

CAPÍTULO 3

3. LOS RECEPTORES REMOTOS EN LA MEDICIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL.

3.1. ¿Qué es un GPS?

Un GPS es un sistema de radio-navegación basado en los satélites, donde el receptor GPS determina su posición geográfica X, Y y Z midiendo su distancia a los diferentes satélites. Hay 24 satélites de GPS operativos que están circulando alrededor de la tierra en diferentes órbitas y todos transmiten su posición espacial. Determinando el horario de los diferentes satélites, que se corresponde con la distancia, se obtiene la posición geográfica. El error en la estimación de posiciones de campo es del orden de unos pocos metros, dependiendo de la calidad del receptor. (13)

3.2. La teledetección remota

La teledetección o percepción remota es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para

la observación, el análisis, la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios.

Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales.

Como su nombre indica, la teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado.

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de información entre el objeto observado y el captador. El portador de esta información es la radiación electromagnética, esta puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos (planetas, seres vivos, objetos inanimados) emiten radiación electromagnética; la cantidad y tipo de esta radiación emitida depende fundamentalmente de su temperatura.

El principal emisor de radiación en el sistema solar es el propio Sol cuya radiación, reflejada por la Tierra y los objetos situados en ella, es la más comúnmente utilizada en teledetección y es la que nos permite ver los objetos situados a nuestro alrededor. Otra opción es que el sistema captador incorpore un emisor de radiación (Radar) cuyo reflejo en la

superficie del planeta objeto de estudio lo recoge el propio captador. Ver ANEXO 47.

El objetivo fundamental de la teledetección es el de analizar las características de la radiación que abandona la superficie terrestre, y que es captada posteriormente por un sensor situado en un satélite. El análisis de estos datos, permite determinar qué elementos y factores ambientales las han producido. (11)

3.2.1. Proceso de la Teledetección

El principio de base de la teledetección es similar al de la visión. La teledetección es el resultado de la interacción entre tres elementos fundamentales: una fuente de energía, un objetivo o escena y un captador o sensor.

La fuente de energía es la que "ilumina" el objetivo emitiendo una onda electromagnética (flujo de fotones). También es posible medir el calor que se desprende de la superficie del objetivo (infrarrojo térmico). En este caso el propio objetivo es la fuente de energía (aunque se trata de energía solar almacenada y reemitida).

El objetivo o escena es la porción de la superficie terrestre observada por el satélite. Su dimensión varia, en función de la resolución del captador, de unos pocos km² a algunos miles de km².

El captador o sensor de teledetección mide la energía solar (es decir la radiación electromagnética) reflejada por el objetivo. El captador puede encontrarse en un satélite o en un avión, sobrevolando el objetivo a una altura de pocos centenares de metros hasta distancias de 36000 kilómetros en el caso de los satélites meteorológicos.

Los captadores embarcados en los satélites miden la radiación electromagnética reflejada y posteriormente reenvían esta información a la Tierra mediante un emisor. En la Tierra una red de estaciones de recepción se encarga de recibir y almacenar estos datos.

Cuando la fuente de energía es el Sol, y el captador solo mide la radiación reflejada, se conoce como teledetección pasiva. Esta modalidad de teledetección solo es operativa durante las horas diurnas. Por la noche o cuando hay nubes que se interponen no es posible realizar observaciones.

La observación de las regiones tropicales no es fácil con esta modalidad de teledetección, a causa de la frecuente presencia de densas coberturas de nubes en estas zonas. Asimismo son difíciles de observar las regiones polares durante los periodos invernales, debido a la reducida iluminación solar que reciben.

En los casos que el mismo satélite lleva una fuente emisora de energía (radar) que envía hacia el objetivo y mide el eco producido se le denomina teledetección activa. El radar atraviesa la cobertura de nubes lo que facilita la obtención de imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas, tanto de día como de noche.

Aunque las imágenes de radar son más difíciles de analizar, complementan los datos de la teledetección pasiva y ofrecen información adicional sobre otros aspectos como la topografía del terreno. (11)

3.2.2. Alturas de Teledetección

La teledetección puede hacerse a distintas alturas y mediante diferentes plataformas.

El área de la superficie terrestre escaneada, está en función de la altura de exploración. Cuanto más lejos esté el sistema de teledetección, mayor será la superficie cubierta, de forma inversa, cuanto más cerca estemos de la superficie menor será el área analizada.

