



Munich Personal RePEc Archive

A Summary on Fundamentals of Remote-Sensing and Applications

Larrosa, Juan MC

Universidad Nacional del Sur

2000

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/12827/>

MPRA Paper No. 12827, posted 21 Jan 2009 14:30 UTC

**UN RESUMEN SOBRE
ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TELEDETECCIÓN
Y SUS APLICACIONES**



Por Juan MC Larrosa

jlarrosa@criba.edu.ar

Septiembre 2000

Tabla de contenidos

1. Introducción.....	4
2. Principios de emisión de energía y teledetección	4
2.1 Fuentes de radiación y principios de radiación	4
2.2 El espectro electromagnético: la distribución de las energías radiantes	9
2.3 Espectro electromagnético: Transmisión, Absorción, y Reflexión	14
2.4 Espectro electromagnético: Firmas espectrales	20
2.5 Interpretación y clasificación	22
2.6 Aplicación exitosa de la teledetección	29
3. Historia y tecnología de sensores remotos	30
4. Aplicaciones de la información obtenida por sensores remotos	32
4.1 Aplicaciones forestales y agropecuarias.....	32
4.1.1 El caso particular de Amazonas	36
4.2 Aplicaciones para el planeamiento urbano y usos de la tierra.....	38
4.3 Aplicaciones para la exploración geológica	42
4.3.1 Prospección petrolera a través del uso de herramientas de clasificación	43
5. Aplicación económica de la información remota	48
5.1 Valoración fiscal de propiedades	48
5.2 Valoración de la producción.....	49
5.3 Valoración de pérdidas por catástrofes naturales.....	50
6. Conclusiones.....	51
Referencias	51

Referencias para Figuras, Esquemas, Imágenes y Tablas

<i>Figura 1. Frecuencia y longitud de onda</i>	5
<i>Figura 2. Campos eléctricos y magnéticos de la onda electromagnética</i>	6
<i>Figura 3. Intensidad radiante</i>	8
<i>Figura 4. Espectro Electromagnético</i>	10
<i>Figura 5. Radiación atmosférica por longitud onda</i>	12
<i>Figura 6. Transmisión, Dispersión, Reflexión y Absorción de fotones</i>	15
<i>Figura 7. Radiación solar-terrestre</i>	16
<i>Figura 8. Superficie perfectamente difusa</i>	18
<i>Figura 9. Reflectancia bidireccional sobre superficie rugosa</i>	20
<i>Figura 10. Firmas espectrales seleccionadas</i>	21
<i>Figura 11. Porcentajes de reflectancia entre firmas espectrales</i>	22
<i>Esquema 1. Clasificación de Niveles de Superficie Utilizada</i>	39
<i>Imagen 1. Identificación de zonas boscosas</i>	33
<i>Imagen 2. Región objetivo y análisis de firmas espectrales</i>	34
<i>Imagen 3. Índice de vegetación para la región pampeana (INTA)</i>	35
<i>Imagen 4. Identificación de clases de terrenos en la cuenca Amazónica</i>	37
<i>Imagen 5. Foto natural a color compuesta de la selva amazónica</i>	37
<i>Imagen 6. Imágenes de desmonte en la selva amazónica</i>	38
<i>Imagen 7. Harrisburg, (EE.UU.), mapa compuesto sobre superficie utilizada/cubierto</i>	40
<i>Imagen 8. Harrisburg, (EE.UU.), mapa multitemático</i>	41
<i>Imagen 9. Buenos Aires, fotografiada desde el Shuttle</i>	41
<i>Imagen 10. Explotaciones petrolíferas en la cuenca Neuquen (foto SAC-C, CONAE)</i>	42

<i>Imagen 11. Imágenes de coeficientes de bandas (Utah, EE.UU.)</i>	43
<i>Imagen 12. Imágenes de ratios a color compuesto</i>	44
<i>Imagen 13. Imágenes blanco y negro de análisis de componentes principales</i>	45
<i>Imagen 14. Imágenes compuestas a color de los componentes principales</i>	46
<i>Imagen 15. Utilización del clasificador de máxima verosimilitud</i>	47
<i>Tabla 1. Nebulosa Crab captada por distintas bandas espectrales</i>	14
<i>Tabla 2. Mapeador temático (TM) del sistema Landsat</i>	22
<i>Tabla 3. Comparación de firmas espectrales entre áreas con vegetales y áreas edificadas</i>	23
<i>Tabla 4. Mejores Bandas MSS [Multi-Spectral Scanner] para la identificación de figuras en la superficie (Landsat Thematic Mapper)</i>	27

1. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de fotografiar la Tierra desde el aire, primero, y desde el espacio, después, ha posibilitado mucho más que simplemente obtener soberbias panorámicas. Los datos extraídos de estas imágenes a través de sensores multispectrales, adecuadamente procesados e interpretados, han provisto de información valiosa a diversos campos de la ciencia así como instituciones públicas y privadas en general. Históricamente relacionado con el ámbito de la defensa, la información extraída por las fotografías aéreas y espaciales ha demostrado tener una muy amplia acogida en el ámbito civil. La capacidad de los sensores montados en satélites de ver lo invisible al ojo humano brinda la posibilidad de enriquecer el campo de investigación de los científicos así como tomar decisiones con mayor calidad de información. Este trabajo tiene como rol inicial el de ser un resumen de tópicos iniciales en el tema de la teledetección, sus fundamentos y sus aplicaciones en diversos campos de investigación.

El trabajo continúa con la sección 2 del trabajo corresponde a un resumen de NASA [2000] *Remote Sensing Tutorial* en sus capítulos 2 y 3, en los cuales se describen los procesos físicos que permiten a los sensores multi-espectrales obtener dicha información. La sección 3 donde se realiza una pequeña introducción a la historia y tecnología de los sensores remotos. La sección 4 describe las aplicaciones actuales y potenciales de los referidos procesos. Por último, la sección 5 esboza algunas aplicaciones potenciales en términos económicos y la sección 6, concluye con algunos comentarios finales.

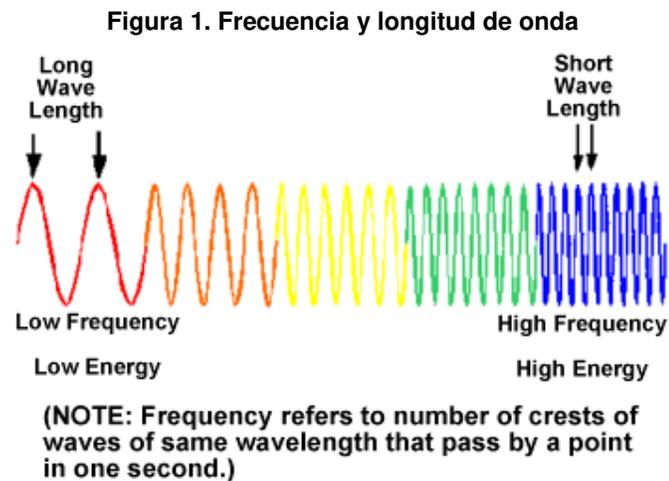
2. PRINCIPIOS DE EMISIÓN DE ENERGÍA Y TELEDETECCIÓN

En esta sección se analizarán los principios físicos que determinan cómo los sensores remotos son aprovechados para extraer mayor cantidad de información de una escena de la podría extraerse confiando en el ojo y cerebro humanos. Las seis subsecciones, a continuación, abarcan un muy breve resumen que parte desde los principios básicos de radiación lumínica hasta consejos de cómo mejorar la utilización de la información extraída por medio de detectores de sensores remotos.

2.1 FUENTES DE RADIACIÓN Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN

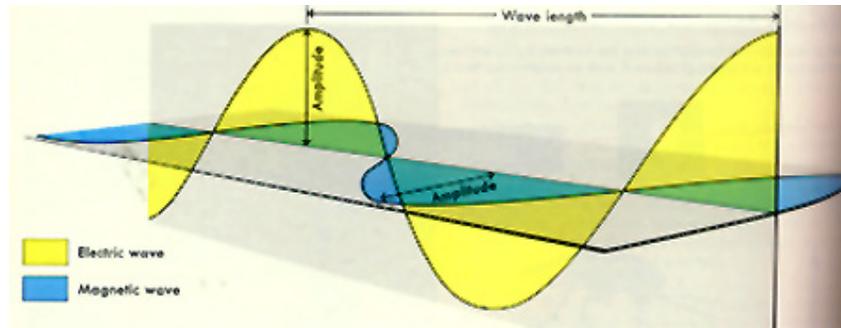
El fotón es la forma física de un quantum, la partícula básica estudiada en la mecánica cuántica (rama científica que estudia la física de los entes a nivel atómico

y subatómico). Es también descrita como la partícula mensajera para la fuerza electromagnética ó la más pequeña partícula de la luz.. Esta partícula subatómica sin masa comprende la radiación emitida por la material cuando es excitado por la temperatura ó por procesos nucleares (fusión ó fisión) ó por algún bombardeo realizado por otro tipo de radiación. Puede existir como radiación absorbida ó reflejada. Los fotones se mueven a la velocidad de la luz: 299.792,46 km/seg (comúnmente redondeadas a 300.000 km/seg). Estas partículas también se mueven como ondas y por lo tanto, tienen una naturaleza dual. Las ondas siguen un patrón que se puede describir en términos de una función sinusoidal como se muestra en la figura bidimensional a continuación.



La distancia entre dos picos adyacentes en una onda es la longitud de la onda. El número total de picos que pasa por una referencia determinada en un segundo es la frecuencia de la onda (en ciclos por segundo y en hertz).

Un fotón viaja como una onda electromagnética con dos componentes, los cuales oscilan mutuamente como ondas sinusoidales en ángulo recto. Uno consiste en el campo *eléctrico* variable y el otro en el campo *magnético* variable. Ambos tienen las mismas amplitudes lo que los hace alcanzar sus picos máximos y mínimos al mismo tiempo. Al contrario de otros tipos de onda que requieren de un transportador (por ejemplo las ondas de agua ú olas), las ondas de fotones pueden transmitirse a través del vacío (como el espacio). Cuando los fotones pasan de un medio a otro, por ejemplo del aire al vidrio, los senderos de ondas son desviados, siguiendo nuevas direcciones por lo que experimentan lo que se llama refracción.

Figura 2. Campos eléctricos y magnéticos de la onda electromagnética

Se dice que un fotón es cuantizado lo que quiere decir que cualquiera de ellos posee una cierta cantidad de energía. Por supuesto, otros fotones pueden tener diferentes valores de energía. Los fotones como *quantums* muestran una amplia variedad de energías discretas. El monto de la energía que caracteriza a un fotón se determina utilizando la ecuación general de Planck:

$$E=h\nu$$

donde h es la constante de Planck ($6.6260... \times 10^{-34}$ Joules-seg.) y ν es la letra griega nu, representando la frecuencia. Los fotones que viajan a mayores frecuencias, entonces, poseen mayor energía. Si un material bajo excitación experimenta un cambio en el nivel de energía desde un nivel alto E_2 a uno más bajo E_1 , se puede describir la anterior fórmula como:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

donde ν tiene como valor discreto determinado uno dado por $(\nu_2 - \nu_1)$. En otras palabras, un cambio particular de energía está caracterizado por la producción de radiación emitida (fotones) en una frecuencia específica ν y una correspondiente longitud de onda en un valor independiente de la magnitud del cambio.

La longitud de onda es la inversa de la frecuencia (frecuencias más altas se asocian con longitudes de onda más cortas) dando la siguiente relación:

$$c=\lambda\nu \text{ (con lo que queda que } \nu=c/\lambda)$$

donde c es la constante que expresa la velocidad de la luz, con lo que la ecuación de Planck queda

$$E=hc/\lambda$$

La distribución de toda la energía de los fotones sobre el rango observado de frecuencias es condensada en el término **espectro**. Un fotón con algún nivel específico de energía ocupa una posición en dicho rango, es decir yace en algún punto específico en el espectro.

La luz visible es una de muchas formas de energía electromagnética. En este sentido, la **energía radiante** (Q), transferida como fotones, es emanada en pequeñas ráfagas (tren de ondas) desde una fuente en un estado de excitación. Esta corriente de fotones se mueve a lo largo de flujos (también llamado rayos) como el flujo (ϕ) el cual es definido como la tasa temporal a la cual la energía Q pasa por una referencia espacial (en calculo sería en términos de: dQ/dt). Las unidades de medidas son tanto joules ó ergs por segundo ($1 \text{ J/seg} = 1 \text{ Watt}$). El concepto de flujo esta relacionado al de potencia, definido como el ratio de tiempo para realizar un trabajo ó gasto de energía. La naturaleza del trabajo es debida a éstos motivos (los cuales puede actuar combinadamente):

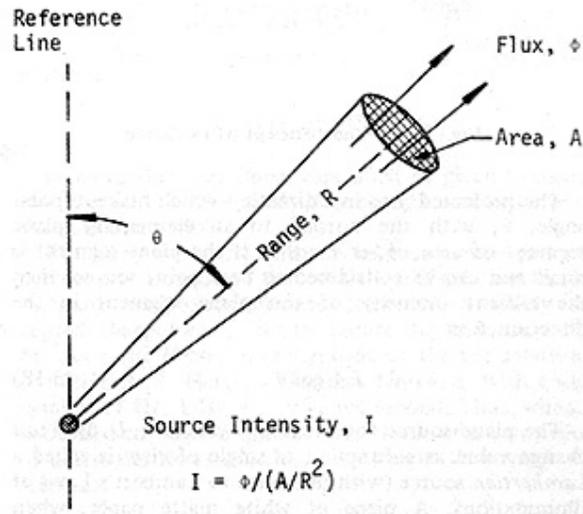
- Cambios en el movimiento de partículas dado por campos de fuerza
- Calentamiento;
- Cambios de estado físico ó químico.

Dependiendo de las circunstancias, la difusión de la energía desde un punto focal puede estar limitada a una dirección específica ó puede dispersarse en todas las direcciones.

La **densidad del flujo radiante** es la energía por unidad de volumen (metros ó centímetros cúbicos). La densidad del flujo es proporcional al cuadrado de la amplitud de las ondas componentes. La densidad de flujo cuando describe la radiación proveniente de una fuente externa a una superficie de un cuerpo es denominada como irradiación (E); si el flujo sale de dicho cuerpo se denomina excitación (M)

La noción de **intensidad radiante** está dada por el flujo radiante por unidad de ángulo sólido en esteradianes (un ángulo cónico en el cual la unidad es un radian ó 57 grados, 17 minutos y 44 segundos); el siguiente diagrama ayuda a entender esta descripción.

Figura 3. Intensidad radiante



De este modo, para una superficie a una distancia R de una fuente, la intensidad radiante I es el flujo ϕ que fluye a través de un cono de ángulo sólido ω sobre el área circular A en esa distancia, el cual está dado por $I = \phi / (A/R^2)$. Nótese que la radiación se está moviendo en alguna dirección ó senda relativa a una línea de referencia que es definida por el ángulo ω .

De ello es derivada una entidad fundamental de la radiación electromagnética denominada radiancia, la cual se representa usualmente con la letra L. La radiancia es definida con el flujo radiante por unidad de ángulo sólido que se proyecta desde un área extendida (área A) en una dirección determinada por unidad proyectada del área en dicha dirección. Como se estableció matemáticamente, $L = \phi / \omega$ veces $1 / \cos \theta$. La radiancia está íntimamente relacionada con el concepto de brillantez que se asocia a los cuerpos luminosos. *Lo que la teledetección mide es la radiancia a diferentes longitudes de onda que se proyectan desde áreas extendidas.*

Los flujos radiantes que salen de las fuentes (origen interno) son denominados excitación radiante (M). Los flujos radiantes que alcanzan ó brillan por sobre (origen externo) una superficie son denominados irradiancia. De este modo, el sol como fuente, irradia a la atmósfera y a la superficie terrestre.

Las cantidades radiométricas Q, ϕ , I, E, L y M se aplican a todo el espectro electromagnético. La mayoría de los trenes de ondas son policromáticos, significando ello que consisten de numerosas ondas de componentes sinusoidales de diferentes frecuencias. La parte de frecuencias variantes (continuos dentro del

rango espectral analizado o una mezcla de frecuencias monocromáticas (longitudes de onda) discretas pero discontinuas) constituyen una onda más compleja ó compuesta. Cualquier onda compleja puede ser partida en sus componentes por un análisis de Fourier, el cual extrae una serie de ondas sus armónicos y sinusoidales simples cada una de las cuales posee una frecuencia, amplitud y fase característica. Los parámetros radiométricos nombrados anteriormente pueden ser especificados para cualquier longitud de onda; esta cantidad espectral radiométrica (la cual tiene un valor diferente de aquellos de cualquier flujo total del que sean partes, a menos que el flujo sea monocromático) es reconocida por su adición al término de un subscripto λ , como en L_λ .

