). Este satélite usa tecnología de exploración por barrido, con dos sensores: LISS (Linear Imaging Self Scanning) con resolución de 72.5 m (LISS-I, una cámara) y 36.25 m (LISS-II, dos cámaras). El LISS-I cubre una escena de 148 km y de 74 km para el LISS-II, con un ciclo de repetición de 22 días. El sensor LISS abarca cuatro bandas del espectro, comprendidas entre el azul y el infrarrojo próximo.

Capítulo 3

Procesamiento y análisis de imágenes

El propósito de este capítulo es presentar los principios y las técnicas más usadas en el procesamiento y análisis digital de imágenes.

3.1. Estructura básica de una imagen digital.

3.1.1. Captura y digitalización de la imagen.

El sistema de sensores de los satélites es un dispositivo óptico y electrónico complicado, que convierte las mediciones de radiancia recibidas por el sensor -para una determinada superficie terrestre y banda del espectro- en una señal eléctrica que genera un nivel digital (ND) representado en un pixel (unidad visual más pequeña que aparece en la imagen). Por lo tanto, el ND consiste en un valor digital que puede traducirse a una intensidad visual (nivel de gris), mediante cualquier convertidor digital - analógico.¹¹

En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina **pixel**, y está definido por un número entero ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa a nivel de gris.¹⁸

El sistema sensor separa los componentes de la radiancia en las longitudes de onda del espectro electromagnético. Estos componentes separados (7 en el caso del LANDSAT) y transformados a señales eléctricas que generan ND son los "valores de canales" para un pixel en particular. Para cada canal o banda se produce un número binario en la digitalización, comúnmente en el ámbito de 0 - 255, así que 8 bits pueden usarse para almacenar los valores de un canal (ND correspondiente a cada pixel).

3.1.2. Formación de una imagen y principio de visualización.

El sistema de sensores de los satélites explora la superficie terrestre y muestrea las radiancias en espacios terrestres sucesivos simultáneamente en todas la bandas, formando una imagen digital multiespectral.³

Entonces, una imagen multiespectral está constituida de k matrices llamadas "canales". La Figura 3.1 presenta la organización de una imagen digital TM; en la figura puede apreciarse que se trata de matrices numéricas de 3 dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras que la tercera se refiere a su dimensión espectral. Las filas de la matriz (líneas) expresan la dirección Norte - Sur, mientras que las columnas indican la orientación Oeste - Este. En estas matrices el origen de las coordenadas está en la esquina superior izquierda (línea 1, columna 1); esto se debe a la secuencia de adquisición de imágenes (Norte - Sur), de acuerdo a la traza del satélite.

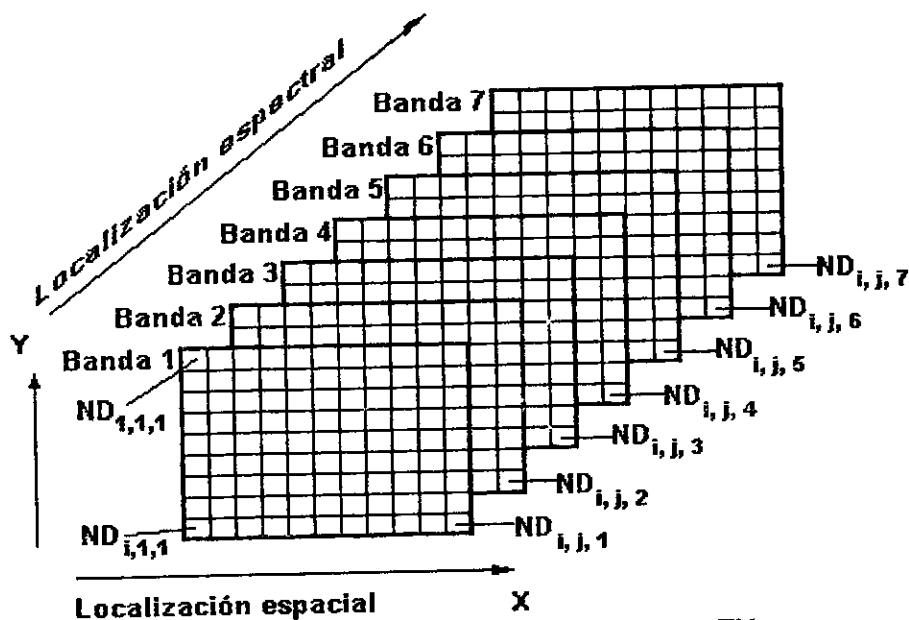
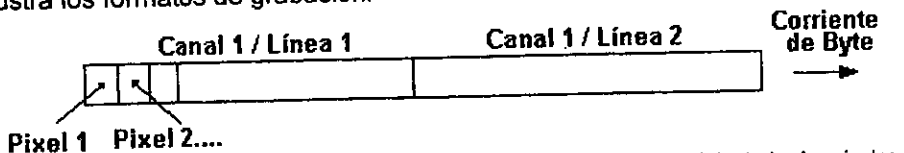
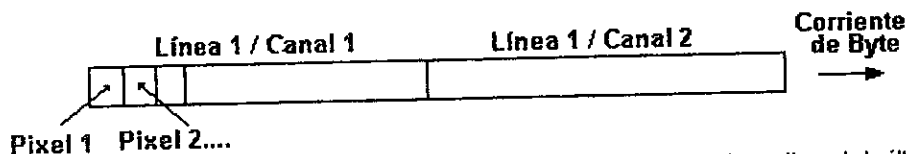


Figura 3.1. Organización de una imagen digital TM.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

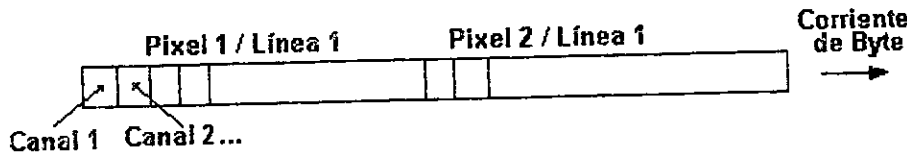
Cuando se almacena una imagen digital como un archivo de computadora (en discos y cintas magnéticas), es organizado como una corriente continua de bits, donde un bit graba el valor de un canal correspondiente a un píxel. Normalmente las imágenes también contienen archivos de cabecera que incluyen el formato de grabación de los ND, tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y azimut solar, así como el tipo de correcciones aplicadas. Existen tres formatos para grabar los ND de la imagen como una corriente continua de bits; estos formatos son: banda secuencial, banda intercalada por línea y píxeles intercalados.⁵ La Figura 3.2 ilustra los formatos de grabación.



Banda Secuencial.- Los ND de cada banda se disponen uno a continuación del otro hasta completar todos los píxeles de una banda. Los ND de las siguientes bandas se colocan sucesivamente. Este formato permite una organización de datos bien estructurada. Sin embargo, cuando se requiere leer subimágenes es preciso recorrer el conjunto de la cinta para acceder a todas las bandas.



Banda Intercalada por Línea.- Los ND se organizan por líneas en lugar de por bandas. Tras la primera línea de la última banda se sitúa la segunda línea de la banda 1, de la banda 2, y así sucesivamente. Este formato agiliza la lectura de subimágenes.



Píxeles Intercalados.- Después del ND correspondiente al píxel de la línea 1, columna 1, banda 1, aparece el correspondiente a la línea 1, columna 1, banda 2, seguido del adquirido para la línea 1, columna 1, banda 3, etc. este formato fue ideado para agilizar la lectura de subimágenes cuando no se disponía de equipo de amplia memoria. El formato es hoy poco frecuente.

Figura 3.2. Formatos de grabación.
Adaptada de Belward, Valenzuela. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resources Management in Developing Countries.

3.2. Preprocesamiento y rectificación de imagen.

Las imágenes adquiridas a través de sensores remotos presentan algunas alteraciones debidas a errores ocurridos en el proceso de captación de datos. Esta es la razón por la que es necesario preprocesar los datos captados por el sensor antes de analizarlos.

La rectificación de imágenes permite hacer correcciones de distorsión, degradación y ruido introducido durante el proceso de captación de esas imágenes.²⁷ Algunos de estos problemas se resuelven rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de imágenes. Otros, sin embargo, persisten, y hacen precisa la aplicación de una serie de técnicas de ajuste.

3.2.1. Distorsiones y correcciones radiométricas.

Las distorsiones radiométricas son aquellas que afectan la radiometría de los objetos en la imagen, mientras que las correcciones radiométricas son las técnicas que modifican los ND originales con objeto de aproximarse a los que habría presentes en la imagen en el caso de una recepción ideal. Las distorsiones radiométricas incluyen las provocadas por la atmósfera así como aquellas derivadas de un mal funcionamiento del sensor. A continuación se presentan algunos de los problemas más comunes y los procedimientos para minimizarlos.

Restauración de líneas o píxeles perdidos.

El mal funcionamiento de un sensor o de la antena receptora puede ocasionar que una línea o pixel aparezca con valores muy bajos o nulos, mostrándose en la imagen como líneas negras o blancas, o píxeles aislados de aspecto similar. La forma de estimar los ND de los píxeles perdidos es considerando los ND de los píxeles vecinos ya que muchas variables tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio. Por lo tanto, los valores de radiancia provenientes de una superficie terrestre tienden a correlacionarse con áreas terrestres vecinas. Existen varias formas de introducir este criterio de vecindad. La más sencilla es sustituir el ND de cada línea o pixel por el de los precedentes o posteriores.⁵

$$ND_{ij} = ND_{i-j} \dots \dots (3.1)$$

donde:

ND_{ij} es el ND de la línea i (defectuosa) y columna j ;

ND_{i-j} es el ND del pixel situado en la línea precedente.

En el caso de la sustitución de líneas defectuosas por las posteriores se incluiría el subíndice $i + 1$.

Un segundo método para restaurar líneas o píxeles perdidos consiste en promediar los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa.⁵ Así,

$$ND_{ij} = \text{ent} ((ND_{i-1j} + ND_{i+1j}) / 2) \dots \dots (3.2)$$

en donde $\text{ent} ()$ se refiere a que el resultado debe aproximarse al número entero más cercano.

Corrección del bandeo de la imagen.

En los sensores de barrido la exploración se realiza en varias líneas simultáneamente, por lo que requiere varios detectores por banda. Es importante que todos ellos traduzcan uniformemente la señal detectada, para

que la misma radiancia recibida no se codifique en ND distintos. Un mal calibrado entre los detectores que forman el sensor, puede producir un efecto de bandeo en la imagen final, especialmente notable en zonas de baja radiancia (sombras, superficie marina). Este efecto es periódico, ya que cada detector registra una de cada n líneas, siendo n el número de detectores por banda.

En el caso de tener detectores bien calibrados, la señal detectada por cada uno de ellos tendería a presentar histogramas similares (ND versus frecuencia). Por lo tanto, para ajustar la señal detectada para cada detector, y corregir el efecto de bandeo, se requiere calcular el histograma para cada detector, calculando independientemente la frecuencia de los n grupos de líneas.² Enseguida se elige un histograma de referencia que es el relativo al conjunto de la imagen, es decir, el formado por todas las líneas que la componen. Se calculan la media y la desviación estándar de cada histograma parcial y del histograma de referencia para después ajustar el primero con respecto al segundo. Esto es, se calculan coeficientes de ajuste para después aplicar una función que permita el ajuste de los histogramas parciales.⁵ Los coeficientes de ajuste son:

$$a_i = \frac{s}{s_i} \dots \dots (3.3)$$

y

$$b_i = ND - a_i ND_i \dots \dots (3.4)$$

donde:

s es la desviación estándar del histograma de referencia;
 s_i es la desviación estándar del histograma parcial;
 ND es la media del histograma de referencia; y
 ND_i es la media del histograma parcial.

El valor corregido se calcula con la función

$$ND_{ij}' = a_i ND_{ij} + b_i \dots \dots (3.5)$$

Corrección atmosférica.

Los efectos atmosféricos en imágenes de sensores remotos son debidos especialmente a la atenuación que sufre la radiación de la atmósfera y la dispersión en dicha radiación, siendo el segundo factor el más significativo. Por ello la radiancia detectada por el sensor no corresponde exactamente a la radiancia de la superficie terrestre, sino que su valor ha sido incrementado debido al efecto dispersor de la atmósfera.

El efecto de dispersión es dependiente de la longitud de onda, y también de la presencia de vapor de agua y aerosoles que varían en el tiempo y en el espacio. En relación con esto último, la dispersión atmosférica no es constante en una imagen, sino que puede haber zonas más afectadas que otras.

Mientras menor es la longitud de onda, mayor es el efecto de dispersión; por esta razón las imágenes multiespectrales presentan menos contraste en las bandas correspondientes al azul y al verde, y aumenta en las bandas del infrarrojo. Uno de los métodos para corregir la radiancia atmosférica es el denominado corrección del histograma por sus valores mínimos. Se considera que áreas correspondientes a zonas de sombra o agua clara deben presentar una radiancia muy cercana a cero. En la práctica, el histograma de los ND siempre presenta un mínimo superior a ese valor, lo que es atribuido al efecto de dispersión atmosférica. En consecuencia, con el método del histograma por sus valores mínimos se resta a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el histograma en cero.

3.2.2. Distorsiones y correcciones geométricas.

Los datos obtenidos por P.R. son afectados por distorsiones geométricas que pueden ser debidas a la geometría del sensor, exploración e inestabilidad de la plataforma, rotación de la Tierra y su curvatura. Algunas de estas distorsiones son corregidas por los centros de recepción y venta de imágenes y otras pueden ser corregidas referenciando las imágenes a mapas existentes de la zona. Las imágenes sin tratamiento obtenidas por P.R. contienen la localización de los datos no referenciados. De tal forma que se pretende transformar las coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM u otras proyecciones), de manera que la imagen resultante pueda superponerse usando mapas convencionales. Por otro lado, cuando se pretenden realizar estudios multi - temporales también se busca corregir geoméricamente para lograr ajustar dos o más imágenes entre sí.

La corrección de todas las distorsiones geométricas a la vez, se realiza con una transformación basada en funciones numéricas.⁷ Esta transformación está dada en los siguientes polinomios:

$$x = a_0 + a_1 r_n + a_2 c_n \dots \dots (3.6)$$

$$y = b_0 + b_1 r_n + b_2 c_n \dots \dots (3.7)$$

donde:

r_n es el número de renglón;
 c_n es el número de columna; y
 x y y son las coordenadas del mapa.

Para definir la transformación será necesario calcular los coeficientes de los polinomios (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2). Para el cálculo tendrán que seleccionarse varios puntos que puedan localizarse exactamente en el mapa (x, y), y que además sean identificables en la imagen (renglón, columna). Es conveniente que sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, como rasgos físicos de carácter antropogénico no sujetos a cambios temporales, por ejemplo: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. El número mínimo de puntos requerido para el cálculo de los coeficientes de los polinomios es de tres para una función de ajuste de primer grado, seis para una de segundo grado y nueve para una de tercer grado. Pero conviene seleccionar más puntos que este número mínimo para obtener una transformación óptima con el más pequeño error en la posición de los puntos seleccionados. Los errores pueden deberse a una pobre posición del mouse en la imagen y por una denominación equivocada de las coordenadas en el mapa. La exactitud general de la transformación está indicada por el promedio de los errores en los puntos de referencia: llamado error medio cuadrático (RMS) o Sigma, y puede valorarse comparando las coordenadas estimadas por la transformación con las reales, para cada punto de control. Un alto RMS para un punto de control, indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, pueden eliminarse aquellos puntos con un valor de RMS alto, ya que se considera que su localización no es correcta. A continuación se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso termina cuando todos los puntos de control presentan un RMS por debajo de cierta condición que haga que el RMS general esté dentro de márgenes tolerables, establecidos de acuerdo a la escala y a la precisión con la que se pretenda obtener los resultados.

Si la precisión de la transformación es aceptable, entonces la transformación es relacionada con la imagen y puede hacerse una referencia para cada pixel dado por el sistema coordenado, así la imagen es geo-referenciada. Después de geo-referenciar una imagen, la imagen tendrá coordenadas para cada pixel, pero su geometría no está corregida por las distorsiones geométricas y no está adaptada al mapa de referencia.

Si pretende crearse una imagen que corresponda adecuadamente con esas coordenadas será necesario transformar los ND de la imagen original a esa posición. Esto da como resultado una nueva imagen donde los píxeles son almacenados en una nueva geometría, la cual está relacionada con la geo-referencia (contiene información de coordenadas y tamaño del píxel). Esta nueva imagen se crea por medio de un "remuestreo", por aplicación de un método de interpolación. El método de interpolación se usa para calcular los valores radiométricos de los píxeles, en la nueva imagen basada en los valores de los ND de la imagen original (Figura 3.3).

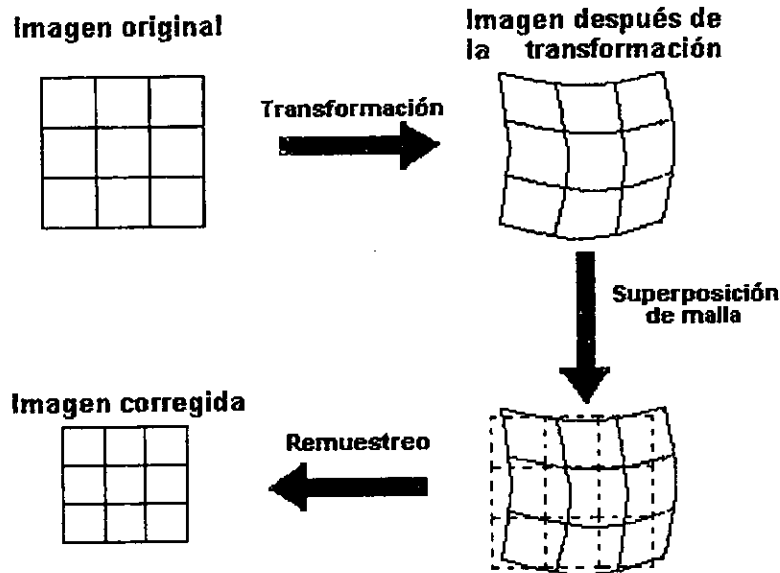


Figura 3.3. Proceso de corrección geométrica.
Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

Existen tres métodos de interpolación:

- Vecino más próximo;
- Bi - lineal; y
- Convolución cúbica.

Vecino más próximo.

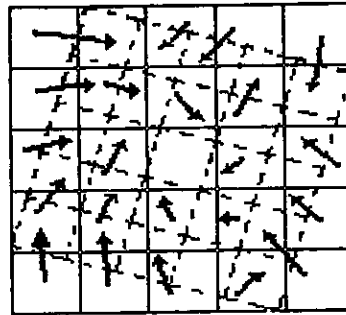
En este método el valor para un píxel (ND) en la imagen corregida es determinado por el valor del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que implica menor transformación de los ND originales⁵ (Figura 3.4). Su principal inconveniente es la distorsión que se produce en rasgos lineales de la imagen (carreteras, fracturas), que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.

Ri - lineal.

La técnica de interpolación bilineal está basada en promediar el ND de los cuatro píxeles más cercanos en la imagen original, pero este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido⁵ (Figura 3.5). Su principal inconveniente es que tiende a difuminar los contrastes espaciales de la imagen original.

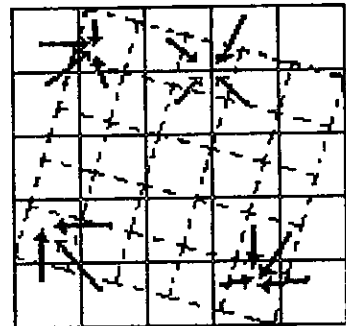
Convolución cúbica.

Este método considera los ND de los 16 píxeles más próximos⁵. La imagen corregida es más correcta, pero requiere de un volumen de cálculo mucho más elevado (Figura 3.6).



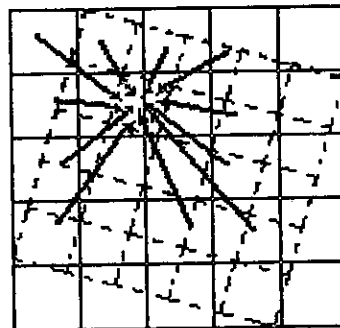
Vecino más próximo

Figura 3.4. Método de interpolación "vecino más próximo".
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.



Interpolación bilineal

Figura 3.5. Método de interpolación Bi-lineal.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.



Convolución cúbica

Figura 3.6. Método de convolución cúbica.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

3.3. Realce de imagen.

Una vez que la imagen ha sido procesada por correcciones radiométricas y geométricas, puede utilizarse ya en los estudios de aplicación. Sin embargo, se requiere usar técnicas para mejorar la interpretación visual de la imagen, es decir, disponer mejor los datos para su análisis visual, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés que presenta la imagen.

Las técnicas de realce de imagen pueden clasificarse de muchas formas. El realce de contraste, también llamado realce global, transforma el conjunto de datos de la imagen usando el cálculo estadístico. Ejemplos de las técnicas de realce de contraste son: expansión lineal del contraste, expansión del histograma analizado, expansión especial del contraste. Contrario a esto, el realce espacial o local toma en consideración

condiciones locales solamente, y estas pueden variar considerablemente en una imagen. Ejemplos de las técnicas de realce espacial son: suavizamiento y definición de imágenes.