- Nivel I: Agrupa los instrumentos que operan desde el nivel del suelo hasta los aviones de gran altitud.
- Nivel II: Incluye los dispositivos ubicados en ingenios de órbita baja (Trasbordador espacial, estación orbital) hasta los satélites de observación de órbitas polares hasta 1000 km).
- Nivel III: Son los satélites de observación meteorológica situados en órbita geoestacionaria a casi 36.000 Km de la Tierra. (11)

3.2.3. Espectro electromagnético y Teledetección

3.2.3.1. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética comprende una amplia variedad de frecuencias o de longitudes de onda que abarcan desde los rayos gamma a las ondas de radio. Todas estas emisiones constituyen el denominado espectro electromagnético.

3.2.3.2. Características

Las ondas electromagnéticas son todas semejantes (independientemente de cómo se generen) y sólo se diferencian en su longitud de onda y frecuencia. La luz es una onda electromagnética.

Las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz.

3.2.3.3. Las ondas electromagnéticas

Cuando la radiación electromagnética incide sobre la superficie de un cuerpo, una parte es reflejada y el resto transmitida.

La intensidad de las ondas electromagnéticas disminuye con el cuadrado de la distancia.

3.2.3.4. Radiaciones electromagnéticas

En teledetección aeroespacial, se mide la cantidad de radiación electromagnética reenviada por una porción de superficie terrestre.

Las películas fotográficas solo pueden registrar las longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo.

Los instrumentos de los satélites de teledetección son sensibles a un rango más amplio de frecuencias que el espectro visible. El rango de longitudes de onda que pueden captar, va desde el ultravioleta, hasta las zonas infrarrojas, térmicas y las microondas.

Las radiaciones más utilizadas en teledetección son:

- **Las microondas**

Las microondas, también llamadas hiperfrecuencias, se usan en los sensores radar. Se generan mediante unos dispositivos electrónicos llamados magnetrones, parecidos a los que hay en los hornos microondas domésticos.

- **La radiación infrarroja**

Los cuerpos calientes emiten radiación infrarroja, propiedad que tiene muchas aplicaciones en teledetección, medicina y astronomía. La zona infrarroja del espectro, se subdivide en tres regiones: infrarrojo cercano, medio y lejano o térmico.

- **El espectro visible**

La luz es la parte visible del espectro electromagnético. La sensibilidad espectral del ojo humano es muy estrecha y se subdivide en seis intervalos que definen los colores básicos: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta.

- **La radiación ultravioleta**

La radiación ultravioleta es la componente principal de la radiación solar. (11)

3.2.4. Interacción de la radiación electromagnética con la Atmósfera

En el espacio exterior no hay pérdida de radiación por interferencia con ningún medio material, sólo se produce el fenómeno de atenuación debida a la ley del cuadrado de la distancia.

Los gases y partículas de la atmósfera terrestre interactúan con los flujos de radiación recibidos del Sol y con los emitidos o reflejados por la superficie terrestre. Los principales efectos de la atmósfera terrestre sobre la radiación incidente son:

3.2.4.1. Dispersión

Es la difusión de la radiación producida por las partículas presentes en la atmósfera. Se distinguen dos tipos principales:

- Dispersión Rayleigh cuando la radiación interactúa con moléculas atmosféricas y otras partículas pequeñas cuyo diámetro es menor que la longitud de onda de la radiación incidente. Las longitudes de onda más cortas tienden a ser más afectadas por esta modalidad de dispersión, que las longitudes de onda más largas. El color azul del cielo es un ejemplo de este tipo de dispersión.
- Dispersión Mie tiene lugar cuando las partículas que interactúan con la radiación son de mayor diámetro, por ejemplo vapor de agua y partículas de polvo. Esta radiación tiende a influir más sobre las longitudes de onda más largas. Las puestas de sol rojizas son un ejemplo de dispersión Mie.

3.2.4.2. Absorción

En contraste con la dispersión, la absorción resulta en una pérdida efectiva de energía en la atmósfera. La absorción se produce en longitudes de onda determinadas. El vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono son los principales elementos que absorben la radiación solar. Los rangos de longitudes de onda en los cuales la atmósfera es particularmente transparente se los denomina ventanas atmosféricas.