La radiación electromagnética puede ser coherente ó incoherente. Las ondas cuyas amplitudes son irregulares ó aleatoriamente relacionadas entre sí, se denominan incoherentes, por ejemplo, la luz policromática. Si dos ondas de diferente longitud de onda pueden ser combinadas para dar lugar a una de características regulares, con relación sistemática entre sus amplitudes, se las denomina coherentes; aquí el ejemplo clásico es el de la luz generada por un aparato láser.

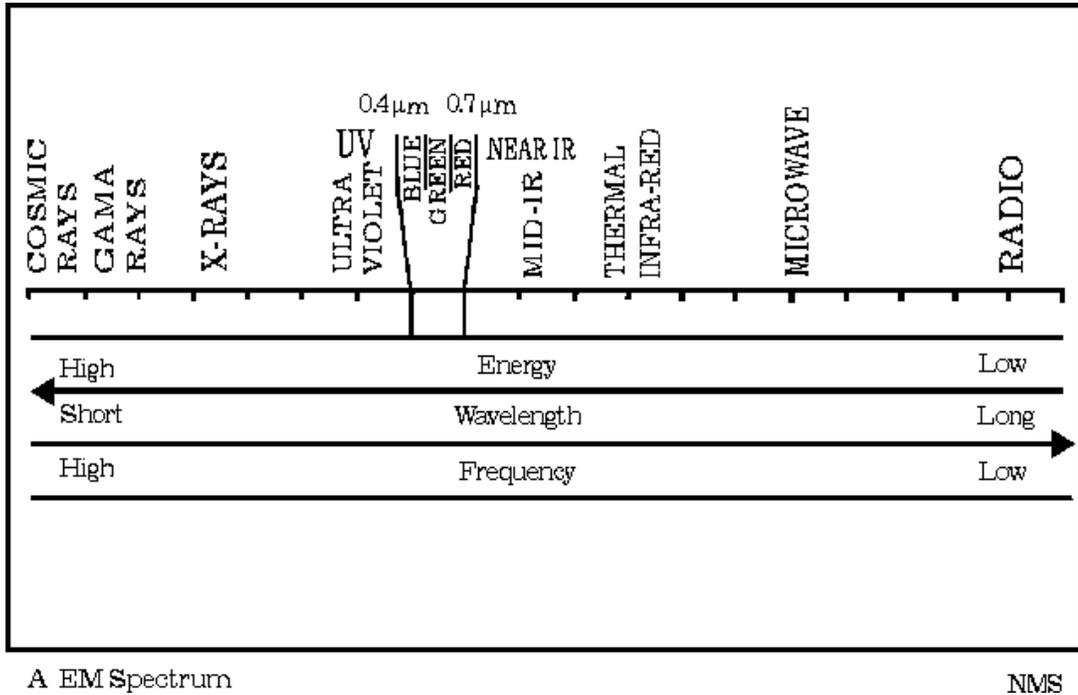
2.2 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ENERGÍAS RADIANTES

Como fue recalcado anteriormente, la radiación electromagnética se extiende sobre un amplio rango de energías y longitudes de onda (frecuencias). Un rango menos amplio de radiación electromagnética desde 0,4 hasta 0,7 μm , el intervalo detectado por el ojo humano, que es conocido como la *región visible*. La luz blanca contiene una mezcla de todas las longitudes de onda en la región visible. Esto último fue demostrado por Isaac Newton en 1666 a través del famoso experimento de la luz blanca a través del prisma.

El principio que sustenta este resultado es que a medida que la radiación pasa de un medio a otro, es separado a través de lo que se denomina un índice de refracción. Este índice depende de la longitud de onda, de tal modo que el ángulo de separación varía sistemáticamente desde el rojo (con una longitud de onda más larga y menor frecuencia) hasta el azul (con menor longitud de onda y mayor frecuencia) El proceso de separar los colores constituyentes de la luz blanca se denomina dispersión. Estos fenómenos se observan en la radiación de las longitudes de onda fuera de las visibles (por ejemplo, un rejilla de cristales atómicos sirven como un aparato de difracción que separa los rayos x en diferentes direcciones).

La distribución de un continuo de energías radiantes puede ser dibujado tanto como una función de la longitud de onda como de su frecuencia en un gráfico conocido como el espectro electromagnético.

Figura 4. Espectro Electromagnético



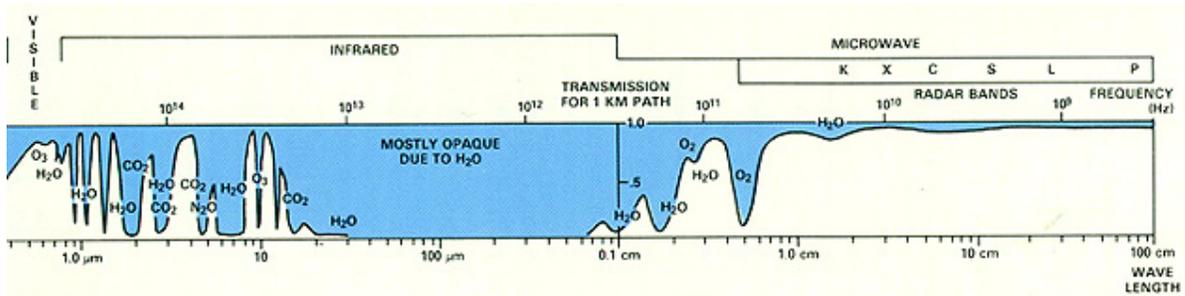
Usando espectroscopios y otros elementos de detección de la radiación, a través de los años los científicos han dividido arbitrariamente el espectro electromagnético en regiones ó intervalos y les han aplicado nombres descriptivos a los mismos. Los espectros con más energía (alta frecuencia y longitud de onda más corta) son los rayos *gamma* y los rayos *x* (cuya longitud de onda esta convencionalmente medida en *ángstroms* [Å], los cuales en la escala métrica son unidades de 10^{-8} cm.). La radiación ultravioleta se extiende desde cerca de 300 Å a cerca de 4.000 Å. Es conveniente medir las regiones del medio del espectro en uno de dos unidades: micrometros (μm), los cuales son múltiplos de 10^{-6} m ó nanómetros (nm), basado en 10^{-9} m. La *región visible* ocupa el rango entre los 0,4 y 0,7 μm , ó sus equivalentes de 4.000 a 7.000 Å ó 400 a 700 NM. La región infrarroja, que abarca entre 0,7 y 100 μm , tiene 4 subintervalos de especial interés: (1) Infrarrojo [IR] reflejado (0,7 – 3,0 μm), y (2) su subconjunto factible de ser fotografiado, el IR fotográfico (0,7 – 0,9 μm); (3) y (4) bandas termales en (3 - 5 μm) y (8 - 14 μm). Medimos los intervalos de las longitudes de ondas más largas en unidades

rankeadas desde los mm. a cm. hasta metros. La región de microondas cruza desde los 0,1 a los 100 cm, el cual incluye todos los intervalos usados por los sistemas de radar. Estos sistemas generan su propia radiación activa y la dirigen hacia objetivos de interés. La región de menor frecuencia y de más larga longitud de onda más allá de los 100 cm son las bandas de radio, desde VHF (*Very High Frequency*) hasta el ELF (*Extremely Low Frequency*). Dentro de cualquier región, una colección de longitudes de onda continuas puede ser divididas en intervalos discretos denominados **bandas**.

La física fundamental explica el cambianete de la dirección o la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos del espectro electromagnético en pequeños intervalos. Un mecanismo común es el de excitar un átomo por medio de calor ó por bombardeo de electrones los cuales causan que ciertos electrones en órbitas específicas momentáneamente se muevan a niveles de energía más elevados; una vez que retroceden a su órbita original, la energía obtenida es emitida como radiación de longitudes de onda discretas. A niveles muy altos de energía incluso el átomo mismo puede ser disociado, liberando fotones en pequeñas longitudes de onda. Los fotones, a su vez, durante el modo de irradiación, son capaces de respuestas atómicas ó moleculares en materiales específicos que generan los fotones emitidos (en la proceso de luz reflejada, los fotones ingresantes que producen la respuesta no son necesariamente los mismos fotones que se liberan de dicho material).

La mayoría de la detección remota es conducida por encima de la Tierra, tanto sea dentro ó por encima de la atmósfera. Los gases en la atmósfera interactúan con la irradiación solar y con la irradiación desde la superficie terrestre. La atmósfera misma es excitada por la energía electromagnética convirtiéndose en otra fuente que libera fotones. Aquí se presenta un diagrama generalizado mostrándose transmisión relativa de radiación atmosférica en diferentes longitudes de onda.

Figura 5. Radiación atmosférica por longitud onda



Las zonas azules marcan los pasajes mínimos de radiación entrante ó saliente, mientras que las áreas blancas denotan una ventana atmosférica, en la cual la radiación no interactúa mucho con las moléculas de aire y, por lo tanto, es absorbida. La mayoría de los instrumentos de teledetección sobre el aire ó sobre plataformas espaciales operan con uno ó más de estas ventanas haciendo sus mediciones con detectores ajustados a determinadas frecuencias (longitudes de onda) que recorren la atmósfera. De todos modos, algunos sensores, especialmente aquellos usados por los satélites meteorológicos, directamente miden los fenómenos de absorción, como aquellos asociados con el dióxido de carbón, CO_2 y otras moléculas gaseosas. Nótese que la atmósfera es casi opaca a la radiación electromagnética en la parte media y en todas las regiones lejanas del IR. En la región de las microondas, por el contrario, la mayoría de la radiación se mueve sin impedimentos, por lo que las ondas de radar alcanzan la superficie. Afortunadamente, la absorción y otras interacciones ocurren sobre muchas de las regiones de longitud de onda más cortas, por lo que solo una fracción de la radiación entrante alcanza la superficie; estos escasos rayos cósmicos y radiación ultravioleta (UV) que puede incluso destruir distintos tipos de vida.

La retrodispersión [*backscattering*] (dispersión de fotones en todas las direcciones sobre el objetivo en el hemisferio que yace sobre el lado de la fuente) es un fenómeno importante en la atmósfera. La dispersión por aire [*mien scattering*] refiere a la reflexión y refracción de la radiación por los constituyentes atmosféricos (por ejemplo, el humo) cuyas dimensiones son del orden de las longitudes de onda de la radiación. La dispersión de Rayleigh resulta de los constituyentes básicos (por ejemplo, gases moleculares [O_2 , N_2 {y otros componentes del nitrógeno}, y CO_2], y vapor de agua) que son más pequeñas que las longitudes de onda de la radiación. La dispersión de Rayleigh aumenta con el decrecimiento de la longitud de onda, causando la dispersión preferentemente del celeste (lo cual produce el efecto azul

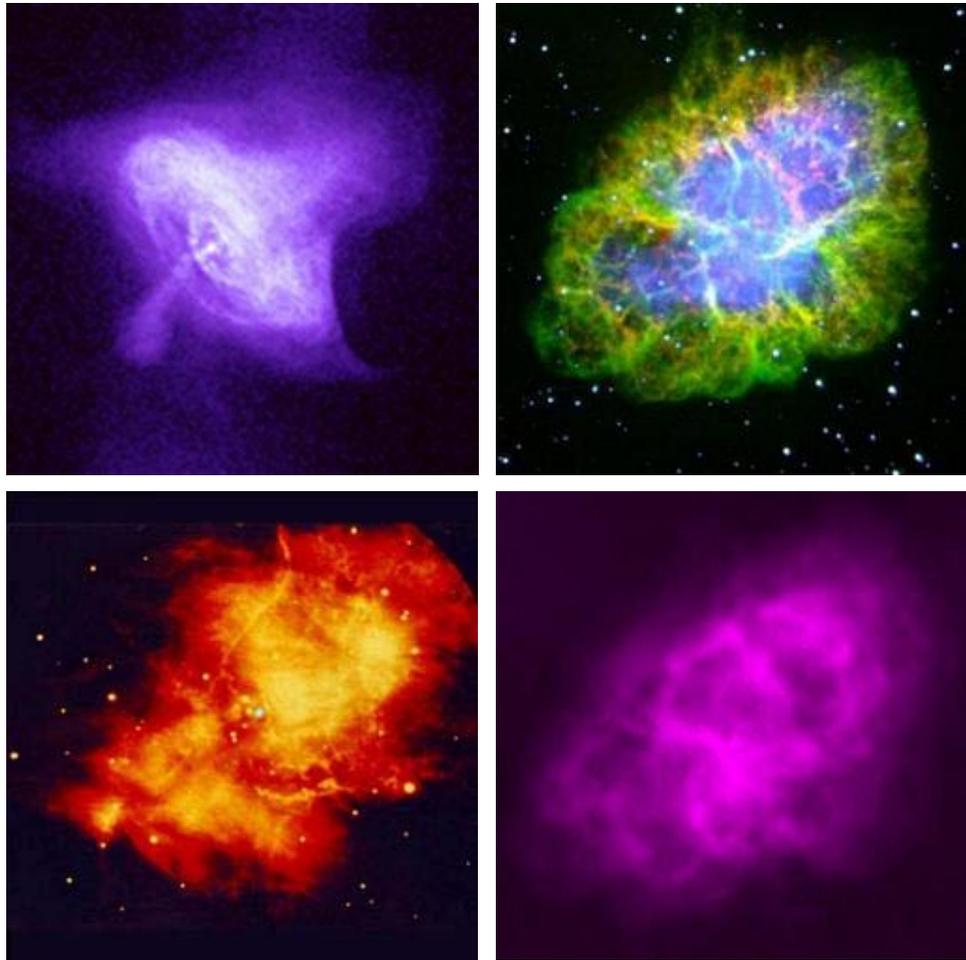
cielo, precisamente); sin embargo, los tonos rojizos en el atardecer y al amanecer resultan de la absorción significativa de las longitudes de onda de la luz visible debido a gran profundidad de sendero atmosférico mientras el Sol está cercano al horizonte. Las partículas más grandes que la longitud de onda de la irradiación hacen aparecer la dispersión no selectiva (independientes de la longitud de onda). La retrodispersión atmosférica puede, bajo ciertas condiciones, tomar cuenta del 80 al 90% del flujo radiante observado por un sensor remoto desde el espacio.

La teledetección de la Tierra tradicionalmente ha utilizado la energía reflejada en lo visible e infrarrojo y energía emitida en el termal infrarrojo y en las regiones de microondas para analizar la radiación que puede ser analizada numéricamente ó utilizada para generar imágenes cuya variación representa diferentes intensidades de fotones asociados con un rango de longitudes de onda que son recibidas por el sensor. Este análisis de un rango (continuo o discontinuo) de longitudes de onda es la esencia de lo que usualmente se denomina una teledetección **multiespectral**.

Las imágenes hechas por distintas señales de longitud de onda e intensidad mostrarán variaciones en los tonos grises en los versiones blanco y negro ó en los colores en (en términos de matiz, saturación e intensidad) en el caso de las versiones a color. Las representaciones gráficas (imágenes) de objetos y aspectos determinados en diferentes regiones espectrales, usualmente utilizando diferentes sensores (comúnmente denominados filtros pasabajos) cada uno ajustado para aceptar y procesar las frecuencias de onda (longitudes de onda) que caracterizan cada región, mostrarán normalmente diferencias significativas en la distribución (patrones) de tonos de color y grises.

