



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO.**

FACULTAD DE INGENIERÍA.

**Crecimiento urbano y cambio de uso de suelo
en el Sur-Oeste del Distrito Federal utilizando
Imágenes Landsat.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO TOPÓGRAFO Y GEODESTA**

P R E S E N T A

DANIEL GARCÍA LÓPEZ.



CIUDAD UNIVERSITARIA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A MI MADRE Y PADRE

*Como flechas en la mano de un hombre poderoso,
así son los hijos de la juventud.
Feliz es el hombre físicamente capacitado
que ha llenado su aljaba de ellos.*

Salmos 127:4,5

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial para la Dra. Rosa Maria Prol Ledesma por ofrecerme el apoyo y el espacio, así como su incansable atención a los detalles en la elaboración de este proyecto.

También al Dr. Marco Antonio Torres Vera por sus valiosas recomendaciones para la presentación de este trabajo.

Deseo agradecer a las siguientes instituciones, así como a las personas que realizaron contribuciones para el mejoramiento de este texto.

Universidad Nacional Autónoma de México
Por las experiencias, conocimientos y valores adquiridos en este recinto.

Facultad de Ingeniería
“Por que el enseñar es dejar una huella en las vidas para siempre”

Instituto de Geofísica
“La educación no es una cosa que uno adquiere, sino un proceso de toda la vida”

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)
Por permitirme participar como becario en el proyecto N°- I 37890-T

Ing. Víctor Robles, Ing. Casiano Jiménez, Ing. Adolfo Reyes Pizano, Mtra. Alejandra Toscana

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	2
ZONA DE ESTUDIO	2

CAPÍTULO I PERCEPCIÓN REMOTA

I.1 PERCEPCIÓN REMOTA	5
I.1.1 FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	5
I.2 SENSOR	7
I.2.1 SENSOR PASIVO	7
I.2.2 SENSOR ACTIVO	7
I.3 PLATAFORMAS	7
I.3.1 TIPOS DE PLATAFORMAS	7
I.4 LA NATURALEZA DE LA RADIACIÓN	8
I.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	10
I.6 PROCESOS FÍSICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	13
I.7 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN EN LA ATMÓSFERA	15
I.7.1 ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA	15
I.7.2 VENTANAS ATMOSFÉRICAS	15
I.7.3 DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA	16
I.8 TRANSMISIVIDAD ATMOSFÉRICA	17
I.9 RADIACIÓN DETECTADA POR LOS SENSORES	18

CAPÍTULO II PROGRAMA ESPACIAL LANDSAT

II.1 PROGRAMA LANDSAT	21
II.2 SENSORES LANDSAT	23
II.2.1 LANDSAT MULTI SPECTRAL SCANNER (MSS)	23
II.2.2 LANDSAT THEMATIC MAPPER (TM)	24
II.2.3 LANDSAT ENHANCED THEMATIC MAPPER (ETM+)	25
II.3 RESOLUCIÓN ESPACIAL	26
II.4 RESOLUCIÓN ESPECTRAL	26
II.5 RESOLUCIÓN RADIOMETRICA	27
II.6 RESOLUCIÓN TEMPORAL	27

CAPÍTULO III MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

III.1 CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS	29
III.1.1 ALGORITMO DARK OBJECT SUBSTRUCTION (DOS)	31

III.1.2	ALGORITMO DE NORMALIZACIÓN DE UNA IMAGEN	31
III.2	IDENTIFICACIÓN DE CLASES	32
III.2.1	COMPOSICIONES A COLOR	33
III.2.2	ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)	35
III.3	MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN	35
III.3.1	CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA	35
III.3.2	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	36
III.3.2.1	SELECCIÓN DEL SITIO DE ENTRENAMIENTO	36
III.4	ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN	38
III.4.1	PARALELEPÍPEDOS	38
III.4.2	MÍNIMA DISTANCIA	40
III.4.3	MÁXIMA PROBABILIDAD	41
III.5	EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD EN LOS MAPAS	43
III.6	DETECCIÓN DEL CAMBIO	45
III.6.1	ÁLGEBRA DE IMÁGENES	45
III.6.2	ANÁLISIS DE MATRIZ DE CAMBIO	46

CAPÍTULO IV IDENTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

IV.1	DEFINICIÓN DE UN SIG	47
IV.2	MAPAS TEMÁTICOS EN LA EVALUACIÓN DE CAMBIO DE USO DE SUELO	51
IV.3	MAPAS DE USO DE SUELO	54
IV.4	MODELOS BOOLEANOS EN UN SIG	54

CAPÍTULO V PROCESADO DE LAS IMÁGENES Y RESULTADOS

V.1	PRE-PROCESADO DE LAS IMÁGENES	58
V.2	REALCE ESPECTRAL PARA IDENTIFICACIÓN DE LA COBERTURA	59
V.2.1	COMPOSICIONES DE FALSO COLOR	60
V.2.2	ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)	62
V.3	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LAS IMÁGENES	65
V.4	MAPAS TEMÁTICOS DE USO DE SUELO	66
V.5	MODELO BOOLEANO PARA LA DETERMINACIÓN DE CAMBIO DE USO DE SUELO	66
V.6	MATRIZ DE CAMBIO DE USO DE SUELO	73

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA	80
---------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y el acelerado crecimiento demográfico de las últimas décadas han producido un desequilibrio importante en el ambiente deteriorando la base material de todos los procesos productivos.

La falta de planeación y modelación de los planes de desarrollo urbano han generado una mayor afectación sobre los recursos naturales. Como consecuencia del crecimiento urbano se ha reducido la zona forestal y agrícola y se ha transformado la composición de los paisajes naturales que se consideran desde hace años como Parques Nacionales, teniendo como consecuencia la pérdida de flora y fauna, la alteración de los ciclos hidrológicos naturales la erosión del suelo y la contaminación en todos sus ámbitos.

El problema de la zona de estudio, el SW de la Ciudad de México, viene dado por el progresivo crecimiento de las zonas urbanas, que sustituyen las zonas agrícolas y forestales, y los efectos que este proceso produce sobre el medio ambiente.

En el área de estudio, un porcentaje del suelo es aún potencialmente urbanizable, lo que puede provocar nuevas pérdidas de áreas verdes. Una consecuencia directa de la pérdida de suelo agrícola es la disminución de la infiltración y la modificación de las características hidráulicas de los acuíferos, que pueden afectar de manera notable los recursos hidráulicos disponibles.

Por otra parte, la localización de los conjuntos industriales y habitacionales en general no obedece a una planificación dirigida a la disponibilidad de recursos (principalmente agua) y condiciones de contaminación que pueden producir, sino que se ha visto más condicionada por los costos económicos de los suelos y las condiciones de comunicación.

Como consecuencia del desarrollo de la actividad urbana en áreas que pueden producir diferentes tipos de efectos nocivos al medio ambiente; estos efectos pueden ser evidentes, no sólo por el simple reconocimiento visual, sino también por la alteración de la respuesta radiométrica, que tal actividad puede provocar.

Un cambio en el uso del suelo, producirá el correspondiente cambio en la cubierta del mismo y consecuentemente, un cambio en la radiancia espectral de esa cubierta. En el caso de la variación de los límites urbanos, los cambios detectables se definen en la sustitución de uso de suelo forestal o agrícola, por el desarrollo de construcciones civiles o edificación. Esta transición se caracteriza por una reducción de radiancia en la región del Infrarrojo y un aumento de la radiancia en la región electromagnética del visible de las cubiertas transformadas.