3.3.1. Realce de contraste.

La sensibilidad de los sensores abordo de los satélites ha sido diseñada de tal forma que puedan grabar un amplio ámbito de características de luminosidad, bajo un amplio ámbito de condiciones de iluminación. Muy pocas escenas terrestres muestran un ámbito de luminosidad que utilice por completo el ámbito de luminosidad de los detectores de los satélites. El objetivo del realce de contraste es mejorar la interpretación visual de una imagen, incrementando la distinción aparente entre las características en la escena.⁷ Aunque la mente humana es excelente en distinguir e interpretar características espaciales en una imagen, el ojo es más bien pobre en la discriminación de diferencias sutiles en reflectancia que representan tales características. Usando las técnicas de realce de contraste, estas pequeñas diferencias son ampliadas logrando que sean fácilmente observables. La expansión del contraste se usa también para minimizar el efecto de "neblina". La luz dispersada que llega al sensor directamente de la atmósfera, sin que tenga interacción con los objetos en la superficie terrestre, es llamada neblina. La neblina produce en general valores altos de los ND y su efecto aditivo resulta en una reducción del contraste en la imagen. Recuérdese que el efecto de neblina es diferente para cada banda espectral; es muy alto en el azul, y muy bajo en la banda del infrarrojo del espectro electromagnético.

Las técnicas utilizadas para el realce de contraste son: expansión lineal e histograma ecualizado. Para el realce de ámbitos específicos de datos mostrando cierto tipo de cubiertas terrestres se usa la expansión especial de contraste.

Un monitor de computadora es capaz de desplegar una imagen de satélite en 256 niveles de gris (0 - 255). Esto corresponde a la resolución de la mayoría de las imágenes de satélite, ya que sus números digitales también varían en el ámbito completo de luminosidad del monitor (desde el negro al blanco, pasando por una variedad de tonos de grises).

La expansión lineal es el realce de contraste más simple. Un valor de ND mínimo del histograma original se asigna al negro extremo (0), y el ND máximo se asigna al blanco extremo (255); el resto de los valores se distribuyen linealmente entre ambos extremos. Un inconveniente de la expansión lineal, es que asigna muchos niveles visuales o de pantalla a los valores de ND -que raramente ocurren-, como si ocurrieran frecuentemente. Sin embargo, usar el ND mínimo en cero y el máximo en 255 todavía produce, en la mayoría de los casos, una imagen bastante oscura. Incluso aunque todos los tonos de gris de la pantalla sean utilizados, la mayoría de los píxeles son desplegados en gris medio. Esto es causado por la distribución más o menos normal dentro de los valores mínimo y máximo de las colas de distribución. Por esta razón es común fijar las colas del histograma en los valores extremos del ámbito (valor más alto y más bajo) y los valores intermedios repartidos en la escala.

La técnica del histograma ecualizado es una expansión no lineal. Los ND son redistribuidos considerando su frecuencia. Es decir, aquellos ND con mayor número de píxeles serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor ámbito de visualización en el monitor. Esta técnica ofrece mejores resultados que la expansión lineal, especialmente si la imagen original presenta una distribución gaussiana.

La expansión espacial de contraste es muy similar a la expansión lineal, la diferencia radica en restringir el contraste a un ámbito específico de ND en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés. Este método es muy usado cuando se quiere resaltar solamente cierto tipo de cubierta, por ejemplo agua. Los valores de ND para esta característica están en el ámbito de 5 a 18 y con el fin de ser factible discriminar tanto como sea posible, es adecuado usar todos los niveles disponibles de gris sólo para esta característica. De esta manera aparecerán diferencias detalladas en la característica de interés, donde las características que quedan se asignan a un único tono de gris. La Figura 3.7 muestra las principales técnicas de realce de contraste.

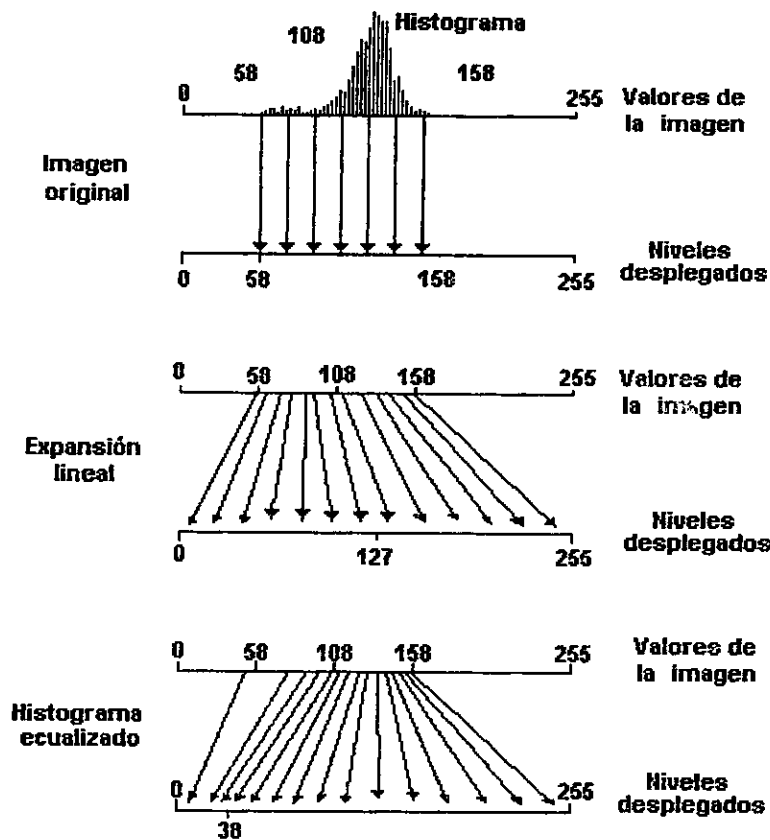


Figura 3.7. Principio de realce de contraste.

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

3.3.2. Realce espacial.

Los procedimientos de realce espacial producen una modificación de un valor de un pixel en una imagen, basado en los valores de pixeles en su vecindad inmediata (realce local). Comúnmente se usan filtros para corregir y restaurar imágenes afectadas por un mal funcionamiento del sistema; también se usan para realzar las imágenes para una interpretación visual, y extraer características. En todos los procedimientos de realce, el objetivo es crear nuevas imágenes a partir de los datos de la imagen original, en cierto orden para incrementar la cantidad de información que puede interpretarse visualmente.

Filtros de frecuencia espacial.

Simplemente llamados filtros espaciales, pueden enfatizar o suprimir datos de la imagen de varias frecuencias espaciales. La frecuencia espacial se refiere a la desigualdad en las variaciones de los ND en una imagen. En áreas de frecuencia espacial alta, los ND pueden cambiar abruptamente sobre relativamente un relativo número pequeño de pixeles (por ejemplo, a través de carreteras, límites de campos, líneas de costa y tierra). Las áreas de imágenes iguales o suaves se caracterizan por una frecuencia espacial baja, donde los ND solamente cambian gradualmente sobre un gran número de pixeles (por ejemplo, grandes campos agrícolas homogéneos, cuerpos de agua, etc.). Los filtros de bajo paso son designados para enfatizar las características de baja frecuencia y suprimir los componentes de la imagen de alta frecuencia. Los filtros de alto paso hacen justamente lo contrario.⁷

Ambos tipos de filtrado se abordan de manera similar. Para lograr poner los pixeles de la imagen en relación con sus vecinos (ya sea para homogenizarlos o diferenciarlos), es necesario realizar una serie de operaciones aritméticas entre cada uno de ellos y sus vecinos. La forma de efectuar este proceso es aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF), los cuales son factores de

ponderación. Esta matriz es denominada Kemel y puede tener un tamaño variable en función del número de píxeles vecinos que se quieran implicar en el proceso. Lo habitual es una matriz de 3 x 3 CF, que se aplica a todos los píxeles de la imagen. También pueden usarse matrices de filtraje mayores, por ejemplo, de 5 x 5 ó 7 x 7 píxeles. Mientras mayor sea la matriz de CF el efecto de suavizado o realce espacial será más intenso, al considerar un mayor número de píxeles vecinos.

Es pertinente insistir en que sólo se modifica el ND del píxel central, entre los que son afectados por la matriz de filtraje. Si los CF tienden a ponderar el valor central en detrimento de los externos, el píxel refuerza sus diferencias frente a los vecinos (filtro paso alto), por el contrario si los CF favorecen a los píxeles externos, el central se asemejará más a los adyacentes (filtro de bajo paso).

El procedimiento matemático del filtraje consiste en relacionar cada píxel con sus vecinos, con base en CF determinados por el usuario, los cuales marcan las consecuencias del filtraje.⁵ Para una matriz de 3 x 3 CF, la ecuación genérica queda:

$$ND'_{ij} = \frac{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 ND_{i+p, j+q} CF_{f,p, c+q}}{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 CF_{f,p, c+q}} \dots \dots (3.8)$$

en donde:

ND_{ij} es el ND original del píxel i, j;

ND'_{ij} es el ND de salida para ese mismo píxel;

CF es el coeficiente de filtraje;

f y c son la fila y columna centrales de la matriz de filtraje.

Por ejemplo, si se pretende aplicar un filtro de bajo paso a una imagen de 5 x 6 píxeles, empleando la matriz de 3 x 3 CF, el proceso se muestra en la Figura 3.8.

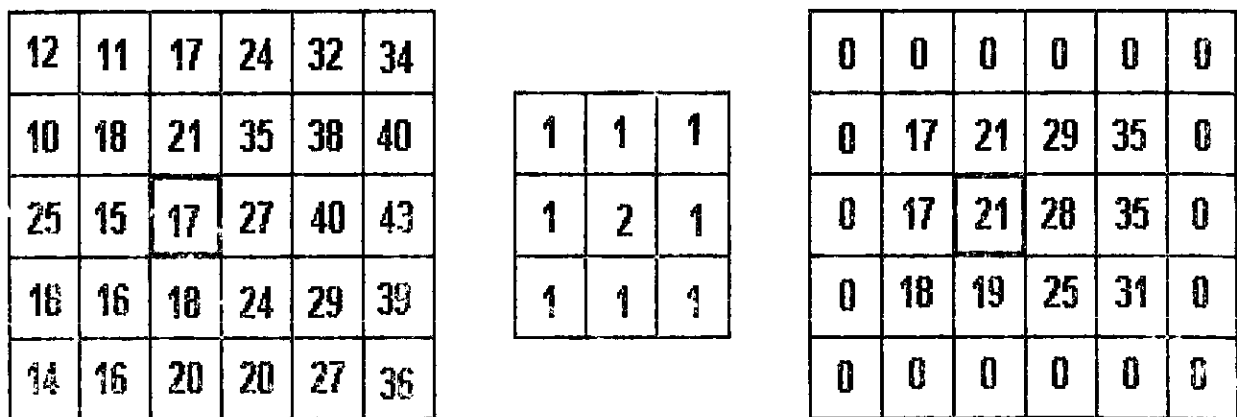


Figura 3.8. Ejemplo de filtro de bajo paso.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

Con respecto al ejemplo, el nuevo ND del pixel central se calcula a través de un promedio de los 8 vecinos, y una pequeña ponderación del valor central; es decir:

$$ND'_{3,3} = \frac{18+21+35+15+2 \times 17+27+16+18+2410}{10} = 20.8 \doteq 21$$

Puede notarse que hay mayor homogeneidad en la nueva imagen, lo cual puede comprobarse ya que la desviación típica de los pixeles afectados por el filtraje en la imagen original es de 8.91, y en la nueva imagen es de 6.77.

Se denomina convolución a la operación en la que cada valor del pixel se multiplica por su correspondiente CF, para después sumar los nueve valores resultantes (si se trata de una matriz de filtrado de 3 x 3), cuyo valor se sustituye por el valor original del pixel central.⁵

Filtros de bajo paso.

Aplicar un filtro de bajo paso tiene el efecto de filtrar las frecuencias altas y medias y la imagen resultante tiene una apariencia homogénea o suave. Por esto, este procedimiento es llamado también suavizamiento de imagen y el filtro de bajo paso es llamado filtro suavizante. Es fácil suavizar una imagen; el problema básico es hacer esto sin perder características interesantes, por esta razón se dá mayor énfasis en suavizar los bordes.⁷

El filtro de bajo paso se ha utilizado para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, y para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías como paso previo a la clasificación.⁵ Un ejemplo de esto son las zonas urbanas, en donde se mezclan distintos tipos de cubierta en un espacio reducido.

En el filtro de bajo paso pueden usarse diversas matrices. Las más usuales son:

1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0

0.25	0.50	0.25
0.50	1.0	0.50
0.25	0.50	0.25

1.0	1.0	1.0
1.0	2.0	1.0
1.0	1.0	1.0

La primera matriz es un simple promedio de los 9 pixeles que componen la ventana de filtraje; las otras dos matrices ponderan el valor central para evitar una pérdida excesiva de detalle.

Filtros de alto paso.

Algunas veces pueden observarse cambios bruscos en los ND de un área a otra. Esto es representado por un gradiente exagerado en los valores de los ND. Los límites de este tipo son conocidos como bordes (rasgos lineales como carreteras, parcelas, accidentes geológicos, etc.). Estos ocupan solamente una pequeña área y son así características de alta frecuencia. Los filtros de alto paso se designan para enfatizar frecuencias altas y suprimir frecuencias bajas.⁷ Cuando se aplica un filtro de alto paso se tiene el efecto de realce de bordes. De aquí que los filtros de alto paso son también llamados filtros de realce de bordes.

Se distinguen dos clases de filtros de alto paso: filtros gradiente (o direccional) y filtros laplacianos (o no direccionales). Los filtros gradiente son direccionales y se usan para realzar direcciones lineales específicas. Están diseñados para realzar los bordes que corren en cierta dirección (por ejemplo: horizontal, vertical o diagonal). Algunos ejemplos de matrices de filtraje para lograr un análisis direccional son:

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

Noreste			Sureste			Suroeste			Noroeste		
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

Los filtros laplacianos son no direccionales porque realzan características que no tienen ninguna dirección en la imagen.⁵ Algunos ejemplos de matrices de filtraje para un análisis no direccional, son:

-1	-1	-1	0	-1	0
-1	9	-1	-1	5	-1
-1	-1	-1	0	-1	0

3.3.3. Visualización de imágenes multibanda.

La información espectral almacenada en bandas separadas puede integrarse, por combinación de aquéllas, en una composición de color. Es posible hacer muchas combinaciones de bandas. La información espectral se combina para desplegar cada banda individual en una sola de los tres colores primarios: rojo, verde y azul.

La llamada Composición de Falso Color (CFC) es una combinación específica de bandas usada para crear una imagen de composición en color. En la CFC, el color rojo se asigna a la banda del cercano infrarrojo, el verde a la banda de rojo visible y el azul a la banda visible del verde.⁷ En esta combinación la vegetación aparecerá rojiza, el agua azulosa, y el suelo descubierto en tonos de marrón y gris. Para las imágenes multiespectrales de SPOT, las bandas 1, 2 y 3 se despliegan respectivamente en azul, verde y rojo. Mientras que para las imágenes TM una combinación muy usada frecuentemente es aquella que despliega en rojo, verde y azul las bandas 5, 4 y 3 respectivamente. Algunas combinaciones producen colores de salida muy parecidos a los colores naturales: el agua se despliega en azul, el suelo descubierto como rojo y la vegetación en verde. De aquí que esta combinación ha sido denominada composición de color pseudo natural o también pseudo color.

Usando la técnica de composición de color, pueden combinarse bandas de diferentes imágenes (correspondientes a diferentes sistemas de imágenes o fechas diferentes), o capas creadas a partir de cálculo entre bandas o análisis de componentes principales.

Composición de color.

Las composiciones de color son creadas y desplegadas en la pantalla, por combinación de valores centrales de tres bandas individuales. Cada banda es desplegada usando uno de los colores primarios. En la Figura 3.9 se presenta el cubo de color con los aditivos primarios (rojo, verde y azul) que dan los colores sustractivos (amarillo, magenta y cyan). Una combinación de píxeles con altos valores de ND para las bandas individuales producen un color claro, mientras que una combinación de píxeles con bajos ND produce un color oscuro. Dependiendo de la contribución específica de rojo, verde y azul, cada punto dentro del cubo genera un color diferente.

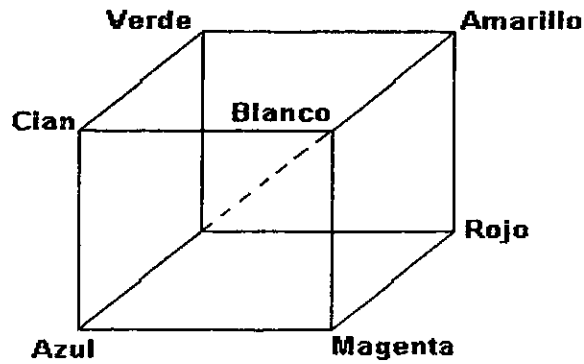


Figura 3.9. Cubo de color .

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

Las relaciones entre los valores de los pixeles de las imágenes multibanda y los colores asignados a cada pixel, se almacena en una representación. Una representación almacena los valores para el rojo, verde y azul; y el valor para cada color representa la intensidad relativa, en un ámbito de 0 a 255. Las tres intensidades juntas definen el color final (por ejemplo, intensidad de rojo = 255, verde = 0 y azul = 0, resulta en un color rojo brillante). Los valores de los pixeles de las 3 imágenes de entrada son usados para definir los valores correspondientes a los pixeles en la composición. Una de las bandas originales da los valores para el rojo, otra los valores para el verde y la tercera para el azul (Ver Figura 3.10).

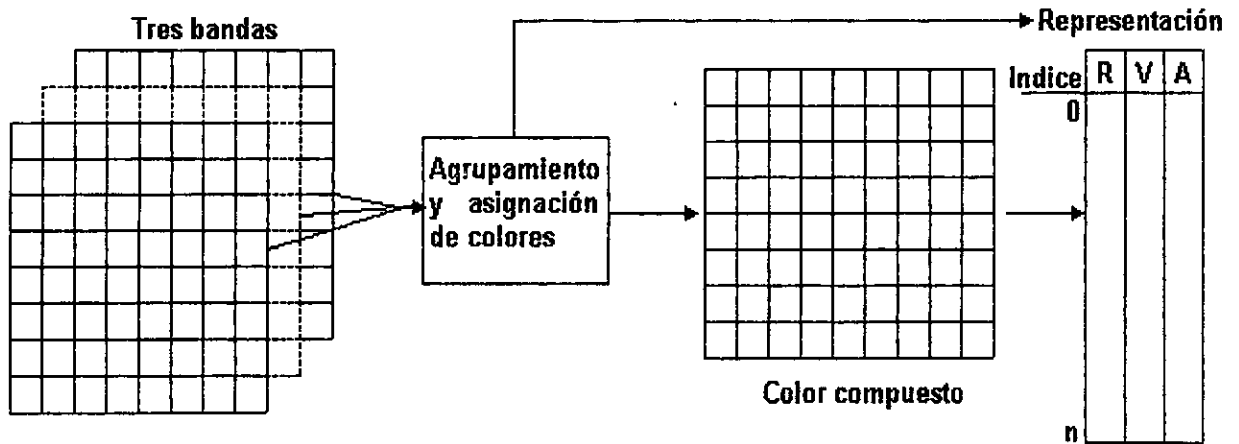


Figura 3.10. Relación entre las imágenes originales, la representación y la composición de color.

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

3.3.4. Transformaciones de la imagen.

Uno de los más importantes aspectos de las imágenes de satélite es su calidad multispectral. Las características terrestres tienen diferentes reflectividades en los diversos canales espectrales y algunas bandas son mejores en la discriminación de ciertos tipos de cubiertas. El carácter multispectral permite un excelente tratamiento de la información de la superficie terrestre. Sin embargo, es difícil ver seis bandas diferentes de una imagen al mismo tiempo. Por lo tanto, es útil formar algún tipo de imagen compuesta la cual reduzca las bandas espectrales originales de seis o siete a una o dos, pero al mismo tiempo preservar la información visual útil de todas las bandas; o hacer combinaciones entre las bandas originales con objeto de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos en la imagen. Existen varios métodos para hacer esto, pero en el presente trabajo nos concentraremos en aquellos usados comúnmente en P.R. y que han dado buenos resultados.

Estadísticas Multibanda.

La distribución de los valores de los datos en una sola banda podría representarse gráficamente usando un histograma y matemáticamente por las estadísticas de la varianza, la cual resume las diferencias entre todos los valores de los píxeles y el valor medio de la banda (el ámbito de valores en una banda indica la variación del canal, pero no indica la forma en cómo los valores se distribuyen entre el mínimo y el máximo). La correlación entre dos o más bandas puede mostrarse gráficamente mediante un gráfico de dispersión y matemáticamente por las estadísticas de la covarianza. Un gráfico de dispersión tiene dos dimensiones, con un eje horizontal de valores de una banda y un eje vertical de valores de la segunda banda. Los puntos en el gráfico indican los valores de los píxeles. Los valores en una matriz de covarianza indican también la correlación: grandes valores negativos indican una fuerte correlación negativa, grandes valores positivos muestran una clara relación positiva, y valores de covarianza cercanos al cero indican una débil o nula correlación.

La Figura 3.11 muestra un ejemplo de gráficos de dispersión (a) con covarianza fuertemente positiva y (b) con variancia cero.