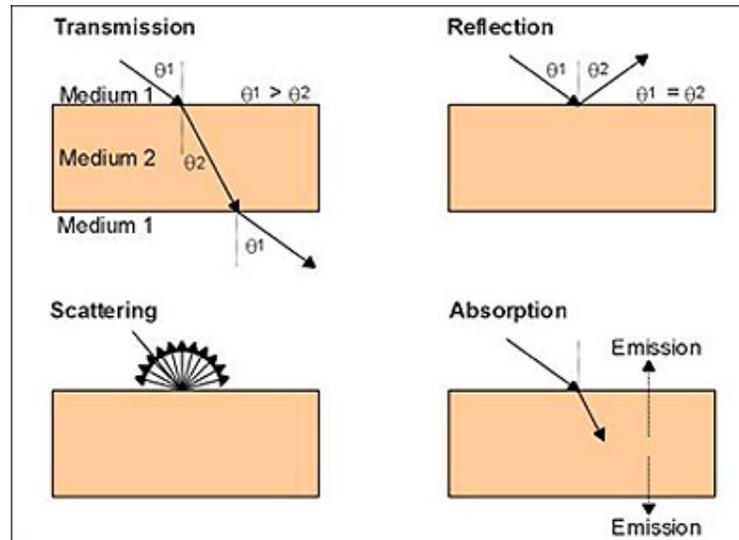
Para recalcar este último punto, se puede ilustrar dramáticamente con vistas de cuerpos estelares tomadas por telescopios (algunos de los cuales orbitan la Tierra) equipadas con diferentes aparatos de detección multiespectral. En la Tabla 1 pueden observarse cuatro vistas de las cercanías de la nebulosa Crab la cual está actualmente en un estado de expansión caótica luego de la explosión de una supernova observada por primera vez en el 1054 de nuestra era por astrónomos chinos. La ilustración superior izquierda muestra a la nebulosa en la región de alta energía de los rayos x; la imagen superior derecha es una imagen visual; la inferior izquierda fue obtenida por sensores infrarrojos; y la inferior derecha es una imagen de telescopio de una gran longitud de onda de radio.

Tabla 1. Nebulosa Crab captada por distintas bandas espectrales



2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: TRANSMISIÓN, ABSORCIÓN, Y REFLEXIÓN

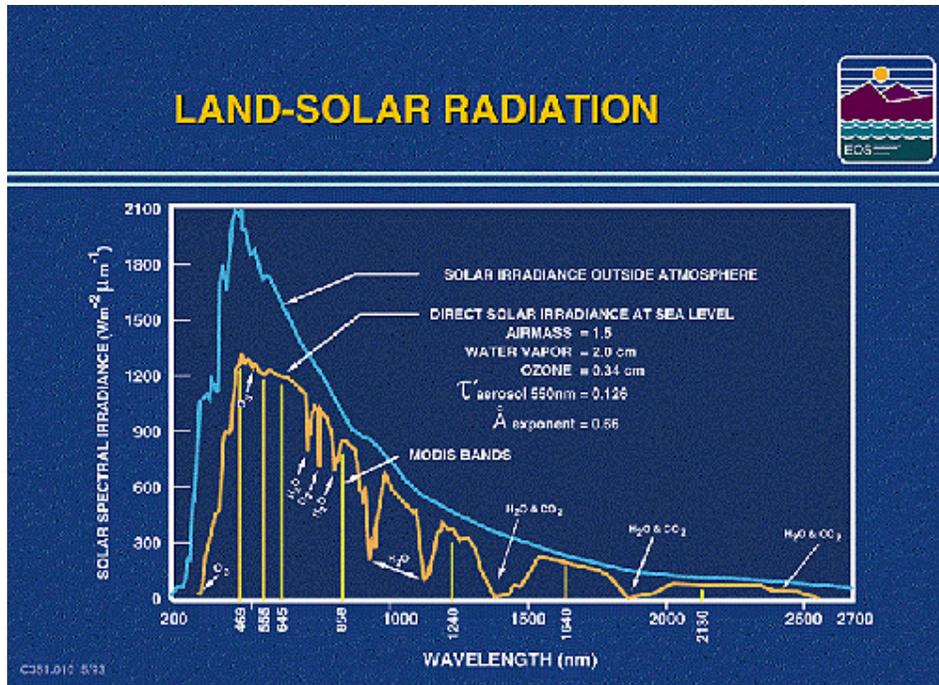
Cualquier emisión de fotones desde una fuente que pasa a través de un medio 1 (usualmente aire) y que choca contra un objeto (medio 2) experimentará una ó más reacciones que pueden ser resumidas en la Figura 6.

Figura 6. Transmisión, Dispersión, Reflexión y Absorción de fotones

Algunos objetos son capaces de dejar pasar la luz sin significativa disminución (nótese como la emisión se curva dos veces en la interfase entre el medio 1 y el medio 2 pero emerge en el mismo ángulo que entró). Otros materiales causan que la luz de la energía sea absorbida (y en parte emitida como radiación de longitud de onda más larga). O, la luz puede ser reflejada en el mismo ángulo en el mismo ángulo en que se produce la aproximación. Más comúnmente, la naturaleza de la superficie de los objetos (debido a la rugosidad microscópica) causa que dicha energía se disperse en todas direcciones.

La fuente primaria de energía que ilumina los objetos naturalmente es el Sol. La irradiación solar (también llamada insolación) cae a la Tierra en longitudes de onda que son determinadas por las temperaturas fotosféricas del Sol (alcanzando máximos de 5.600 °C). El intervalo principal de longitud de onda está entre 200 y 3.400 nm (0,2 y 3,4 μm), con *input* de potencia máxima cercano a los 480 nm (0,48 μm), el cual se encuentra en la región visible verde. Cuando los rayos solares arriban a la Tierra, la atmósfera absorbe ó retrodispersa una fracción de los mismos y retransmite el resto (obsérvese la Figura 7 a continuación).

Figura 7. Radiación solar-terrestre



Una vez que han chocado con la superficie terrestre ú oceánica (y el resto de los objetos), y los objetos atmosféricos como el aire, la humedad y las nubes, la irradiación entrante (irradiancia) se divide en tres modos de respuesta a la interacción energética:

(1) *Transmisión* (τ) – alguna fracción (hasta el 100%) de la radiación penetra dentro de cierta superficie de materiales como el agua y si el material es transparente y fino en una dimensión, normalmente pasa a través con alguna ligera disminución.

(2) *Absorción* (α) – alguna radiación es absorbida a través de reacciones de electrones ó moleculares con el medio; una porción de esta energía es entonces emitida de nuevo, usualmente a longitudes de onda más largas y alguna de ella permanece y da calor al objeto;

(3) *Reflexión* (ρ) – otra parte de la irradiación (normalmente 100%) refleja (se mueve desde el objeto) y se dispersa desde el objeto en todas direcciones, dependiendo de la aspereza de la superficie y el ángulo de incidencia de los rayos.

Dado que ello envuelve el estudio de coeficientes de irradiación, estos tres parámetros son números adimensionales (entre 0 y 1) los cuales son representados como porcentajes. Siguiendo la *ley de la conservación de la energía*: $\tau + \alpha + \rho = 1$.

Un cuarto evento sería la radiación emitida por la excitación atómica ó molecular interna, usualmente relacionada con los estados de calor de un cuerpo, la cual es un proceso termal.

Cuando un instrumento de teledetección tiene como mira el reflejo de la energía solar reflejada de un objeto, entonces el instrumento recaba la energía reflejada y guarda la observación. La mayoría de los instrumentos de teledetección esta diseñados para recolectar radiación reflejada.

Hay dos tipos generales de superficies reflectantes que interactúan con la radiación electromagnética: especular (suave) ó difusa (rugosa). Estos términos esta definidos geométrica y no físicamente. Una superficie podría parecer suave en términos físicos, es decir, se ve y se siente suave, pero en una escala del orden de las longitudes de onda de la luz, muchas irregularidades podrían ocurrir en la misma superficie (una ruta hecha de concreto puede aparecer como suave y lisa desde cierta distancia pero se siente rugosa una vez que se pasa los dedos por ella, con muchas irregularidades, pequeños orificios y protuberancias). La radiación cuando choca contra una superficie difusa tiende a ser reflejada en muchas direcciones (dispersión). El criterio de Rayleigh es usado para determinar la rugosidad de una superficie con respecto a la radiación:

$$h \text{ es menos ó igual que la longitud de onda } \lambda/8\cos\theta$$

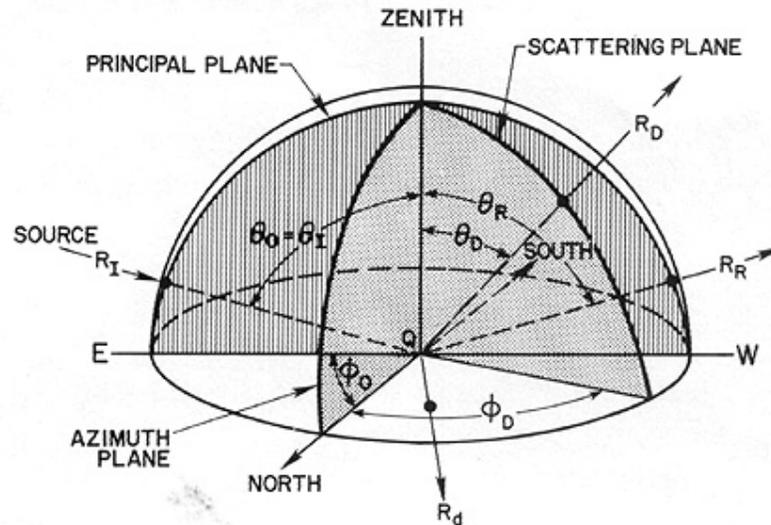
donde h es la altura de la irregularidad de la superficie (medido en ángstroms), λ es la longitud de onda (también medido en ángstroms) y θ es el ángulo de incidencia (medida desde la normal [perpendicular] a la superficie). Si λ es menor que h , la superficie actúa como un reflector difuso; si es más grande que h , la superficie es especular.

Una superficie especular refleja la radiación de acuerdo con la Ley de *Snell* la cual establece que el ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflectancia θ_r (donde el rayo de luz se mueve en el plano principal que pasa normal a la superficie). Los valores actuales (radianzas) de la radiación especular reflejada dependen del tipo de material que se encuentra por encima de la superficie especular. La reflectancia especular dentro del rango de longitud de onda visible varía desde tan alto como 0,99 para un muy buen espejo hasta tan bajo como 0,02-0,04 para un muy calma superficie de agua.

En general, las superficies naturales son casi siempre difusas y difieren significativamente de la especular en las longitudes de ondas más cortas (en el infrarrojo) y podría ser todavía difusa en la región de las microondas.

El comportamiento de una superficie perfectamente difusa, ó lambertiana, es descrito con la ayuda de la Figura 8:

Figura 8. Superficie perfectamente difusa

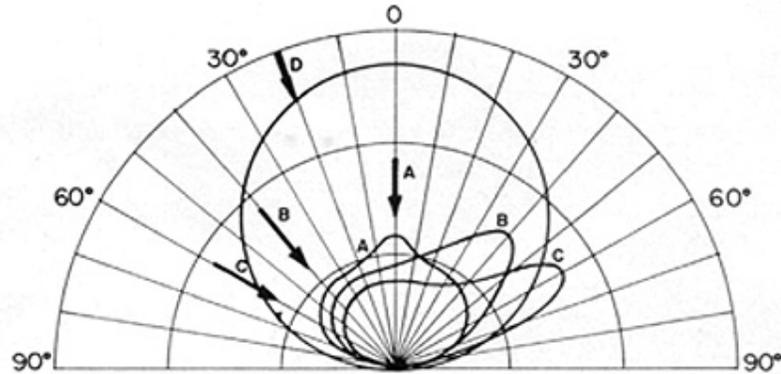


Considérese un conjunto de rayos (los cuales conforman el flujo de radiación) desde una posición de una fuente distante en un ángulo incidente θ_I (relativo a la dirección cenit) y un ángulo de azimut ϕ_0 (relativo al norte). Imagínese un plano horizontal (arbitrario) a un objeto siendo irradiado para ser encerrado dentro de un hemisferio (esto simplifica algunos cálculos porque permite usar coordenadas polares). Para las condiciones de la longitud de onda que fijamos, la superficie es considerada rugosa ó difusa y tiene irregularidades donde la superficie sale de la horizontal, a varias pendientes. Dado un rayo R_I localizado en el plano principal toca la superficie en un punto Q_1 . Será reflejado de acuerdo a la posición del punto de la superficie en Q dependiendo de la pendiente. Si esa superficie es horizontal (pendiente = 0°), el rayo se traslada a través de R_R en el plano principal por lo que esta geometría es especular. Pero si el punto de la superficie Q_s no es horizontal, es decir, tiene pendientes variables definiendo la forma de la irregularidad, el rayo (matemáticamente tratable como un vector) se saldrá en alguna dirección R_D a través de su plano de dispersión cuya posición es definida por θ_D y ϕ_D . En otros puntos (Q_n) de la superficie, la dirección del saliente R diferirá de acuerdo con la

orientación de la pendiente en la inmediata regularidad. De este modo, un número grande de rayos entrantes encontrará en la superficie otras irregularidades (muy probablemente con pendientes aleatoriamente orientadas) las cuales dirigirán (divergencia) en todas las posibles direcciones extendiéndose a través del hemisferio de referencia.

La radiancia en cualquier dirección es, en promedio, la misma que cualquier otra; en otras palabras, la radiancia es constante en cualquier posición de visión sobre el hemisferio por lo que es independiente de φ_0 . De todos modos, la intensidad radiante en cualquier posición variará de acuerdo a la relación $I_\theta = I_0 \cos \theta$. Esto establece que el ángulo de radiación incidente I_θ es variado, la intensidad de la radiación saliente también cambia. Para la incidencia normal (desde el cenit), θ es 0 y $\cos \theta$ es 1, de modo que $I_\theta = I_0$. Para todos los otros ángulos $\cos \theta$ es menor que 1 e I_θ es reducido. Aunque una superficie homogénea y no variante vista desde cualquier posición podrá verse como uniformemente iluminada (radiancia constante), esa superficie se convertirá menos brillante a medida que la fuente lumínica es movida desde una posición vertical al plano mismo (es decir desde la posición central más alta hacia el horizonte del plano).

El término reflectancia bidireccional describe la condición comúnmente observada en la teledetección en la cual el ángulo θ difiere del ángulo φ de rayos incidentes sobre una superficie difusa, y los rayos entrantes / salientes no están en el plano principal (es decir tiene diferentes azimuts). De este modo, las reflectancias de un mismo objeto (tipo) cambian en valor por varias combinaciones de θ y φ : esto es particularmente importante cuando el sensor opera *off-nadir* (es decir mirando desde los costados) y en ángulo del Sol y la azimut varían durante el período de operación (como ocurre cuando un avión se mueve de un lado a otro en una misión de reconocimiento fotográfico aéreo). Considérese la Figura 9 (el cual trata el caso bidimensional); en realidad la conducta puede ser mostrada en la tercera dimensión utilizando un hemisferio como referencia:

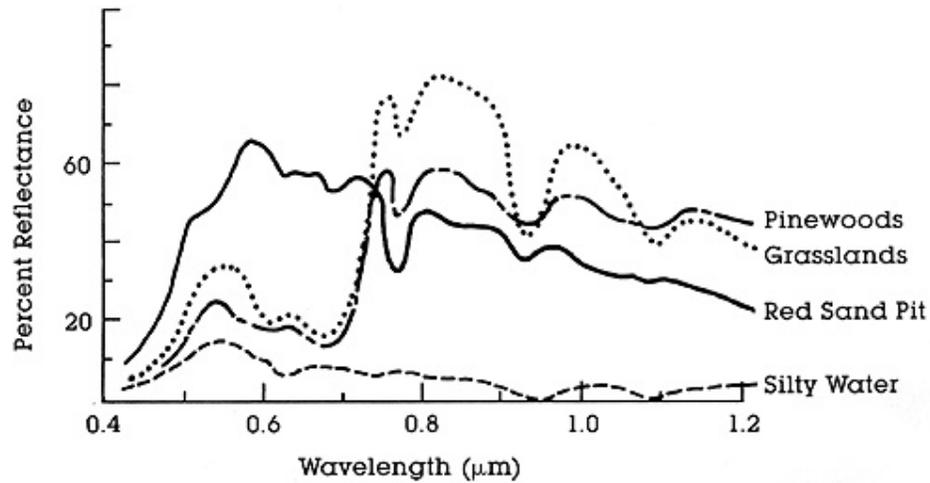
Figura 9. Reflectancia bidireccional sobre superficie rugosa

Para un reflector imperfectamente difuso (que contiene un componente especular) y un visor directamente arriba (tal como un sensor mirando exactamente hacia abajo en la normal de superficie terrestre), la dispersión produce envolventas tridimensionales (mostradas aquí como un corte bidimensional) de reflectancias derivadas de los rayos A, B, y C. Estas radiancias varían en intensidad en un modo asimétrico (excepto para A). De este modo, para los rayos B y C, hay reflectancia general difusa en todas las direcciones más un incremento diferencial en las direcciones alrededor del ángulo del componente especular. Dado que las reflectancias también varían con la longitud de onda, estas envolventas de reflectancia bidireccional deben ser calculadas para cada longitud de onda en los rangos λ considerados.