Los efectos de la atmósfera sobre la radiación electromagnética varían por diferentes factores entre los que destacan: las diferencias de recorrido, la intensidad de la señal emitida, la longitud de onda y con las condiciones atmosféricas del momento de la observación. (11)

3.2.5. Interacciones de la radiación con la materia

Todos los objetos de la superficie terrestre reciben radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del Sol.

En función de las características del objeto material la radiación, puede seguir tres caminos:

Reflejarse

La radiación es reenviada de vuelta al espacio

Absorberse

La radiación pasa a incrementar la energía del objeto

Transmitirse

La radiación se transmite hacia abajo a otros objetos

La reflectancia o albedo de una superficie se mide por la relación entre la radiación incidente y la reflejada. Cuanto más reflectante es un material mayor es su valor de albedo. El albedo anual promedio de la Tierra, incluyendo la atmósfera, es del 34%. El 75% del albedo terrestre está causado por la reflexión de las nubes.

En teledetección se trabaja normalmente con la reflectancia relativa, y se mide comparando la radiación reflejada por el objeto con la que refleja un papel blanco (considerado una superficie reflectante perfecta) en idénticas condiciones de iluminación. El hecho de utilizar la reflectancia relativa en lugar de la absoluta, hace que el resultado no dependa de factores

ambientales tales como la cantidad de luz recibida (muy variable en función de la hora de captación), la latitud, la orientación...

Hay que tener en consideración que un radiómetro mide la cantidad de energía que le llega procedente de una determinada zona de la superficie terrestre, que varía en función de la distancia y del ángulo de captación.

La proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para los distintos componentes del terreno, dependiendo del tipo de material y de su condición. Estas propiedades específicas de cada cuerpo se aprovechan en teledetección para establecer mecanismos de identificación de los distintos elementos geográficos en su ambiente.

Gracias a las medidas de reflexión, absorción y emisión de energía radiante de los distintos tipos de superficies en el espectro visible y infrarrojo, los científicos pueden calcular las firmas o firmas espectrales para los distintos tipos de paisajes y cubiertas vegetales de la Tierra.

El conocimiento de la signatura espectral de una zona de la superficie terrestre, facilita mucho la tarea creación de mapas de vegetación y de usos del suelo. Estos mapas de usos del suelo, son instrumentos muy útiles para la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales. (11)

3.2.6. Interacción radiación electromagnética – materia

Comportamientos y firmas espectrales

El análisis e interpretación de las imágenes de satélite exige conocimientos interdisciplinarios. Una sólida base de física y en especial de radiometría es necesaria para poder entender las imágenes de teledetección.

Todos los elementos geográficos (bosques, cultivos, ríos, lagos, edificios, etc.) transforman de forma diferenciada la radiación electromagnética que reciben del Sol.

Cada tipo de objeto presenta a un nivel de respuesta específico en términos de:

% radiación reflejada + % absorbida + % transmitida,

La variación de la reflectancia en función de la longitud de onda se la denomina firma o signatura espectral.

La firma espectral es pues la medida cuantitativa de las propiedades espectrales de un objeto en una o varias bandas espectrales. También se la conoce como comportamiento espectral , concepto que incluye la variabilidad temporal de las firmas espectrales, así como su variación en función de las condiciones meteorológicas, de las estaciones del año, y de las condiciones de iluminación. (11)

Respuesta espectral del agua y de la nieve

La respuesta espectral del agua depende principalmente de su pureza y de la presencia de partículas en suspensión (aluviones, algas...). El agua pura tiene unas excelentes propiedades en cuanto a transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. En cambio la reflectancia presenta un pico en el verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo. Esta falta de reflectividad en el infrarrojo es clave para distinguir entre áreas de tierra y agua tanto en costas o lagos como en ríos. Al

incrementarse la profundidad del agua la reflectancia desciende, en cualquier longitud de onda.

Cuando el agua presenta turbidez, las consecuencias sobre la respuesta espectral van a depender del tipo de partículas en suspensión. Si se trata de fitoplancton, aparecen importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye).