En este trabajo se plantea el problema enmarcado en la parte SW del área metropolitana del D.F., relacionado con el análisis y actualización de los cambios y usos de suelo en un entorno urbano o suburbano, se realizó mediante la utilización de técnicas de Percepción Remota para posteriormente incorporar los resultados obtenidos a un Sistema de Información Geográfica.

ANTECEDENTES

Una gran parte de la ciudad se ha desarrollado sobre terrenos no aptos para la urbanización. Familias de bajos recursos han ocupado zonas de alto riesgo en laderas empinadas y valles que están expuestos a deslizamientos e inundaciones. Así mismo la sismicidad que existe en el D.F. asociada con las fallas geológicas son elementos a considerar para determinar las zonas potencialmente urbanizables.

La observación y cuantificación del crecimiento de la mancha urbana en ciudades del Tercer mundo, son elementos muy relevantes para tareas de planeación urbana y regional del territorio en estudio y sus alrededores. De este modo el desarrollo de métodos y estrategias de evaluación espacial de zonas urbanas, en formato digital es importante para la facilitación del empleo de nuevas técnicas para la planeación del desarrollo urbano.

Los sistemas de información Geográfica, combinados con técnicas de Percepción Remota (procesamiento de imágenes de satélite), han sido muy utilizados últimamente en el análisis del monitoreo de uso de cambio de suelo, esto es en el ámbito mundial (Prakash and Gupta, 1998; Kwarteng and Chavez, 1998; Luque, 2000). En México por mencionar algunos ejemplos, en la ciudad de Tijuana se realizó la interpretación visual de fotos aéreas estereoscópicas para determinar el crecimiento urbano (Bocco and Sánchez, 1995), en La Laguna de Términos se monitoreo los cambios de cubierta de suelos utilizando imágenes de satélite (Mas, 1999), en la vecindad del Distrito Federal concretamente en el municipio de Chalco se utilizo datos cartográficos e imágenes Landsat TM para determinar el cambio de uso de suelo (Prol-Ledesma *et al.*, 2002).

Comúnmente la información de uso de suelo en las áreas urbanas es esencial para el planeamiento urbano y para otros propósitos. Los patrones de uso de suelo cambian rápidamente en respuesta de las fuerzas económicas, sociales y ambientales que son ejercidas. La información oportuna sobre el cambio del uso de suelo es la base para la formación de políticas sobre la anticipación de problemas que acompañan al crecimiento urbano. La detección del cambio es el proceso para identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno por medio de la observación en diferentes lapsos de tiempos (Ridd and Liu, 1998).

La Percepción Remota provee una fuente de datos viable para extraer eficientemente y con un bajo costo la información acerca de las cubiertas de suelo para ordenar, inventariar y monitorear efectivamente esos cambios. En consecuencia, los cambios de detección han llegado a tener una mayor aplicación en la Percepción Remota a causa de la información repetitiva en intervalos de tiempos cortos y la calidad consistente de las imágenes (Mas, 1999).

ZONA DE ESTUDIO

El Distrito Federal se localiza en la zona centro de la República Mexicana, entre los 19°36' y los 19°03' de latitud norte, y los 98°57' y 98°32' de longitud oeste. Limita al norte, este y oeste con el estado de México y al Sur con el estado de Morelos (INEGI, 2002).

El área de estudio se encuentra localizada en la parte SW del Distrito Federal enmarcadas por las siguientes coordenadas geográficas entre los 19°11'35.24035" y los 19°27'53.01694" de latitud norte, y los 99°21'15.92450 y 99°09'16.96163" de longitud oeste (Fig. 1). En esta área se encuentran ubicadas las delegaciones Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos.



Fig 1 Límites del D.F. y Zona de estudio (Modificada de INEGI, 2002)

Parque Nacional Cumbres del Ajusco

El volcán del Ajusco es uno de los parques nacionales en la vecindad inmediata de la ciudad de México. Desde 1938 es un parque nacional de pinos, oyameles y pastizales además de albergar fauna silvestre. El parque nacional se encuentra ubicado en la delegación Tlalpan, con una superficie de 920 hectáreas. Se encuentra ubicado dentro de las siguientes coordenadas geográficas; 19°12' y 19°12'50" latitud Norte y 99°14'35" y 99°16'20" longitud Oeste (Vargas, 1984).

Un factor que ha producido un fuerte deterioro en la localidad es el exceso de contaminantes volátiles producidos por las fábricas de la Cuenca de México, así como los gases que despiden los autos y camiones. Los contaminantes volátiles, al no poder atravesar la serranía en los días sin viento, se acumulan en los bosques de las partes altas, provocando la muerte, tanto de la flora arbórea como de la fauna acompañante. El ejemplo más evidente es la parte desnuda de la cima del Macizo Central (3,600-3,937 m.s.n.m.) además de otros muchos factores que se generan como incendios, plagas, sobre pastoreo, tala, erosión y los asentamientos humanos irregulares (Vargas, 1984).

Parque nacional Desierto de Los Leones

La primera área natural protegida en México fue la zona boscosa conocida como el Desierto de Los Leones, decretada en 1876 por la importancia de sus manantiales en el abastecimiento de agua de a la Ciudad de México y en 1917 esta misma área se decreto como el primer Parque Nacional al considerar adicionalmente la belleza natural de sus paisajes (CONABIO, 2001).

El parque nacional esta ubicado en el Distrito Federal, en la Delegación Política de Cuajimalpa de Morelos la mayor parte y en la Delegación Álvaro Obregón. La localización del parque esta dado por las siguientes coordenadas geográficas; latitud Norte 19°15'20" y 19°19'40"y de longitud Oeste 99°17'40" y 99°19'40" (Vargas, 1984).

El Parque Nacional Desierto de los Leones tiene una gran importancia ecológica, por los siguientes aspectos: protege el bosque, conserva el suelo, recarga los acuíferos, amortigua el clima, amortigua la contaminación, alberga la fauna silvestre (Vargas, 1984)

Los Dinamos

Los Dinamos es conocido como Parque Nacional, excepto en la lista oficial de Parques Nacionales y Áreas Protegidas. En realidad de trata de un área natural perteneciente a la Delegación Magdalena Contreras y que al igual que las anteriores áreas son de vital importancia en el equilibrio hidrológico del D.F. (Vargas, 1984).

I PERCEPCIÓN REMOTA

I.1 PERCEPCIÓN REMOTA

Desde épocas muy antiguas, volar ha sido uno de los sueños más anhelados por el hombre. Pese a la persistencia, sólo en fechas recientes se ha podido disponer de los medios técnicos necesarios para hacer realidad este deseo. Desde ese momento, el ritmo de la innovación tecnológica ha sido vertiginoso, lo que ha permitido enriquecer notablemente el conocimiento sobre el planeta.

En el afán de remontar la limitada perspectiva de la visión humana, es evidente que desde sus inicios, la aeronáutica ha sido una pieza clave para la investigación espacial. La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la Percepción Remota. Este vocablo es una traducción latina del término inglés *remote sensing* ideado a principios de la década de los años 60 para designar cualquier medio de observación remota. Se aplicó fundamentalmente a la fotografía aérea que fue el principal medio para obtener información remota en aquel momento. En sentido amplio, la Percepción Remota no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación.

La Percepción Remota espacial puede definirse como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Entre la tierra y el sensor existe una interacción de energía, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético recibido por el sensor. La energía detectada por el sensor se transmite posteriormente a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación (Chuvieco, 1990).

I.1.1 FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

Un sistema de Percepción Remota espacial, incluye los siguientes elementos (Fig. I.1).