2.4 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: FIRMAS ESPECTRALES

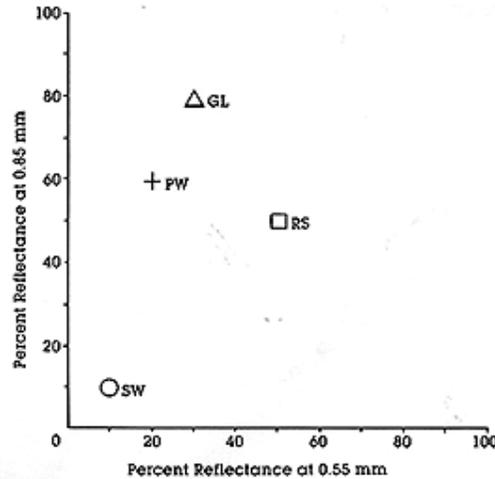
Para cualquier material dado, el monto de radiación solar que refleja, absorbe ó transmite varía con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia hace posible identificar diferentes substancias ó clases y separarlas por su firma espectral a través de curvas espectrales, como se ve en la Figura 10:

Figura 10. Firmas espectrales seleccionadas



Por ejemplo, en ciertas longitudes de onda, la arena refleja más energía que la vegetación verde pero en otras longitudes de onda ésta absorbe más (refleja menos) que lo que lo hace la vegetación. En principio, se puede reconocer varios tipos de materiales de superficies y distinguirlos entre ellos por sus diferencias en reflectancia. Por supuesto, ello debe existir un método definido de cómo medir dichas diferencias en función de las longitudes de onda y la intensidad (como fracción del monto de radiación irradiada). Usando diferencias en reflectancia se puede distinguir los cuatro más comunes materiales de superficies (GL=pastizales [*grassland*]; PW=bosques [*pinewoods*]; RS=arena [*red sand*]; SW=agua sedimentaria [*silty water*]), mostrados en la Figura 10. Nótese que la posición de los puntos de cada gráfico como un porcentaje de reflectancia para sólo dos longitudes de onda (Figura 11).

Figura 11. Porcentajes de reflectancia entre firmas espectrales



Una herramienta que ha sido fundamental para extraer firmas espectrales de los objetos presentes en la Tierra y reconocerlos es el denominado **mapeador temático** (Thematic Mapper, TM) adosado a los satélites estadounidenses del tipo Landsat. Este comprende un sofisticado sensor multiespectral que recaba información de 7 bandas del espectro electromagnético. Las mismas se resumen a continuación en la Tabla 2 dado que serán utilizadas para posteriores descripciones.

Tabla 2. Mapeador temático (TM) del sistema Landsat

Banda No.	Intervalo de longitud de onda (μm)	Respuesta Espectral	Resolución (m)
1	0,45 – 0,52	Azul-Verde	30
2	0,52 - 0,60	Verde	30
3	0,63 - 0,69	Rojo	30
4	0,76 - 0,90	Casi IR	30
5	1,55 - 1,75	IR Medio	30
6	10,40 - 12,50	IR Termal	120
7	2,08 - 2,35	IR Medio	30

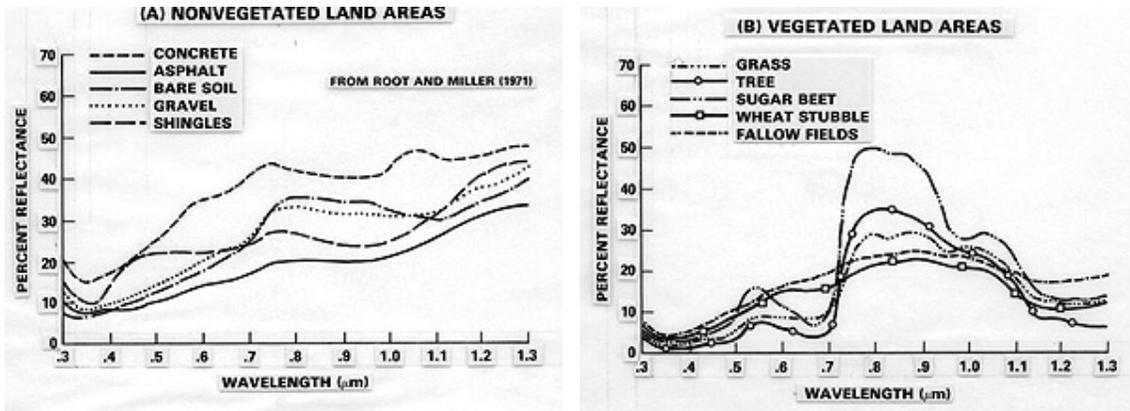
2.5 INTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN

Las imágenes aéreas o espaciales contienen un detallado descripción de eventos en la tierra en el momento de la adquisición de datos. Un interpretador de imágenes analiza esto junto con otros materiales complementarios, como mapas ó reportes del campo observado. Luego se realiza una interpretación de la naturaleza física de los objetos y fenómenos que aparecen en la misma. Esta interpretación puede derivar en simples reconocimientos de objetos hasta complejos análisis de interacción de la

superficie de la Tierra con capas subyacentes. El éxito en la interpretación de dichas imágenes viene generalmente del entrenamiento y la experiencia, la naturaleza de los objetos y fenómenos analizados y la calidad de las imágenes. La capacidad observación unida a la imaginación y una gran dosis de paciencia son básicas para un buen intérprete.

Una muy buena ayuda lo comprende la información sobre firmas espectrales de los objetos a identificar. Por ejemplo, en el conjunto de curvas espectrales mostradas en la Tabla 3 (hechas en una experiencia a campo utilizando un espectrómetro portátil), es claro que la respuesta espectral para los tipos de vegetación es distinta de aquellos materiales inorgánicos más comunes. La reflectancia para la vegetación crece abruptamente cerca de los 0,7 μm , seguida por una gradual caída cerca de los 1,1 μm . La primera firma espectral (arriba) indica un gradual incremento en la reflectancia con longitudes de onda crecientes para aquellos materiales artificiales particulares presentes en el superficie terrestre. El concreto, siendo de color claro y brillante, tiene un notable promedio superior al del oscuro asfalto. Los otros materiales caen en valores intermedios. El ripio es probablemente azulado, en color como lo sugiere un incremento en la reflectancia de 0,4 a 0,5 μm así como una respuesta plana en lo remanentemente visible (0,4 – 0,7 μm). Las segundas curvas (abajo) indican que la mayoría de los tipos de vegetaciones son muy similares en respuesta dentro del rango 0,3 – 0,5 μm ; muestran moderadas variaciones en el intervalo 0,5 – 0,6 μm ; y muestran un máximo de variabilidad (y por ello optimiza la discriminación) en los rangos 0,7 – 0,9 μm .

Tabla 3. Comparación de firmas espectrales entre áreas con vegetales y áreas edificadas



Realizar medidas espectrales depende de la interacción entre la radiación incidente y las estructuras atómicas y moleculares del material. Estas interacciones dan lugar a una señal reflejada la cual cambia a medida que retorna a través de la atmósfera. Finalmente, la medición depende de la naturaleza detector de respuesta del sistema del sensor. Después de testear la respuesta de muchos materiales, los expertos en detección remota puede usar medidas espectrales para describir un objeto por su composición. En la práctica, describimos objetos y características sobre la superficie de la Tierra mas como un conjunto de clases que de un conjunto de materiales en sí mismos. Considérese, por ejemplo, el material concreto. Este lo podemos encontrar generalmente en rutas, estacionamientos, piletas de natación y otras unidades estructurales cada una de las cuales puede ser tratada como una clase separada. Podemos subdividir la vegetación en una variedad de maneras: árboles, cultivos, pasturas, algas de lagos, etc. Subdivisiones más precisas pueden llegar a realizarse, clasificando árboles como de copa baja ó de copas altas ó distinguir, a su vez, a los de copa baja entre especies particulares como roble, arce, nogal, álamo, etc.

Dos propiedades adicionales ayudan a distinguir estas variadas clases, algunas de las cuales comparten los mismos materiales; ellos pueden ser la **forma** (patrones geométricos) y el uso del **contexto** (incluyéndose a veces locaciones geográficas). De este modo, podríamos asignar a un evento compuesto de concreto a la clase denominada “calles” y “estacionamientos”, dependiendo si su forma es larga y delgada ó más cuadrada ó rectangular. Dos eventos con casi idéntica firma espectral para la vegetación les podríamos asignar a las clases “cultivos” y “bosques” dependiendo de si en el área presente en las imágenes existen límites regulares (a veces rectangulares) ó irregulares respectivamente.

Un uso fundamental para los datos extraídos por sensores remotos es el de clasificar las múltiples formas que existen en una escena (usualmente presentadas como una imagen) dentro de una categorías ó clases significativas. La imagen, entonces, se convierte en un **mapa temático** (el tema puede ser variado: usos de la tierra, geología, tipos de vegetación, patrones de lluvias, etc.) Esto es hecho creando una clasificación **no supervisada** cuando los eventos están separados *sólo* por sus propiedades espectrales y una clasificación **supervisada** cuando se utiliza algún conocimiento *a priori* ó adquirido de las clases en la escena y, a partir de ello, **entrenamos** a un algoritmo ó a un equipo de observadores para que estime e identifique las características espectrales de cada clase.

La tarea de cualquier sistema remoto de detección es simplemente la de detectar señales de radiación, determinar su carácter espectral, derivar firmas espectrales apropiadas e interrelacionar las posiciones espaciales que dichas clases representan. Esto lleva en último término a algún tipo de visualización interpretable, sea una imagen ó un mapa, ó un conjunto numérico de datos que representan un espejo de la realidad de la superficie (ó algunas propiedades atmosféricas de la misma) en términos de la naturaleza de la distribución de los eventos presentados en el campo visual.

En términos de herramientas estadísticas comúnmente utilizadas para analizar la gran cantidad de información numérica obtenida por la digitalización de las imágenes podemos destacar a continuación algunas (para una revisión exhaustiva de métodos estadísticos aplicados al análisis y la interpretación de información de sensores remotos se puede acudir a Schowengerdt, 1997, y a Fischer y Getis, 1997, Part C). La búsqueda de relaciones estadísticamente significativas de una matriz de datos plantea la utilización de algoritmos cuyo objetivo sea el de encontrar agrupación de datos con cierto grado de homogeneidad. En ese sentido las herramientas clásicas de análisis son los análisis de componentes principales (*principal component analysis*, PCA), los métodos de máxima verosimilitud (*maximun likelihood*), modelos de análisis de conglomerados (*cluster analysis*) y otras muchas variaciones respecto a la idea de minimizar la distancia en un espacio euclídeo de los pixels de cada imagen, la cual esta asociada a una banda del espectro electromagnético capturado por el sensor remoto. Dichos datos son comparados con firmas espectrales previamente recabadas sobre diferentes objetos ó formas presentes en la superficie terrestre. Cuando el grado de asociación alcanza un nivel significativo estadístico se puede clasificar la información en términos de su alta probabilidad de estar asociado a la firma espectral con la cual ha sido comparada. Para observar una aplicación de éstas véase Sección 4.3.1 de este trabajo.

Otra forma de obtener nueva información es a través de la utilización de coeficientes [*ratios*] entre bandas los cuales ayudan a menguar los efectos distorsivos de la luz en el momento de ser tomada la imagen a fin de mejorar el perfil de las formas percibidas por los sensores. Asimismo, las transformaciones digitales (brillo, tinte, color) a las cuales pueden ser objeto dichas imágenes permiten la distinción de patrones ocultos en las fotos naturales.

En ese sentido la Tabla 4 a continuación puede dar un ejemplo más acabado del tipo de clasificación que se puede extraer de datos obtenidos por un sensor remoto a través de un mapeador temático (TM). La descripción de las bandas originales se encuentra en la Tabla 2. En esta se representa la mejor aproximación multi-espectral para la identificación de formas de la superficie terrestre:

Tabla 4. Mejores Bandas MSS [Multi-Spectral Scanner] para la identificación de figuras en la superficie (Landsat Thematic Mapper)

Ítem	Categoría	Mejores Bandas	Características salientes
a.	Agua clara	7	Tono negro tanto en blanco y negro como en color.
b.	Agua sedimentosa	4,7	Oscuro en 7; azulado en color.
c.	Tierras bajas costeras sin vegetación	7	Tono gris oscuro entre negro agua y tierra gris clara; bloques en rosa, rojo, azul y/o negro.
d.	Bosques bajos	5,7	Tono muy oscuro en 5, suave en 7; rojo oscuro.
e.	Bosques de coníferas	5,7	Moteados medios a gris oscuro en 7, muy oscuro en 5; rojo amarronado y tonos sometidos en color.
f.	Bosque talado	5,7	Tono más claro en 5, más oscuro en 7 y grisáceo a rojo amarronado en color, relativo con la vegetación normal.
g.	Bosque Mixto	4,7	Combinación de tonos grises borrosos; rosas punteados, rojos y rojo amarronado.
h.	Césped (en crecimiento)	5,7	Tono ligero en blanco y negro; rojo-rosado.
i.	Tierras cultivadas y pasturas	5,7	Gris medio en 5, más claro en 7, rosado a rojo moderado en color dependiendo de la etapa de crecimiento del cultivo.
j.	Tierra mojada	7	Tonos gris oscuro irregulares (amplios); colores oscuros.
k.	Campos con suelos descubiertos con barbecho rocoso	4,5,7	Depende de la composición de la superficie y de la cobertura vegetal. Si es árido ó expuesto, podría ser más brillante en 4 y 5 que en 7, Suelos y rocas rojas en sombras de amarillo; suelo gris y rocas oscuro azulado; rocas fuera de zonas de cultivo asociadas con formas grandes de terreno y estructuras.
1.	Fallas y fracturas	5,7	Lineal (recto a curvado), a veces discontinuo; interrumpe la topografía; algunas veces con vegetales.
m.	Arena y playas	4,5	Brillante en todas las bandas; blanco, azulado a pulido ligero.
n.	Pozos en la tierra a cielo abierto y canteras	4,5	Similar a las playas – usualmente sin cuerpos grandes de agua cercanos; a veces moteado, dependiendo del grado de desecación.
o.	Áreas Urbanas: Comercial e industrial	5,7	Usualmente en tonos ligeros en 5, oscuro en 7, gris azulado moteado con motas blanquecinas a rojizas.
p.	Áreas Urbanas: Residencial	5,7	Gris moteado, patrones de calles visibles; rosado a rojizo.
q.	Transporte	5,7	Patrones lineales, luces de rutas de tierra ó concreto, en 5; asfalto oscuro en 7.

Otro ingrediente esencial en la mayoría de las imágenes de detectores remotos es el **color**. Mientras que las variantes de las imágenes en blanco y negro

pueden ser muy informativas, y fueron la norma en las primeras fotos de reconocimiento aéreo, el número de tonos grises diferentes que el ojo humano puede separar esta limitado a cerca de 20 ó 30 capas (de un máximo de aproximadamente 200) en una escala de contraste. Por otro lado, el ojo puede distinguir 20.000 ó más tintes de colores, por lo que podemos discernir pequeñas pero a veces importantes variaciones dentro de una serie de materiales ó clases. Para una revisión más comprehensiva de como el ojo humano funciona para percibir los tonos de grises y los colores consulte: capítulo 2 en Drury (1987) así como Delrieux (2000).

Como ya se mencionó, el proceso de interpretación de imágenes puede llegar a convertirse en un tema complejo. Existen casos de donde la identificación del objeto fotografiado desde el cielo ó el espacio, por su misma forma, es directa, por ejemplo el caso de un cruce autopistas. Sin embargo, en otros casos se debe recurrir más a la inferencia que a la observación directa. Por ejemplo, cuando existen tuberías enterradas. Aquí la visión del objeto no es directa, pero si se pueden observar cambios en la tierra que son provocados por la instalación de dicha tubería. Los terrenos son mejor drenados en la sección entubada, dado que se utiliza grava y arena para cubrir las zanjas, observándose este efecto en la imagen como el de una línea ligera y de tono suave a través de la fotografía. También se debe tener en cuenta que ciertas características del suelo pueden variar en distintos períodos del año. El conocimiento de las estaciones ó períodos de cultivos de los cereales puede ayudar a predecir si cierto es probable de ser observado en cierto período del año.

Finalmente mencionamos otro tópico que es parte de una buena interpretación y clasificación. Este es a veces citado como referencia ó dato auxiliar y es comúnmente conocido como la **comprobación sobre el terreno** [*ground truth*]. Bajo este encabezado se agrupan varias categorías: mapas y bases de datos, sitios de pruebas, medidas de campo y laboratorio, y más precisamente, visitas sobre el sitio preciso del que se está obteniendo información con detectores remotos. Este último tiene dos facetas importantes:

- 1) identificar que hay allí en términos de las clases ó materiales para preparar el entrenamiento supervisado, y

- 2) revistar partes de una imagen de un área clasificada para verificar la precisión de la identificación en lugares no visitados. Este tema será abordado con mayor detalle en la primera mitad de la sección 13.