La reflectividad de la nieve es mucho mayor que la del agua en todas las longitudes de onda, pudiendo incluso saturar los sensores. (11)

Comportamiento espectral de la vegetación

La cubierta vegetal es un medio heterogéneo compuesto de hojas, tallos, troncos, suelos, agua... elementos todos ellos que presentan sus respuestas espectrales respectivas. Además hay que tener en consideración que las plantas son seres vivos sujetos a cambios estacionales, climáticos e incluso a enfermedades y que estos cambios afectan a su reflectividad. Por estas razones el estudio del comportamiento espectral de la vegetación es muy complejo.

La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. La reflectividad de la vegetación es muy alta en el infrarrojo próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía.

La vegetación enferma presenta una disminución de la reflectividad en las bandas infrarrojas y un incremento en el rojo y azul.

Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta. (11)

3.2.7. Concepto de imagen satelital.

Una imagen satélite está compuesta por una matriz de puntos elementales (píxeles) generados por los captadores de los instrumentos de teledetección. Estos sensores miden la

radiación reflejada por unidad de superficie para unas longitudes de onda determinadas (bandas).

Una imagen digital puede ser obtenida por diferentes medios, ya sea por medio de un fotosensor electrónico pasivo o bien mediante el eco producido por una emisión de radar.

Aunque la imagen se parece a una fotografía de tonos continuos, en realidad está compuesta por una matriz de valores discretos que son los elementos de la imagen o píxeles. Esta representación puede ser definida por colores o diferentes niveles de gris.

Es importante distinguir entre imagen digital y fotografía. Las imágenes digitales, se generan por un captador electrónico y su carácter digital permite el procesamiento informático, lo cual amplifica enormemente las posibilidades de análisis y tratamiento. Las fotografías se obtienen mediante películas fotográficas y procesos de revelado químico de las mismas. Directamente una fotografía no es susceptible de tratamiento informático, para ello primero se la debe convertir en imagen digital mediante un escáner. (11)

Definición de píxel

El término 'píxel' proviene de la contracción de las palabras inglesas '*picture*' y '*element*' es decir 'elemento de imagen'. Un píxel representa la unidad elemental mínima de información de una imagen digital. Por extensión se utiliza (inadecuadamente) para referirnos a cada uno de los fotosensores que integran el sensor electrónico de una cámara digital o de un captador de satélite. Este uso resulta incorrecto porque son varios minúsculos fotosensores los que contribuyen a la información contenida en un píxel de la imagen. Por tanto, para evitar confusiones, hay que tener siempre presente si nos referimos a "píxeles del sensor" o a "píxeles de la imagen digital".

La intensidad de cada píxel corresponde al brillo promedio o "radiancia" medida electrónicamente sobre el área del terreno que corresponde a cada píxel. Normalmente un píxel contiene información en un rango de 128 o 256 valores de gris por lo que se puede tener así una imagen monocroma.

Por convención, las medidas más intensas están codificadas en blanco y las más débiles en negro. Esta codificación genera una gama degradada de grises, mediante este mecanismo se generan las imágenes satélite. (11)

3.2.8. Composición de colores en las imágenes digitales

Los datos captados por los satélites de teledetección se registran en diferentes bandas del espectro electromagnético.

Cada banda de un sensor multispectral, es una imagen monocroma que podemos ver en escala de grises con una paleta de 256 tonos. Cada píxel de estas imágenes puede tener un valor que oscila entre negro (valor 0) y blanco (valor 256).

(11)

Representación en color de imágenes satélite

La visualización de las imágenes de teledetección es mejor cuando se tiene una representación en colores, ya que el ojo humano percibe mejor las diferencias de color que los niveles de gris.

Para poder ver las imágenes de teledetección en colores, se hace una combinación de tres bandas, que recibe el nombre de imagen de color compuesta. Las imágenes de las distintas bandas se pueden combinar entre ellas para producir una imagen en color real o en falso color en función de las bandas

escogidas. Esto se hace asignando a cada uno de los canales (RGB) de la pantalla de ordenador, una banda en particular.

El máximo número de canales que podemos ver simultáneamente en una pantalla es de tres y la apariencia de colores dependerá de las bandas espectrales concretas que asignemos a los canales rojo, verde y azul del monitor. (11)

Imágenes compuestas en color natural

Las imágenes compuestas en color natural o real son combinaciones de las bandas 1 (azul) , 2 (verde) y 3 (rojo) que coinciden aproximadamente con la gama visual del ojo humano, por lo que se parecen bastante a lo que esperaríamos ver en una fotografía normal en color. Las imágenes de color real tienden a presentar un bajo contraste y un aspecto algo borroso. Ello es debido a que la luz azul es más afectada que las demás por la dispersión atmosférica.