- *Fuente de energía*, supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. La fuente de energía más importante, obviamente, es la solar, excepto en los sensores radar.
- *Cubierta Terrestre*, formada por distintos materiales, como son la vegetación, el suelo, el agua o bien las construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- *Sistema Sensor*, compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo transporta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, amplificarla, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción en la Tierra.
- *Sistema de Recepción*, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se

graba en un formato apropiado y se distribuye con las correcciones necesarias.

- *Intérprete*, que analiza esa información (normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales), convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- *Usuario final*, encargado de analizar el documento resultante de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

En forma más general podemos decir que un sistema de Percepción Remota consta de:

- Una fuente emisora
- Un objeto a estudiar
- Un sistema capaz de captar información
- Una distancia entre el objeto a estudiar y el sistema capaz de captar información
- Un intérprete y el usuario final

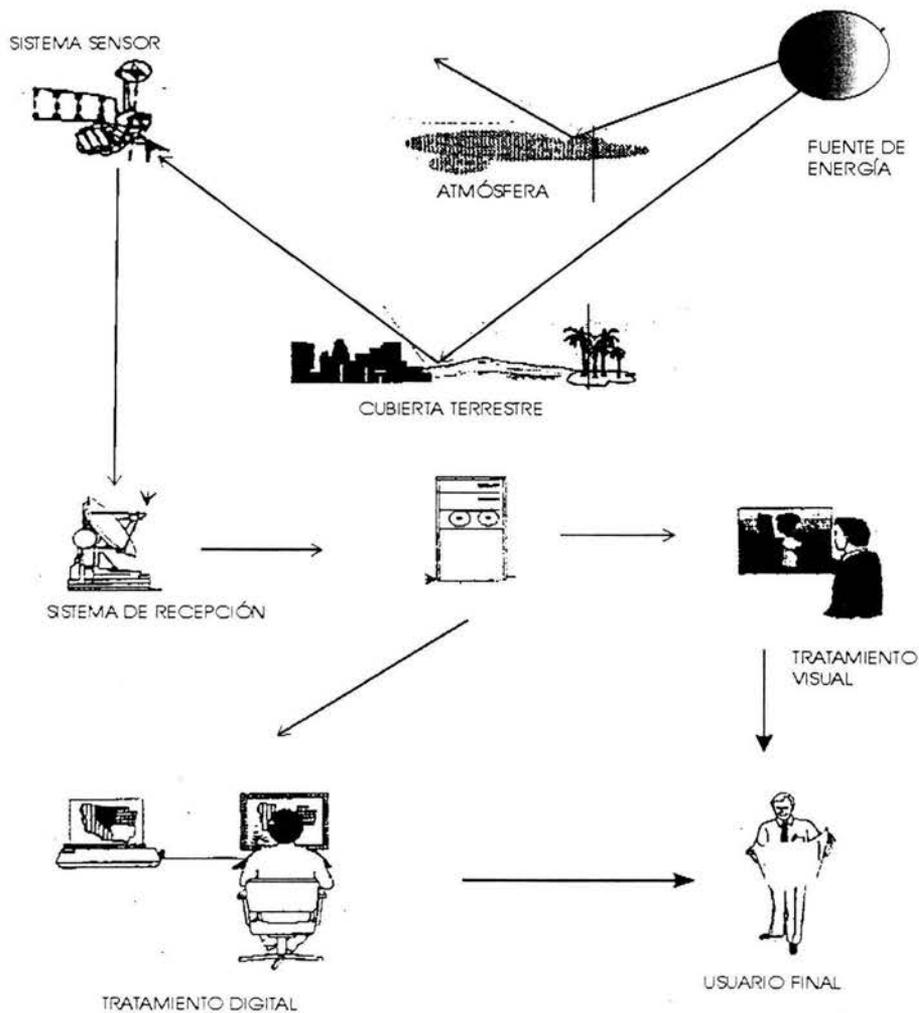


Figura I.1 Componentes de un sistema de Percepción Remota (Tomada de Chuvieva, 1990)

I.2 SENSOR

Un sensor es un sistema capaz de captar radiación proveniente de un objeto o fenómeno en cierta gama de longitudes de onda y puede transformarla en una señal que permite grabar esta información. (Chuvieco, 1990).

Los sensores más comúnmente utilizados en ciencias de la Tierra son:

- Cámaras fotográficas
- Radiómetros de barrido multiespectral
- Radiómetro térmico de barrido mono o multiespectral
- Radar lateral

Los tres primeros actúan en forma pasiva, registrando una radiación reflejada o emitida naturalmente por los objetos. El radar actúa en forma activa, es decir, capta la radiación retrodifundida de un haz de ondas calibrado que él mismo emite.

I.2.1 SENSOR PASIVO

Se limitan a coleccionar la energía electromagnética procedente de cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares o emitida en virtud de su propia temperatura. En función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos, puede establecerse una división en estos sensores. En el primer grupo estarían las cámaras fotográficas. En el segundo, los exploradores de barrido y las cámaras vidicon. Por último, los sensores pasivos de antena que se conocen con el nombre de radiómetros de micro-ondas.

I.2.2 SENSOR ACTIVO

Se llaman sensores activos los que tienen la capacidad de emitir un haz energético, que posteriormente detectan, tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar.

I.3 PLATAFORMAS

Se considera una plataforma a cualquier sistema o vehículo capaz de transportar un sensor remoto a la zona de operación y mantenerlo sobre el objetivo de estudio durante el tiempo que sea necesario.

I.3.1 TIPOS DE PLATAFORMAS

AVIONES: prácticamente es posible utilizar todo tipo de avión para tareas de Percepción Remota. Además de las consideraciones de tipo económico, costo, mantenimiento, requerimientos de tripulación, consumo, velocidad de vuelo; una consideración importante es la velocidad mínima para que sea compatible con el tiempo del obturador de las cámaras disponibles y la altura que alcance la nave para efectos de escala.

HELICÓPTEROS: son empleados en menor proporción debido a al alta vibración y poco

alcance ya que es de unos cuantos cientos de kilómetros.

GLOBOS: una de las primeras plataformas empleadas en la Percepción Remota fueron los globos estratosféricos libres, inflados con hidrogeno ó helio. Los globos en la actualidad son bolsas de polietileno o materiales similares.

PLATAFORMAS ESPACIALES: las plataformas espaciales se dividen en:

- Migratorias
- Estacionarias

Ambos tipos son de interés para la Percepción Remota y según su función se pueden clasificar en:

- Satélites de comunicación
- Satélites meteorológicos
- Satélites para aplicaciones terrestres y oceanográficas

Dependiendo del tipo de órbita que recorre, el satélite se denomina: polar, helio-sincrónico, geosincrónico y geoestacionario.

1.4 LA NATURALEZA DE LA RADIACIÓN

Energía es la capacidad que tiene un cuerpo para producir trabajo. Esta puede existir en una gran variedad de formas, tales como química, eléctrica, calorífica y mecánica. La energía es transferida de un cuerpo a otro, (Barrett and Curtis, 1992) mediante:

- *Conducción*, la cual involucra coaliciones atómicas o moleculares a través de un medio.
- *Convección*, es el proceso mediante el cual la energía se transfiere por medio del movimiento real de masa.
- *Radiación*, esta es la única forma mediante la cual la energía electromagnética puede ser transferida en cualquier medio ó en el vacío.

Estos tres tipos de transferencia son utilizados en el estudio de la Percepción Remota. En la Tabla I.1 se describen los términos de radiación electromagnética más usados en Percepción Remota.

Tabla I.1.- Términos asociados con la radiación electromagnética usados en Percepción Remota.