2.6 APLICACIÓN EXITOSA DE LA TELEDETECCIÓN

La calidad de la información obtenida por sensores remotos de ser perfecta. Si bien a través de las firmas multispectrales se puede llegar a distinguir, luego de un amplio proceso de entrenamiento, una amplia variedad de clases y formas en la superficie terrestre esta forma de observar el terreno en estudio deja muchos aspectos librados a la deducción. Por ejemplo, el procesamiento de la imagen satelital puede advertir la presencia de un cierto mineral en dicha zona con un cierto grado de probabilidad, pero sólo la experiencia de campo validará efectivamente su presencia.

En este sentido, Lillesand y Kiefer (2000, punto 1.10, pág. 41) destacan la necesaria integración de los datos de teledetección con otras fuentes de información y métodos de análisis. Destacan que un relevamiento de información que contemple la aplicación de este tipo particular de información requiere necesariamente de los siguientes pasos:

- 1) Una definición clara del problema a investigar,
- 2) Evaluación del efecto potencial de satisfacer dicho problema con información de sensores remotos,
- 3) Identificación del procedimiento de adquisición de datos por sensores remotos apropiados para la tarea,
- 4) Determinación de los procedimientos y técnicas para interpretación de los datos obtenidos por sensores remotos.
- 5) Identificación del criterio para juzgar la calidad de la información obtenida.

La necesidad de corroborar la información por diferentes fuentes a fin de sustentar la calidad y confiabilidad de la misma es la misma que da soporte a la aplicación general de procedimiento multispectrales (es decir obteniendo información de muchas bandas al mismo tiempo) así como procedimientos multi-etápicas (obtención de información en el terreno, complementado con información obtenida por aviones fotográficos a baja y gran altitud más información obtenida por sensores remotos) y multi-temporales (información sobre un mismo terreno con desfase temporal).

En ese sentido, la información obtenida por medios remotos da una acabada **visión panorámica** de un escenario específico. En ese sentido se debe recalcar que este tipo de observación permite de forma más clara estimar el efecto de un hecho específico que se registre en dicho escenario más que la causa del mismo. Cómo

recalcan Lillesand y Kiefer (2000, pág. 43) las preguntas que mejor ayudan a responder estos datos son: ¿*dónde* se ha producido?, ¿*cuánto de severo* ha sido el efecto de dicho evento? ¿*cuánto* terreno ha sido afectado?, más que responder a ¿*cuál* es la causa de dicha afectación?

A continuación analizaremos muy brevemente la historia y la tecnología utilizada para el transporte de los sensores remotos.

3. HISTORIA Y TECNOLOGÍA DE SENSORES REMOTOS

La tecnología de sensores remotos se remonta a las primeras fotografías obtenidas desde el aire¹. La fotografía aérea esta disponible desde 1858 en una experiencia hecha por Nadar. Sin embargo, la baja calidad y lo riesgoso de su interpretación hizo que este procedimiento no se materializase efectivamente hasta la Primera Guerra Mundial, hecho que dio lugar a la aparición de los primeros intérpretes de información aérea. En forma paralela al desarrollo de máquinas fotográficas y de medios aéreos de navegación nació la posibilidad de obtener información sobre lo que ocurría en la tierra desde una perspectiva menos directa para el ojo humano aunque con más información relevante para la toma de decisiones. En ese sentido, esta información tuvo un origen primordialmente militar y las guerras, reales ó latentes, han sido grandes impulsoras del desarrollo de esta tecnología. Técnicamente, las primeras fotografías militares sobre el frente enemigo se iniciaron a través de la utilización de globos de observación y luego esta responsabilidad recayó en consiguientes desarrollos aeronáuticos desde las guerras coloniales de principios de la década de 1910, la primera y segunda guerras mundiales y todo el período de la guerra fría hasta nuestros días. Precisamente durante el primer período de entreguerra (1919-1938) es cuando, aprovechando los conocimientos adquiridos por los ahora desempleados expertos en interpretación de fotografía aérea, se empieza a aplicar dichos conocimientos para la prospección geológica desde el aire. En este último caso, con un particular interés por la exploración de petróleo. El *USDA (U.S. Department of Agriculture)* desarrolla en ese sentido investigaciones de este tipo en condados previamente seleccionados desde 1937.

Durante la Segunda Guerra Mundial la fotografía aérea militar alcanza niveles muy altos de desarrollos tanto en tecnología como en capacidad de interpretación de la información, los cuales llegarían a un máximo con la escalada de la Guerra Fría. El desarrollo en la década de los cincuenta de la tecnología aeroespacial incrementó

las posibilidades de obtención de información geográfica a través no sólo de la fotografía sino también a través del uso de nuevas tecnologías: sensores de rayos infrarrojos y de ondas de radar.

Las primeras experiencias en lo que daría lugar a la fotografía espacial pueden ser remontadas a pioneros alemanes como Ludwig Rahrmann (1895) y Alfred Maul (1910). Ambos investigadores sostenían el concepto de adosar cámaras fotográficas especiales a cohetes, con los cuales obtenían fotografías aéreas aún antes ó en los primeros inicios de la aeronavegación. La fotografía realizada por este tipo de vectores, más precisamente, se inicia con los experimentos realizados por investigadores norteamericanos en 1946-49, quienes adosaron cámaras fotográficas y filmadoras a cohetes V2 capturados a los alemanes en el polígono de White Sands, Nuevo México.

Con el lanzamiento de los primeros satélites meteorológicos se empieza a tomar conciencia de la capacidad de estos instrumentos de navegación para capturar información de la Tierra. El posterior programa de desarrollo espacial, que derivaría en la primera llegada del hombre a la Luna, y las nuevas tecnologías militares que hacían cada vez más riesgoso el papel de la fotografía aérea militar tradicional, daría pie y sustento al desarrollo de tecnologías cada vez más complejas para los sensores remotos de detección, con mayor utilización del espectro de banda electromagnético. Los programas Gemini y Apollo deben ser citados como pioneros a este respecto. Las imágenes desde el espacio para uso civil provienen principalmente de los programas Landsat (EE.UU.) en los 70' y SPOT (Francia) en los 80'. Los programas anteriores a éstos obtenían fotos desde ángulos oblicuos de la Tierra, mientras que estos programas hicieron hincapié en la obtención de fotografías en ángulo recto, lo que brinda menor distorsión y mejor interpretación de las imágenes.

Actualmente, los programas que utilizan tecnología con mayor resolución para la obtención de información satelital de la Tierra son SPIN-2 (Rusia), IKONOS-2, QuickBird, OrbView-3 (todos de EE.UU.) y EROS (Israel). Como sistemas con moderada resolución se pueden listar a Landsat-1/-7 (EE.UU.), SPOT-1/-5 (Francia, con colaboración de Suecia y Bélgica), India (IRS System), Rusia (RESURS-01), Japón (ADEOS y JERS-1, este último con radar de apertura sintética) así como otros 17 países entre los que se incluye al programa argentino SAC-C, desarrollado por la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) en conjunto con la NASA. A

¹ Esta sección esta basada en el aporte de Lillesand y Kiefer (2000, secciones 2.2 y 6)

continuación analizaremos algunas áreas de aplicación exitosa de la información obtenida por los sensores remotos.

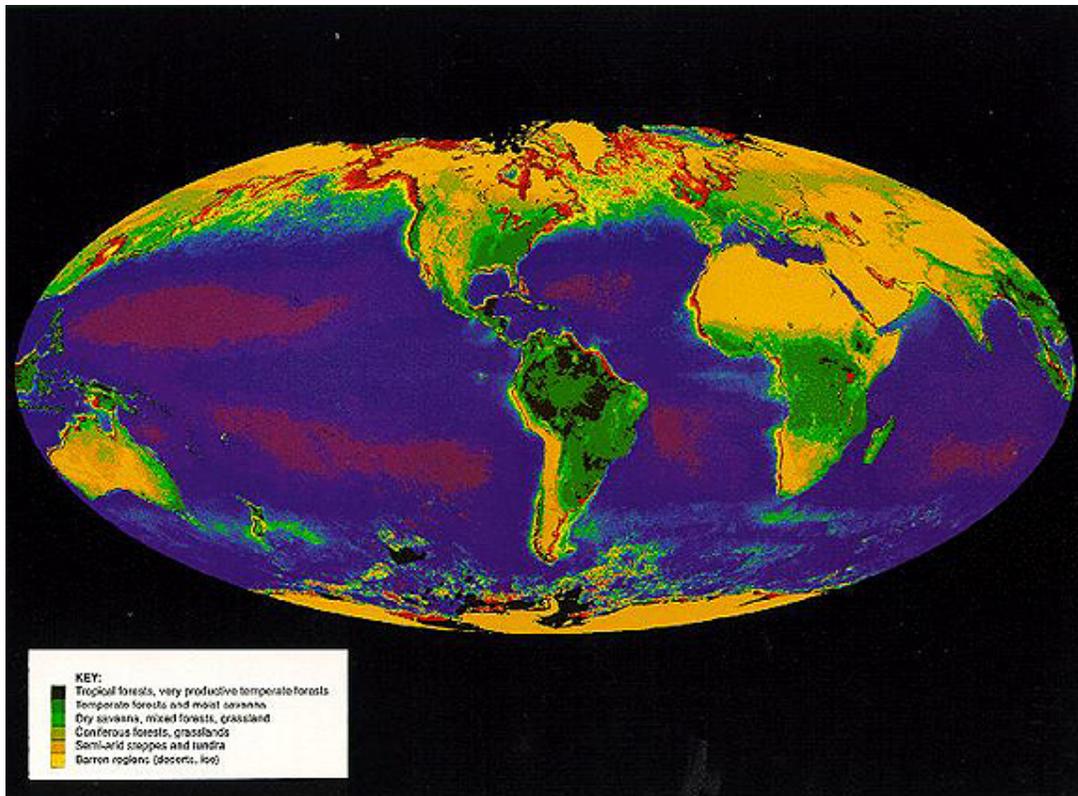
4. APLICACIONES DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA POR SENSORES REMOTOS

Variadas son las áreas en que las que la obtención de información por medio de sensores remotos resulta válido. En primer lugar revisaremos las aplicaciones dedicadas a los estudios forestales. Allí se podrá apreciar la posibilidad de identificar y zonificar diversos tipos de bosques tropicales y de detectar abusos en su explotación. En segundo lugar se revisarán someramente algunas posibles aplicaciones al planeamiento urbano e identificación de utilización y cobertura de la tierra. Por último, se desplegará una amplia sección a la aplicación de medios estadísticos para la detección geológica de diversos recursos minerales.

4.1 APLICACIONES FORESTALES Y AGROPECUARIAS

Esta sección se enfocará hacia la observación de los bosques mundiales naturales y plantados así como aquellos mantenidos para futuras prácticas forestales y comerciales. La distribución y condición de estos bosques, así como con otros tipos principales de vegetación, puede ser determinada y vigilada periódicamente analizando los datos de índices de vegetación obtenidos por satélites. A continuación se exhibe la Imagen 1 con la distribución de clases generales de bosques, tal y como fueron identificados por los datos del AVHRR provenientes de los satélites meteorológicos NOAA 7 y 9. Los colores que no están identificados en la leyenda incluyen rojo = aguas poco profundas, costeras ó de tierras bajas; azul = aguas oceánicas; púrpura = océano profundo; negro en regiones árticas y antárticas.

Imagen 1. Identificación de zonas boscosas

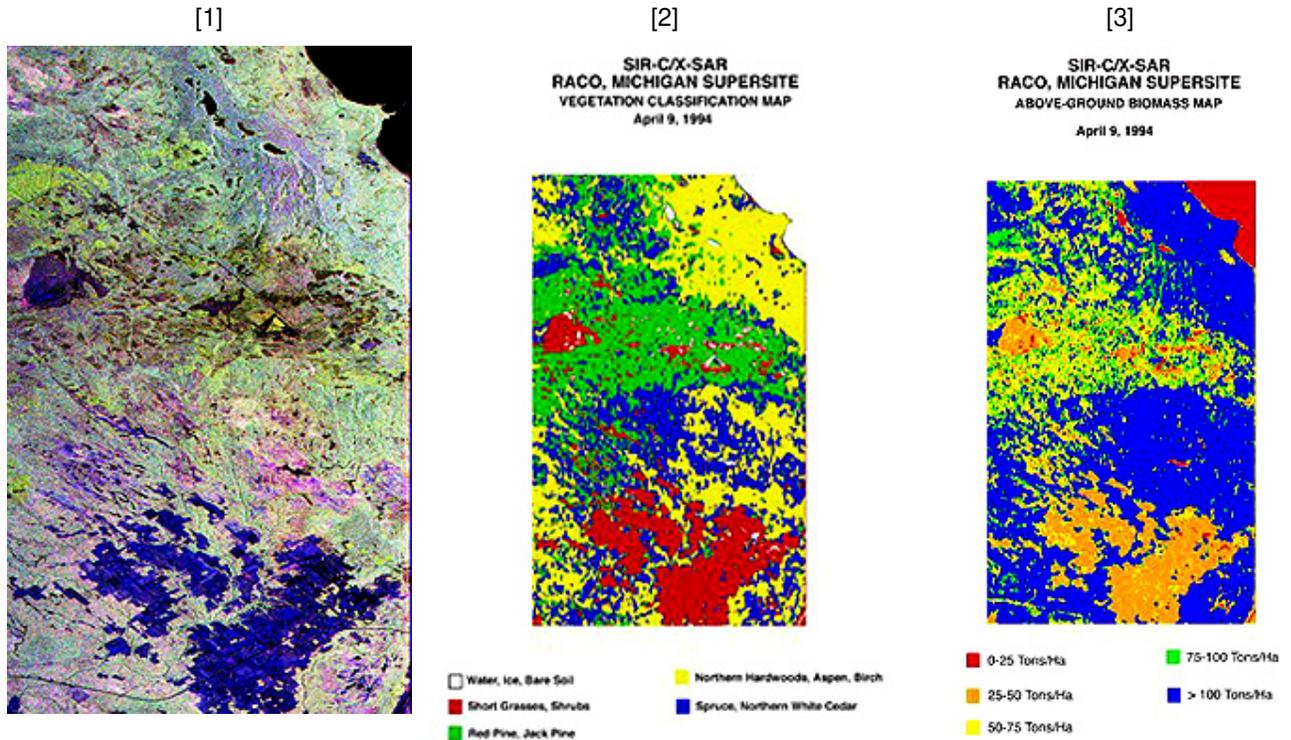


Una aplicación obvia es la determinar la distribución geográfica y por área de los mayores tipos de selva virgen y sus ecosistemas. Generalmente, Landsat y otros sistemas de teledetección pueden rápidamente distinguir entre bosques de coníferas y bosques de follaje más amplio, y reconocer de ese modo lugares de predominancia de arbustos, sabanas y varios ecosistemas desérticos. Pero, identificar la mayoría de los tipos de árboles al nivel de especie es algo mucho más dificultoso, a menos que las imágenes de alta resolución estén disponibles y los árboles posean copas y formas de hojas distintivas que produzcan firmas espectrales claramente distinguibles. Tareas más fáciles que han tenido amplia utilización, son las de discernir los grados de defoliación -tanto sea en casos extremos como la tala del árbol en sí ó a través de la caída progresiva de las hojas dado por insectos-, así como evaluación de incendios forestales ó daños por tormentas.

A manera de ejemplo podemos observar una investigación de la NASA Supersite en Raco, Michigan sobre Península Alta cercana al Lago Superior (zona de los grandes lagos). Tomada en Abril de 1994, el área objetivo estaba densamente

forestada, como se puede apreciar en la imagen compuesta multi-bandas a continuación.