Otras combinaciones de bandas distintas, generan imágenes en falso color. La naturaleza de los objetos que se quieren investigar, determina la selección de las tres bandas a combinar. (11)

3.2.9. Generación de imágenes en falso color

Las diferentes bandas espectrales captadas por los sensores electrónicos de un satélite de teledetección, pueden combinarse para generar imágenes coloreadas que mejoran la visualización de determinadas escenas. (11)

Imágenes compuestas en falso color

El ojo humano puede ver muchos más detalles en las imágenes en color que en blanco y negro. Incluso se pueden apreciar más detalles en una imagen de color falso que en otra equivalente en color natural o verdadero.

En el procesado de imágenes de satélite, se generan a menudo imágenes en falsos colores porque incrementan la percepción de determinados detalles de la superficie. Una imagen en falso color es una representación artificial de una imagen multiespectral.

En algunas aplicaciones de teledetección, puede ser útil asociar las clases de cobertura del suelo con colores familiares, por ejemplo, la hierba con el verde. En otros casos, se prefieren los

colores contrastados para resaltar objetos de interés en el fondo.

La codificación que se emplea en las imágenes multibanda, se basa en la numeración de las bandas que integran dicha imagen, siguiendo el orden específico de rojo, verde y azul. De esta manera, una imagen que use la banda 7 para el rojo, la banda 4 para el verde, y la banda 2 para el azul se la designa como: 7,4,2. (11)

Imágenes en pseudocolor

A diferencia de las imágenes en falso color que están compuestas por la información de tres bandas diferentes, las imágenes en pseudocolor consisten en imágenes monocromas en las que se ha substituido la escala de grises por una tabla o paleta de colores (11)

3.2.10. Resolución de las imágenes satelitales

Resolución: concepto y tipos

El número de píxeles que integran un sensor de satélite o de cámara digital, definen su poder de resolución. Es decir la

capacidad de discernir objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas. A mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del fotosensor, pero también mayor es el volumen del archivo informático generado. Es lo que se denomina resolución espacial y constituye uno de los tipos de resolución que definen a las imágenes satélite.

Una imagen de satélite se caracteriza por los siguientes modalidades de resolución:

- resolución espacial
- resolución espectral
- resolución radiométrica
- resolución temporal.

Resolución espacial

Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor.

Por ejemplo las imágenes Landsat TM, tienen una resolución espacial de 30x30 m en las bandas 1,2,3,4, 5 y 7 y de 120 x 120m. en la 6 (térmica). El sensor SPOT - HRV tiene una resolución de 10x10m., mientras que los satélites meteorológicos como NOAA, el píxel representa un tamaño desde 500 a 1100m. de lado.

Resolución espectral

Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor. Por ejemplo SPOT tiene una resolución espectral de 3, Landsat de 7. Los nuevos sensores, llamados también espectrómetros o hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral.

Resolución radiométrica

Se la llama a veces también resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital usado.

Así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de $2^6= 64$ niveles de gris en el canal 6, y Landsat MSS en las bandas 4 a 7 de $2^7= 128$ niveles de gris, mientras que en Landsat TM es de $2^8 = 256$. Esto significa que tenemos una mejor resolución dinámica en el TM y podemos distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación.

Resolución temporal

Es la frecuencia de paso del satélite por una mismo punto de la superficie terrestre. Es decir cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

El ciclo de repetición de los Landsat-1 al Landsat -3 era de 17 días. A partir del Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días. SPOT permite un ciclo de repetición de entre 3 y 26 días. (11)

3.2.11. Procesamiento digital de las imágenes satélite

El propósito del procesamiento digital de imágenes, es el de resaltar elementos que son difíciles de percibir o no se pueden distinguir directamente en una imagen.

En el procesamiento digital de imágenes, normalmente se utilizan varias bandas espectrales de un mismo satélite. Por ejemplo Landsat TM tiene 7 y SPOT tiene 3.

Pero también se puede trabajar en modo multisensor o multitemporal de modo que el número de bandas puede ser mucho mayor. Por ejemplo, pueden integrarse datos obtenidos por distintos satélites, de una misma zona.