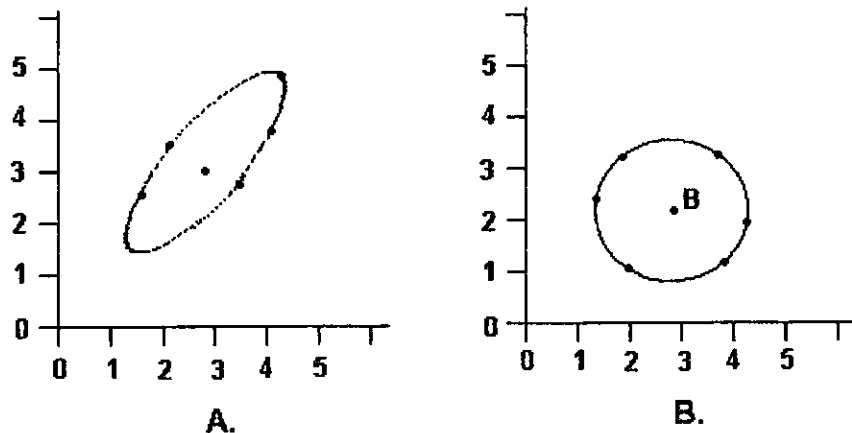


Figura 3.11. Gráficos de dispersión mostrando (A) una fuerte covarianza positiva media: 3.0, 3.0, y (B) covarianza con media 3.0, 2.3.

Tomada de Ihwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ihwis 2.1 for Windows.

Al observar los gráficos de dispersión puede establecerse que los valores de covarianza indican el grado de dispersión o la forma del grupo espectral y la principal dirección. De la Figura 3.11 (A) se deduce una elipse como forma del grupo y una fuerte correlación positiva (un incremento en el valor de un canal está relacionado con un incremento en el valor del otro canal), y la Figura 3.11(B) muestra una forma del grupo espectral en círculo teniendo correlación cero.

Las bandas individuales de una imagen multispectral tienen muy alta correlación frecuentemente, lo cual implica que hay redundancia en los datos y la información se está repitiendo. Para evaluar el grado de correlación entre bandas individuales puede usarse una matriz de correlación. Esta matriz es de covarianza y tiene valores en el ámbito de -1 a 1, representando una fuerte correlación negativa a una fuerte correlación positiva respectivamente, donde los valores cercanos al cero representan una pequeña correlación. Si se usan los coeficientes de correlación de la matriz, las bandas que muestren la menor correlación pueden seleccionarse y por tanto la mayor cantidad de información de la imagen será incluida en una composición multibanda.

Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP puede ser aplicado para sintetizar las bandas originales creando nuevas bandas no correlacionadas con las otras (componentes principales de la imagen), que recogen la mayor parte de la información original. Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende hacer un análisis multitemporal, o cuando se desea hacer una composición de color a partir de las tres bandas más adecuadas. Los componentes se

ordenan en función de la cantidad de varianza, los primeros dos o tres componentes llevarán la mayor parte de la información del conjunto de bandas originales, mientras que el resto de los componentes solamente describe variaciones menores (algunas veces solamente ruido). Por lo tanto, al mantener sólo los primeros componentes se mantiene la mayor parte de la información. Estos componentes pueden usarse para generar una composición de color RGB, en la cual el componente 1 se despliega en rojo, el componente 2 y el 3 en verde y azul respectivamente. Tal imagen obtenida a partir de esa combinación de color contiene más información que ninguna otra combinación de tres bandas espectrales originales.

Como se ha establecido en el apartado anterior, la elipse que limita la nube de puntos de los ND de las bandas consideradas, expresa gráficamente la fuerza de la correlación entre las dos bandas. Tanto mayor cuanto más se aproxime a una recta. La Figura 3.12 muestra una correlación positiva con dos ejes de variación: el primero en el sentido A y el segundo perpendicular a A, en el sentido B. Gráficamente puede deducirse que una rotación de ejes x y y en las direcciones A y B, mejorará la disposición original de los datos, y probablemente también la separación entre los grupos de ND homogéneos en la imagen. La rotación puede obtenerse con una función del tipo mostrado en la ecuación (3.9).

$$CP_1 = a_{11}ND_i + a_{12}ND_j \dots \dots (3.9)$$

donde:

CP₁ es el valor correspondiente al primer componente principal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas i y j, después de aplicarles los coeficientes a₁₁ y a₁₂. De modo similar podría expresarse el segundo componente, ya que existen tantos componentes principales como bandas originales, la Figura 3.12 muestra dos componentes principales.

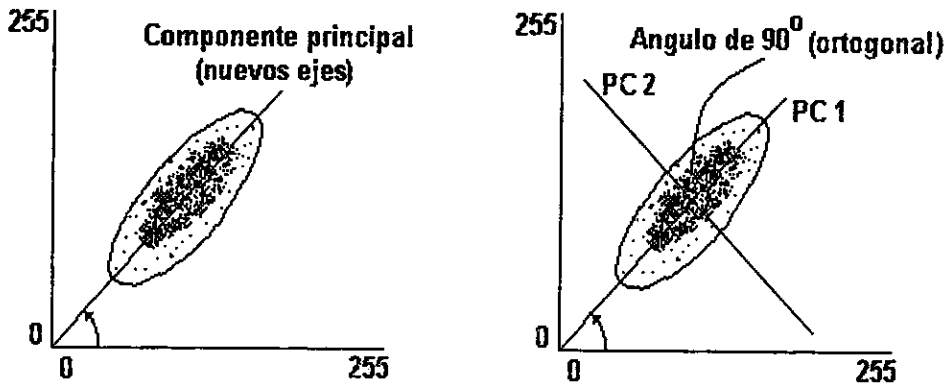


Figura 3.12. Primero (izquierda) y segundo (derecha) componentes principales.

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

El proceso de ACP inicia a partir de la matriz de varianza-covarianza, de donde se extraen los eigenvalores para cada uno de los componentes (λ_p). Los eigenvalores expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y en última instancia la proporción de información original que retienen. Ya se ha establecido que el ACP deduce tantos componentes como bandas originales, por tanto el eigenvalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se maximiza la varianza extraída en el análisis. La varianza para cada componente (V_p) se determina como la proporción de su eigenvalor con respecto a la suma de los eigenvalores⁵, esto es:

$$V_p = \frac{\lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^m \lambda_p} \dots \dots (3.10)$$

Además de la longitud de cada eje, resulta también de gran interés conocer su dirección (eigenvector). El eigenvector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo componente principal. Dicho de otra forma, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes, y los componentes principales las dependientes. A partir de los eigenvectores, se calcula la matriz de correlación entre componentes principales y bandas de la imagen, lo que permite conocer el sentido espectral de estos componentes⁵. Para ello el coeficiente de correlación entre el componente p y la banda k ($r_{p,k}$); está definido por:

$$r_{p,k} = \frac{a_{p,k} \sqrt{\lambda_p}}{s_k} \dots \dots (3.11)$$

donde:

$a_{p,k}$ es el eigenvector del componente p en la banda k ;
 λ_p es el eigenvector del componente p ; y
 s_k es la desviación típica de la banda k .

Por último se obtiene la imagen de los componentes principales, midiendo en la matriz de eigenvectores ($a_{p,k}$) la relación lineal de cada componente principal y las bandas originales.⁵ El cálculo de las nuevas bandas, o componentes principales se realiza como:

$$CP_{i,j,p} = \sum_{k=1}^n a_{p,k} ND_{i,j,k} \dots \dots (3.12)$$

donde:

n es el número de bandas;
 $CP_{i,j,p}$ es el valor de la imagen del componente principal p para las coordenadas i, j ;
 $a_{p,k}$ son los eigenvectores para el componente en cada una de las bandas.
 $ND_{i,j,k}$ es el ND de esa misma banda y para las mismas coordenadas.

La imagen de los componentes principales puede representarse en blanco y negro o color, obteniéndose así una nueva visualización de la zona en estudio.

3.4. Clasificación digital.

La última fase del procesamiento digital de imágenes es la clasificación. Su objetivo es la generación de una imagen, en la que cada uno de los píxeles originales sea definido por un ND, que es el identificador de la clase en donde se ha incluido. Esta clase puede describir distintos tipos de cubierta (variable nominal o categórica), o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable original). Por tanto la clasificación digital es una caracterización particular, que es válida para una determinada imagen que representa la condición de un territorio concreto en una fecha determinada. En la clasificación digital se distinguen tres fases: a) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento); b) asignación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación); y c) comprobación y verificación de resultados.¹⁸

3.4.1. Fase de entrenamiento.

La fase de entrenamiento es el procedimiento en el que el usuario define las clases de cubiertas terrestres (categorías) que son significativas para el estudio particular de aplicación, selecciona una muestra de píxeles de la imagen que represente adecuadamente a las categorías de interés, para después calcular la media de los ND y la variabilidad numérica de cada categoría, en todas las bandas que intervienen en la clasificación. Con base en la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento se dispone de dos métodos de clasificación: el supervisado y el no supervisado.

El método supervisado implica el conocimiento previo del terreno, a partir del cual se hace la selección de las muestras para cada una de las categorías, es decir, define clases informacionales (por ejemplo, tipos de ocupación del suelo), para luego delimitar en el resto de la imagen las zonas que se ajustan a esas características.

El método no supervisado se basa en una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, para posteriormente encontrar las correspondencias entre esos grupos y las categorías de interés.

Los grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen obtenidos de los ND presentes (con una reflectividad similar para las bandas consideradas, en la fecha específica de la imagen) son las clases espectrales.

Por tanto, el método supervisado pretende definir clases informacionales, mientras que el no supervisado tiende a identificar clases espectrales presentes en la imagen.

Pueden atribuirse ventajas e inconvenientes a los métodos supervisado y no supervisado. El primero pudiera considerarse subjetivo, ya que el usuario establece *a priori* categorías, sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo proporciona en ocasiones resultados de difícil interpretación o, en otros casos, poco relacionados con las necesidades del usuario. La elección de uno u otro método depende de los datos y medios disponibles y de la experiencia del usuario. Pero incluso, pueden combinarse de alguna forma con objeto de eliminar los inconvenientes de los métodos. Por ejemplo, puede emplearse el análisis supervisado para conducir el no supervisado; este es el caso de la aplicación del método no supervisado a áreas de la imagen con cobertura conocida, esto facilita la definición espectral de dicha cubierta. Otra combinación puede ser la aplicación separada del análisis supervisado y el no supervisado sobre la misma imagen, para después sintetizar las medidas extraídas por ambos.

Método supervisado.

El método supervisado requiere un previo conocimiento de las características del área de estudio, así como de las categorías que pretenden discriminarse (categorías de interés), lo cual permitirá al usuario delimitar sobre la imagen áreas piloto, que sean representativas de las categorías de interés. Estas áreas piloto se denominan "campos de entrenamiento", lo que significa que son estos campos los que "entrenan" a la computadora en el reconocimiento de las categorías; es decir, la computadora calcula los ND que definen cada clase, y luego asigna al resto de los píxeles de la imagen a una de estas categorías en función de sus ND. La forma de localizar los campos de entrenamiento en la imagen es con la ayuda del ratón electrónico o digitalizador, introduciendo en la pantalla los vértices de los campos y asignándolos a las categorías de interés. Conviene seleccionar varios campos por categoría con el fin de reflejar la posible variabilidad de la zona en estudio. A partir de los ND de los píxeles pertenecientes a los campos de entrenamiento para cada categoría, se calculan los estadísticos elementales (media, desviación estándar, número de píxeles con el valor predominante, número total de píxeles seleccionados), para cada categoría y para todas las bandas que intervendrán en la clasificación. Se considera que estos campos de entrenamiento representan fielmente a las distintas categorías de interés y, por lo tanto, que las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente a esas clases.

Existen algunos criterios o requisitos estadísticos que garantizan la representatividad de las categorías, los cuales se refieren a la elección del tamaño y la distribución más idónea de la muestra. De acuerdo con Schowegerdt, 1983, se requiere seleccionar un mínimo de $m+1$ píxeles por categoría, donde m es el número de bandas que integran el análisis. Jensen y otros autores, 1986, recomiendan seleccionar un número de píxeles comprendido entre 10 y 100 m por categoría. En cuanto a la distribución, resulta más conveniente elegir varios campos de pequeño tamaño, que uno sólo mayor, ya que se subvaluará la posible variabilidad de esa categoría.⁵

Método no supervisado.

Este método define clases espectrales presentes en la imagen. Las clases espectrales forman agrupaciones o conglomerados (cluster) de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo. El usuario interpreta posteriormente el significado temático de esas categorías o clases espectrales. El algoritmo básico para

definir los agrupamientos espectrales es el siguiente:

1. Selección de las bandas espectrales (originales o producto de alguna transformación), que intervienen en el análisis;
2. Selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre píxeles que componen la imagen (cada uno de los píxeles definido por tantos ND como bandas intervengan en el análisis); y
3. Selección de un criterio para agrupar píxeles similares. Es decir, se trata de encontrar grupos de píxeles con ND similares, para después deducir o interpretar las clases informacionales de interés para el usuario.

La forma de encontrar los grupos homogéneos puede explicarse, por ejemplo, en el caso de estar trabajando con dos bandas representadas en un gráfico bivariado, en donde aparecen tantos puntos como píxeles, localizados de acuerdo a sus ND en cada banda. En donde se observa la existencia de agrupaciones de píxeles con ND similares en ambas bandas, que podrían identificar clases temáticas de interés, Figura 3.13a.

En cuanto a la similitud entre píxeles, se han propuesto diversos criterios para medir la distancia entre píxeles, siendo el más utilizado el de la distancia euclidiana⁵, representado por:

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \dots \dots (3.13)$$

donde:

$D_{a,b}$ es la distancia entre los píxeles a y b;
 $ND_{a,k}$ y $ND_{b,k}$ son los ND de los píxeles a y b en la banda k; y
 m es el número de bandas.

Existen también varios algoritmos para la agrupación de píxeles similares, uno de los más usados es el del vecino más cercano k⁷ (Figura 3.13b). Las fases de este algoritmo son:

1. Se señalan una serie de centros de clase;
2. Se asignan los píxeles al centro de clase más próximo;
3. Se calculan nuevamente los centros de clase, considerando todos los píxeles incorporados en la fase anterior.
4. Se asignan nuevamente todos los píxeles de la imagen al centro más cercano.
5. Se vuelven a calcular los centros de clase, teniendo las nuevas incorporaciones y se retorna al numeral 4.

El proceso se repite iterativamente hasta que el centro de clase no se desplace significativamente, lo que indica un buen ajuste a los grupos presentes en la imagen.

Análisis de las estadísticas de entrenamiento.

Antes de abordar la clasificación propiamente dicha conviene evaluar la facilidad de discriminación de las categorías seleccionadas, con los objetivos de: a) confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido obtenidas correctamente; b) adoptar una categoría de interés más general para aquellas categorías que por tener cierto grado de mezcla no puedan discriminarse; y c) recabar información auxiliar o imágenes de otras fechas.

Existen métodos gráficos y analíticos que permiten evaluar las estadísticas de entrenamiento. Entre los gráficos se tiene el diagrama de firmas Figura 3.14, donde se tiene en las abscisas las bandas que intervienen en el análisis y en las ordenadas los ND medios de cada categoría. En este caso, las líneas paralelas y próximas indican una probable confusión entre categorías, y las líneas que se cruzan indican

aquellas bandas donde es más probable separar a las categorías que representan.

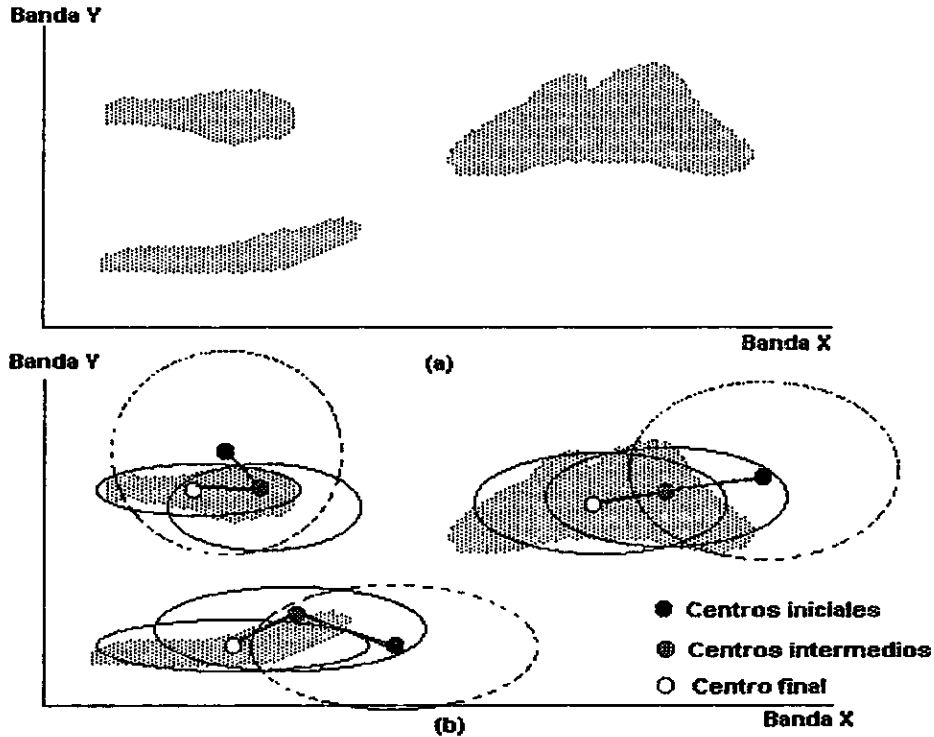


Figura 3.13. Fundamentos del análisis no supervisado.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

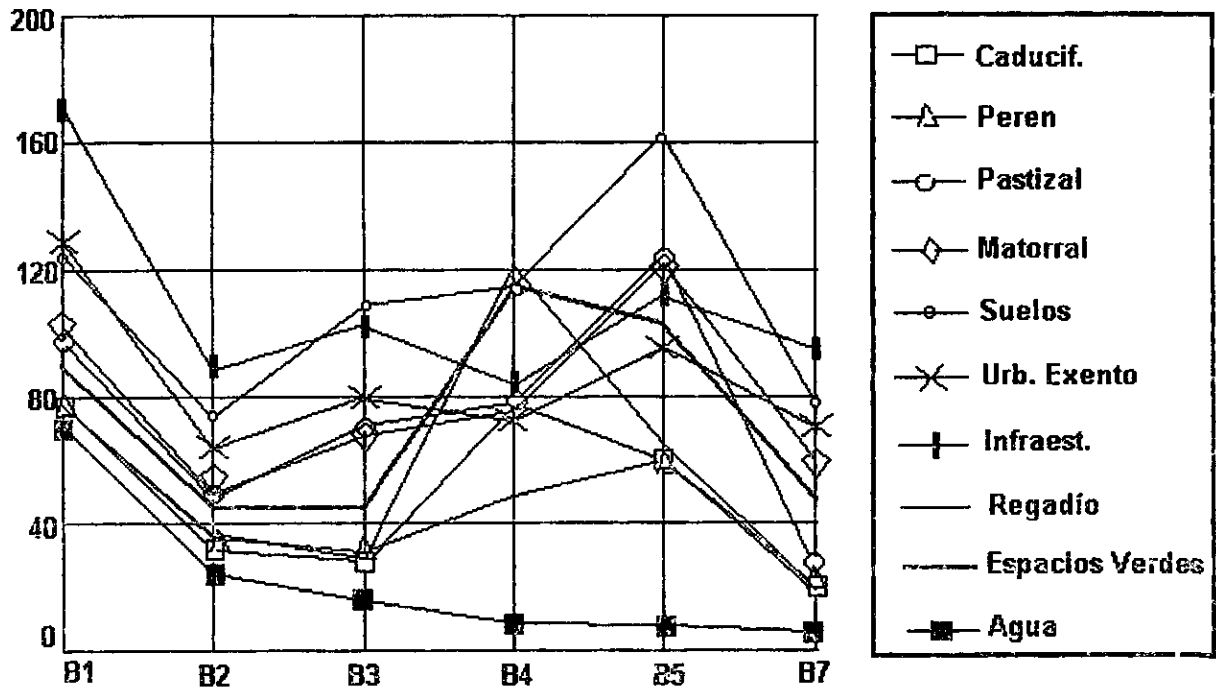


Figura 3.14. Diagrama de firmas espectrales.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

El método de la divergencia estadística es un método analítico usado para evaluar las estadísticas de entrenamiento. Se considera que los ND en una categoría se distribuyen normalmente, asumiendo la separabilidad como medida del traslape entre categorías vecinas. Dado que se trata de calcular ese valor para un espacio multivariado (tantas variables como bandas intervienen en el proceso), se calcula la matriz de varianza-covarianza entre pares de categorías. Cuanto mayor sea el valor de divergencia, mayor también será la separabilidad entre clases, basada lógicamente en las bandas consideradas para su cálculo.

3.4.2. Fase de asignación.

En el campo de la clasificación digital es común llamar a las bandas como "características" y a los valores de reflexión para un pixel en todas las bandas como vectores característicos. Tales vectores pueden graficarse en un espacio de n bandas, llamado "espacio característico".

En la fase de entrenamiento fueron definidas las clases o categorías de píxeles con valores espectrales similares que intervendrán en la clasificación; por su parte, la fase de asignación es la fase de decisión para asignar cada uno de los píxeles de la imagen a las clases previamente seleccionadas, para obtener como resultado una imagen en la que cada pixel resultante es asignado a una categoría si los valores espectrales del pixel son suficientemente similares a la categoría de entrenamiento, y si no se asigna a una categoría o clase con etiqueta "no conocida". La decisión de si los píxeles son suficientemente similares a las clases de entrenamiento depende del método de asignación que se seleccione. Todos los métodos de asignación definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Los criterios o métodos más comunes de asignación son: a) mínima distancia, en donde el pixel se asigna a la clase más cercana; b) paralelepípedos, que permiten señalar al usuarios umbrales de dispersión para cada clase; y c) máxima probabilidad, que asigna el pixel a aquella categoría en donde tiene mayor probabilidad de pertenencia.⁷

Clasificador de mínima distancia.