	Entidad	Proceso	Propiedades (1)	Características de su comportamiento(2)
Termino	Emitir / radiar Absorber Reflejar Transmitir	Emisión Absorción Reflexión Transmisión	Emisividad (ϵ) Absortividad (α) Reflectividad (ρ) Transmisividad (τ)	Emitancia Absorbancia Reflectancia Transmitancia

(1) Usualmente relacionada a modelos teóricos definidos en una escala de 0-1.

(2) Expresando la fuente real, medio ó performance del objeto. Algunas veces expresado en porcentajes (ejemplo: el albedo(porcentaje de reflectancia natural de los objetos))

En forma similar a lo que se hace en algunas áreas como la física y otras ciencias, se

utilizan modelos (simplificados ó representaciones idealizadas de la realidad) para describir fenómenos complejos. Así, para describir el fenómeno de radiación electromagnética es necesario construir dos modelos, los cuales pueden ayudar a comprender sus principales características

El modelo de onda: cualquier partícula con una temperatura superior al cero absoluto tiene una vibración. Esta vibración provoca perturbaciones en los campos magnéticos y eléctricos que rodean a la partícula y actúan como una fuente emisora de radiación. La dirección del movimiento de estas perturbaciones de onda se presenta en línea recta. Las perturbaciones de onda viajan partiendo de la fuente emisora a una velocidad constante: "velocidad de la luz" (aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$). A la distancia entre cada cresta de onda se le denomina longitud de onda de la radiación (λ); el número de crestas que pasan en un segundo a través de un punto seleccionado es llamado frecuencia (f) (Fig. I.2).

El modelo de una partícula: en este aspecto se enfatiza el comportamiento de la radiación en el cual se sugiere que consta de muchas unidades discretas llamadas fotones. Estos fotones transportan propiedades de la fuente emisora tales como momentum y energía, pero tienen una característica particular, que es el carecer de masa. De este modo los fotones son definidos como un tipo de partícula básica de la energía.

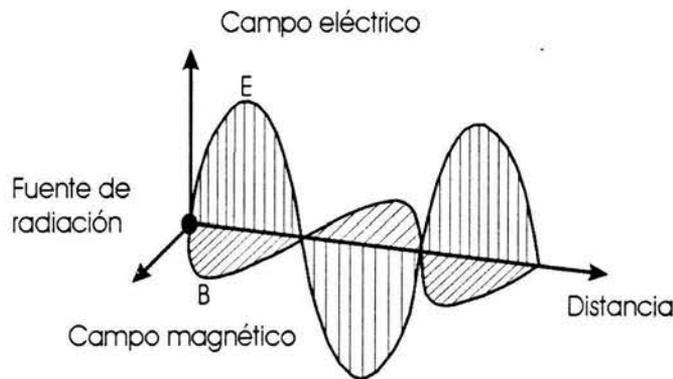


Fig I.2 Onda electromagnética (Tomada de Barrett and Curtis, 1992)

Debe observarse que todas las formas de radiación se producen (clásicamente) por cargas aceleradas. Desde el punto de vista de un modelo de onda, la longitud de onda (λ) de la energía resultante está determinada por el periodo de tiempo en que la partícula cargada es acelerada. La frecuencia (f) de la onda de radiación depende sobre todo del número de aceleraciones por segundo a la cual es sometida la partícula; la relación entre longitud de onda, frecuencia y velocidad de la luz (Cte. universal, c) está dada en la siguiente forma:

$$c = \lambda f \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (I.1)$$

Lo cual nos dice que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda y directamente proporcional a la velocidad de la onda.

Podemos relacionar esta ecuación (I.1) de la teoría de ondas, a una teoría particular a través

de la ecuación:

$$E = hf \quad (I.2)$$

Donde E es la energía de un fotón, h es una constante (llamada de Planck, quien la propuso en su teoría del quantum en 1900), y f la frecuencia de las ondas de radiación. Si multiplicamos $\lambda = c/f$ por h/h , y substituyendo E por hf , obtenemos una nueva expresión:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.3)$$

Esta formula nos dice que la energía de un fotón varía directamente con la frecuencia e inversamente con la longitud de onda de la radiación.

Probablemente la forma más familiar de la radiación electromagnética es la luz visible. Los rangos de radiación detectada por el ojo humano tienen una secuencia de componentes de color que van desde el color violeta al rojo. Este rango es llamado espectro visible, el cual no debe confundirse con el espectro electromagnético, del cual forma parte.

1.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (EEM)

Puesto que todas las ondas electromagnéticas viajan a través del vacío con una velocidad c , su frecuencia f y longitud de onda λ están relacionadas mediante la ecuación (I.1) se puede hacer una clasificación de la radiación electromagnética, la cual puede ser expresada de diferentes formas (Barrett and Curtis, 1992)

- *Por longitudes de onda:* el rango del espectro varía desde ondas cortas (rayos cósmicos) a ondas muy largas de radio.
- *Por la frecuencia:* como se mencionó, la frecuencia y las longitudes de onda están relacionadas inversamente. De este modo, todas las ondas electromagnéticas avanzan a la velocidad de la luz, por lo tanto, una onda larga de radiación corresponde a una baja frecuencia de propagación, mientras que una onda corta de radiación es caracterizada por una alta frecuencia, las unidades de medida son los hertz (Hz.) ciclos por segundo.
- *Energía de fotón:* de acuerdo con la ecuación (I.2) la energía de un fotón es directamente proporcional a la frecuencia, de este modo se confirma que a una longitud de onda larga se tiene una baja energía del fotón, mientras que a una longitud de onda corta de radiación se tiene una alta energía de fotón, esta energía es expresada en joules(J), o wattsegundos(Ws).

Las regiones del espectro electromagnético (Fig. I.3), pueden ser subdivididas según su longitud de onda en (Serway, 1997):

Rayos gamma: (10^{-10} m a 10^{-14} m): ondas electromagnéticas emitidas por los núcleos radiactivos y durante ciertas reacciones nucleares. Son altamente penetrantes y producen serios daños cuando son absorbidos por los tejidos de seres vivos.

Rayos X: (10 nm a 10^{-4} nm): la fuente más común de rayos X es la desaceleración de electrones de alta energía que bombardean a un blanco metálico. Los rayos X se usan como una

herramienta de diagnóstico en medicina y como tratamiento para ciertas formas de cáncer. Este tipo de rayos se usa en el estudio de la estructura cristalina, ya que sus longitudes de onda son comparables a las distancias de separación atómica en los sólidos.

Rayos Ultravioletas: (380 nm a 60 nm): la mayor parte de la luz ultravioleta proveniente del sol es absorbida por átomos de ozono en la atmósfera superior, o estratosfera.

Luz visible: (0.38 μm a 0.7 μm): la forma más familiar de ondas electromagnéticas es aquella parte del espectro electromagnético que el ojo puede detectar. La luz es producida por el reacomodo de electrones en átomos y moléculas.

Infrarrojo: (7×10^{-7} m a 1 mm): estas ondas son producidas por la vibración de moléculas por energía térmica y son absorbidas rápidamente por la mayor parte de los materiales. La energía infrarroja absorbida por una sustancia aparece como calor debido a que la energía los átomos del cuerpo, aumentan su movimiento vibratorio y rotacional, lo cual origina un aumento en la temperatura.

Microondas: (1 mm a 30 cm): son generadas por dispositivos electrónicos. Debido a su corta longitud de onda, son bastante adecuadas en los sistemas de radar utilizados en la navegación aérea y para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia.

Radio: es generado por dispositivos electrónicos, como los osciladores LC, y se usan en sistemas de comunicación de radio.