Cuando se trabaja en modo multibanda se pueden perseguir diferentes objetivos. Por ejemplo: extraer información que sólo puede verse combinando 2 o más bandas espectrales, o reducir la cantidad de datos eliminando la información redundante.

El procesamiento de imágenes digitales requiere software especializado.

Las funciones básicas de los programas de procesamiento digital de imágenes se pueden resumir en:

- Efectuar composiciones de color RGB a partir de la combinación de imágenes monocromas.
- Generación de histogramas para conocer las características espectrales de las imágenes tratadas.

(11)

3.2.11.1. Efectuar correcciones

Las imágenes de satélite están sometidas a una serie de interferencias o de errores durante su recepción, que perturban la información que quiere analizarse:

Fallos en los sensores, generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica).

Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación y los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica).

Interferencias de la atmósfera, que alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica).

3.2.11.2. Filtrado

Son métodos para resaltar o suprimir, de forma selectiva, la información contenida en una imagen para destacar algunos de sus elementos, o también para ocultar valores anómalos.

3.2.11.3. Operaciones con imágenes digitales

Se trata de hacer transformaciones simples en las imágenes, aplicando las operaciones matemáticas básicas. Para ello se requiere un mínimo de 2 imágenes de bandas distintas.

Los tipos de operaciones son:

- **Sumas**

La suma de 2 o más bandas espectrales se usa para reducir el ruido propio de la imagen.

- **Diferencias**

Se usan básicamente para detectar cambios, por ejemplo imágenes tomadas en distintas fechas.

- **Cocientes**

Los cocientes sirven para detectar o acentuar algunas características especiales, como el contenido de hierro en rocas o la vegetación. También se usan para atenuar la influencia del relieve.

3.2.12. Interpretación de imágenes satélite multiespectrales

Los captadores a bordo del satélite LANDSAT recogen datos en 7 bandas del espectro electromagnético. Los distintos elementos de la superficie terrestre pueden destacarse usando combinaciones apropiadas de estas bandas.

Es muy útil contrastar los datos procedentes de las diferentes bandas del espectro electromagnético para analizar los componentes de la superficie terrestre, gracias a la propiedad que se denomina *signatura* o *firma espectral*. (11)

Análisis multiespectral por combinación de bandas.

Las bandas concretas que se emplean en las combinaciones de tres bandas se suelen identificar dándoles números de banda para rojo, verde y azul en un orden específico. De esta manera,

una imagen que use la banda siete para el rojo, la banda cuatro para el verde y la banda dos para el azul se designaría 7,4,2

Con esta combinación espectral la cubierta vegetal aparece claramente diferenciada del resto de elementos.

- Análisis combinando las bandas 4,3,2

Esta composición de bandas, muestra los bosques en rojo y las zonas cultivadas en distintos tonos de rojo y rosa. Las carreteras se ven como líneas de color rosa claro.

Los lagos y el mar son de color azul oscuro.

- Análisis combinando las bandas 5,4,2

En esta imagen compuesta por las bandas 5, 4 y 2, los bosques aparecen en color verde, las zonas cultivadas en distintos tonos verde y las zonas edificadas en varios tonos grises y rosados. Además, se ven las carreteras como líneas oscuras. Los lagos aparecen en color negro.

- Análisis de la imagen en color real (bandas 3,2,1)

Las imágenes compuestas en color real o verdadero tienen un aspecto similar a lo que esperaríamos ver en una fotografía normal, ya que la combinación de colores se aproxima a la percepción del ojo humano. Las imágenes de color real tienden a presentar un bajo contraste y un aspecto algo borroso. Ello es debido a que la luz azul (Banda 1) es más sensible que las de otros anchos de banda al efecto de dispersión de la atmósfera.

3.3. Propiedades ópticas espectrales de la vegetación

3.3.1. Respuesta espectral de los pigmentos, espectro visible

En la porción visible del espectro, la absorción, transmisión y reflectancia de luz depende fundamentalmente de los pigmentos presentes en los tejidos vegetales, entre los cuales el más abundante es, normalmente, la clorofila.

La clorofila absorbe mucha más luz azul y roja que verde, la cual es reflejada con el doble de intensidad. Así, una planta verde refleja alrededor del 5% de la luz azul, el 20% de la luz verde, y el 8% de la luz roja.