Para todas las bandas que intervienen en el análisis se calcula una distancia espectral a partir de los ND de cada pixel hacia las medias de clase. El criterio más empleado para medir la distancia es la distancia euclidiana:

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{x,k} - ND_{A,k})^2} \dots \dots (3.14)$$

donde:

$d_{x,A}$ es la distancia entre el pixel x y la categoría A;
 $ND_{x,k}$ ND del pixel x para la banda k; y
 $ND_{A,k}$ ND medio de la categoría A para la banda k.

Se calcula entonces la distancia del pixel para todas las categorías y se asigna el pixel x a la categoría en donde haya tenido la distancia más pequeña.

La distancia euclidiana no considera la dispersión de cada categoría o la correlación entre bandas, por lo tanto tiende a delimitar grupos circulares de radio proporcional a la situación de cada categoría.

Clasificador de paralelepípedos.

Se crean paralelepípedos para cada categoría, en donde la media de la categoría será el centro del paralelepípedo y la desviación estándar de la categoría determinará el tamaño del rectángulo. Entonces un pixel será asignado a una categoría si sus ND caen dentro de los paralelepípedos, para todas las bandas consideradas.⁵ Es decir:

$$\overline{ND}_{A,k} - R_{A,k} < ND_{x,k} < \overline{ND}_{A,k} + R_{A,k} \dots \dots (3.15)$$

en donde:

k varía desde 1 hasta el número de bandas.

R_{A,k} es la desviación estándar para cada categoría y banda.

El tamaño de los paralelepípedos puede cambiarse introduciendo un "factor multiplicador" a la desviación estándar. Mientras mayor sea el rectángulo mayor será el número de píxeles incluidos en esa categoría, y mayor el riesgo de confusión con categorías vecinas. Ahora bien, un rectángulo menor garantiza mayor confiabilidad a las asignaciones pero mayor número de píxeles sin asignar.

Un problema que puede presentarse es el traslape entre paralelepípedos, en este caso si no se cuenta con otro criterio de asignación (por ejemplo mínima distancia), el píxel será asignado a la primera categoría en donde cumpla los requisitos establecidos en la ecuación (3.15).

Clasificador Gaussiano de máxima verosimilitud

El clasificador gaussiano de máxima verosimilitud asume que los valores espectrales de los píxeles de entrenamiento para cada clase se distribuyen estadísticamente de acuerdo con una función normal de densidad de probabilidad. Es decir, cada categoría puede describirse por una función normal de densidad de probabilidad, a partir de dos parámetros su media y varianza. Por lo tanto, puede calcularse la probabilidad de que un píxel (con un determinado ND) pertenezca a una categoría. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, el píxel se asigna a aquella que maximice la función de verosimilitud.

Sea f(x; A) una función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria x (píxel con un ND) de tamaño n(x₁, x₂, x₃, . . . x_n) y A la categoría o clase a la que pertenece. La determinación de A está dada por el producto de f(x; A), y es llamada función de verosimilitud y denotada por L. Por ejemplo, para una sola banda, la función de máxima verosimilitud que define que un píxel x pertenece a la clase A, puede calcularse a partir de la media (ND_A) y la varianza (σ_A²) de esa clase, y el nivel digital del píxel x para la banda analizada(ND_x), tal como se presenta en la ecuación siguiente:

$$L(x; A) = \prod_{i=1}^n f(x_i, A)$$

$$L(x; A) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} e^{-\frac{(ND_{x_i} - ND_A)^2}{2\sigma_A^2}} \dots \dots \dots (3.16)$$

Una vez que se ha calculado la función de verosimilitud para todas las categorías que intervienen en la clasificación, el píxel se asignará a la clase A, si:

$$L(x; A) \geq L(x; B) \dots (3.17)$$

para todo A ≠ B y variando B desde 1 hasta n, siendo n el número de categorías.

La ecuación (3.16) puede transformarse en una función lineal mediante el empleo de logaritmos:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} e^{-\frac{(ND_{xi} - ND_A)^2}{2\sigma_A^2}}$$

$$L = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A}\right)^n e^{-\frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2}$$

$$\ln L = \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A}\right)^n - \frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2$$

$$\ln L = \frac{n}{2} \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma_A^2}\right) - \frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2$$

$$\ln L = \frac{n}{2} (\ln 1 - \ln 2\pi\sigma_A^2) - \frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2$$

$$\ln L = 0.5 n (0 - (\ln 2\pi + \ln \sigma_A^2)) - \frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2$$

$$\ln L = -0.5 n \ln 2\pi - 0.5 n \ln \sigma_A^2 - \frac{1}{2}\sigma_A^2 \sum_{i=1}^n (ND_{xi} - ND_A)^2 \dots (3.18)$$

El término $-0.5 n \ln 2\pi$ puede eliminarse debido a que interesa efectuar el cálculo de la función verosimilitud para las distintas clases, y ese término es constante para todas las categorías. Además, no es necesario reconvertir el valor de L calculado a antilogaritmos, ya que si el logaritmo de la función L es mayor en una categoría que en otra, también lo es su antilogaritmo. El término $0.5 n \ln \sigma_A^2$ puede calcularse para cada categoría inicialmente, de tal forma que el cálculo por píxel se reduce al último término de la ecuación (3.18).

En ocasiones pueden tenerse algunas categorías que cuentan con una mayor extensión superficial con respecto a otras, por lo que presentan mayor probabilidad de albergar píxeles desconocidos. De considerarse esta situación se introduce la probabilidad a priori $p(A)$ que modifica a la ecuación (3.18), es decir, un píxel pertenece a la clase A , si:

$$L(x; A) p(A) \geq L(x; B) p(B) \dots (3.19)$$

para todo $B \neq A$, donde $L(x; A)$ es la función de máxima verosimilitud que define que un píxel x pertenece a la clase A , y $p(A)$ es la probabilidad a priori de que un píxel cualquiera se incluya en esa clase. Un posible criterio podría ser conceder a cada categoría una probabilidad equivalente a la superficie que ocupa en la zona de estudio; sin embargo, esto requiere contar con un inventario previo que puede obtenerse a partir de trabajos de campo o mapas temáticos que raras veces se tiene actualizados, sin embargo, es la información disponible. De ahí la necesidad de que las autoridades ambientales continúen e incrementen la realización de trabajos de campo e inventarios de los recursos naturales del país, que permitan la aplicación más amplia y confiable de la percepción remota.

La ecuación (3.18) presenta el criterio de máxima verosimilitud para el caso de una sola banda, sin embargo, en una clasificación se emplearán varias bandas y por lo tanto se requiere extender dicha ecuación a varias dimensiones. Para el caso de dos dimensiones (dos bandas) los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (Figura 3.15). En la Figura 3.15, mientras mayores sean las áreas de traslape entre categorías, mayor será el riesgo de confusión mutua.

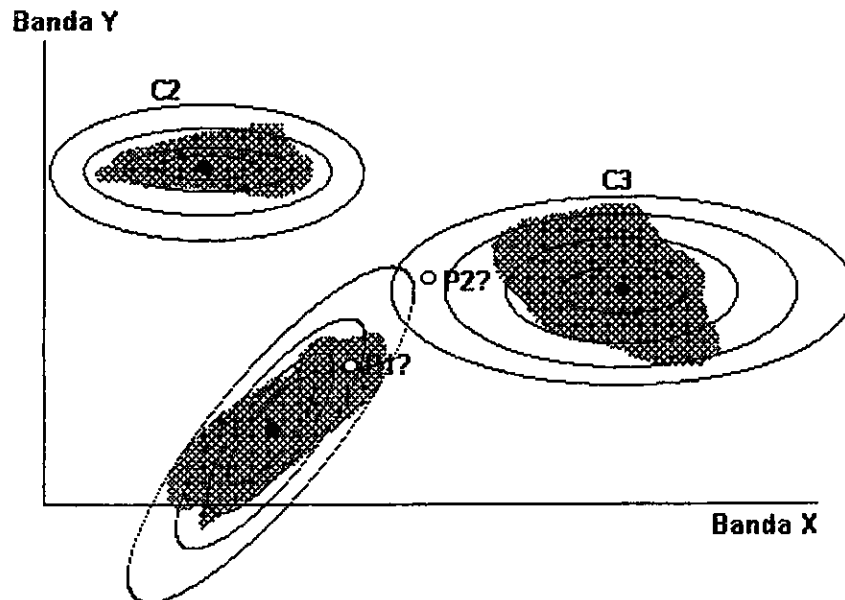


Figura 3.15. Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima verosimilitud.
Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

3.4.3. Presentación y verificación de resultados.

Producto de la clasificación digital se obtiene una imagen en la que el ND de cada pixel corresponde a la categoría a la que fue asignado. La nueva imagen es similar a la original, pero en ella se ha resumido la información espectral (varias bandas) en una sola clase temática. La imagen resultante de la clasificación puede generar información cartográfica y estadística. La primera se refiere a la producción de mapas y la segunda a la realización de un inventario con base en los ND que componen la imagen.

La verificación de los resultados de la nueva imagen puede realizarse por los siguientes métodos: a) comparación del inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales, b) confiabilidad en la clasificación de las áreas de entrenamiento y c) selección de áreas de verificación para las que realmente se conoce la cubierta terrestre.¹⁸

En el método de comparación del inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales que se suponen plenamente confiables, sólo se puede obtener el porcentaje de error, pero no su localización en el mapa.

El método de clasificación de campos de entrenamiento resulta interesante en tanto que permite saber la precisión con la que se identifica a un determinado tipo de cubierta. De tal forma que si los pixeles se asignan a otras clases, es conveniente definir nuevos campos de entrenamiento.

El método de las áreas de verificación para las que se conoce la cubierta terrestre considera la realización de un muestreo en el área de estudio, con el fin de obtener medidas de campo con las que se verifiquen los resultados de la clasificación. La realización del muestreo en campo supone un incremento en el costo del proyecto no para aumentar su fiabilidad sino para cuantificarla. Sin embargo, en la medida en la que pueda cuantificarse la fiabilidad de un documento se califica la calidad del mismo y además se puede evaluar la idoneidad de los métodos para una aplicación específica.

Puede construirse una matriz de confusión en donde se sinteticen los acuerdos y desacuerdos entre los datos

obtenidos del muestreo y los obtenidos de la clasificación. Esta matriz puede analizarse estadísticamente y obtener a partir de este análisis la fiabilidad del trabajo: global y por cada una de las categorías. El muestreo permite estimar la fiabilidad, por lo que el diseño y desarrollo del muestreo es la parte medular del proceso de verificación.⁵

Diseño del muestreo para la verificación.

El diseño del muestreo para la verificación deberá seleccionar una muestra que siendo tan pequeña como sea posible sea a la vez representativa del conjunto. Para garantizar esa representatividad el diseño del muestreo deberán considerarse: a) método de selección de la muestra; b) tamaño y distribución; y c) nivel de confianza otorgado a la estimación. De estos aspectos, el método de selección de la muestra es el más controvertido.¹³

Métodos de selección de la muestra.

Aleatorio simple. Los elementos a verificar se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la siguiente. Este tipo de muestreo presenta problemas en su aplicación espacial, debido a que puede suponer elevados costos de desplazamiento. Existe cierta probabilidad de no recoger la variación espacial de la imagen clasificada (Figura 3.16a).

Aleatorio estratificado. La muestra se selecciona dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo con una variable auxiliar (altitud, por ejemplo). Su diseño es más complejo que el tipo de muestreo anterior, pero aporta información sobre subconjuntos de la población y si la variable auxiliar se elige correctamente, se reduce el error de muestreo (Figura 3.16b).

Sistemático. A partir de un punto de origen señalado aleatoriamente, la muestra se distribuye a intervalos regulares. Se garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede contribuir a estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área (geometría de parcelas, por ejemplo). Además no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones (Figura 3.16c).

Sistemático no alineado. Con respecto al muestreo anterior, varía aleatoriamente una de las dos coordenadas (Figura 3.16d), y garantiza una revisión completa del territorio.

Por conglomerados. Como unidad de muestra se selecciona un grupo de observaciones, que se denomina conglomerado. Es decir, en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos cercanos al seleccionado aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado (Figura 3.16e). Este método reduce los costos de transporte, pero resulta menos preciso que los anteriores.

De los métodos descritos, el muestreo sistemático no alineado ha sido ampliamente usado en la verificación de clasificaciones.

Tamaño de la muestra.

El tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad, o de confianza, que quiera darse a la estimación, así como de la variabilidad de la imagen considerada. El tamaño de la muestra puede determinarse empleando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{z^2 p q}{E^2} \dots \dots (3.20)$$

en donde:

- n es el tamaño de la muestra;
- z es la abscisa de la curva normal para un determinado nivel de confianza; el más conveniente es de 95 %
- p es el porcentaje de aciertos estimados;
- q es el porcentaje de errores (q = 1-p)
- E es el nivel permitido de error, se aceptan errores del 5 %

Los valores de p y q pueden estimarse a partir de datos auxiliares.

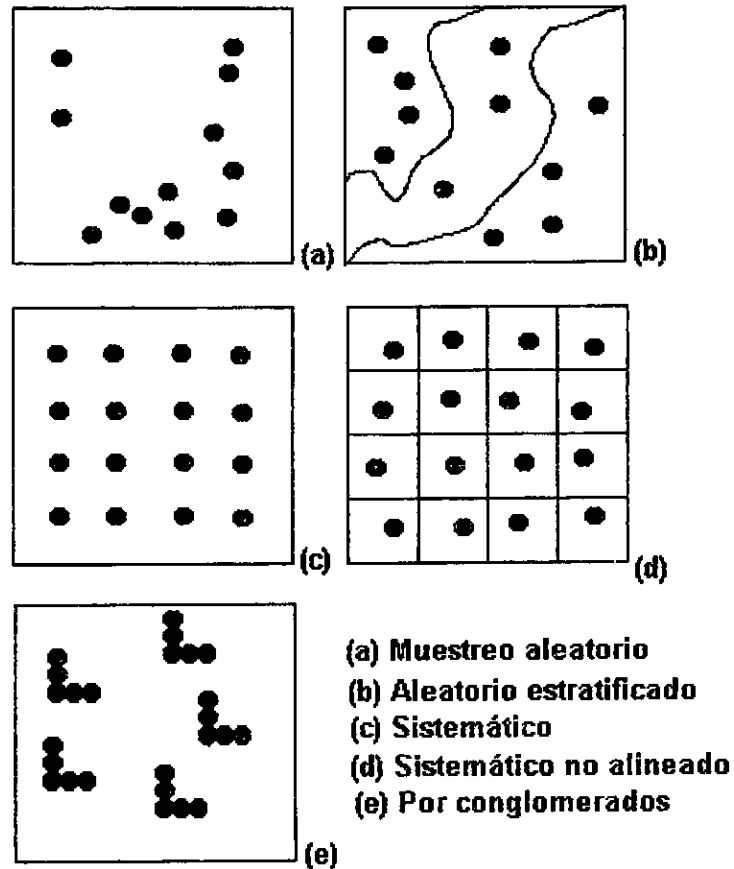


Figura 3.16. Tipos de muestreo para la verificación.
 Tomada de Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

Después de determinar el método y tamaño de la muestra, se obtiene para cada uno de los puntos de verificación la clase real y la deducida de la clasificación. Por supuesto que es conveniente obtener la información en las fechas más cercanas posibles a la adquisición de la imagen para evitar errores por defases temporales, además de localizar en forma precisa los puntos de verificación con el fin de evitar errores de posición.

Matriz de confusión.

A partir de los datos obtenidos del muestreo y los obtenidos de la clasificación se forma una matriz bidimensional, en donde las filas ocupan las clases de referencia y las columnas las categorías que se deducen de la clasificación. Se trata de una matriz cuadrada de $n \times n$, donde n indica el número de categorías.⁵

La diagonal de la matriz de confusión expresa el número de puntos de verificación donde hay acuerdo entre las dos fuentes (muestreo y clasificación), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la confiabilidad global de la clasificación. Los residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en la clasificación, mientras que los residuales en columnas implican cubiertas que no se ajustan a la realidad. Es decir, representan los errores de omisión y de comisión respectivamente.

A partir de los datos de la matriz de confusión puede orientarse la búsqueda de nuevos métodos de clasificación, el empleo de imágenes de otras fechas o el de bandas auxiliares, con el fin de lograr un documento confiable. El Cuadro 3.1 muestra un ejemplo de una matriz de confusión entre clases.

Cuadro 3.1 Ejemplo de una matriz de confusión entre clases.

CLASE REAL	CLASE MAPA											TOTAL	EXACT USUAR	ERROR COMIS	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
1. Edif, compacta	14												14	100.0	0.0
2. Residencial		10											10	100.0	0.0
3. Herbáceos Secano			113				3		5				121	93.4	6.6
4. Regadío				15		2							17	93.8	6.2
5. Perennifolios					45		7	1	17				60	75.0	25.0
6. Caducifolios			1		1	6							8	75.0	25.0
7. Matorral							11	6	12				29	37.9	62.1
8. Pastizal			1				1	28		1			31	90.3	9.7
9. Past-Matorral			3				4	1	32				40	80.0	20.0
10. Roquedo									1	1			2	50.0	50.0
11. Agua											4		4	100.0	0.0

TOTAL	14	10	118	15	46	8	26	36	57	2	4	336
Exac. Productor	100	100	96	100	98	75	44	78	56	50	100	(%)
Error omisión	0	0	4	0	2	25	56	22	44	50	0	(%)

Fuente: Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial.

Análisis estadístico de la matriz de confusión.

Medidas globales de confiabilidad.

Una forma de calcular la confiabilidad global de la clasificación es relacionar los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} \times 100 \dots \dots (3.21)$$

Además pueden calcularse los umbrales inferior y superior en los que se encontraría la exactitud real alcanzada por la clasificación. Este intervalo se calcula para un determinado nivel de significancia (σ), a partir del error de muestreo (ES) y del nivel de probabilidad ($1 - \sigma$):

$$F = F_m \pm Z E_s \dots \dots (3.22)$$

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

donde:

- z es la abscisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ($1 - \sigma$);
- E_s es el error estándar del muestreo y es función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de la muestra:

$$E_s = \frac{\sqrt{p q}}{n} \dots \dots (3.23)$$

Respecto a los errores de omisión y comisión, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor. La primera está en relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión. Por ejemplo, si se tiene un error de omisión pequeño para una categoría, entonces existe una alta probabilidad de que esta categoría esté incluida en la clasificación, lo que significa un logro para el productor del mismo. Pero a la vez puede haberse producido un alto error de comisión, lo que indicaría que la probabilidad de que una categoría real incluida en la clasificación sea muy baja. Esto implica que el usuario de esa información maneje datos erróneos.⁷

Capítulo 4

Percepción Remota en la Evaluación de la Calidad del Agua

4.1. Panorama General de las Aplicaciones de la Percepción Remota.

Como se ha establecido en el Capítulo 1, la PR es la ciencia de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno que se está estudiando. La PR permite un mejor conocimiento del espacio que nos circunda, y con esta finalidad se ha aplicado en los siguientes tópicos:

- ⇒ Ambiente;
- ⇒ Gestión, control e inventario del uso del suelo;
- ⇒ Estudio de zonas sometidas a fenómenos dinámicos rápidos;
- ⇒ Agricultura;
- ⇒ Geología; y
- ⇒ Tácticas militares.

4.1.1. Cartografía.

Las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas relativas a la cartografía topográfica mundial, muestran que sólo 44% de las tierras emergidas son cartografiadas a escalas que permiten el manejo de la información a un detalle adecuado (de 1/10 000 a 1/50 000). Además, la mayoría de estas cartas no están actualizadas por lo que no satisfacen las necesidades de información de los proyectos importantes que se llevan a cabo en muchos países.

Una de las ventajas del satélite SPOT, por ejemplo, es su capacidad para variar el ángulo de observación, lo que permite la adquisición de imágenes estereoscópicas, ofreciendo así vistas en tres dimensiones. Además, su resolución de 10 m (modo pancromático) permite producir mapas topográficos cuya precisión es comparable a aquéllos realizados utilizando los métodos tradicionales²⁵. Estos mapas pueden producirse con restituidores analíticos o computadoras, utilizando un software de autocorrelación, y sus tiempos de realización son muy cortos gracias a la superficie cubierta con un par estereoscópico (del orden de 3 500 km²). Las imágenes en tres dimensiones permiten visualizar un Modelo Numérico de Elevación (MNE), es decir, mostrar las altitudes sobre una cuadrícula de superficies elementales desde cualquier ángulo, utilizando una computadora. Esto permite visualizar la imagen en perspectiva.

4.1.2. Ambiente.

Bajo la presión demográfica e industrial, la gestión y protección ambiental es una de las preocupaciones permanentes a nivel mundial. Sin lugar a dudas, es el problema primordial que debe resolver la humanidad en los próximos decenios.

Las modificaciones del ambiente son rápidas y difícilmente reversibles; los fenómenos que entran en juego son complejos, interdependientes y de gran importancia. Se requiere estudiarlos, comprenderlos y vigilarlos. Las imágenes satelitarias constituyen una herramienta particularmente interesante puesto que permiten recoger información acerca del ambiente, con las siguientes cualidades:

- ⇒ Precisa y actualizada;
- ⇒ De manera permanente; y
- ⇒ Abarcando la superficie total de la Tierra.

4.1.3. Gestión, control e inventario del uso del suelo.

Los datos de teledetección permiten elaborar mapas y realizar inventarios de la ocupación del suelo en los medios natural, agrícola y urbano (deforestación, agricultura, urbanización).