Imagen 2. Región objetivo y análisis de firmas espectrales

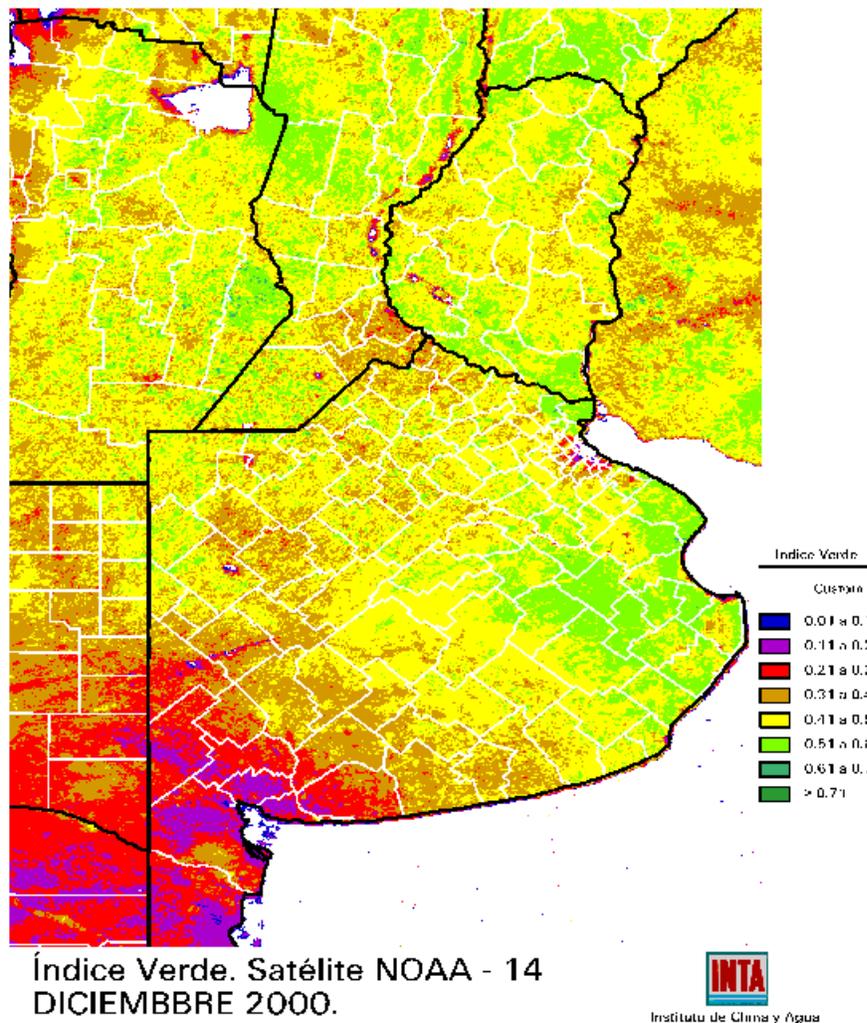


En la Imagen 2.1, las áreas azules son en su mayoría campos limpios. Las marcas amarillo-verdosas indican la presencia de pinos rojos, las marrones con tonos amarillos son pinos de la especie *jack* y las púrpuras indican árboles de rama caída.

Usando información extraída sobre el terreno (*ground truth*) así como otras fuentes de información, la Imagen 2.1 fue clasificada y ello se muestra en las Imagen 2.2. La Imagen 2.3 se proyectan las estimaciones de biomasa, usando datos de campo y modelos matemáticos. Las imágenes de la banda *Casi-Infrarrojo Visible* (Visible-NIR) han encontrado mediano éxito en la estimación de biomasa en los bosques, pastizales y cultivos. El grado de éxito esta fuertemente influido por la calidad de la información obtenida en campo (*ground truth*) así como del modelo específico utilizado. Pero a medida que la resolución de las imágenes aumente y mejores modelos sean desarrollados estos resultados deberían mejorar significativamente.

Debe destacarse también que para facilitar el reconocimiento de especies de cultivos y tipos de vegetación se trabaja con los denominados **índices de vegetación**, los cuales proveen de la información de la evolución para cada tipo ó clases de vegetal en un período determinado del año. Por ejemplo, INTA de Argentina lo define como "... [el indicador que] permite observar el nivel de desarrollo de la vegetación en las diferentes regiones y sintetiza el resultado de la marcha de cultivos y pastizales durante todo el mes, así como el patrón de uso de las tierras predominante en cada zona". En la Imagen 3 se ilustra en una escala de tonos de verde oscuro a claro las regiones con mayor nivel de desarrollo de la vegetación y en tonalidades del naranja y rojo los sectores con un bajo nivel de la biomasa.

Imagen 3. Índice de vegetación para la región pampeana (INTA)



La utilización agropecuaria de la información de sensores remotos para el análisis de la evolución de los cultivos resulta una herramienta eficaz de localización,

clasificación, control y previsión de usos de la tierra. En primer lugar ayuda a determinar la distribución espacial de los cultivos, la extensión ocupada y el tipo cultivado (dado por las firmas espectrales de cada cultivo). Asimismo, permite detectar la presencia de plagas, siniestros ó el grado de extensión de la afectación de catástrofes naturales, las cuales otorgan fuertes propiedades de control a las autoridades e implicados. Finalmente, se puede seguir la evolución de los cultivos hasta su cosecha, con la consiguiente determinación de área cultivada y cosechada, volumen de producción neto de pérdidas, todo por tipo de cultivo.

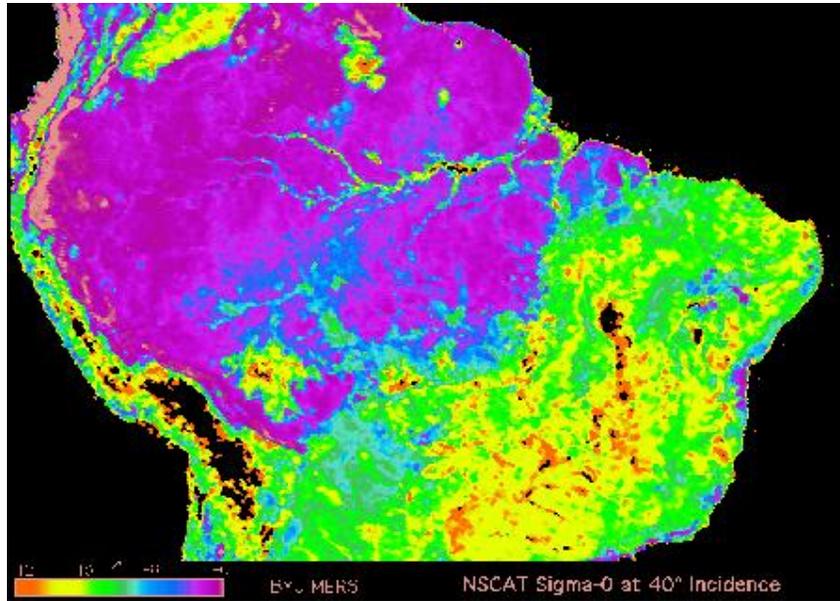
4.1.1 EL CASO PARTICULAR DE AMAZONAS

La tala de bosques afecta el balance entre el oxígeno y el dióxido de carbón producido y usado en la fotosíntesis. La sistemática tala de bosques en las zonas tropicales para su utilización en tareas agrícolas y otros fines es una gran fuente de alarma para toda la comunidad mundial. La mayor preocupación recae en las densas y amplias forestas de la selva del Amazonas en Brasil. En los últimos años, granjeros y agricultores así como otros emprendedores han talado cerca de 320 mil kilómetros cuadrados (cerca del 10%) de los 3.08 millones de kilómetros cuadrados de la cuenca amazónica. Afortunadamente dado el pedido internacional, la tasa de talado ha disminuido levemente.

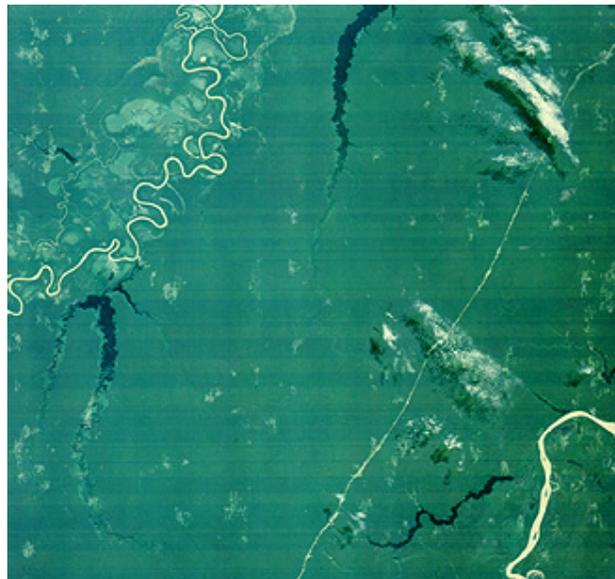
Para el caso de la deforestación del Amazonas dado por la explotación agrícola puede consultarse a Walker y *otros* (2000). Para el caso de la deforestación de selvas en Camerún y su efecto económico general puede verse a Mertens y *otros* (2000). Ambos trabajos dan amplia utilización a la información extraída por sensores remotos.

Datos de radar de la NASA Scatterometer (NSCAT) operando sobre América del Sur muestran en la Imagen 4 la distribución de distintas clases generales de terrenos en la Amazonia. En este mapa basado en imagen, el bosque lluvioso aparece en azul ó púrpura, tierras madereras y sabanas aparecen en verde ó amarillo y tierras dedicadas a la agricultura y ganadería en negro.

A continuación, en la Imagen 5, se aprecia una imagen del Landsat compuesta en color natural que ilustra claramente a los bosques tropicales uniformemente densos.

Imagen 4. Identificación de clases de terrenos en la cuenca Amazónica

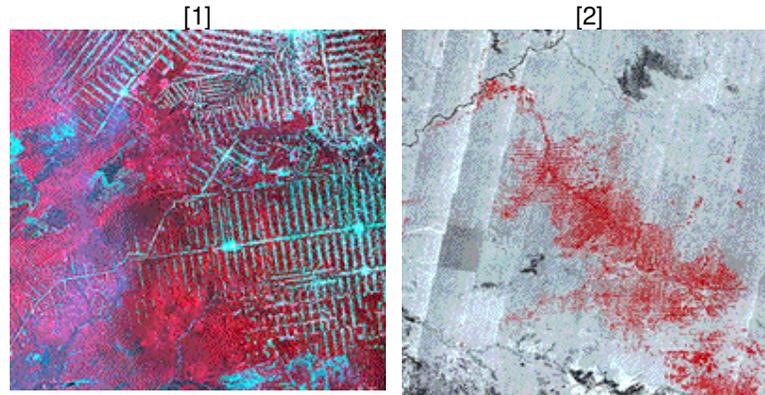
Estos bosques son los terrenos más continua y densamente arbolados en la Tierra, lo que da origen a una inmensa variedad de especies vegetales y animales que se teme desaparezcan si su hábitat es destruido.

Imagen 5. Foto natural a color compuesta de la selva amazónica

Luego podemos apreciar dos ejemplos de como los agricultores desmontan el bosque tropical para cultivar la tierra en la región amazónica. La Imagen 6.1 es del Landsat TM [*Thematic Map*] tomada en 1986. Las líneas que se aprecian en celeste

representan la tierra desmontada, mientras que el rojo es el bosque superviviente. La Imagen 6.2 fue tomada por un radar de apertura sintética del satélite japonés JERS-1, en donde las áreas en rojo representan las zonas taladas.

Imagen 6. Imágenes de desmonte en la selva amazónica



Como se pudo apreciar, la información brindada por los sensores remotos es altamente ilustrativas del daño así como de la extensión del mismo. Ahora repasaremos algunas aplicaciones a la planificación urbana y al estudio del uso de la tierra.

4.2 APLICACIONES PARA EL PLANEAMIENTO URBANO Y USOS DE LA TIERRA

Las imágenes desde el espacio son una herramienta poderosa para el mapeo de lo que ocurre en la superficie de la Tierra. Podemos identificar y categorizar diversas formas y desarrollos naturales y artificiales en términos de superficie cubierta [*land cover*]. Si bien el término superficie utilizada [*land use*] es casi un sinónimo de la primera, se refiere más específicamente a cómo la tierra es usada para actividades humanas. Los mapas de superficie cubierta y superficie utilizada son ingredientes esenciales de los sistemas geográficos de información (GIS). La mayoría de estos siguen un sistema de clasificación determinado. Uno que es comúnmente observado es el diseñado por la *U.S. Geological Survey*². Este sistema jerárquico tiene cuatro niveles. Los dos superiores (Niveles I y II) son categorías que podemos identificarlas normalmente viendo un mapa mientras que las dos categorías inferiores se requiere de fotos de alta resolución (generalmente tomadas desde por aeroplanos (Niveles III y IV). Las clasificaciones para los Niveles I y II se muestran en el Esquema 1.

² Este esquema puede extraerse también de Lillesand y Kiefer (2000, pág. 210)

Para ilustrar las subdivisiones en el Nivel III, se ha elegido en primer término, el Nivel I=Urbano y el Nivel II=Residencial, luego las subdivisiones en el Nivel III son, en unidades: hogares de Familias simples, Multi-familiares, Casas móviles, Hoteles/moteles; y Otros. Generalmente, según sea más precisa la división, más información sobre el terreno se necesita. Los mapas para los Niveles I y II pueden ser coloreados, y se puede adosar símbolos numéricos (por ejemplo, 115=Hoteles Residenciales) para objetos individuales en el mapa con una escala suficiente como para ajustarlo a ellos.

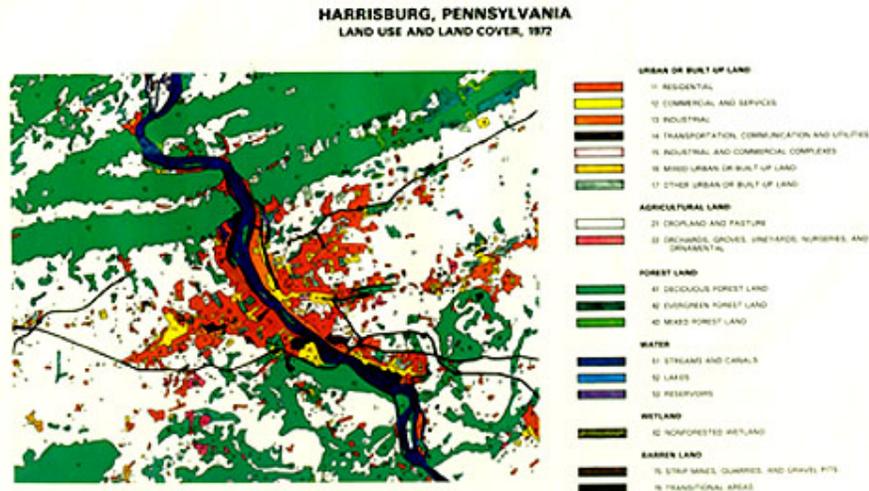
Esquema 1. Clasificación de Niveles de Superficie Utilizada

Level I	Level II
1 Urban or Built-up Land	11 Residential.
	12 Commercial and Services.
	13 Industrial.
	14 Transportation, Communications, and Utilities.
	15 Industrial and Commercial Complexes.
	16 Mixed Urban or Built-up Land.
	17 Other Urban or Built-up Land.
2 Agricultural Land	21 Cropland and Pasture.
	22 Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries, and Ornamental Horticultural Areas.
	23 Confined Feeding Operations.
	24 Other Agricultural Land.
3 Rangeland	31 Herbaceous Rangeland.
	32 Shrub and Brush Rangeland.
	33 Mixed Rangeland.
4 Forest Land	41 Deciduous Forest Land.
	42 Evergreen Forest Land.
	43 Mixed Forest Land.
5 Water	51 Streams and Canals.
	52 Lakes.
	53 Reservoirs.
	54 Bays and Estuaries.
6 Wetland	61 Forested Wetland.
	62 Nonforested Wetland.
7 Barren Land	71 Dry Salt Flats.
	72 Beaches.
	73 Sandy Areas other than Beaches.
	74 Bare Exposed Rock.
	75 Strip Mines, Quarries, and Gravel Pits.
	76 Transitional Areas.
	77 Mixed Barren Land.
8 Tundra	81 Shrub and Brush Tundra.
	82 Herbaceous Tundra.
	83 Bare Ground Tundra.
	84 Wet Tundra.
	85 Mixed Tundra.
9 Perennial Snow or Ice	91 Perennial Snowfields.
	92 Glaciers.