La región óptica más usada del EEM es la comprendida entre las longitudes de onda 0.3 a 15.0 μm , que es la radiación emitida por el sol y reflejada por los materiales en la superficie de la Tierra. La mayor parte de esta energía se encuentra entre las longitudes de onda 0.38 μm a 3.0 μm . Esta energía electromagnética se puede subdividir (Tabla I.2) en: región del visible de 0.38 μm a 0.70 μm , región del infrarrojo 0.70 a 3.0 μm (la cual a su vez se subdivide en infrarrojo cercano 0.70 μm a 13 μm , infrarrojo medio 1.3 μm a 3.0 μm e infrarrojo lejano ó infrarrojo térmico 7.0 a 15.0 μm).

Tabla I.2 Relación entre bandas y longitudes utilizadas en Percepción Remota.

REGIÓN	LONGITUD DE ONDA	AMPLITUD
ULTRAVIOLETA	UV Intermedio	0.280 a 0.350 μm
	UV Cercano	0.315 a 0.380 μm
VISIBLE	Violeta	0.380 a 0.446 μm
	Índigo	0.446 a 0.464 μm
	Azul	0.464 a 0.500 μm
	Verde	0.500 a 0.578 μm
	Amarillo	0.578 a 0.592 μm
	Naranja	0.592 a 0.620 μm
INFRARROJO	Rojo	0.620 a 0.700 μm
	Cercano	0.700 a 1.300 μm
	Medio	1.300 a 3.000 μm
MICROONDAS	Lejano	3.000 a 14.00 μm
		0.300 a 300.0cm

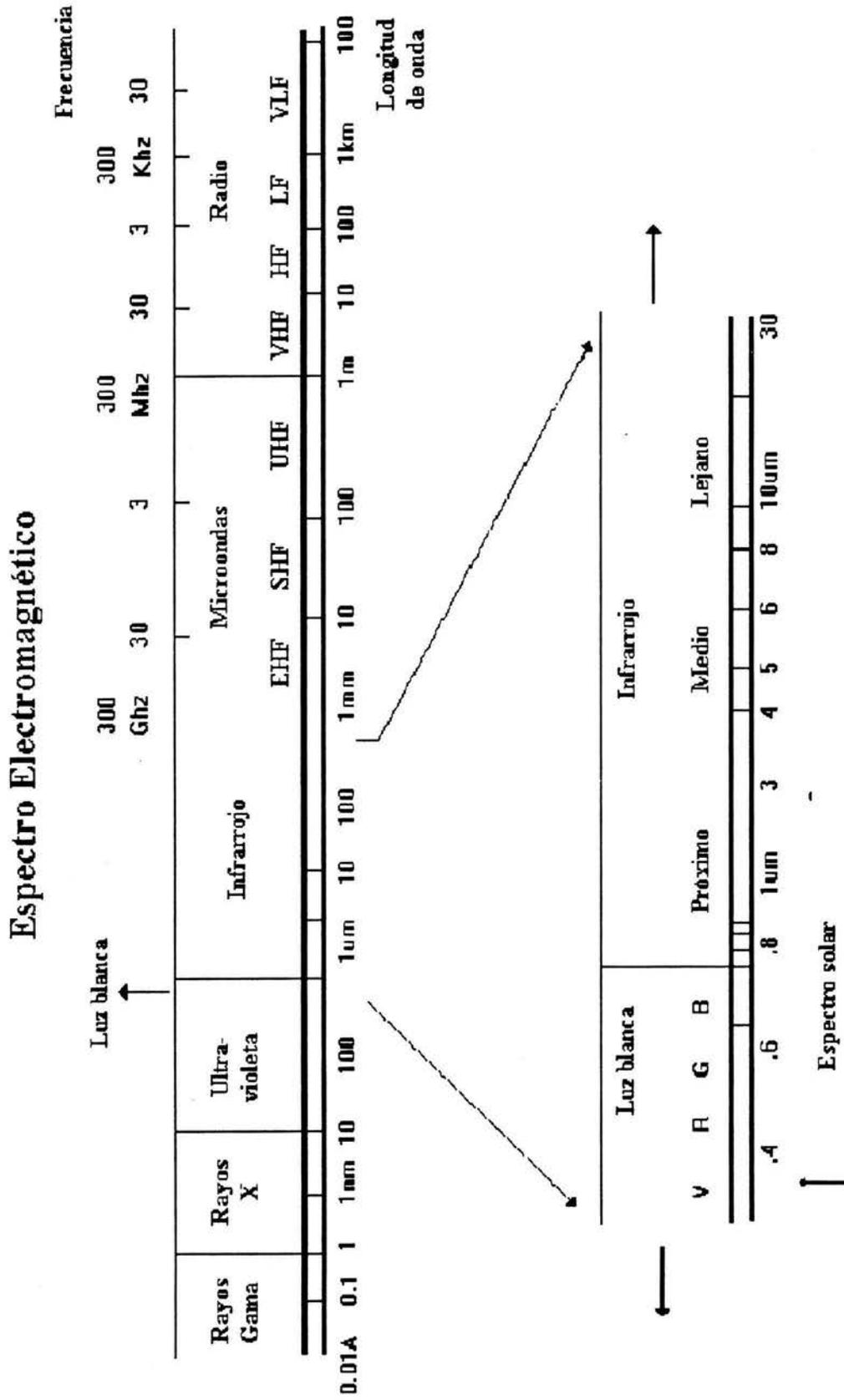


Fig. 1.3 Espectro Electromagnético (Tomada de Spring, 2002)

I.6 PROCESOS FÍSICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La energía que es transmitida por la fuente natural (sol) sufre una serie de transformaciones al viajar a través de los diversos medios (espacio, atmósfera), las cuales normalmente reducen su intensidad. La intensidad de energía que llega hasta los cuerpos, se denomina energía incidente. Al incidir sobre un cuerpo, esta energía puede ser absorbida, reflejada o transmitida (Fig. I.4). De esta manera, aplicando el principio de conservación de la energía se puede escribir la interacción de la energía como:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (I.4)$$

donde: E_I es la energía incidente, E_R energía reflejada, E_A energía absorbida y E_T energía transmitida (Fig. I.5). Todas las componentes de la ecuación (1.4) son función de la longitud de onda. La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y/o transmitido depende de las características de la superficie en la que incide la energía

Debido a que muchos sistemas de sensores remotos operan en regiones de longitudes de onda en las cuales predomina la energía reflejada, es generalmente útil pensar que el balance de energía puede ser expresado como:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)] \quad (I.5)$$

donde E_R es la energía reflejada, $E_I(\lambda)$ energía incidente, $E_T(\lambda)$ energía transmitida, $E_A(\lambda)$ energía absorbida.

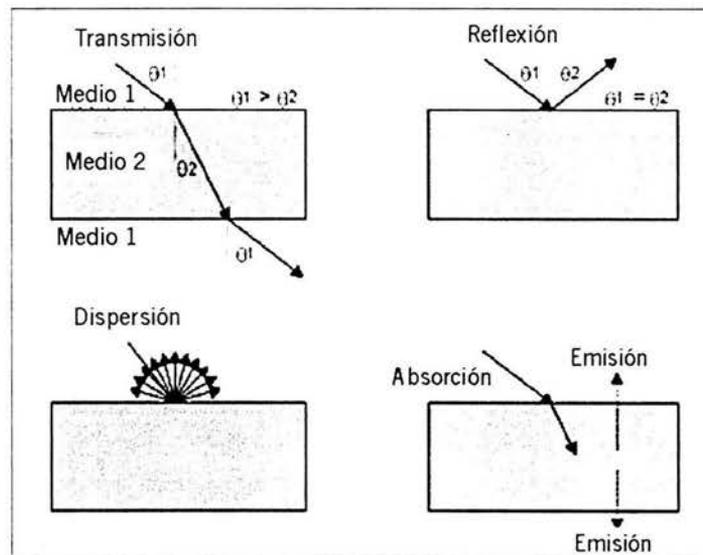


Fig. I.4 Efectos de la energía incidente en un cuerpo (Tomada de NASA, 2002)

La geometría con la cual un objeto refleja la energía es un factor importante de considerar, ya que está en función de la rugosidad del objeto. Se consideran reflectores especulares a las superficies planas, donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, y reflectores difusos (ó Lambertianos) a las superficies rugosas que reflejan la energía en todas direcciones. La mayor parte de las superficies de la Tierra no son reflectores especulares ni difusos, ya que cuentan

con ambas características.