La precisión obtenida permite realizar tanto estudios regionales sobre grandes superficies, como estudios locales donde pueden ser detectables objetos de 10 m. La información obtenida puede actualizarse cuantas veces sea necesario gracias a la flexibilidad y a la rapidez de tomas de vistas seguidas.

Esta información adquirida en forma digital y geo-referenciada podrá introducirse en los bancos de datos de información de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) donde se asociará con otras informaciones procedentes de fuentes variadas y se utilizarán como herramientas en la toma de decisiones o en el control del uso del suelo.

Lo anterior permite no solamente evaluar y dar seguimiento a una situación sino prever problemas y anticipar acciones. Con la ayuda de la información obtenida mediante PR y SIG los estudios de impacto ambiental pueden realizarse de manera confiable para las obras de ingeniería civil, como son carreteras, ferrocarriles, oleoductos, embalses, urbanización, etc.²². Las imágenes en relieve permiten la simulación del escenario ambiental modificado.

4.1.4. Estudio de fenómenos dinámicos rápidos.

El ambiente de las zonas costeras presenta fenómenos dinámicos y rápidos. Las imágenes de satélite permiten estudiar las evoluciones costeras: zonas de transporte de sedimentos costeros, zonas de depósito, circulación de corrientes marinas y dinámica de las zonas costeras que reciben descargas.

Otros fenómenos dinámicos rápidos que también pueden ser estudiados gracias a las imágenes de satélite son: la degradación de las tierras, la erosión, la deforestación, el monitoreo del agua, las catástrofes naturales, el monitoreo de vegetación y otros más¹⁹.

4.1.5. Agricultura.

La agricultura provoca cambios en el paisaje de las tierras cultivadas de un año a otro, y durante el mismo a lo largo de las estaciones. Estos cambios son consecuencia de las incertidumbres climáticas y de la explotación de cultivos perennes y anuales según reglas estrictas de rotación de cultivos. Los inventarios de ocupación del suelo y de previsión de cosechas se conciben solamente si las observaciones se hacen en ciertos periodos que corresponden a las fases fenológicas claves. La identificación de los cultivos y de los límites de las parcelas se facilitan con los satélites de teledetección ya que poseen a la vez:

- ⇒ La riqueza espectral de tres a siete bandas bien adaptadas a la observación de los vegetales; y
- ⇒ Estabilidad de los instrumentos de toma de vistas que permite detectar pequeñas variaciones del estado físico de las parcelas.

4.1.6. Geología.

Los datos satelitarios permiten un enfoque global, integrando los diferentes aspectos de un mismo paisaje regional (geología, pedología, botánica, geomorfología, etc.). Esto permite llevar a cabo análisis detallados y posibilitan el paso entre la geología de las capas externas y la geología de las capas internas. Por ejemplo, la información externa se manifiesta a través de anomalías en la repartición de la vegetación, en las características generales de la red hidrográfica y en discontinuidades morfológicas. La excelente resolución de los datos obtenidos mediante imágenes de satélite posibilita la realización de mapas detallados en escalas 1/50 000 hasta 1/25 000. En el caso del satélite SPOT, gracias a las posibilidades de observación lateral que permite obtener imágenes estereoscópicas, la morfología del terreno puede restituirse con

precisión. Esta última permite conocer rasgos estructurales y unidades litológicas a cartografiar²⁵. La distinción de diferentes formaciones geológicas y la determinación de sus contornos permite realizar mapas geológicos en donde es posible localizar los cuerpos volcánicos, y establecer sus morfologías y extensiones. Esto redundará en la mejora sensible de la cartografía geológica cuando ya existe o, en caso contrario, posibilita su levantamiento.

4.1.7. Usos militares.

Aun cuando se trata de un uso desafortunado de la PR, el hecho es que existe y ha adquirido una importancia fundamental la aplicación de la energía electromagnética en la milicia. En un principio su empleo se concentró en el campo de las comunicaciones, lo cual permitió a los mandos y sus tropas disponer de un medio de enlace más expedito entre ellos.

En la actualidad el espectro electromagnético ofrece ilimitadas posibilidades en el ámbito de un conflicto bélico. Esto se debe a que el espectro electromagnético es el medio de propagación de las ondas de radio, radares, fibras ópticas, láser, comunicaciones infrarrojas y por satélite¹².

Se dice que la primera guerra mundial se ganó en las trincheras y que la segunda gran confrontación se decidió en el mar. A esto podría agregarse que en caso de presentarse una tercera conflagración y de haber ganadores, ésta se ganaría en el campo del espectro electromagnético.

4.2. Aplicaciones de la Percepción Remota en la Evaluación de la Calidad del Agua.

La calidad del agua es un término general que describe si el agua es o no utilizable para una determinada actividad o uso, o si el ambiente puede ser puesto en peligro por los contaminantes contenidos en el agua. La mala calidad del agua no había sido percibida como un problema, sino hasta después de la revolución industrial y como consecuencia del rápido crecimiento de las ciudades.

Desde principios de este siglo los intentos en el control de la calidad del agua se han concentrado en las descargas municipales e industriales dando especial atención a aspectos de salud y saneamiento. En tiempos recientes, las fuentes de contaminación no puntual han sido motivo de interés general así como de investigación científica. Es común que la contaminación causada por fuentes no puntuales (áreas urbanas, industriales y rurales) sea considerada como parte del escurrimiento pluvial.

El principal problema asociado con este tipo de contaminación es identificar sus fuentes y efectos eventuales; debido a que no hay colección del agua en redes de alcantarillado, como en el caso de drenajes municipales o industriales. La contaminación no puntual puede evaluarse mejor aplicando PR, especialmente si se considera la distribución espacial de las fuentes no puntuales de contaminación.

La visión sinóptica proporcionada por la PR da al profesional ambiental una riqueza extraordinaria de datos si se los compara con los que pueden obtenerse del muestreo y colección de datos de superficie; además, el monitoreo de grandes áreas puede lograrse económicamente sólo si se usa la PR. Desafortunadamente, la PR está limitada a unos cuantos parámetros de calidad del agua, tales como: turbiedad, sólidos suspendidos, clorofila, eutroficación y temperatura. Sin embargo, estas características pueden usarse como indicadores de problemas de contaminación más específicos. Debe enfatizarse que el uso efectivo de los datos obtenidos a partir de PR puede lograrse solamente cuando dichos datos se usan en conjunción con otros datos o información obtenidos de otras fuentes.

Por lo anterior, la PR puede desempeñar un papel importante en la evaluación y estrategia de administración de la calidad del agua.

4.2.1. Planteamiento general.

La región del espectro electromagnético que incluye la luz visible e infrarroja se utiliza para detectar indicadores de calidad del agua. Las mediciones en esta porción del espectro utilizan la energía electromagnética reflejada. Para medir la calidad del agua también se usa el término infrarrojo, pero en este caso se usa una medición directa de la energía emitida. En el caso de la región de microondas, ésta no es

utilizable para determinar indicadores de calidad del agua debido a que no hay o hay una muy pequeña penetración dentro del agua de este tipo de energía. La detección de capas de aceite u otros contaminantes superficiales es la excepción a esta regla general. El enfoque difiere dependiendo de si se está midiendo la energía reflejada o la emitida.

En general, pueden establecerse relaciones entre parámetros de calidad del agua dados y la reflectancia, debido a que la intensidad y color de la luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes. De esta manera, pueden generarse relaciones empíricas entre mediciones de reflectancia y la calidad del agua de una muestra. El grado al cual la luz es atenuada por el agua varía con la longitud de onda de la luz, y con la naturaleza, concentración y color del contaminante del agua. La Figura 4.1 muestra cómo la luz es atenuada por el agua clara. Nótese que prácticamente no hay penetración de la energía infrarroja dentro del agua, en tanto que aproximadamente 60% de la luz azul ($\approx 0.5\mu\text{m}$) es todavía medible a 20 m ⁽⁶⁾.

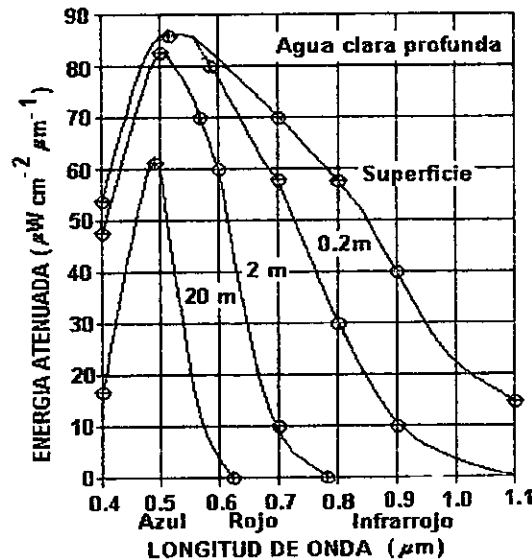


Figura 4.1. Atenuación de la luz en el agua clara.
Tomada de: Engman y Gurney, Remote Sensing in Hidrology.

La presencia de sólidos en el agua cambia notablemente las características de dispersión del agua. La Figura 4.2 muestra cómo la concentración de sólidos incrementa la energía reflejada si se le compara con la energía reflejada del agua clara; nótese también cómo el pico de las curvas cambia a longitudes de onda mayores ⁶.

Como puede apreciarse, la naturaleza empírica de este planteamiento requiere desarrollar una relación única para cada estudio de calidad del agua.

Incluso después de que se han establecido las relaciones empíricas, es probable que cambien debido a que la concentración del parámetro en el agua puede modificarse.

No hay forma de medir directamente los cambios temporales en los parámetros de calidad del agua con alto grado de confiabilidad. Por lo tanto, deben realizarse programas de muestreo periódico en campo para desarrollar las relaciones empíricas, y posteriormente programas de muestreo adicionales para verificar la calibración. En el caso de estudios con imágenes adquiridas en distintas fechas (estudios multitemporales) y/o por distintos sensores, es necesario modelar los factores que intervienen en la señal detectada por el sensor. Estos factores incluyen relaciones angulares entre el Sol y el sensor (cambiantes con la estación del año), y la composición de la atmósfera (variable) ⁸.

Las aplicaciones de la PR en la evaluación de la calidad del agua en el térmico infrarrojo son útiles en la

longitud de onda de 8 - 14 μm , debido a que como se ha explicado en el Capítulo 1 del presente trabajo, es una eficiente ventana atmosférica, y además incluye la región de máxima emitancia radiante para la mayor parte de las características terrestres. El agua se comporta como un cuerpo negro con su máxima emisión ocurriendo entre 9 y 10 μm y con una emisividad cercana a la unidad. En general, la mayor parte de los monitoreos de calidad del agua pueden asumir emisividades constantes en el ámbito de 8 - 14 μm , pero en el caso de trabajos cuantitativos sería deseable conocer la variación que ocurre con respecto al tiempo y a la longitud de onda. El uso del térmico infrarrojo en el monitoreo de la calidad del agua ha sido usado básicamente en la medición de diferencias de temperatura espacialmente. La interpretación de los datos térmicos se relaciona generalmente con información auxiliar, tal como el conocimiento de la localización de una tubería de descarga para inferir un impacto en la calidad del agua. Sin embargo, la contaminación térmica en la superficie del agua puede medirse directamente con un explorador térmico que puede usarse para obtener un mapa muy detallado de temperaturas ⁶.

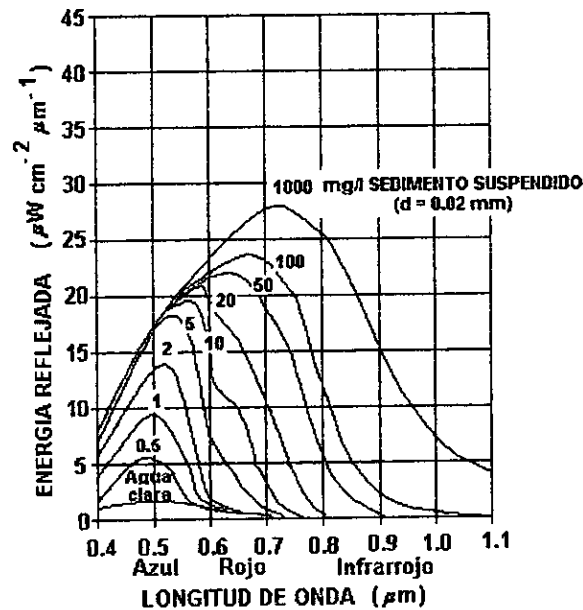


Figura 4.2. Incremento de la energía reflejada al incrementar la concentración de sedimentos. Tomada de: Engman y Gurney. Remote Sensing in Hidrology.

4.2.2. Determinación de la calidad del agua.

La PR puede medir solamente la energía reflejada o emitida de la superficie o cercana a la superficie del agua, además sus aplicaciones se limitan a aquéllas características del agua que pueden detectarse en las regiones del espectro electromagnético detalladas en el apartado 4.2.1.

Como se ha discutido en el apartado 4.2.1, para poder inferir la calidad en un cuerpo de agua deben establecerse relaciones empíricas entre parámetros de calidad del agua y las mediciones de radiancia media de una o más bandas espectrales. Al respecto, se han usado exitosamente indicadores de calidad del agua tales como: color, turbiedad y sólidos suspendidos. El siguiente apartado presenta estos parámetros y algunos planteamientos usados para evaluarlos.

Color.

El color es un parámetro de calidad del agua que proporciona información cualitativa respecto a la productividad biológica y a la apariencia química de los cuerpos de agua. El color verdadero se debe a la presencia de sólidos en suspensión coloidal o en solución. Por otro lado, el color aparente, es aquel que se percibe directamente y que puede ser causado por la reflexión de la luz en los sólidos en suspensión; el fondo del cuerpo de agua, o el reflejo del cielo. Para determinar el color verdadero, debe tomarse una

muestra y determinarse *in situ*. Frecuentemente el color aparente se determina como indicador de la presencia de vida y de sólidos suspendidos en el agua. La presencia de algas se asocia con la presencia de colores específicos como algas azul-verde, que están relacionadas con un color verde oscuro; las diatomeas, que imparten un tinte amarillo o amarillo-café; algún tipo de zooplancton, que imparte al agua un tinte rojizo; en tanto que el humus puede causar colores en el agua que varían desde el verde hasta el café oscuro. Los componentes químicos pueden impartir un color específico al agua. Frecuentemente estos cambios son muy sutiles o son eliminados por otras fuentes de color en el agua natural y por eso no son detectables por técnicas comunes de percepción remota.

Existen satélites que pueden proporcionar datos de color útiles como indicadores en la evaluación de la calidad del agua. El Nimbus 7 -explorador de la zona de costa-, el Landsat y SPOT pueden proporcionar mapas valiosos de colores específicos que pueden ser indicadores de calidad del agua ²⁵.

Turbiedad.

La turbiedad es otro parámetro indicador de la calidad del agua y se define como la transparencia óptica o grado de opacidad producido en el agua por materia particulada en suspensión. Hay varias formas de medir la turbiedad, todas ellas relacionadas con la transparencia. Un dispositivo para medir la turbiedad es el disco Secchi, comúnmente usado en mediciones de campo y que, debe decirse, resulta un instrumento de medición bastante subjetivo. El procedimiento de medición con el disco Secchi consiste en sumergir un disco de 20 cm de diámetro con cuatro cuadrantes (dos blancos y dos negros alternados) dentro del agua. Se promedian las profundidades a las que ya no es posible ver el disco. Como regla empírica, el disco deja de verse a una profundidad de más o menos 5% del nivel de transmisión de la luz solar. Pueden hacerse mediciones más precisas con instrumentos de transmisión de la luz como fotómetros y transmisómetros, sin embargo, estos no son apropiados para trabajos de campo. El disco Secchi, por otro lado, puede usarse fácil y rápidamente desde un bote para medir indirectamente la distribución espacial de sólidos suspendidos.

La turbiedad varía espacial y temporalmente, cambia al modificarse las descargas en los afluentes y con las corrientes internas, con la estratificación térmica y los ciclos de vida en el agua. La PR constituye una herramienta excelente para un monitoreo de estos cambios espaciales y temporales. A partir de los datos de turbiedad puede inferirse la dinámica y calidad de los cuerpos de agua. Particularmente los datos de turbiedad obtenidos de las imágenes de satélite son muy útiles en el monitoreo del movimiento de masas de agua dentro de grandes lagos, debido a que el monitoreo hecho con estudios de campo es casi imposible o impráctico.

Abiodun y Adeniji (1978) demostraron cómo con una clasificación espectral del agua del lago Kainji en el Río Nigeria a partir de datos secuenciales de Landsat puede generarse un mapa del movimiento de diferentes masas de agua. La Figura 4.3 muestra la distribución espacial de la turbiedad para cuatro fechas correspondiente al estudio de Abiodun y Adeniji ⁶.

Sólidos

La presencia de sólidos suspendidos incrementa la reflectancia en la región visible del espectro electromagnético. Sin embargo, la reflectancia de los sólidos y el agua permanece baja en la porción del infrarrojo cercano a menos que esté presente una cantidad significativa de algas. La restricción de un sensor para detectar turbiedad a una profundidad aproximada de 1 m, cuando mucho, limita su aprovechamiento para la detección de sólidos suspendidos superficiales.

Los datos proporcionados por el Landsat MSS son el medio ideal para el monitoreo de sólidos suspendidos en grandes cuerpos de agua. Un gran número de estudios han sido hechos usando los datos del Landsat multiespectral scanner (MSS), relacionando concentraciones de sólidos suspendidos y mediciones de reflectancia (Yarger et al. 1974; Richie et al. 1976; Munday and Alfoldi, 1979; Aranuvachapum and LeBlond, 1981; Whitlock et al., 1981).

Un aspecto muy importante al usar los datos del Landsat MSS se refiere a la posibilidad de generar una descripción histórica de los sólidos suspendidos o bien de la sedimentación de sólidos en un cuerpo de agua. Para lograr esto deberá disponerse de imágenes Landsat MSS desde 1972 (año de su lanzamiento) o de

los años en los que se tenga disponible la imagen hasta el presente, haciendo la calibración o desarrollo de las relaciones empíricas con datos de muestras actuales. Al hacer esto, se asumirá que las características de los sedimentos no han cambiado con el tiempo. Esta consideración es esencialmente la misma que deberá hacerse para el uso futuro de datos usando reflectancia-concentración en monitoreo de cuerpos de agua. Sin embargo, en el caso de monitoreos futuros, la calibración podrá verificarse con programas de muestreo posteriormente ¹⁷.

Ritchie et al. 1984, llevó a cabo estudios usando datos TM y concentración de sólidos suspendidos de muestras tomadas en el Lago Chicot, Arkansas. De acuerdo con Ritchie, la resolución espacial de 80 m del Landsat MSS define el tamaño del cuerpo de agua que puede muestrearse en alrededor de 5 ha (es decir 8 pixeles). Desde luego que el incremento en la resolución espacial disponible con los datos del TM amplían las aplicaciones posibles de la PR ²⁵. A este respecto, Ritchie señala que el incremento en la resolución espacial de los datos TM puede posibilitar a dependencias gubernamentales de conservación, cuya función sea el control de la calidad del agua, identificar cuencas con problemas de erosión mediante la identificación de cuerpos de agua con altas concentraciones de sólidos suspendidos.

Las autoridades gubernamentales competentes podrían usar esta información para planear estrategias de control de la erosión, enfocando sus esfuerzos en las áreas afectadas más seriamente.

4.2.3. Fuentes de contaminación no puntuales y erosión.

La PR ha sido usada para estimar fuentes de contaminación no puntuales en estudios regionales de calidad del agua y planes de conservación. La contaminación provocada por fuentes no puntuales está estrechamente relacionada con la cubierta de suelo y su uso, de manera que cuando se asocia cubierta de suelo y topografía puede describirse el potencial de calidad del agua del escurrimiento pluvial ⁷. Varios grupos de investigadores han usado datos del Landsat como información de entrada de la cubierta del suelo para sus modelos de fuentes no puntuales (Shecter 1976; Okl. 1975; Ragan y Rogers, 1978). El modelo de Okl. permite estimar la erosión y la contribución de sedimentos. El planteamiento del modelo está basado en la evaluación de la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978):

$$A = RKLSCP. . . . (4.1)$$

donde:

- A promedio anual de pérdida del suelo por unidad de área;
- R factor de precipitación;
- K factor de erosión del suelo;
- L factor de longitud;
- S factor de inclinación;
- C factor de manejo de cultivo; y
- P factor de prácticas de manejo, o control de la erosión.

El modelo de Okl agrupó en un sólo parámetro los términos de la ecuación 4.1; dicho parámetro fue estimado a partir de datos Landsat.