Un ejemplo de un estudio típico de mapas de superficie cubierta y usos puede observarse a continuación. Aquí se puede observar en la Imagen 7 de Harrisburg,

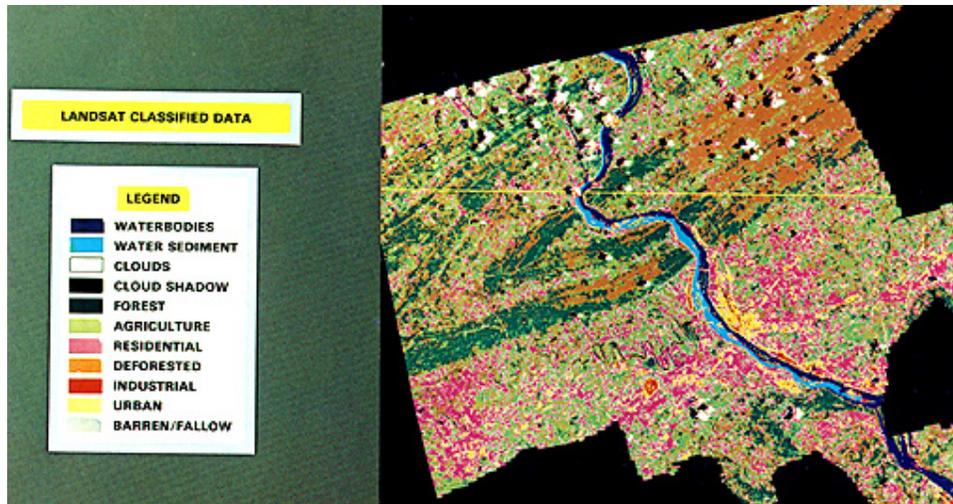
Pennsylvania, obtenida por el *U.S. Geological Survey Map*. Si bien las letras de la leyenda son demasiado pequeñas para poder leerlas claramente, puede ser suficiente por el momento mencionar que lo que se observa es el número de categorías del Nivel II. Este es un ejemplo típico del mapeo de objetos en tierra a través de datos de sensores remotos e información del terreno.

Imagen 7. Harrisburg, (EE.UU.), mapa compuesto sobre superficie utilizada/cubierto



A modo de comparación se aprecia ahora una imagen de Harrisburg, pero con un esquema multitemático sobre la superficie utilizada/superficie cubierta (Imagen 8). La ciudad está localizada cerca de un patrón prominentemente amarillo asignado al sector urbano. Las manchas más pequeñas de color amarillo hacia el Este y el Oeste indican los centros de la ciudad. El área metropolitana, con una población similar a la de Bahía Blanca (algo más de 300.000 habitantes), está distribuida más allá de los límites de la ciudad de Harrisburg. La categoría denominada "*deforested*" describe un tipo de desmonte adjudicado a un tipo de polilla denominada gitana [*gypsy moth*]. La superficie utilizada/cubierta con imágenes espaciales provenientes de Landsat, SPOT, JERS, IRS son capaces de mostrar con buena (pero no excelente) precisión algunas de las categorías del Nivel II. IKONOS y satélites similares capaces de imágenes de alta resolución pueden adquirir muchas de las características del Nivel III.

Imagen 8. Harrisburg, (EE.UU.), mapa multitemático



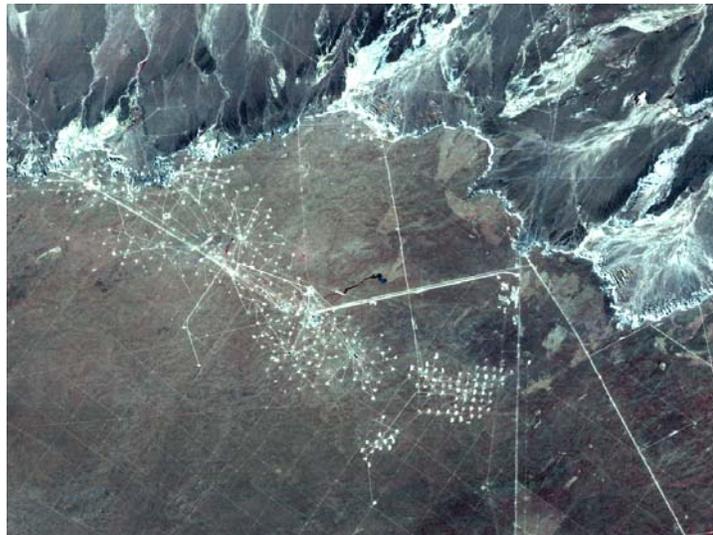
Asimismo se pueden dar descripciones más acabadas sobre la dimensión relativa de un centro urbano, sólo con fotos de color natural. Por ejemplo, a continuación se aprecia una fotografía de Buenos Aires obtenida por el transbordador espacial *Shuttle* (Imagen 9). En ella se puede apreciar el tamaño adquirido por la urbanización en dicha ciudad, comparado claramente con la otra orilla del Río de la Plata, en la cual predominan campos de cultivo. Paralelamente, esta foto permite apreciar el color marrón rojizo del Río de la Plata, debido a la fuerte presencia de sedimentos provenientes del río Paraná y Uruguay.

Imagen 9. Buenos Aires, fotografiada desde el *Shuttle*

4.3 APLICACIONES PARA LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

Una de las primeras aplicaciones de la información extraída por sensores remotos al ámbito civil y comercial ha sido la exploración geológica. Ello fue influido por la factibilidad de fotografiar grandes extensiones de territorio, la cual era examinada por expertos geólogos quienes, a través del análisis de ciertas regularidades en el terreno así como la presencia de determinados minerales en la superficie podían extraer conclusiones acerca de áreas en las cuales era factible otro mineral específico. Asimismo, la presencia de explotaciones petrolíferas se revela claramente desde el espacio dada la presencia de líneas en zonas generalmente desiertas, como se aprecia en la Imagen 10 en la provincia de Neuquen, Argentina.

Imagen 10. Explotaciones petrolíferas en la cuenca Neuquen (foto SAC-C, CONAE)



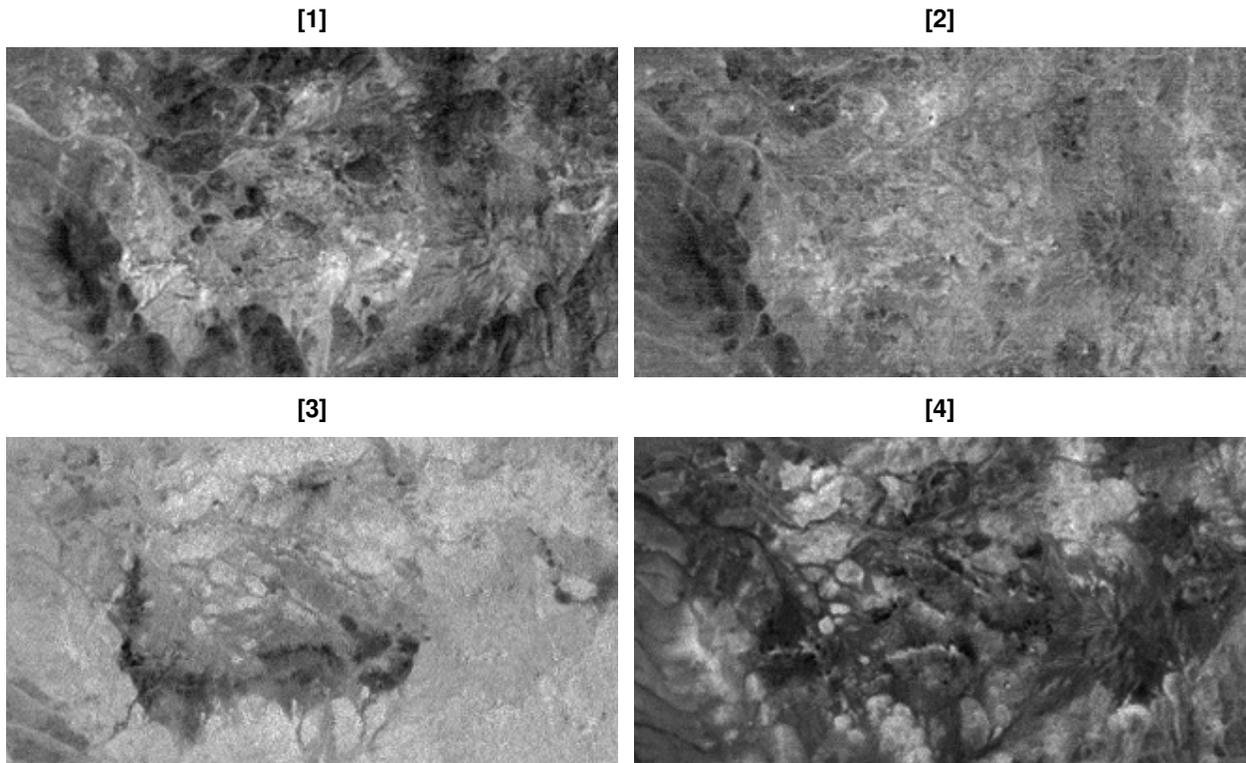
La posibilidad de extracción de información espectral de las imágenes aéreas y satelitales no hizo más que mejorar el nivel de información disponible para su evaluación. En ese sentido, el análisis estadístico especializado refinó más las probabilidades de determinar la presencia de minerales en un ámbito específico. En ese sentido la posibilidad de combinar la información multi-bandas extraída por los sensores permite que se comparen conjuntamente bandas que reflejan, cada una de por sí, información diferente para luego extraer por diferencia nueva información. A continuación repasaremos el uso de las herramientas estadísticas mencionadas en la sección 2.5 aplicadas a un caso de prospección de petróleo.

4.3.1 PROSPECCIÓN PETROLERA A TRAVÉS DEL USO DE HERRAMIENTAS DE CLASIFICACIÓN

En ese sentido podemos ejemplificar con la siguiente prospección de petróleo en la zona de White Mountain, Utah, (EE.UU). Generalmente en geología, la detección de ciertas formas ó estructuras en el terreno asociado a la presencia de determinados minerales puede dar la pauta de la existencia de petróleo ó gas en debajo de la superficie. En este caso, lo que se intenta es determinar la presencia de basaltos (andesitas) y hematitas, en un área donde debiese existir también presencia de minerales hidrosos (arcilla). Se analizarán previamente cuatro imágenes de coeficientes de bandas espectrales realizado por la NASA.

4.3.1.1 UTILIZACIÓN DE RATIOS DE BANDAS

Imagen 11. Imágenes de coeficientes de bandas (Utah, EE.UU.)



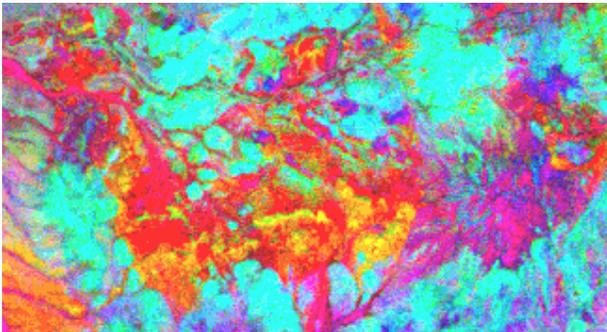
La Imagen 11.1 muestra el ratio de la Banda 3 con la Banda 1 (3/1) la cual deja observar un color gris oscuro predominante, con algunas áreas en blanco más iluminadas (véase Tabla 2 para referencias sobre las bandas). Ello probablemente corresponde a zonas con fuerte presencia de hematitas (muy reflectiva en la banda 3 pero oscura en la 1). La Imagen 11.2 muestra el ratio 4/2, el cual es similar al anterior pero las áreas brillantes aparecen desplazadas. Ello da la pauta de

presencia de vegetación densa. La Imagen 11.3 corresponde al ratio 7/5 la que posee un patrón único, allí se presenta un área oscura en forma de gancho dentro de una zona mayormente clara que coincide con las zona con presencia de minerales. La banda 7 es un excelente detector de minerales hidrosos tales como arcilla, alunita, entre otros, porque estos absorben radiación (y ello reduce la reflectancia). Por último, la Imagen 11.4, muestra al ratio 1/7 el cual describe áreas brillantes que son aproximadamente las mismas que las correspondientes a basaltos y algunas andesitas

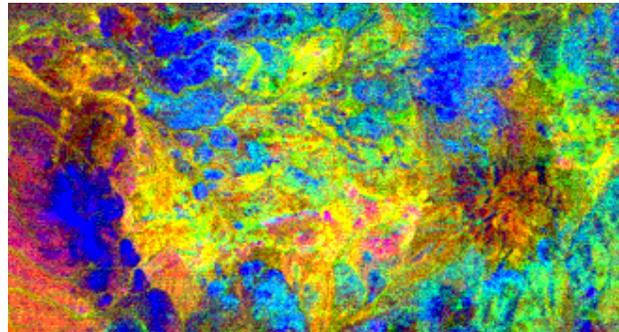
Por otro lado, la Imagen 12.1 de ratios, a color compuesto, hecha de azul = 7/5, verde = 1/7, y rojo = 3/1 no llega a separar a los dos tipos de roca volcánica (ambos son azul y verde) pero muestra las White Mountain de Utah como púrpura y pinta como áreas amarillas a las combinaciones de k/a (kaolinita/alunita).

Imagen 12. Imágenes de ratios a color compuesto

[1]



[2]

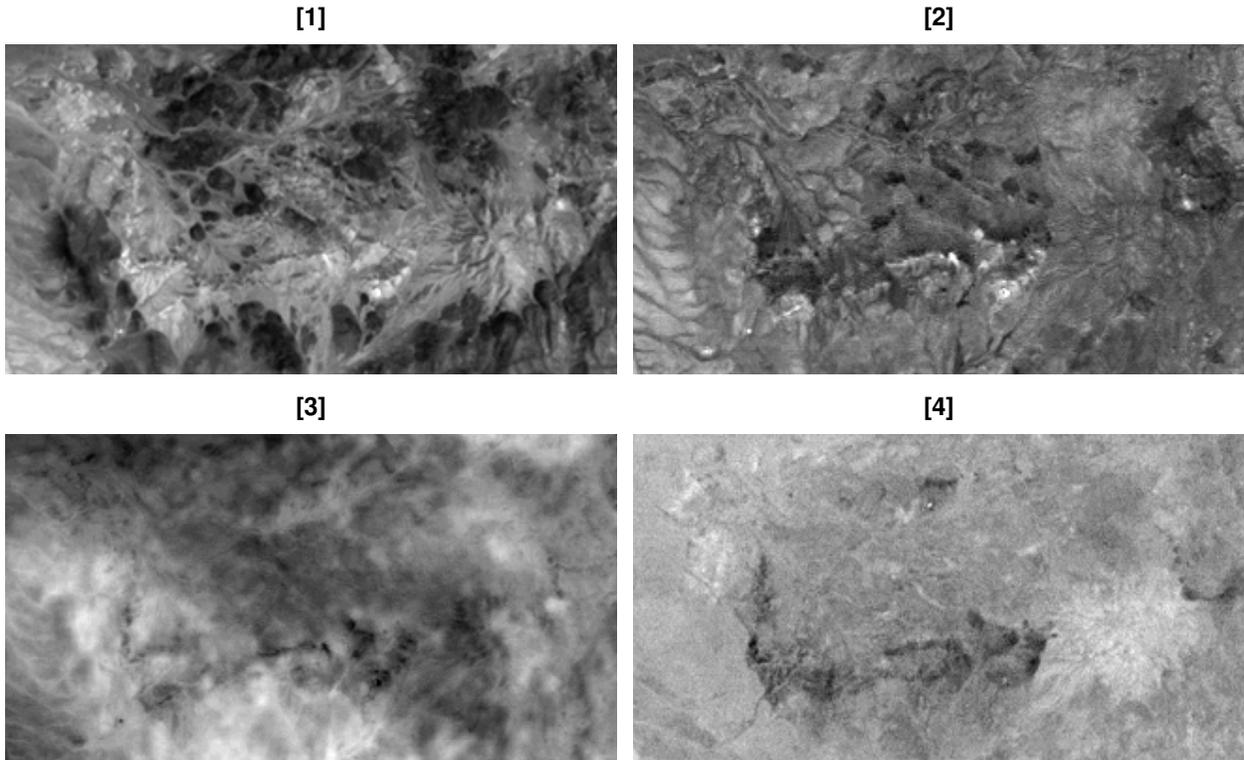


A su vez, un segundo ratio compuesto (Imagen 12.2), con azul = 1/7, verde = 4/2, y rojo = 3/1, produce un resultado muy diferente. El azul oscuro se fija claramente en las extensiones de basalto con las andesitas en un azul con sombreado diferente. Las White Mountain aparecen en un marrón anaranjado, pero se puede notar que el mismo color aparece en la sección norte de las extensiones de basalto. Por su parte, las secciones de k/a están en púrpura rojizo, y son muy diferentes de la zona roja donde prevalece la presencia de hierro. De este modo, las imágenes de coeficientes de bandas parecen mejorar a las imágenes compuestas estándar en términos de detectar alteraciones en el terreno.