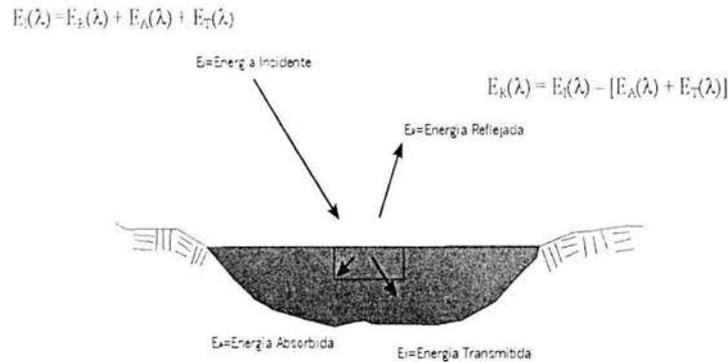


Fig. 1.5 Interacción básica entre la energía electromagnética y la superficie de la tierra (Tomada de Lillessand and Kieter, 1987)

Para los sensores remotos se tiene mayor interés en la medición de la reflectancia difusa. Las características de la reflectancia en la superficie de la tierra pueden ser cuantificadas mediante la medida de la porción de energía incidente que es reflejada. Esta es medida en una función de longitud de onda y es llamada reflectancia espectral $R(\lambda)$, la cual está definida matemáticamente de la siguiente manera:

$$R = \frac{E(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{\text{Energía} \cdot \text{reflejada} \cdot \text{de} \cdot \text{un} \cdot \text{objeto}(\lambda)}{\text{Energía} \cdot \text{incidente} \cdot \text{en} \cdot \text{el} \cdot \text{objeto}(\lambda)} \times 100 \quad (1.6)$$

donde R es expresada como un porcentaje

La gráfica de la reflectancia espectral de un objeto (Fig. 1.6) proporciona una visión de las características espectrales del objeto, con la cual podemos seleccionar las regiones de longitud de onda donde los sensores remotos pueden proporcionarnos información de interés útil.

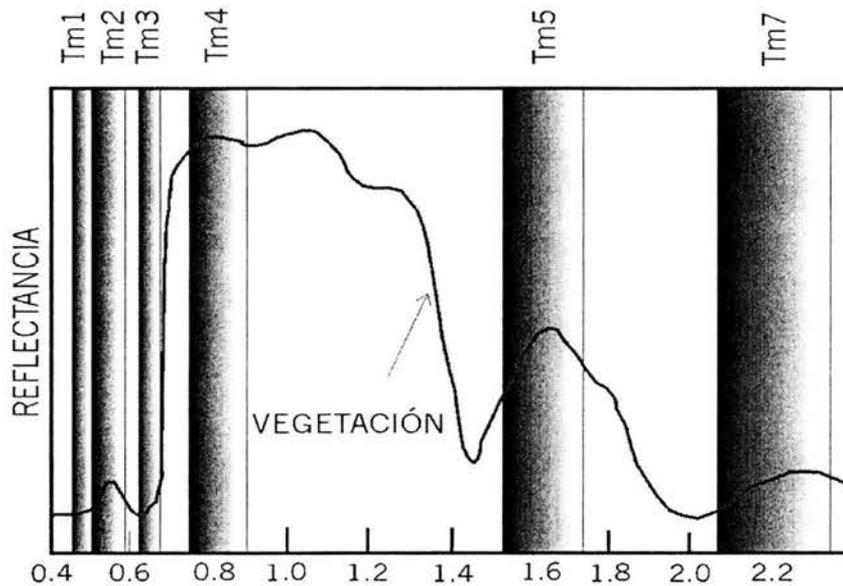


Fig. 1.6 Curva de reflectancia espectral para la vegetación (Tomada de Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998)

I.7 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN EN LA ATMÓSFERA

Al penetrar en la atmósfera la radiación solar experimenta ciertos efectos que repercuten en su intensidad a medida que atraviesa cada una de las capas que la conforman. De esta forma se pueden establecer dos efectos principales: la absorción atmosférica, que debido a las vibraciones atómicas y moleculares atenúa a la radiación, y la dispersión atmosférica, que amplifica la señal de la radiación en ciertas longitudes de onda.

I.7.1 ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando se trabaja con sensores remotos, se usan longitudes de onda que no se encuentran dentro de las bandas de absorción de los principales gases que constituyen la atmósfera, como lo son O₂, N₂, y en menor proporción vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y el ozono (O₃). La mayor parte de la luz ultravioleta es absorbida por el ozono, oxígeno y el nitrógeno, mientras que el vapor de agua y el bióxido de carbono absorben la luz infrarroja. La contribución más significativa a la absorción debida a moléculas de gases es la que representa el ozono. Esta contribución puede ser calculada y aunque es pequeña con relación a la dispersión de Rayleigh y aerosoles, debe ser incluida en cualquier cálculo de corrección atmosférica que se realice a una imagen de satélite.

I.7.2 VENTANAS ATMOSFÉRICAS

A la parte del espectro electromagnético donde los constituyentes atmosféricos tienen una alta transmisión se le llama ventana atmosférica. Las ventanas atmosféricas permiten al sensor medir las señales electromagnéticas que pasan a través de la atmósfera (Fig. I.7).

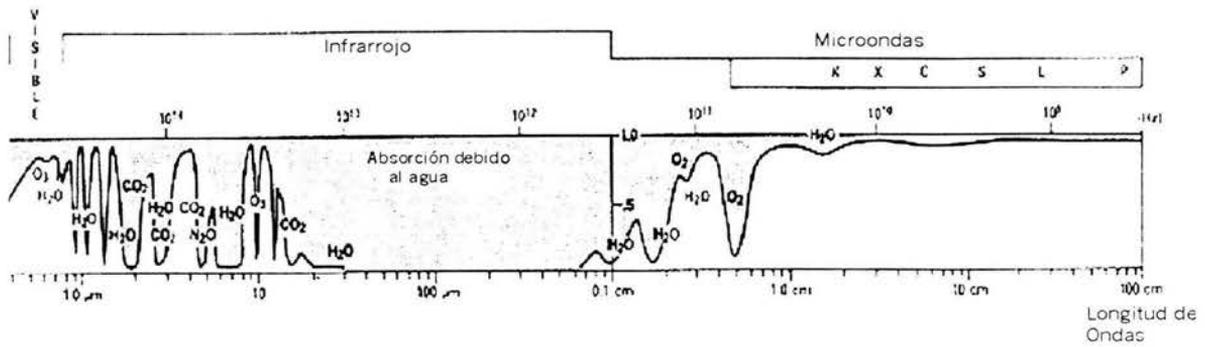


Fig. 1.7 Ventanas Atmosféricas (Tomada de NASA, 2002)

En la Tabla I.3 se describen la región del espectro y las características de absorción de los gases atmosféricos.