Evidentemente, conforme la clorofila de una hoja se pierde, ya sea por senescencia, enfermedad, o degradación consecuencia del estrés o falta de nutrientes, la luz en la porción visible del espectro es reflejada con más intensidad, hasta conformar una curva de reflectancia típica de pastos secos, en la que éstos se ven más brillantes que la vegetación viva.

3.3.2. Respuesta en el infrarrojo cercano (NIR)

La porción infrarroja del espectro, sin embargo, debe sus propiedades ópticas a la estructura celular, y no a la presencia de pigmentos. Entre los $.75 \mu\text{m}$ y los $1,25 \mu\text{m}$ la luz casi no es absorbida en absoluto, de modo que es reflejada y transmitida en proporciones similares (alrededor del 50% de cada una). En otros términos, las hojas de la vegetación verde actúan, en el infrarrojo cercano, como un espejo semi-plateado.

3.3.3. Efectos de diferencias en la estructura foliar

En general, y ante condiciones de hidratación similares, las hojas de dicotiledóneas reflejan alrededor de un 5% más de la luz incidente que las hojas de las monocotiledóneas, presumiblemente por el mayor ordenamiento del mesófilo en empalizada de las primeras (el mesófilo esponjoso, y el de las

dicotiledóneas es más isotrópico o desordenado, lo que contribuye a la dispersión). Lamentablemente esta diferencia es frecuentemente insuficiente, por si sola, para permitir distinguir cultivos entre sí, como en el caso de la soja y el maíz, aunque en condiciones óptimas pueda serlo. Cabe destacar, sin embargo, que las diferencias de reflectancia en el visible son nulas.

3.3.4. Respuesta en el infrarrojo medio (SWIR)

En el infrarrojo medio, o de onda corta, la respuesta está fuertemente influenciada por el contenido de agua. Esta tiene tres picos de absorción ubicados alrededor de 1,4 μm , 1,9 μm , 2,7 μm (la más importante) de importancia creciente, de modo que el grado de hidratación de los tejidos vegetales influyen fuertemente en la cantidad de luz reflejada en esta porción del espectro, condición que se manifiesta aditivamente a medida que aumenta la cantidad de capas de hojas, o el IAL (Índice de área foliar).

3.3.5. Efecto del contenido de humedad foliar

Es importante notar que la curva de reflectancia de la vegetación cambia significativamente conforme ésta se seca. Pequeñas pérdidas de agua afectan principalmente la reflectancia en el infrarrojo de onda corta, pero si la pérdida se agrava, lo cual

afecta el contenido de clorofila en las hojas, toda la curva sufre alteraciones importantes, y aumenta la reflectancia a lo largo de todo el espectro.

En la porción del espectro visible, la reflectancia en el rojo aumenta más rápidamente que en el azul, motivo por el cual el ojo humano percibe un amarillamiento en la vegetación que se seca. (11)

3.4. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)

3.4.1. DEFINICIÓN

Se han desarrollado diversas técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites.

Con el fin de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multiespectrales a una sola dimensión, se han definido los Índices de vegetación. Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc.

Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que iniciaría las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. Dos bandas del espectro, la azul y la roja muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (región invisible para el ojo humano) actúa justo de forma inversa. La mayor absorción del rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es la diferencia espectral de la respuesta de toda la vegetación, y ha sido usado durante mucho tiempo como forma de diferenciación de las superficies con y sin vegetación.

La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos en la banda visible roja (banda 1), región de absorción de la clorofila, que en la banda cercana infrarroja (banda 2), región de alta reflectancia del componente celulósico. Cuando la vegetación sufre stress, los valores de la banda 1 aumentan y los de la banda 2 decrecen. Estas propiedades llevaron a definir varios índices de vegetación basados en operaciones algebraicas entre las bandas 1 y 2. Uno de los algoritmos más conocidos es el del llamado Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI, en inglés) que se define como: (5)

$$\text{NDVI} = (\text{banda 2} - \text{banda 1}) / (\text{banda 2} + \text{banda 1}). \text{ Ver ANEXO 6.}$$

3.4.2. RANGO DE VALORES

El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre (-1) y el (+1). Sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona. Estas propiedades hacen que el NDVI se haya constituido en una valiosísima herramienta para la evaluación de cubiertas vegetales, así como para estudiar la clasificación y dinámica vegetal y sus aspectos fenológicos. (5)