Un planteamiento similar se usó en un estudio de ocho condados localizados en la región central de Indiana (Cambell, 1979). En ese estudio se definió el potencial de contaminación no puntual (NPP, por sus siglas en inglés). Dicho índice fue establecido como:

$$NPP = f(\text{caract. del suelo} \times \text{intensidad de su uso para la agricultura} \times \text{proximidad del agua}) \dots (4.2)$$

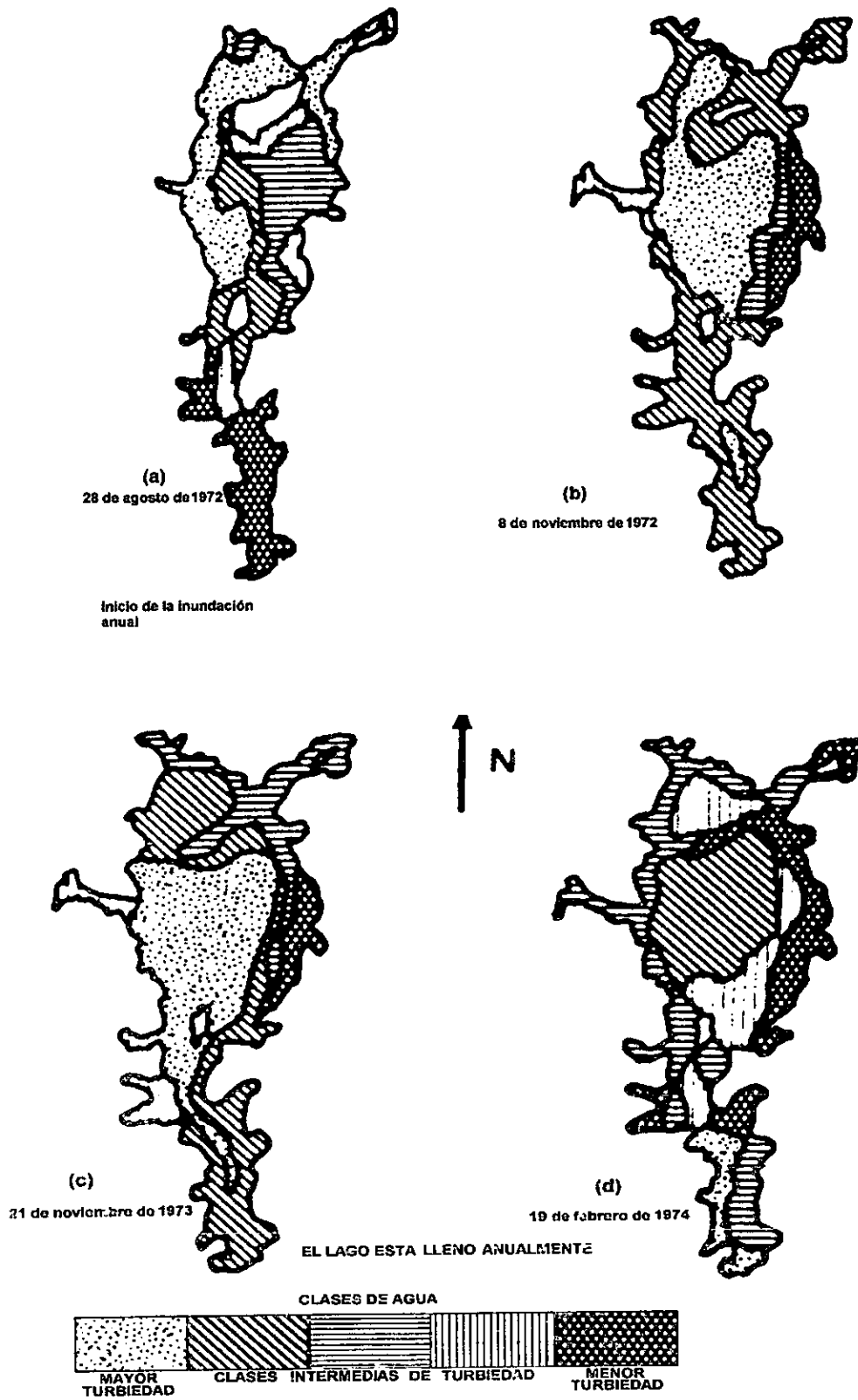


Figura 4.3. Cambios estacionales de la turbiedad del Lago Kainji en Nigeria (tomado de Abiodun, 1978). Tomada de: Engman y Gurney, Remote Sensing in Hidrology.

El índice fue aplicado a celdas de aproximadamente 53 píxeles Landsat MSS. Los datos de intensidad del uso agrícola del suelo se obtuvieron de las imágenes Landsat; las características del suelo, de los datos de erosión provenientes de estudios al respecto; y la proximidad de la superficie del agua fue medida por un conteo de celdas desde puntos elevados hasta cuerpos de agua identificados en mapas topográficos⁶.

En otro estudio, Pelletier (1985) describe un sistema de información geográfica (SIG) adaptado a la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978) que puede usar datos del Landsat MSS o del Landsat TM para determinar la cubierta de suelo, y posteriormente el factor de manejo de cultivo, "C".

En los casos citados, la erosión del suelo no se ha medido directamente por medio de técnicas de PR. Se han determinado varios factores relativos al tipo y uso del suelo, y topografía para estimar la erosión.

4.2.4. Modelos de calidad del agua.

Los modelos que relacionan parámetros de calidad del agua y el valor medio de la reflectancia o radiancia de diferentes bandas Landsat se desarrollan con ecuaciones de regresión lineal múltiple. A continuación se describen algunos ejemplos de modelos de calidad del agua desarrollados para el estudio de la Bahía de San Francisco, E.U.A.⁶.

Khorram (1985) usó datos Landsat y muestras tomadas en 50 sitios de la Bahía para desarrollar modelos de calidad del agua. Los parámetros estudiados fueron salinidad, turbiedad, sólidos suspendidos y clorofila. Los modelos obtenidos son los siguientes:

Salinidad

$$Y_s = 91.8 - 19.7(\ln X5) - 11.8(\ln X6) \dots \dots (4.3)$$

donde

Y_s es la salinidad en partes por mil.

Turbiedad

$$Y_t = 3.70 - 0.40(X4)^2 + 0.8(X5)^2 + 0.09(X6)^2 - 0.57(X7)^2 \dots \dots (4.4)$$

donde

Y_t es la turbiedad en UTN.

Sólidos suspendidos

$$Y_{ss} = -79.5 + 24.4(\ln X5) + 0.34(\ln X7) \dots \dots (4.5)$$

donde

Y_{ss} son los sólidos suspendidos totales en mg/l.

Clorofila

$$Y_c = -40.99 + 2.73(X4) - 2.62(X5) + 1.93(X6) + 4.14(X7) + \\ + 0.07(X4)^2 + 0.30(X5)^2 - 0.25(X6)^2 - 0.19(X7)^2 \dots \dots (4.6)$$

donde

Y_c es la concentración de clorofila en g/l.

En las ecuaciones (4.3) a (4.6), "X" representa los valores de la radiancia media para Landsat, banda 4 (X4), banda 5 (X5), banda 6 (X6) y para la banda 7 (X7).

Es importante destacar que las ecuaciones (4.3) a (4.6) son empíricas y que sólo son aplicables al cuerpo de agua para el cual fueron obtenidas. Por ejemplo, si se compara la ecuación (4.3) con la ecuación (4.7) que se presenta a continuación:

$$Y_s = 38.52 - 120.86 \frac{X6}{(X4 + X5)} \dots \dots (4.7)$$

debe destacarse que, aunque ambas ecuaciones son modelos de salinidad, la ecuación (4.7) fue desarrollada para el río Neuse en Carolina del Norte, E.U.A.⁶.

4.2.5. Estado trófico de cuerpos de agua.

El estado trófico de un cuerpo de agua se refiere a la descripción de su productividad y de sus nutrientes. Para caracterizar el estado trófico de un cuerpo de agua pueden utilizarse como indicadores los parámetros descritos en los apartados anteriores, sin embargo, los factores de mayor interés son el nitrógeno y el fósforo. Witzing y Whitehurst (1981) han propuesto un índice numérico del estado trófico y su estimación a partir de datos del Landsat. Estos índices del estado trófico son combinaciones complejas de varios parámetros de calidad del agua, sin embargo, dichos índices no son aplicables a todas las regiones físico-climáticas y dimensiones del cuerpo de agua.

Los datos del térmico infrarrojo del Landsat se han usado exitosamente para evaluar la calidad del agua en lagos. Por ejemplo, un estudio del Lago Utah en E.U.A (Miller y Rango, 1984), correlacionó la capacidad de emisión del calor con concentraciones de algas. Se obtuvo una alta correlación positiva entre la energía térmica emitida y la concentración de algas, durante el día. Durante la noche, los datos de energía térmica mostraron una fuerte correlación negativa con la concentración de algas⁶.

4.2.6. Contaminación Térmica.

La contaminación térmica puede definirse como el incremento o decremento de la temperatura de un cuerpo de agua de tal forma que hay un efecto adverso directo o indirecto sobre el ecosistema acuático. Los efectos directos de la contaminación térmica se refieren al cambio en la temperatura del agua, de tal forma que la biota acuática existente no puede tener mayor tiempo de vida y reproducirse, y en los casos drásticos sobreviene la muerte inmediata. Los efectos indirectos de la contaminación térmica consisten en la presencia de cambios en algunos otros parámetros de la calidad del agua, tal como el oxígeno disuelto, que disminuye en concentración en el agua al elevarse la temperatura. En el estudio de la contaminación

térmica se han usado radiómetros infrarrojos, en vuelos, para conocer temperaturas superficiales de los cuerpos de agua; dichos instrumentos pueden medir en un intervalo de -50 a $+50^{\circ}\text{C}$, con una precisión de 0.5°C . Los datos de temperatura obtenidos mediante P.R. tienen la misma limitación que para las otras aplicaciones ya expuestas, y se refiere a que utilizando sistemas térmicos infrarrojos solamente pueden medirse las temperaturas del agua cercana a la superficie⁹. Sin embargo, pueden inferirse temperaturas del agua a mayores profundidades a partir de la distribución superficial de temperaturas. Por otra parte, los mapas de temperatura pueden proporcionar información excelente para el diseño de programas de muestreo.

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Capítulo 5 Estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán

En este capítulo se presenta el estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán, ubicada en el Estado de Querétaro, a partir del análisis espectral de una imagen del satélite Landsat TM.

5.1. Características generales del área de estudio y del proyecto de la presa.

5.1.1. Antecedentes.

El estado de Querétaro enfrenta enormes retos para hacer frente a las demandas de agua que le imponen el crecimiento demográfico y el desarrollo agrícola e industrial. En un esfuerzo realizado tanto por los niveles de gobierno federal y estatal, como por los diferentes sectores de la sociedad queretana, se han planteado soluciones para el adecuado aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la entidad, en un marco de uso eficiente y responsable del vital líquido. Entre estas soluciones se tienen las destinadas al aprovechamiento de las aguas disponibles.

Los productores localizados en terrenos aledaños al sitio de la presa El Batán promovieron su construcción, con la finalidad de aprovechar los escurrimientos del río Pueblito y el manantial San Francisco, a fin de mejorar las condiciones de riego precario con que contaban sus tierras. Con el apoyo del gobierno estatal, las demandas de los ejidos El Pueblito y La Negreta y de los pequeños propietarios, motivaron la realización de diversos estudios, algunos de los cuales se iniciaron desde 1937.

Finalmente, la construcción de la presa se inició en diciembre de 1989, para concluir en diciembre de 1990.

La presa El Batán es resultado del trabajo conjunto y la aportación de recursos de los Gobiernos Federal y Estatal, y de los propios solicitantes.

5.1.2. Marco físico.

Localización.

La presa se localiza en el municipio de Corregidora, a los 20°30' 13" de latitud norte y 100° 24' 39" de longitud oeste, a una altura de 1869 metros sobre el nivel del mar.

Para llegar a la presa se parte de la ciudad de Querétaro hacia el suroeste por la carretera libre Querétaro-Celaya, por la cual se recorren seis kilómetros hasta llegar a Villa Corregidora. Desde ahí parte hacia la izquierda una desviación a Coroneo, por la que se caminan dos y medio kilómetros, para tomar nuevamente a la izquierda la carretera a Huimilpan, por la que se recorren tres kilómetros. A partir de este punto, se continúa a la derecha 1.4 kilómetros por un camino de terracería hasta llegar a la cortina.

Clima.

El clima representativo de la zona del proyecto es semiseco con poca o nula humedad de agua, templado frío con baja concentración de calor en verano. La temperatura media anual se aproxima a 18° C.

Precipitación.

La precipitación se concentra principalmente en los meses de junio a septiembre y tiene un promedio de 646 milímetros por año.

Por su parte, la evaporación media anual supera los 1871 milímetros que representa casi el triple de la precipitación media anual.

Hidrografía.

Las corrientes que alimentan a la presa forman parte de la cuenca del río La Laja, que a su vez forma parte del sistema Lerma-Santiago.

En la cuenca aportadora, se localizan varios poblados de relativa importancia, entre otros, el poblado de Huimilpan que es cabecera del municipio del mismo nombre, así como los poblados de Ceja de Bravo, Taponas, Puerta de San Rafael, Buenavista, El Milagro, Presa de Bravo, Lagunillas, San Pedro, San Francisco Neverías, El Zorrillo, Apapátaro, San Rafael y Arroyo Hondo.

Suelos.

De acuerdo con los estudios agrológicos, el origen de los suelos de la zona se asocia a diferentes procesos de formación en los que predominan los aluviales; en un 85% los suelos de la zona son de segunda clase.

Cultivos.

El 53% de la superficie total de la cuenca se utiliza para la agricultura; unas 3000 hectáreas se riegan con agua de almacenamientos existentes para el cultivo del maíz, frijol, trigo, alfalfa, sorgo, cebada, frutales y hortalizas. El otro 47% de la superficie presenta áreas de pastizal y de cobertura natural con vegetación tipo chaparral y bosque en la parte alta de la cuenca.

5.1.3. Objetivos del proyecto de la presa.

Los beneficios del proyecto se asocian principalmente al riego de 187 hectáreas, en beneficio de 341 familias, así como el abastecimiento de agua potable al municipio de Corregidora, en beneficio de 25000 habitantes.

Por lo que toca a la zona de riego por beneficiar, los volúmenes almacenados en la presa brindarán mayor seguridad a la producción agrícola.

En forma secundaria, se prevé que la presa va a contribuir en la regulación de las avenidas que se presentan en el río Pueblito protegiendo así las zonas agrícolas, urbanas e industriales que con frecuencia se ven afectadas por las crecientes de dicho río.^{5bis}

5.1.4. Generalidades acerca de los estudios básicos para la realización del proyecto.

Hidrología

La superficie total de la cuenca aportadora, hasta el sitio de la presa, es de 361 kilómetros cuadrados; dicha cuenca es de forma romboide alargado de norte a sur. Se inicia en la elevación 2840 metros sobre el nivel del mar y termina en la elevación 1869 metros sobre el nivel del mar.

El río Pueblito, cuyas aguas capta la presa, está formado por tres grandes corrientes: río Huimilpan, río Hondo y río Bravo. La cuenca aportadora se encuentra muy regulada por varios aprovechamientos; entre ellos se encuentran 20 almacenamientos de relativa importancia que captan 18.6 millones de metros cúbicos

y aproximadamente 121 bordos menores que retienen un escurrimiento de 0.8 millones de metros cúbicos. Después de considerar los aprovechamientos existentes, los estudios hidrológicos realizados señalan una aportación media anual a la presa de casi 9.7 millones de metros cúbicos. Al volumen anterior se unen las aportaciones del manantial San Francisco, el cual es propiamente una galería filtrante, cuyos aforos a lo largo de 18 años registran caudales de entre 105 y 305 litros por segundo, con lo que resulta un caudal promedio de 150 litros por segundo.^{5 bis}

Topografía y Geología.

La zona presenta elevaciones de origen volcánico como el cerro Cimatarío, que se eleva 400 metros sobre el valle de Querétaro. También se observan mesetas de mediana altura, mientras que hacia el norte del sitio de la presa, la topografía se modera formando grandes valles.

Las rocas predominantes en la región son volcánicas del terciario, tales como basaltos, andesitas y riolitas; presentándose en algunas partes tobas intercaladas depositadas en un medio acuoso, intrusionadas por diques de basalto.

La boquilla está constituida por basalto compacto de color gris oscuro, de estructura lajeada que va desde vertical hasta 50° de inclinación. Los planos de contacto del lajeamiento se observan cerrados en ambos márgenes de la boquilla y zona del cauce. Las perforaciones efectuadas en ambos márgenes, profundizadas a 30 metros, mostraron una formación cerrada y seca, a excepción de las ejecutadas en la zona del cauce, en las cuales se encontró agua entre los 20 y 25 metros de profundidad, misma que brotó a la superficie con un gasto aproximado de un litro por segundo.^{5 bis}

5.1.5. Descripción de los elementos principales de la presa.

Cortina

La cortina es de tipo flexible, de materiales graduados, de forma trapezoidal y con taludes exteriores 2:1. Está desplantada en basalto y tiene una longitud de 207.50 metros, con altura máxima de 45.50 metros y ancho de corona de 10 metros.

Vertedor.

El vertedor de demasías, localizado en la margen izquierda de la boquilla, es del tipo canal lateral con perfil Creager, con una longitud de cresta vertedora de 50 metros. Descarga a un canal colector de eje curvo, con 15 metros de ancho de plantilla y taludes 0.5:1. Después del canal colector se tiene un canal de descarga con el mismo ancho de plantilla y taludes de pendiente variable. El canal remata con una cubeta deflectora que descarga al río. La capacidad de diseño es de 533.50 m³/s.

La estructura está revestida de concreto reforzado hasta el inicio de la cubeta deflectora.

Obra de toma.

La obra de toma se localiza en la margen izquierda y está constituida por una estructura de entrada con torre de rejillas y tubería de acero ahogada en concreto de 30 pulgadas de diámetro que pasa por debajo de la cortina; tiene una longitud de 142.5 metros. Al final de la tubería de acero se tiene la estructura de salida con una válvula de emergencia en la tubería principal, seguida de una bifurcación con diferentes diámetros. En la tubería mayor se instalaron dos válvulas con descarga al río para servicio de riego; en la menor se tiene una válvula de mariposa y conexión a un ramal para el suministro de agua potable.

5.1.6. Datos de proyecto

Cortina	Flexible, de materiales graduados
Obra de toma	Torre y tubería de acero
Vertedor	Canal lateral con cresta libre
Capacidad	
de azolves	0.50 Mm ³
útil	6.00 Mm ³
de conservación	6.50 Mm ³
superalmacenamiento	2.27 Mm ³
total	8.77 Mm ³
Elevación	
del cauce	1862.00 m.s.n.m.
N.A.M.E.	1905.15 m.s.n.m.
N.A.M.O.	1902.10 m.s.n.m.
De la corona de la cortina	1907.15 m.s.n.m.
Cortina	
altura máxima	45.50 m
longitud de la corona	207.50 m
Vertedor	
gasto máximo de diseño	533.50 m ³ /s
longitud de cresta	50.00 m
elevación de la cresta	1902.10 m.s.n.m.
Obra de toma	
elevación del umbral	1884.00 m.s.n.m.
Gasto de diseño	1.20 m ³ /s

Fuente: CNA. El Agua y su Aprovechamiento Múltiple.

5.2. Planteamiento teórico del estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán.

Conviene recordar que los sensores a bordo del Landsat TM están calibrados para medir la radiancia de las cubiertas terrestres, y que los cuerpos de agua son menos reflectivos que los suelos, vegetación, arena, nieve o áreas urbanas. En las bandas del visible, los cuerpos de agua relativamente pura aparecen en tonos muy oscuros en la imagen de satélite, debido al hecho de que se comportan casi como un cuerpo negro. Esto es diferente en el caso de cuerpos de agua someros superficiales, en donde el fondo reflectivo influye notablemente en la señal electromagnética recibida por el sensor. Es decir, el agua de cuerpos superficiales poco profundos permite que una fracción de la radiación incidente alcance el fondo y sea reflejada nuevamente, para finalmente alcanzar el sensor remoto. El incremento en la profundidad de los cuerpos de

agua hace que disminuya la contribución de la reflexión del fondo a la señal electromagnética. Así, en general, la señal medida por el sensor es una mezcla de la radiación reflejada por el fondo, de las partículas que causan turbiedad y de la propia agua. En el caso del agua del vaso de la presa El Batán puede considerarse que no será significativa la radiación reflejada del fondo debido a que se trata de un cuerpo de agua profundo, por lo que la señal detectada por el sensor es debida principalmente a la presencia de sólidos suspendidos que causan turbiedad en el agua y, en segundo término, al agua misma.

5.3. Requerimientos de imágenes, software y hardware para el estudio.

El análisis espectral se realizó sobre una imagen LANDSAT TM de la cuenca del río Querétaro, correspondiente a marzo de 1997 (época de estiaje) abarcando un área de 2800 km² (40 km en sentido horizontal por 70 km en sentido vertical), utilizando el software ILWIS versión 2.1 para Windows. El término ILWIS es el acrónimo de su denominación en inglés Integrated Land and Water Information System. El ILWIS es un sistema de información Geográfica (SIG) con capacidad para el procesamiento de imágenes, que ha sido desarrollado por el Instituto Internacional para el Estudio del Aeroespacio y las Ciencias de la Tierra (ITC) en Holanda. Desde 1985 dicho software se ha venido perfeccionando, de tal forma que la última versión incluye el cambio del sistema operativo MSDOS al ambiente Windows. Para trabajar de manera óptima con ILWIS 2.1 para Windows es recomendable emplear un equipo de cómputo con procesador pentium, 16 MB en RAM o más y monitor SVGA con resolución de 1068 x 768 pixeles y 256 colores, un drive para disco de 3 ½ pulgadas, un CD-ROM y un mouse.

5.4. Metodología.

La estrategia para la clasificación espectral consistió en aplicar un análisis cluster sobre bandas no correlacionadas obtenidas a partir de una descomposición de componentes principales. La imagen original fue previamente georeferenciada a coordenadas geográficas UTM.

Previamente a la estrategia de clasificación se realizó un análisis visual de todas las bandas en forma independiente y se prepararon además composiciones en color para la imagen original de 2800 km² con el fin de tener información de carácter regional complementada con información documental útil para el estudio. Posteriormente se seleccionó una porción de terreno localizada al sur de la imagen, que corresponde a la escena de la presa El Batán para aplicar la estrategia de clasificación.

5.5. Composiciones en color para la imagen original de 2800 km².

Composición de color 1, 3, 4.