Tabla I.3 Longitudes de onda que corresponden a bandas de absorción por los gases atmosféricos (Szekielda,1988).

Longitud de onda	Absorción
0.003 a 0.03 µm	Completa absorción debido a la corta longitud de onda con relación al tamaño de partículas atmosféricas; alta probabilidad de interacción con la atmósfera
0.03 a 0.13 µm	N ₂ y O ₂ causan una completa absorción
0.13 a 0.22 µm	O ₂ causa casi una completa absorción
0.22 a 0.30 µm	O ₂ causa una fuerte absorción
0.30 a 0.40 µm	Dispersión de Rayleigh
0.40 a 1.0 µm	Buena transmisión; poca absorción en las bandas, excepto por el agua que afecta a la banda 0.9µm
1.0 a 20 µm	Mucha vibración y rotación molecular en toda la región por H ₂ O Y CO ₂ ; en la región de 1.06 y 1.27 µm debida al O ₂ ; región de ventana entre 8 a 14µm
24 a 1000µm	fuerte absorción principalmente por H ₂ O
1mm a 10cm	zona de ventanas atmosféricas
10cm	transmisión casi completa

1.7.3 DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Se pueden definir tres tipos de dispersión, las cuales pueden diferenciarse dependiendo del diámetro de las partículas existentes y las longitudes de onda incidentes.

Dispersión de Rayleigh: esta incluye mayormente moléculas de gas y otras partículas diminutas. Este tipo de dispersión ocurre cuando el diámetro de las moléculas de gas (d) es menor que el tamaño de la longitud de onda incidente ($d < \lambda$). La dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. $\frac{1}{\lambda^4}$.

La dispersión de Rayleigh a través de una sección está dada por la fórmula:

$$\sigma_{\lambda} = \frac{4\pi^2 NV^2 (n^2 - n_o^2)^2}{\lambda^4 (n^2 + n_o^2)^2} \quad (I.7)$$

donde V = volumen de dispersión de partículas.

N = número de moléculas en el aire por unidad de volumen (cm^3).

λ = longitud de onda.

n = índice refractivo de partículas.

n_0 = índice refractivo del medio.

El comportamiento de la dispersión de Rayleigh (λ^{-4}) significa que este mecanismo es muy importante en longitudes de onda cortas, pero llega a ser insignificante para longitudes de onda grandes.

Dispersión de aerosol: ocurre cuando los diámetros de las partículas atmosféricas son iguales a las longitudes de onda incidente $d = \lambda$. Este tipo de dispersión es principalmente provocada por el vapor de agua, cenizas, polvo y otras partículas de aerosol en la atmósfera.

la dispersión de aerosoles puede ser calculada mediante:

$$\sigma = 10^5 \pi \int_{a1}^{a2} N(a) K(a, n) a^2 da \quad (I.8)$$

σ = coeficiente de dispersión expresado en longitudes de onda km^{-1}

$N(a)$ = número de partículas en el intervalo dado

$K(a, n)$ = coeficiente de dispersión (a través de la sección)

a = radio de las partículas

n = índice de refracción de partículas

En la práctica es muy difícil calcular esta dispersión debido a la gran diversidad que existe de partículas y la concentración tan variable de cada una de ellas.

Dispersión no selectiva: Se presenta cuando el diámetro de las partículas es mucho más grande que la longitud de onda incidente $d > \lambda$ por ejemplo las gotas de agua comúnmente tienen un diámetro en el rango de 5 a 100 μm , con lo cual dispersan toda la región del visible.

I.8 TRANSMISIVIDAD ATMOSFÉRICA

La energía incidente además de sufrir una modificación por la absorción y dispersión atmosférica puede sufrir una reflexión en la atmósfera, especialmente cuando hay nubes presentes en ella. Después de que la energía solar ha sufrido estos fenómenos, sólo un aparte de ella llega a la superficie terrestre. Por consiguiente, la capacidad que tiene la atmósfera para dejar pasar la radiación solar incidente se denomina transmisividad atmosférica, la cual se define como la relación entre la radiación solar incidente sobre la superficie y la radiación solar externa.

En la ausencia de la atmósfera, la transmisividad de la energía solar a la tierra sería del 100%. Sin embargo, no toda la energía del sol llega a la superficie de la tierra debido a la absorción y dispersión. La transmisividad atmosférica T_0 puede ser calculada como

$$T_{\theta} = e^{-\tau \cos \theta} \quad (I.9)$$

donde τ es la consistencia óptica normal de la atmósfera y θ puede representar cualquier ángulo (Fig. I.8); T_{θ_0} es la capacidad de la atmósfera para transmitir el flujo radiante del sol al objeto, y T_{θ_s} es la capacidad de la atmósfera para transmitir el flujo radiante del objeto al sistema del sensor. La consistencia óptica de la atmósfera a ciertas longitudes de onda $\tau(\lambda)$ es igual a la suma de todos los coeficientes de atenuaciones. la dispersión de Rayleigh τ_m , dispersión de Mie τ_p así como también la absorción atmosférica selectiva τ_a .

$$\tau(\lambda) = \tau_m + \tau_p + \tau_a \quad (I.10)$$

donde: $\tau_a = \tau_{h_2o} + \tau_{o_2} + \tau_{o_3} + \tau_{co_2}$

De este modo se puede cuantificar la transmisividad atmosférica.

1.9 RADIACIÓN DETECTADA POR LOS SENSORES

En secciones anteriores se ha descrito la importancia del estudio de las interacciones y la interdependencia entre la fuente primaria de energía electromagnética y las ventanas atmosféricas. En esta sección estudiaremos la sensibilidad espectral de los sensores para detectar la energía.

Idealmente, el flujo radiante detectado en varias bandas del espectro electromagnético por el sistema de sensores remotos es una representación exacta del flujo radiante que realmente sale de los objetos de interés en la superficie de la tierra. Debido a la presencia de la atmósfera entre el terreno de interés y el sensor remoto, se tiene una distorsión en la colección de los datos. De tal forma, que la energía detectada por el sensor es diferente a la que fue reflejada o emitida por el terreno.

Para explicar la forma en la cual se realiza la adquisición de los datos por un sensor es necesario definir dos conceptos principales: la radiancia e irradiancia. La radiancia e irradiancia son dos conceptos íntimamente relacionados y complementarios. Definimos irradiancia como la suma del flujo solar directo incidente en la superficie de la Tierra por unidad de área en la superficie, y la radiancia como la forma en que éste flujo es reflejado ó irradiado. La radiación reflejada por el objeto de interés es captada en el campo de visión instantáneo (*IFOV Instantaneous Field of View*) del sensor. Aunado a esto, otra energía radiante puede entrar dentro del campo de visión proveniente de varios caminos descritos a continuación (Jensen, 1996) (Fig. I.8).

- 1) Energía que sigue una trayectoria fuente-objeto-sensor.
- 2) Energía que debido a la dispersión atmosférica cambia su trayectoria y es detectada por el sensor sin antes haber sido reflejada en la superficie de estudio.
- 3) Energía del sol que pasa por algún tipo de dispersión, además de absorción y re-emisión antes de la iluminación del área de estudio.
- 4) Energía que fue reflejada o dispersada por algún terreno cercano, tal como nieve, concreto, aceite, agua y/o vegetación dentro del campo instantáneo de visión (*IFOV Instantaneous Field of View*) del sensor. En este caso la energía realmente no ilumina el área de estudio.