4.3.1.2 UTILIZACIÓN DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Ahora se realizará una evaluación de la utilidad del análisis de componentes principales (PCA). El primer componente principal se observa en la Imagen 13.1 y provee una vista muy marcada, análoga a una fotografía aérea en blanco y negro. Los tonos más suaves indican las áreas de alteraciones en el ratio k/a. Hay muchos puntos muy brillantes y pequeños. Estos son probablemente pozos excavados por prospectores, algo análogo a lo observado en la Imagen 10.

Imagen 13. Imágenes blanco y negro de análisis de componentes principales



El segundo componente principal se observa en la Imagen 13.2 y es un poco más oscuro en general, con algunas alteraciones especialmente oscuras. La imagen nuevamente muestra puntos brillantes así como un área brillante al oeste de las colinas de basalto. El tercer componente principal (Imagen 13.3) parece sin sentido, excepto porque los puntos negros tal vez pertenezcan a alguna de las zonas de alteraciones geológicas anteriormente mencionadas.

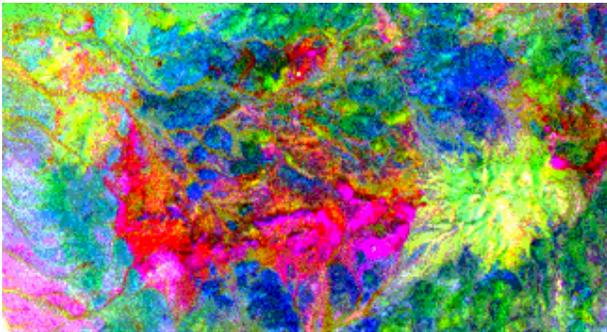
Finalmente, una mirada al cuarto componente principal en la Imagen 13.4 muestra la misma patrón oscuro tipo gancho que se observó en la Imagen 11.3. La White Mountain esta separada por sus tonos suaves, con tonos similares al norte en los depósitos de basalto.

A continuación se presenta un análisis de componentes principales pero de fotos compuestas a color. Con ello se pretende ver con mayor claridad la separación entre las distintas clases de minerales presentes en la escena de White Mountain.

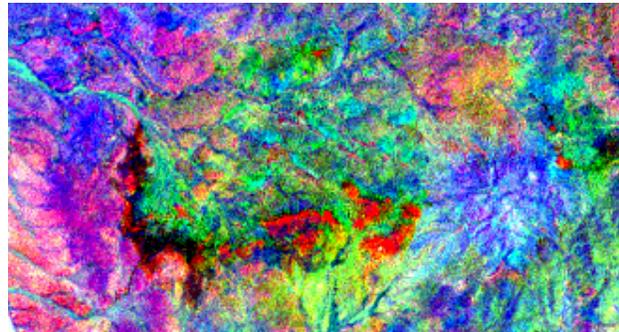
Como se aprecia en las imágenes de la Imagen 14, los colores resplandecen de información. Ahora, en la Imagen 14.1 se separan a los componentes principales como PC1=rojo, PC2=azul y PC4=verde. Las rocas de basalto aparecen en azul verdoso, mientras que las andesitas tienden al azul oscuro. White Mountain mantiene un distintivo amarillo, tal como las áreas por encima de los basaltos. Ello implicaría que estos depósitos de piedra caliza son similares a los encontrados en White Mountain. Las zonas de k/a aparecen en color púrpura vino. Las zonas hematíticas son rojas profundas y amarillas. Las áreas cubiertas por el aluvión tienden a ser multicolores con límites menos claros.

Imagen 14. Imágenes compuestas a color de los componentes principales

[1]



[2]



La Imagen 14.2 muestra un segundo análisis de componente principal. Ahora el PC4=azul, PC5=verde, PC2=rojo, y la imagen es menos definida. Los basaltos son púrpura y las andesitas pueden ser verdes y/o amarillas. No se llega a distinguir a la White Mountain. Las zonas de k/a son rojas brillantes, pero están limitadas por un borde negro de naturaleza variada. Nada queda muy evidente en este segundo gráfico.

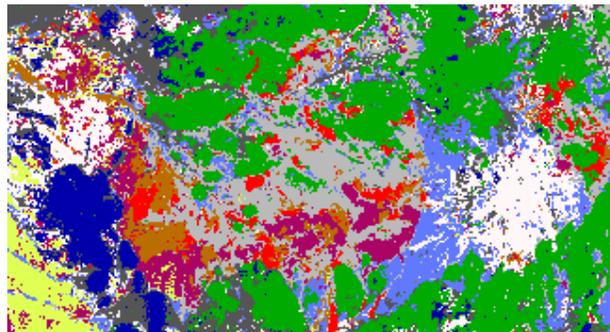
4.3.1.3 UTILIZACIÓN DE ALGORITMOS DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

Un último análisis corresponde a la utilización de métodos de máxima de verosimilitud. Éste corresponde a un proceso de clasificación supervisado de un mapa temático de datos hechos por la empresa IDRISI en base a imágenes del Landsat y con datos de campo y basados en algunos mapas previos. Diez clases

fueron establecidas y luego identificadas a través de entrenamiento de un algoritmo de clasificación basado en métodos de máxima verosimilitud. En la Imagen 15 se aprecian los resultados finales.

Allí se pueden observar las clases: Basalto (azul oscuro) y Andesita (verde) ocupan grandes extensiones de la imagen. White Mountain esta bien separada con un color blanco se asemeja al de los depósitos de piedra caliza al norte de los basaltos. La zona de kaolinita/alunita (k/a) es púrpura y coincide con la información del mapa. La clase designada como Ferrosa (marrón) es equivalente al mapa geológico denominado Moderadamente Hematizada, mientras que la clase denominada Hematita (en rojo) es igual a la determinada en el mapa como Fuertemente Hematizada. Arbitrariamente, cuatro diferentes clases de aluviones fueron separadas, basados en razonamiento fotointerpretativo y geológico. La clase MixAlluv (gris) está parcialmente dentro de la zona alterada y se presume que es una mezcla de roca alterada y deyecciones de roca volcánica. DrkAlluv (gris oscuro) es un depósito diferenciable que consiste mayormente en residuos volcánicos. La clase LsAlluv (celeste), se presume contiene considerables contribuciones de White Mountain así como de otras fuentes de piedra caliza. BrtAlluv (amarillo) refiere a aluviones del oeste hacia colinas de basalto orientales, las cuales han recibido mucho de su composición de otras montañas adyacentes. Su brillantez (en bandas individuales y compuestos de color) implica la presencia de una variedad de detritos de colores claros (deyecciones fragmentarias) y arcillas.

Imagen 15. Utilización del clasificador de máxima verosimilitud



Al parecer, la utilización de algoritmos de aprendizaje iterativo permite reconocer e identificar de manera más acabada las clases presentes en una escena. Debe recalarse en este caso que el proceso de entrenamiento del algoritmo fue sustentado en información de campo, así como otra información complementaria.

Esta inclusión sin dudas fue mejorando en cada iteración el proceso de aproximación hacia la identificación de patrones.

5. APLICACIÓN ECONÓMICA DE LA INFORMACIÓN REMOTA

Hasta ahora hemos analizado la forma de localizar, analizar, identificar e interpretar información proveniente de datos de sensores remotos. Esta funcionalidad puede ser extenderse a otros ámbitos de estudio.

La información de sensores remotos (tanto aérea como satelital) tiene destacables características:

- 1) Puede cubrir grandes extensiones
- 2) Por otro lado, en el caso de los sensores de alta resolución, puede llegar a un grado de precisión en la identificación de objetos de metros de diferencia con el real.
- 3) Puede detectar información invisible al ojo humano (microondas, IR, Casi IR, etc.)

Basado en estas tres características solamente se esbozarán actuales y potenciales aplicaciones para la valoración de propiedades y actividades, teniendo en cuenta su afectación principalmente a la determinación de la base imponible.

5.1 VALORACIÓN FISCAL DE PROPIEDADES

Como se ha podido apreciar la obtención de datos por sensores remotos aplicados al sector agropecuario puede brindar información sobre la evolución estimada del rendimiento de los cultivos. Del mismo, se pueden calcular las posibles pérdidas producidas por catástrofes naturales ó por presencia de diversas plagas. De este modo dentro de un sector determinado puede estimarse las rindes por tipo de cultivo. Contemplando los precios durante el período de venta del cultivo se puede hacer estimaciones de los ingresos obtenidos por el propietario del terreno productivo.

Nótese que aquí se puede combinar efectivamente la función de mapa temático a fin de identificar las instalaciones e infraestructura (cobertizos, silos, mangas, corrales, etc.) y los otros bienes de capital, como cosechadoras, vehículos particulares ó de uso productivo. Esta información, como tantos otros métodos indiciarios de estimación de la riqueza, es sólo aproximada y puede dar sustento, tal vez, a un valor mínimo a adjudicar a los bienes mencionados.

En el primer caso, la valuación de los rendimientos netos por cultivo asignado a alguna propiedad puede determinar el importe a debitar por el impuesto a los ingresos brutos, impuesto vigente en muchas provincias argentinas, por ejemplo. Asimismo, deja abierto el camino para un cotejo de cifras declaradas en el impuesto a las ganancias, de ámbito nacional, en caso de sospechas de sub-declaración de ganancias. En el segundo caso, la determinación de la existencia de diversas propiedades, sean bienes muebles ó inmuebles, facilita una estimación de la riqueza del propietario, lo que puede otorgar base a un cotejo con la declaración de impuesto a los bienes patrimoniales ó un chequeo de declaración de bienes.

La valoración fiscal de los terrenos puede ser campo de trabajo para los sensores remotos. La información extraída por los mismos brinda detalles de gran exactitud con respecto al tamaño del terreno mientras que, como se mencionó, pueden derivar en información sobre la superficie cubierta y utilizada del mismo. De hecho, la fotografía aérea urbana brinda datos a las autoridades fiscales municipales sobre la superficie edificada declarada y la superficie efectivamente poseída, la cual es base del impuesto inmobiliario. Asimismo, se debe contemplar que a la determinación de la superficie de la propiedad deben incluirse los valores de tasación de la propiedad por cada sector urbano a que corresponda. Esto datos suelen ser variables, por lo que deben ser actualizados regularmente.

En el tema impositivo no debe olvidarse, de todos modos, los aspectos legales. Estos métodos indiciarios pueden, precisamente, sufrir la crítica de cierta falta de precisión en la información presentada. El análisis interpretativo en algunos casos puede llegar a ser vago ó hasta contradictorio. Pero, como se destaca en el punto 2.6, la información de sensores debe ser complementada con la comprobación en el campo para que sea efectiva. Por lo que dichos datos representan solo representaría una guía para la obtención de mayor información sobre algún caso puntual.

5.2 VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Como ya se hizo mención, una de las estimaciones factibles de realizar dada la calidad de la información obtenida por sensores remotos es la estimar los niveles de producción agrícola netos de una determinada región. Estas estimaciones podrían generalizarse a otros sectores de la producción, teniéndose en cuenta que la actividad a mensurar debe ser factible de ser observada y su producto distinguido por los sensores remotos. Por ejemplo, la ganadería. La observación de los rebaños

y manadas desde la altura permitiría cuantificar las existencias de una clase de ganado en especial (desconocemos el grado de precisión en la identificación, pero es nuestra suposición que identificar razas de ganado resultaría algo más complejo). Por otro lado, dentro de estos sectores factibles de ser mensurados podría contarse a la explotación forestal. En este sentido, en la sección 4.1.1 se muestran diversas imágenes que dan una acabada idea de cómo esta actividad productiva pudiera mensurarse.

¿Podría valuarse las actividades manufactureras? Salvo raras excepciones, supondríamos que no. Por ejemplo, podría extraerse información de la producción automotriz obteniéndose imágenes de las flotas de autos producidos una vez éstos son puestos en las playas de la empresa productora. Del mismo modo, podrían estimarse con algún grado de aproximación los embarques de un puerto, obteniendo información espectral de la cantidad de buques, su tipo de carga, cantidad de camiones y *containers* dentro del mismo, etc. Ahora bien, convendría al mismo tiempo calcular los costos de reorientar un satélite ó de hacer despegar un avión para obtener una información cuyo grado de aproximación a la realidad, en algunos casos, puede ser lejana ó meramente especulativa comparado con los costos normales de simplemente enviar un fax recabando información a las autoridades privadas ó publicas correspondientes, las cuales, en algunos casos, tienen la obligación legal de brindar dicha información en forma correcta.

Sin embargo, ciertas actividades productivas, y por razones estratégicas, de hecho han sido y son vigiladas a través de información de sensores remotos. Por ejemplo, la observación de la producción de material de guerra (buques en astilleros, formaciones de tanques, misiles, etc.) durante la Guerra Fría ha sido uno de los grandes impulsores del desarrollo de muchas tecnologías de detección por sensores remotos.

5.3 VALORACIÓN DE PÉRDIDAS POR CATÁSTROFES NATURALES

Las catástrofes naturales, por su carácter generalmente imprevisto y su gran alcance en la afectación de la infraestructura pública ó privada, generan habitualmente pérdidas por cientos de millones de dólares. La información obtenida por teledetección de hecho brinda actualmente información con respecto a la proximidad y afectación de catástrofes climáticas (tornados y huracanes, por ejemplo), a través de los satélites meteorológicos (*satmet*), los cuales orbitan la Tierra desde 1960. Sin embargo, una vez ocurrida la catástrofe puede estimarse los costos de la misma con

la información de sensores remotos. Otras incidentes naturales, como las inundaciones en algunos casos, pueden prevenirse también cuando se perciben determinados patrones de lluvias en la parte superior de la cuenca de algún río. Según sea de mayor longitud el río, con mayor tiempo podrá advertirse la evolución de las corrientes a fin de tomar medidas de acción que permitan evitar mayores pérdidas. Del mismo modo, las erupciones volcánicas pueden ser advertidas con algún grado de previsión desde el aire. La utilidad de los sensores remotos, nuevamente, recae en que se evalúen como mejores tanto en precio ó calidad de la información para ser destinados a dichas tareas.

6. CONCLUSIONES

Este resumen abarca diversos temas básicos de la teledetección moderna. En este sentido, se describen los procedimientos de mapeo de radiación realizado por los instrumentos de detección remota, así como se esbozan las aplicaciones actuales y potenciales. Como comentario final se puede destacar los grandes avances que se han producido en los sistemas de teledetección aplicados al ámbito civil y comercial. Estos adelantos brindan mejores y más amplios niveles de información en tiempo real sobre lo que acontece en determinados puntos de la Tierra. La capacidad multispectral del mapeo ayuda a descubrir nuevos datos sobre imágenes disponibles, aunque el aumento de precisión así como la capacidad de identificación de objetos y formas en la teledetección requiere posteriores mejoras en los sensores y en los algoritmos de interpretación.

De todos modos, la función introductoria y didáctica de este trabajo así como la presentación de conjeturas sobre la aplicación de la respectiva información pretende hacer converger dos áreas de conocimiento a los cuales el autor considera como potencialmente correlacionados: la teledetección y la provisión de nueva información para usos económicos.

REFERENCIAS

- Comisión Nacional de Actividades Espaciales, [<http://www.conae.gov.ar>]
CHUVIECO, Emilio (1995), FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL, Ediciones Rialp, Madrid.
DELRIEUX, Claudio (2000), "El color en computación gráfica", Universidad Nacional del Sur, Septiembre 15.

- DRURY, S.A. (1987), IMAGE INTERPRETATION IN GEOLOGY, Allen & Unwin.
- FISCHER, M.M. y GETIS, A. (1997), RECENT DEVELOPMENTS IN SPATIAL ANALYSIS, Springer Verlag, Heidelberg, Germany.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, [<http://www.INTA.gov.ar>]
- LILLESAND, Thomas L. y Ralph W. KIEFER (2000), REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION, Wiley & Sons.
- MERTENS, Benoît, William SUNDERLIN y Ousseynou NDOYE (2000), "Impact of Macroeconomic Change on Deforestation in South Cameroon: Integration of Household Survey and Remotely-Sensed Data", *World Development* 28(6): 983-999.
- NASA, REMOTE SENSING TUTORIAL; [<http://rst.gsfc.nasa.gov/>]
- SCHOWENGERDT, Robert A. (1997), REMOTE SENSING. MODELS AND METHODS FOR IMAGE PROCESSING, Academic Press, 1997.
- WALKER, Robert, Emilio MORAN y Luc ANSELIN (2000), "Deforestation and Cattle Ranching in the Brazilian Amazon: External Capital and Household Processes", *World Development* 28 (4): 683-699.