Con relación a la Figura 5.1, en la parte superior de la imagen se observan formaciones volcánicas (Cerro del Zamorano, con una altura de 3300 m.s.n.m.), así como mesetas lávicas, sierras y lomeríos que constituyen la parte más alta de la cuenca; en la parte central se observan zonas con desniveles menores, que son sitios de depósito de materiales erosionados, probables zonas lacustres antiguas; al SW se observa la ciudad de Querétaro y áreas dedicadas a la agricultura, a una altura aproximada de 1800 m.s.n.m.; y al SE, en color verde, se aprecia la zona de estudio en donde se localiza la presa El Batán.

Composición de color 5, 4, 2.

Con respecto a la Figura 5.2, se pueden apreciar los cuerpos de agua superficiales -corrientes y almacenamientos-, en tonalidades azules. En algunos casos, las trayectorias de los escurrimientos se pierden debido a que se encuentran en zonas de cultivo, lo que implica un cambio en su curso original.

Composición de color 4, 3, 2.

En la Figura 5.3, el mosaico de uso agrícola se presenta en rojo, el paisaje general en tonos de verde y los asentamientos humanos en tonos azul-verde, mientras que al agua se observa en tonalidades de azul.

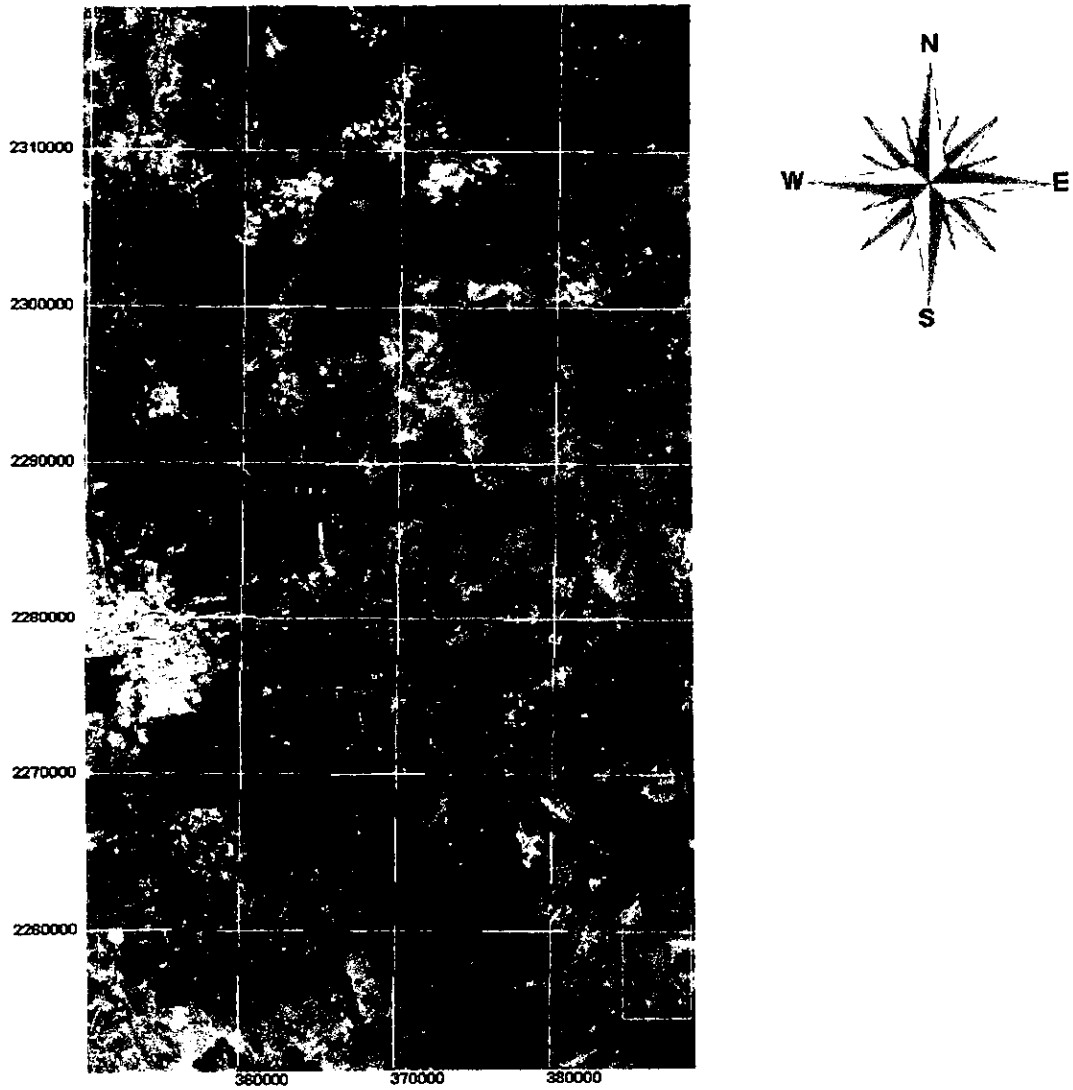
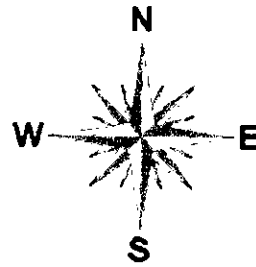
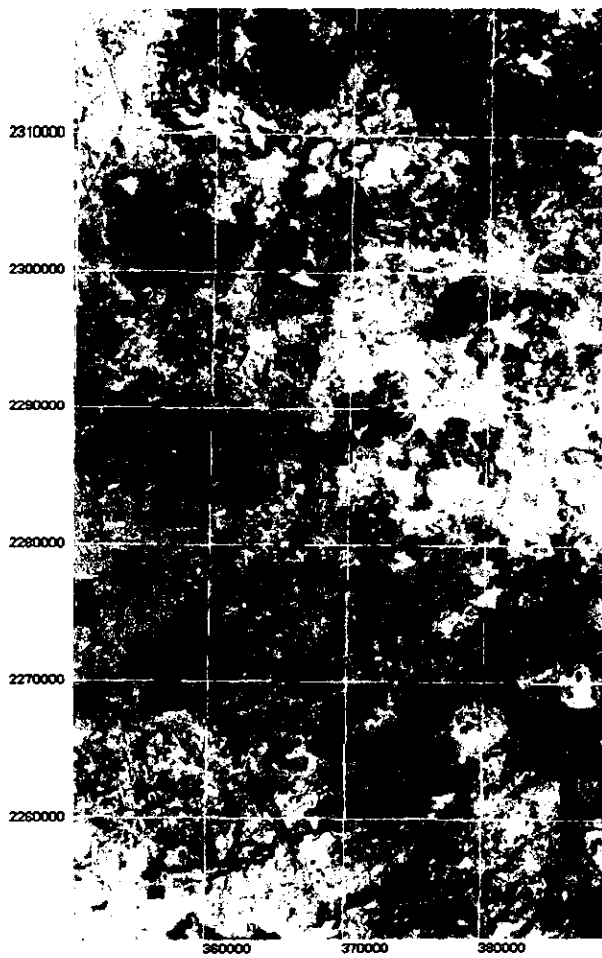


Figura 5.1. Composición de color 1, 3, 4. Geología.



Zona del estudio. Presa Batán

Figura 5.2. Composición de color 5, 4, 2. Hidrología.

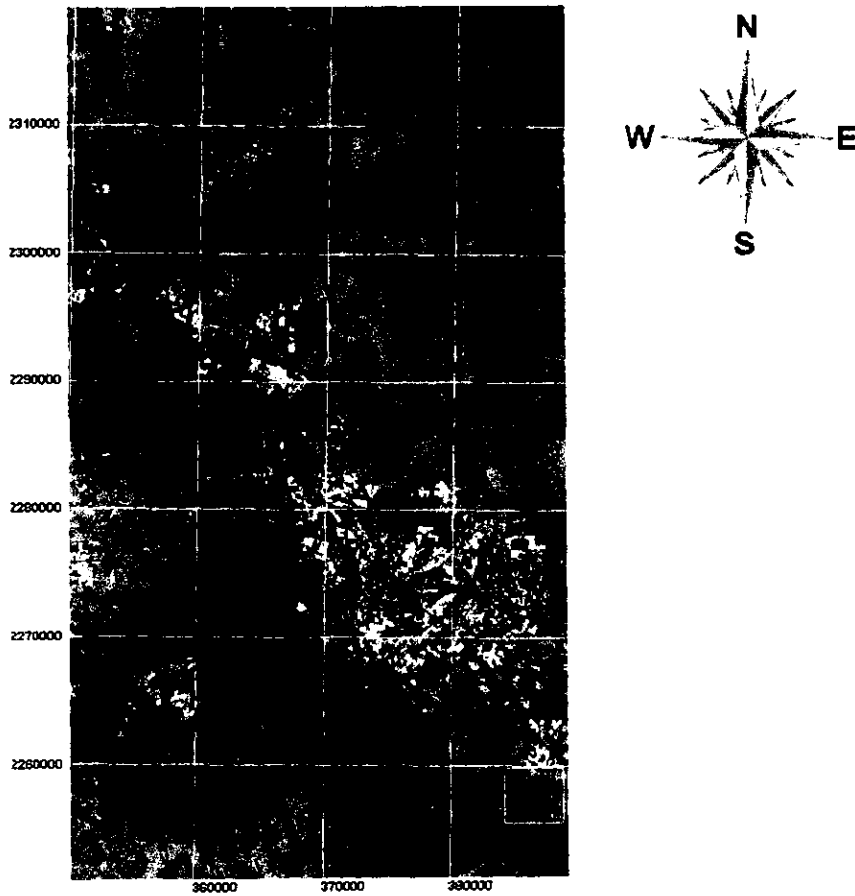


Figura 5.3. Composición de color 4, 3, 2. Uso del Suelo.

5.6. Análisis espectral de la imagen.

Para analizar la imagen de satélite se empleó una clasificación espectral no supervisada. Para el proceso de clasificación se llevó a cabo un estudio para determinar las mejores bandas de entrada al proceso. Primero se realizó una inspección visual de todas las bandas y se observaron los valores de radiancia en el vaso de la presa El Batán. Al respecto, se concluyó que las primeras tres bandas 1, 2 y 3 (grupo visible), contienen información particularmente relevante acerca de los cuerpos de agua, mientras que el grupo infrarrojo (bandas 4, 5, 6 y 7), contienen información respecto al suelo. De manera que la imagen multispectral está formada por dos grupos de bandas: el visible, que aporta información relativa al agua, y el infrarrojo, cuya información se refiere al suelo. Para verificar lo que se acaba de expresar, se calculó la matriz de correlación de la imagen que se muestra en el Cuadro 5.1. En la matriz de correlación, los grupos visible e infrarrojo están presentes; además, puede verse que la correlación entre las bandas de cada grupo es alta, mientras que para las bandas entre grupos la correlación es baja.

Cuadro 5.1. Matriz de correlación para las siete bandas de la imagen de satélite de la presa "El Batán"

Matrix : Correlation Matrix "MatrixCorr(bama...)"

1.00	0.96	0.95	-0.09	0.03	-0.12	0.11
0.96	1.00	0.97	-0.18	-0.14	-0.29	-0.07
0.95	0.97	1.00	-0.17	0.01	-0.12	0.10
-0.09	-0.18	-0.17	1.00	0.67	0.44	0.57
0.03	-0.14	0.01	0.67	1.00	0.86	0.98
-0.12	-0.29	-0.12	0.44	0.86	1.00	0.88
0.11	-0.07	0.10	0.57	0.98	0.88	1.00

Correlation Matrix for bamaco

Mean per band:						
70.99	35.59	45.69	49.55	82.92	145.26	44.41
Std. per band:						
8.81	6.88	10.62	16.76	39.22	13.54	22.27

Nota: Pantalla impresa directamente del "ILWIS".

Una vez definida la existencia de dos grupos de bandas en la imagen multispectral, se aplicó un análisis de componentes principales al grupo visible. De esta transformación se obtuvieron los mejores componentes principales. Es importante recordar que el análisis de componentes principales es un método matemático que permite describir las relaciones entre muchas variables reduciendo la cantidad de datos necesarios para definir las relaciones. Con el análisis de componentes principales para cada variable (imágenes de la presa Batán1, Batán2 y Batán3, Figura 5.4), se logra una combinación lineal de componentes comunes ortogonales (imágenes de componentes) con una variación decreciente. Cada componente lleva información diferente que no está correlacionada con los otros componentes.

Los componentes se listan en orden decreciente de variancia, esto permite la reducción de imágenes, ya que los últimos componentes tienen una muy pequeña variación que no añade información significativa, por lo que se descartan. La matriz de covariancia es la base para el cálculo de las imágenes de salida. El Cuadro 5.2 presenta la matriz de covariancia para las imágenes Batán1, 2 y 3 con sus respectivos coeficientes de transformación (eigenvectores). Las imágenes de salida son ortogonales (Matr1231, Matr1232, Matr1233) y están listados en orden de variación (variancia); también se muestra la variancia para cada componente. Por ejemplo, la imagen de salida Matr1231 (componente principal 1) se calcula como una combinación lineal de los eigenvectores y las imágenes Batán 1, 2 y 3; es decir: $0.57 \text{ Batán1} + 0.44 \text{ Batán2} + 0.69 \text{ Batán3}$.

Cuadro 5.2. Matriz de covarianza para las imágenes Batán 1, 2 y 3.

Matrix : Principal Components Coefficients "matrr123"

	batan1	batan2	batan3
matr1231	0.57	0.44	0.69
matr1232	0.78	-0.01	-0.63
matr1233	-0.28	0.90	-0.35

Principal Components Coefficients of map123.apl
 Variance per band: 97.34 1.81 0.85

Nota: Pantalla impresa directamente del "ILWIS".

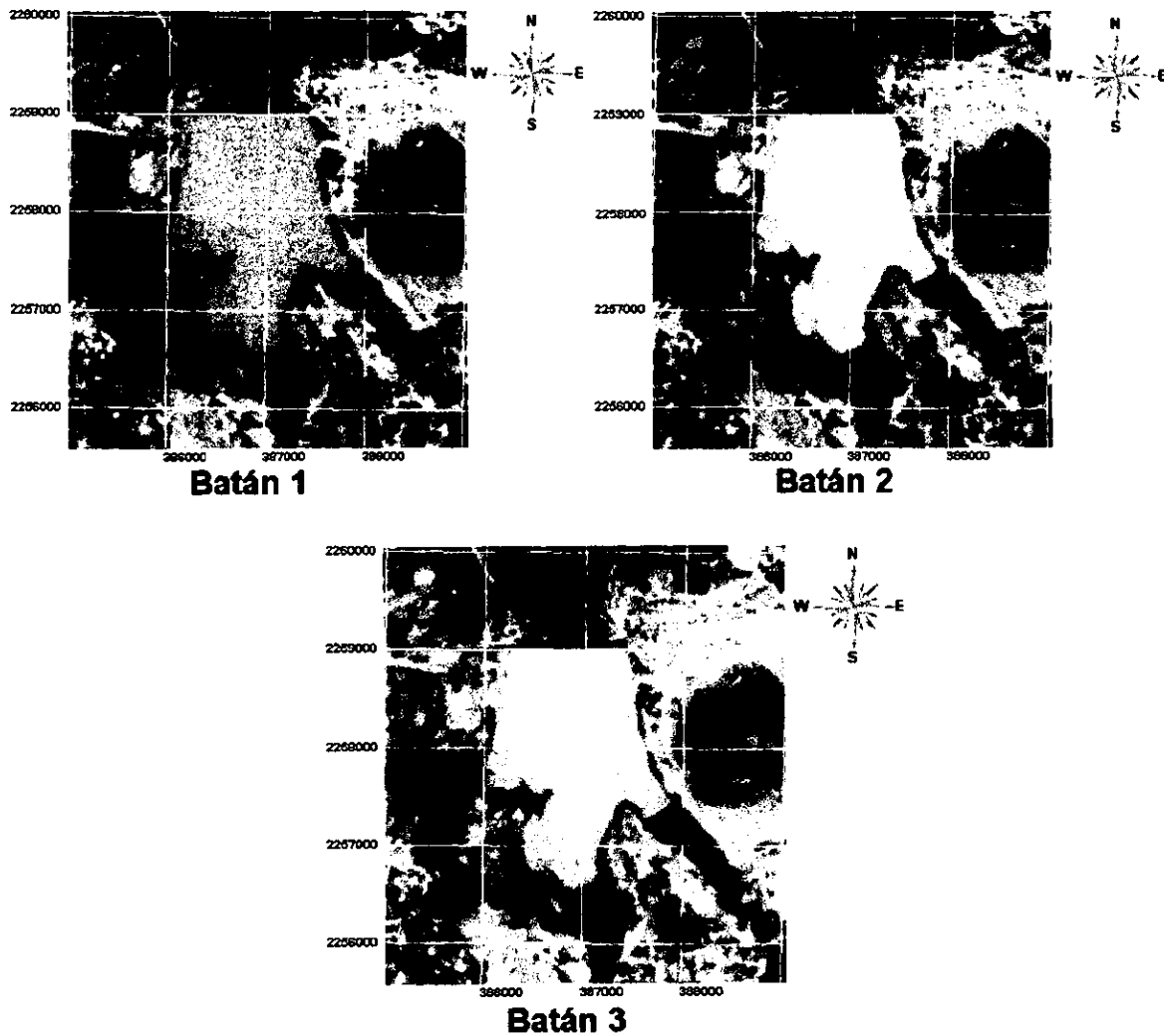


Figura 5.4. Imágenes de la presa "El Batán" para las bandas 1, 2 y 3.

Para la clasificación no supervisada fue utilizado el componente principal 1 (Figura 5.5) obtenido del análisis de componentes principales al grupo visible, el cual contiene la información más relevante del componente agua de la imagen. La clasificación no supervisada, o clustering, es el proceso mediante el cual los datos de la imagen son agrupados en clases espectrales de los valores de todos los píxeles. El número de clases espectrales que pueden obtenerse mediante la clasificación está comprendido entre 2 y 60. De la inspección visual de la imagen en las 3 bandas del espectro visible, se pudo estimar que el número de clases esperadas en la segmentación de las concentraciones de sólidos en el agua podría ser de 2 a 3. Después de varias pruebas con varios clusters, se pudo obtener la mejor clasificación (9 clusters), en donde se pudo apreciar que intentar diferenciar más de 3 niveles de sedimentos ocasiona una confusión entre clases.

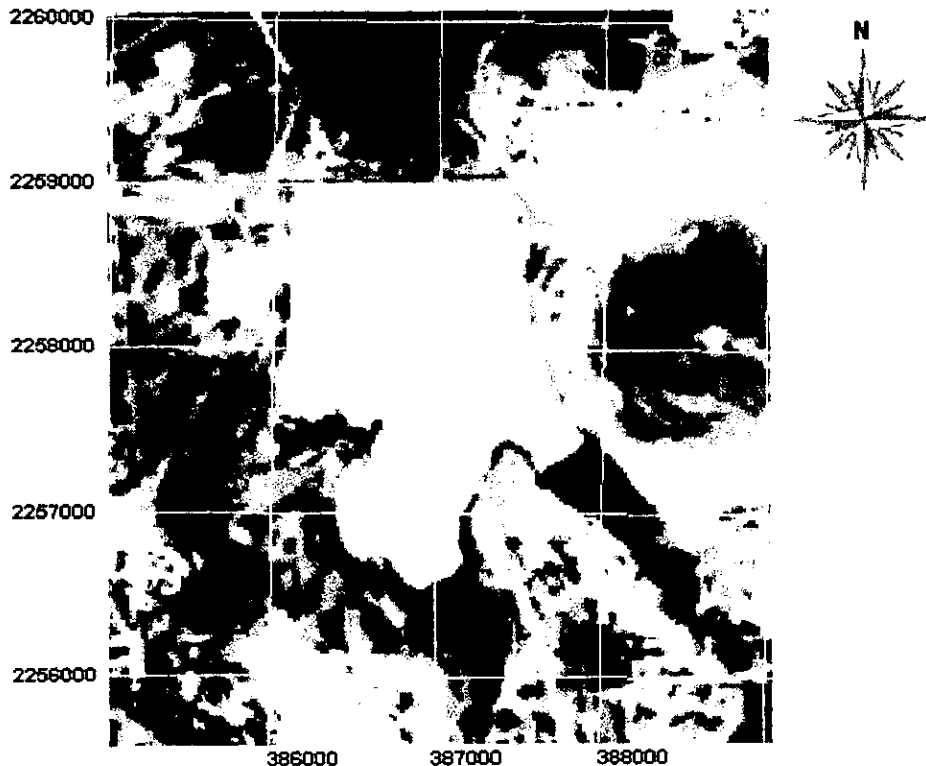


Figura 5.5. Componente principal 1 obtenido del análisis de componentes principales al grupo visible.

Una regla heurística de la clasificación no supervisada solicita al clasificador un número de clusters entre 2 y 3 veces las clases espectrales esperadas; esto se cumplió en el caso que nos ocupa con el número de clusters (9) con la cual se obtuvieron tres clases de sólidos en el vaso de la presa El Batán.

Para generar la imagen temática final se editó la clasificación resultante uniendo varios de los clusters en una única clase, solamente en la porción de suelo de la imagen, para así apreciar únicamente la distribución de sólidos en el vaso de la presa; además, para suavizar la apariencia de las clases espectrales, se aplicó a la imagen un filtro de tipo majority. La Figura 5.6 muestra la imagen resultante georreferenciada y el código de color para describir los diferentes niveles de sólidos suspendidos en el agua.

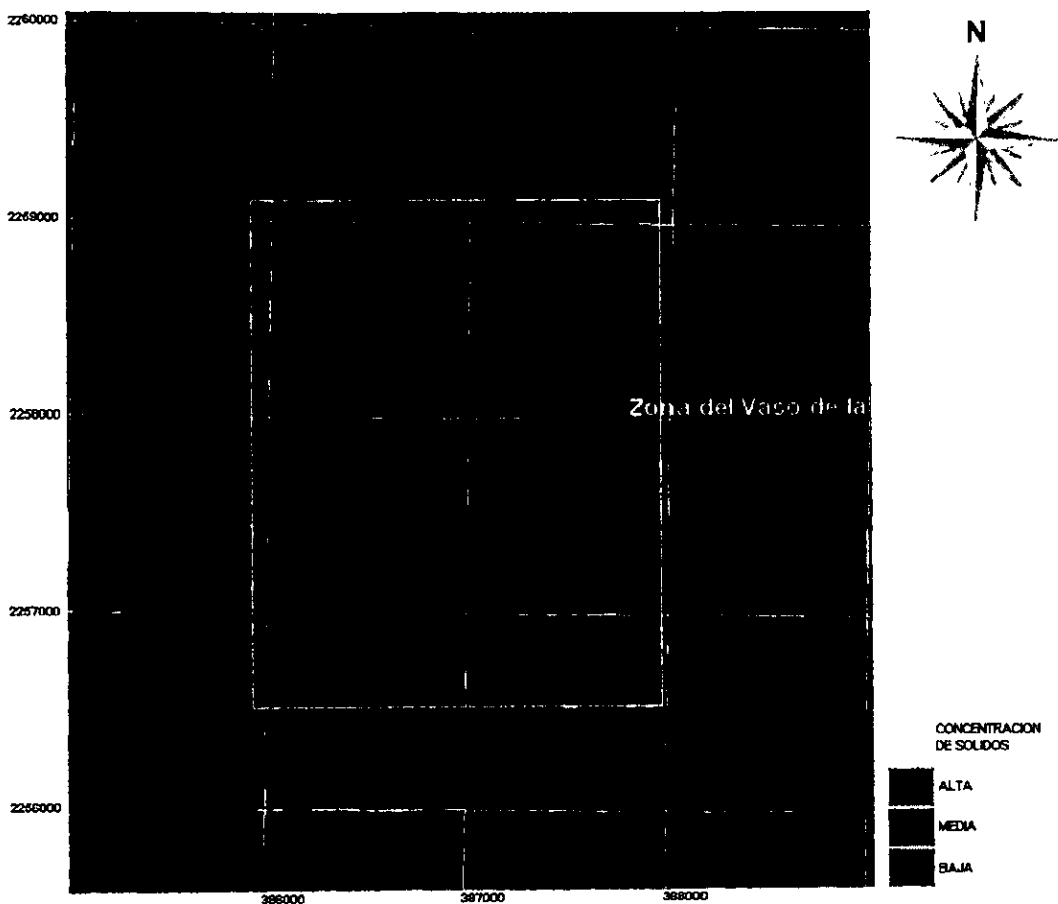


Figura 5.6. Imagen resultado de la clasificación no supervisada donde se muestran en código de color los diferentes niveles de sólidos suspendidos en el agua.

5.7. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada.

El índice de vegetación de diferencia normalizada se calculó con la finalidad de determinar el grado de eutroficación del lago artificial debido a la existencia de plantas acuáticas. Dicho índice se calculó a partir de dos bandas de satélite, una correspondiente al rojo (Banda 3) y otra al infrarrojo cercano (Banda 4), usando la ecuación⁷:

$$NDVI = \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3}$$

El empleo de estas bandas para el cálculo del índice es explicable por el peculiar comportamiento radiométrico de las cubiertas vegetales, la firma espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre la banda roja (0.6 - 0.7 μ m) y la comprendida en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μ m). Es decir, en la región visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben (para realizar la función clorofílica), en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por ello, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano.

La principal ventaja del NDVI es que su interpretación es fácil, ya que tiene valores entre -1 y 1. Las áreas con vegetación alcanzarán altos valores debido a su relativamente alta reflectancia en el cercano infrarrojo y baja reflectancia en el visible. El agua, en contraste, tiene una gran reflectancia en el visible más que en el cercano infrarrojo, de ahí que los valores característicos del índice serán negativos. Las áreas con rocas y suelo tienen reflectancias similares en las dos bandas y por ello sus índices de vegetación son cercanos a cero.

La Figura 5.7 muestra el NDVI en la zona del vaso de la presa. Todos los valores son negativos (color azul), lo cual indica que no hay presencia de plantas acuáticas. El color verde corresponde a roca o a suelo, cuyos índices son cercanos a cero y, finalmente, los índices mayores a cero y cercanos a 1.0 se muestran en color rojo o naranja.

5.8. Conclusiones del estudio de la distribución de sólidos suspendidos en el agua del vaso de la presa El Batán.

La distribución de sedimentos obtenida en el vaso de la presa El Batán estuvo basada en el análisis de componentes principales que sirvió como información de entrada a un análisis cluster. Como resultado de la aplicación de la metodología y apoyándose en una revisión espectral de las imágenes, se obtuvieron 3 clases espectrales o concentraciones de sólidos en el agua del vaso. Para asignar un orden de magnitud de los sólidos en suspensión para los colores dados en la Figura 5.6, es necesario contar con mediciones de sólidos suspendidos en campo, correspondientes a la fecha de adquisición de la imagen (marzo de 1997), información desafortunadamente no disponible en nuestro caso. Sin embargo, puede estimarse que la mayor concentración de sólidos corresponde a la porción sur del vaso de almacenamiento, donde ingresa el principal aporte de agua a la presa, corriente que se aprecia ligeramente debido a que la imagen del satélite corresponde a la época de sequía. La concentración se va reduciendo en dirección hacia la cortina debido al efecto de sedimentación de los sólidos en suspensión.

Por último, se puede concluir que la presa no presenta problemas de eutroficación, con base en el cálculo del NDVI (Figura 5.7).

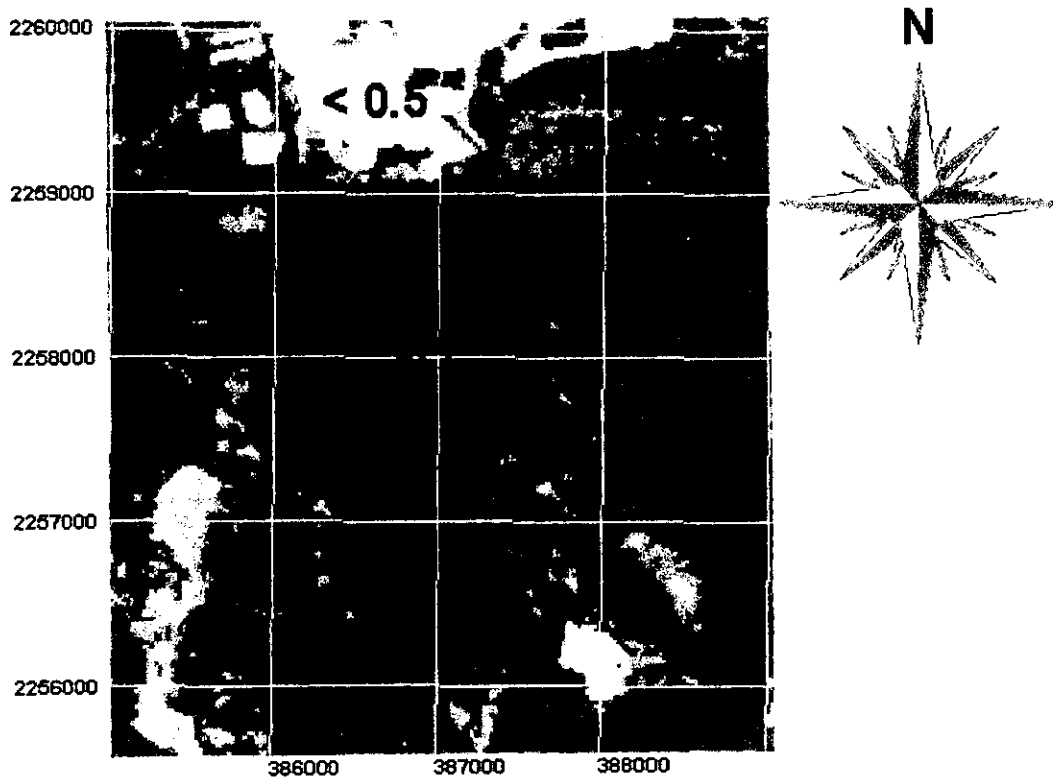


Figura 5.7. Índice de vegetación de diferencia normalizada para la presa "El Batán".

Conclusiones

Las conclusiones se presentan de acuerdo con los objetivos específicos planteados para este trabajo.

Conclusión	Objetivo 1: Estudiar los fundamentos teóricos de la percepción remota a través de los cuales es posible la adquisición de la imagen.
------------	--

1. El proceso para la obtención de la información de los objetos situados sobre la superficie terrestre (adquisición de la imagen de satélite) está gobernado por las leyes de la física, por lo que el conocimiento de los principios que permiten adquirir la imagen posibilitará al usuario para hacer una mejor interpretación de esa información.

2. Una de las características espectrales distintivas del agua pura se refiere a su propiedad de transmisión excelente (máxima reflectancia) y débil absorción de la energía en la región visible del espectro; y su débil transmisión (reflectancia mínima) y fuerte absorción en el infrarrojo. Esta característica resulta muy significativa debido a que el material del fondo, la profundidad y la calidad del cuerpo de agua están asociados con cambios en las propiedades espectrales del agua. Dichos cambios son evidentes solamente en el espectro visible ya que en el infrarrojo las relaciones entre reflectancia y parámetros de calidad del agua tienden a ser inciertas debido al efecto de absorción del agua en esta banda, aunque la frontera agua - suelo es más clara en el infrarrojo. Por lo tanto, la región visible del espectro electromagnético proporciona información concerniente a las características del agua, mientras que la región del infrarrojo es la opción adecuada para localizar y definir las fronteras de los cuerpos de agua mediante percepción remota.

Conclusión	Objetivo 2: Estudiar los principios y las técnicas más usadas en el procesamiento y análisis de imágenes.
------------	---

3. Adicionalmente a la ventaja dada por el carácter multiespectral de la imagen de satélite con respecto a la fotografía, se tiene la ventaja de que debido al carácter digital de la imagen se puede obtener un registro permanente en computadora, tanto de los datos originales como de los transformados, rapidez de análisis y facilidad para aplicar operaciones que no se pueden realizar sobre una fotografía.

4. El tratamiento digital supone una inversión económica inicial importante; sin embargo, dependiendo de la magnitud de la superficie por analizar, los costos disminuyen si aquélla aumenta. El análisis digital de imágenes se justifica cuando: el objeto o la escala de estudio no sea abordable mediante análisis visual; se pretenda trabajar repetidamente sobre áreas extensas; y se desee introducir los resultados en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Conclusión	Objetivo 3: Investigar respecto a las posibilidades de aplicación de la percepción remota, particularmente en lo relativo a la evaluación de la calidad del agua.
------------	---

5. Las principales ventajas de la percepción remota aplicada al estudio de atributos ambientales son: a) la rapidez con que pueden adquirirse datos de grandes superficies terrestres o atmosféricas, b) la posibilidad de estudiar áreas inaccesibles mediante otros medios, c) monitoreo permanente de la zona de estudio, lo cual permite disponer de datos actualizados, y d) la posibilidad de alcanzar el grado de precisión adecuado en función del objetivo del estudio.

6. Las aplicaciones de la percepción remota a la evaluación de la calidad del agua están limitadas a aquellos parámetros que muestran diferencias en su reflectancia espectral al aumentar o disminuir sus concentraciones en el agua. Al respecto, actualmente sólo es posible estimar concentraciones de fitoplancton y sólidos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Sin embargo, las aplicaciones futuras de la percepción remota a la evaluación de la calidad del agua podrían incrementarse al contar con instrumentos con mayor resolución espectral y espacial. Estos avances junto con la investigación básica relativa a la calidad del agua y su respuesta en la percepción remota, así como las mejoras en los análisis computarizados de imágenes, podrían favorecer nuevas aplicaciones en este campo.

7. Durante la fotosíntesis el fitoplancton absorbe la luz azul y se incrementa su concentración de clorofila, esto propicia que los niveles de reflectancia espectral en el verde se incrementen, y por ello el agua con altas concentraciones de fitoplancton y, en consecuencia, altas concentraciones de clorofila, pueden ser detectadas por la reflectancia del agua. Por lo tanto, las longitudes de onda azul/verde son las mejores para el estudio de fitoplancton y clorofila en el agua.

8. En el caso de los sólidos orgánicos e inorgánicos que producen turbiedad en el agua, la respuesta espectral es mayor que lo que ocurre en el agua libre de sólidos, y el máximo valor de reflectancia se presenta para la longitud de onda del rojo en lugar del verde. Por lo tanto, las mejores bandas para detección de sólidos son las correspondientes a verde-rojo.

9. La percepción remota permite una visión a gran escala del cuerpo de agua que, en la mayoría de los casos, no puede obtenerse de ninguna otra manera. Además, la naturaleza temporal de los datos de las imágenes de satélite proporciona información que permite inferir cambios en la calidad del cuerpo de agua. Por otra parte, los datos suministrados por las imágenes de satélite son herramientas muy útiles para elaborar programas y localizar puntos o fijar permanentemente instrumentos para el muestreo.

10. Para desarrollar modelos matemáticos que relacionen cuantitativamente parámetros de calidad del agua con los valores de radiancia media de las bandas, es necesario contar con datos de campo que correspondan de preferencia a la misma fecha de la imagen, para que a través de una regresión lineal múltiple se obtengan las relaciones empíricas.

11. La asimilación de la tecnología de la percepción remota a los diferentes campos de estudio implica un costo y tiempo significativo de arranque durante las primeras etapas. En el caso particular del presente estudio significó la búsqueda y adquisición de material bibliográfico, la capacitación en el uso del *software* para el procesamiento de imágenes, la adquisición de *hardware* y *software*, así como una impresora en color, y la obtención de la imagen de satélite. El tiempo empleado para el término de este estudio fue de un año y seis meses, y el costo aproximado fue de treinta mil pesos sin considerar la imagen de satélite que fue facilitada para este estudio por el Instituto de Geografía de la UNAM, y cuyo costo es de aproximadamente veinticinco mil pesos.

Conclusión	Objetivo 4: Ejemplificar la utilidad de la percepción remota en la evaluación de la calidad del agua mediante un caso estudio.
------------	--

12. A partir del análisis espectral de una imagen de un cuerpo de agua pueden obtenerse clases espectrales o concentraciones de sólidos en el agua; además, puede saberse si existe eutroficación. Para determinar el orden de magnitud de las concentraciones de sólidos en el agua se requiere contar con mediciones de sólidos suspendidos en campo correspondientes a la fecha de la imagen, información que no siempre se tiene disponible. Cuando se obtienen clases espectrales a partir del análisis de una imagen, esta información puede utilizarse para especificar los puntos de muestreo que estarán determinados por las clases espectrales identificadas y que serán localizados en coordenadas geográficas UTM, ya que la imagen está georreferenciada.

Glosario

Banda espectral. Se refiere a una selección de longitudes de onda con comportamiento electromagnético similar.

Clasificación digital. Proceso por el que se asigna un pixel de una imagen multiespectral a una categoría, sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen.

Cluster. Son los pixeles de una imagen que tienden a formar grupos con condiciones similares espectrales. El agrupamiento automático no supervisado (clustering) pretende encontrar estos grupos espectrales como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

Componentes principales. Es una técnica de tratamiento estadístico que permite condensar una serie de variables en un menor número, sobre la base de sus correlaciones mutuas.

Cuerpo negro. Emisor ideal que radia el máximo de energía por unidad de superficie en cada longitud de onda y para una temperatura dada. Un cuerpo negro también absorbe toda la energía que sobre él incide.

Emisividad. Es una medida relativa que describe la habilidad de un cuerpo para emitir energía en comparación a cómo la emite un cuerpo negro.

Emitancia radiante. Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo.

Energía radiante. Total de energía radiada en todas direcciones.

Espectro electromagnético. Localización de las distintas radiaciones según su longitud de onda y frecuencia.

Firma espectral. Expresión de un objeto sobre una imagen que nos permite reconocerlo. La firma está afectada por las características del objeto que originan su interacción con la energía electromagnética, y son distintas según la longitud de onda.

Flujo radiante. Energía radiada en todas direcciones por unidad de tiempo.

Frecuencia. Número de ciclos por segundo que pasan por un punto fijo.

Infrarrojo. Porción del espectro electromagnético comprendida entre 0.7 y 100 micras. Suele dividirse en infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 micras), medio (1.3 a 8.0 micras) y lejano (8 a 14 micras). Éste último también se conoce como infrarrojo térmico.

Irradiancia. Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo.

Lambertiana. Difusor perfecto que refleja la energía incidente, por igual en todas las direcciones.

LANDSAT. Serie de satélites construidos por la NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales.

Longitud de onda. Medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre ondas sucesivas.

Mie. Tipo de dispersión atmosférica provocada por partículas con similares dimensiones a la longitud de onda de la radiación.

Nivel digital. Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor.

Percepción Remota. Técnica que permite obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

Pixel. Elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado.

Radiación. Proceso en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

Radiancia. Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida.

Rayleigh. Tipo de dispersión atmosférica provocada por partículas mucho más pequeñas en tamaño que la longitud de onda de la radiación.

Reflectancia. Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie u objeto.

Resolución. Medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen.

Sensor. Cualquier instrumento que detecta energía (electromagnética), la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para el estudio del ambiente.

Sistema de Información Geográfica (SIG). Conjunto de programas que permiten almacenar, modificar y relacionar cualquier tipo de información espacial.

Referencias

I. Libros

Ref.

1. Asrar Ghassem. Theory and Applications of Optical Remote Sensing. John Wiley and Sons, Inc. USA. 1989.
 2. Barrett E.C-Curtis L.F. Introduction to Environmental Remote Sensing. Chapman and Hall. USA. 1982.
 3. Belward Alan S.-Valenzuela Carlos R. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 1990.
 4. Bernstein Ralph. Digital Image Preprocessing for Remote Sensing. IEEE Press Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York. 1978.
 5. Chuvieco Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp S.A. Madrid, 1990.
 - 5bis. CNA. El Agua y su Aprovechamiento Múltiple.
 6. Engman E.T.-Gurney R.J. Remote Sensing in Hidrology. Chapman and Hall. 1991.
 7. ILWIS Department. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences Enschede, The Netherlands. ILWIS 2.1 for Windows. The Integrated Land and Water Information System.
 8. Lillesand-Kiefer. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons. USA. 1979.
 9. Lira J. La Percepción Remota: Nuestros Ojos desde el Espacio. Fondo de Cultura Económica. México. 1987.
 10. Kovar K.-Nachtnebel H.P. Application of Geographic Information Systems in Hidrology and Water Resources Management. IAHS International Association of Hidrological Sciences, 211. Netherlands. 1993.
 11. Rees.W.G. Topics in Remote Sensing 1. Physical Principles of Remote Sensing. University Press Cambridge, 1990.
 12. SEDENA. Manual de Operaciones de Guerra Electrónica. México. 1990.
 13. Shaw G.-Wheeler D. Statistical Techniques in Geographical Analysis. John Wiley and Sons. New York, 1981.
-

14. Trevett J.W. Imaging Radar for Resources Surveys. Chapman and Hall. USA. 1986.
15. Ulaby F.T.-Moore R.K.-Fung A.K. Microwave Remote Sensing Active and Passive. Volume 1 Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Volume 2 Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Volume 3 From Theory to Applications. University of California, Santa Barbara. 1986.
16. Watson K.-Regan R.D. Remote Sensing. Society of Exploration Geophysicists. USA. 1983.

II. Artículos publicados en revistas técnicas.

Por fecha de publicación del más reciente al más antiguo.

Ref.

17. Lira J.-Morales A.-Zamora F. Study of sediment distribution in the area of the Pánuco river plume by means of remote sensing. Remote Sensing, 1997, vol. 18, no. 1.
18. Lira J. Análisis digital de imágenes y percepción remota. Instituto de Geofísica UNAM, vol.2, no.2.
19. Navarro-Watts-Williams-Saiz. Captura de imágenes directamente del satélite para la gestión ambiental en América Latina. SELPER, Noviembre de 1996.
20. Henderson F. B. Remote Sensing for Gis. GIS World, February 1995.
21. Friel-Leary- Norris-Warford-Sargent. Gis tackles oil spill in Tampa Bay. GIS World, November 1993.
22. Rodbell S.GPS/GIS Mapping Accurately Assesses Environmental Impact. GIS World, December 1993.
23. Lira J.-Marzolf G.R.-Marocchi A.- Naugle B. A probabilistic model to study spatial variations of primary productivity in river impoundments. Ecological Applications, February 1992, col.2. no.1.

3. Apuntes de cursos

Ref.

24. "Introducción a los sistemas de Información Geográfica con aplicaciones en Hidrología y Manejo de Cuencas mediante el ILWIS", Instituto de Geografía, UNAM 1998.
25. "Agua y Futuro", Iniciación a la teledetección. GDTA Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale. Marzo 1997.
26. "Percepción Remota para Ingenieros Topógrafos y Geodestas". M.I. Clemencia Santos Cerquera, México. 1994.
27. "Sistema de Información Ambiental para el Desarrollo Integral Regional". INEGI, Programa integral de capacitación, formación e investigación, 1993.