- 5) Energía que fue reflejada por el terreno cercano dentro de la atmósfera y posteriormente fue dispersada ó reflejada sobre el área de estudio.

De este modo, para un intervalo espectral dado (λ_1 a λ_2) la irradiancia solar extendida en la superficie de la Tierra E_G , es una integración de muchas componentes.

$$E_G = \frac{1}{\pi} \int (RT_0 \cos\theta_0 + Ed\lambda)d\lambda (Wm^{-2}) \quad (I.11)$$

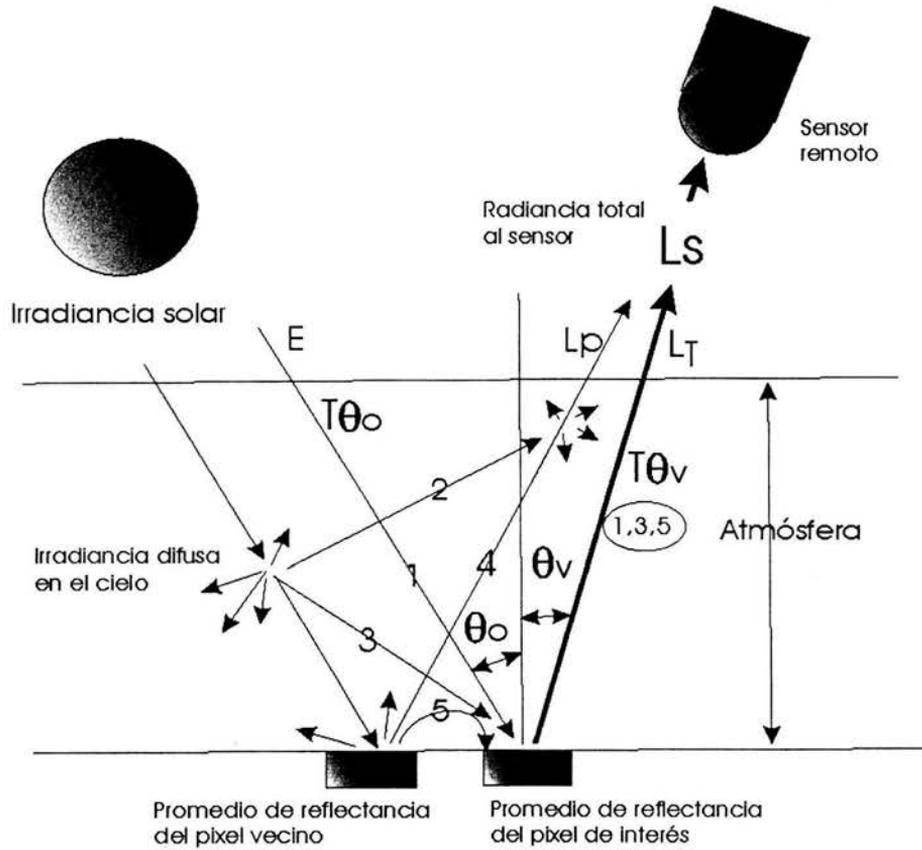


Fig. I.8 Radiación detectada por los sensores (Tomada de Jensen, 1996)

Sin embargo, sólo una pequeña cantidad de esa irradiancia es realmente reflejada por el terreno en la dirección del sensor. Si asumimos que la superficie de la Tierra es un reflector difuso, la suma total de radiancia de la superficie al sensor es:

$$E_G = \frac{1}{\pi} \int RT\theta_0 (E_0 \lambda T\theta_0 \cos\theta_0 + Ed\lambda)d\lambda (Wm^{-2}sr^{-1}) \quad (I.12)$$

La radiancia detectada por el sensor es diferente de la radiancia emitida por el objeto de interés hacia el sensor $L_s \neq L_T$. A este efecto se le llama trayectoria de la radiancia. El total de la radiancia grabada por el sensor llega a ser:

$$L_s = LT + L_p(Wm^{-2}sr^{-1}) \quad (I.13)$$

Estas situaciones influyen directamente en la cantidad de energía que recibe un punto en la superficie de la Tierra.

RESUMEN

En este capítulo se describen los principios básicos de la radiación electromagnética, con lo cual se puede obtener una visión de las características espectrales de un objeto de estudio, todo ello sirve para seleccionar las regiones de longitud de onda donde los sensores remotos pueden proporcionarnos información de interés útil, también se describieron los procesos de adquisición de datos obtenidos por los satélites y el principio fundamental de aplicación de la Percepción Remota, el cual recalca la condición que un tipo de cubierta de suelo es distinguible en términos de sus características de reflectancia emitida.

II PROGRAMA ESPACIAL LANDSAT

II.1 PROGRAMA LANDSAT

Para poder describir el programa *Landsat* es necesario realizar un poco de historia, sobre los programas que le anteceden.

En los inicios de la década de los sesenta el programa de satélites *Nimbus* fue instalado por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), con el propósito de desarrollar un sistema de observación capaz de proveer datos para investigaciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra y la Atmósfera. Los objetivos generales del programa fueron desarrollar:

- Sensores radiométricos y espectrómetros para tener mediciones de la atmósfera terrestre, con el afán de producir una gran base de datos meteorológicos.
- Evaluar nuevos sensores activos y pasivos para el sondeo de la atmósfera y mapeo de las características de su superficie.
- Nueva tecnología espacial.
- Impulsar nuevas técnicas para la exploración en otros planetas y sus atmósferas.

La serie del *Nimbus* comenzó con el lanzamiento del *Nimbus 1* en agosto de 1964, llevando tres sensores meteorológicos 1) el Advance Vidicon Camera System (*AVCS*) 2) el Automatic Picture Transmission (*APT*), y 3) el High-Resolution Infrared Radiometer (*HRIR*), en el transcurso de los años se fueron modificando dichos sensores en cada vuelo.

Posteriormente en octubre de 1978 fue puesto en órbita el último de estos satélites el *Nimbus 7*, perteneciente a la serie de satélites relacionados a la investigación de la atmósfera y de colección de datos atmosféricos.

La serie de satélites *Nimbus* proporcionó resultados útiles, que después fueron usados e incorporados dentro de la planeación del programa Earth Resource Technology Satellite (*ERTS*), tiempo después renombrado *Landsat*.

En tanto, para el año de 1967 la NASA, alentada por el U.S. Department of the Interior, inició el programa *ERTS*. Dicho programa fue resultado del desarrollo de satélites, cargando una variedad de sensores remotos, primordialmente para adquirir información sobre recursos naturales.

El satélite *ERTS-1* fue lanzado el 23 Julio de 1972, primer sistema experimental diseñado para probar el potencial de recolección de datos referentes a los recursos naturales (agricultura y recursos forestales, geología, hidrología, geografía, cartografía y meteorología). Esta familia de satélites es denominada *Landsat*, a partir del segundo lanzamiento. Con lo cual desde 1975 se ha constituido en el proyecto más fructífero de Percepción Remota desarrollado hasta el momento (Szekielda, 1988).

El primer satélite fue lanzado en el año de 1972. *Landsat 2* y *3* fueron lanzados en 1975 y 1978 respectivamente. Los tres primeros satélites *Landsat* tenían una forma de mariposa por la disposición de los paneles solares. Sus dimensiones eran de tres metros de altura por 1.5 metros de

diámetro, que se tornaban en 4 metros cuando extendían dichos paneles. El peso total del sistema se aproximaba a 960 kg, tenía una inclinación de 99° en su órbita con una altura aproximadamente de 919 km, circundando a la Tierra cada 103 minutos, con lo cual realizaba 14 órbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días y a la misma hora local (9:30 a 10:00 a.m. en el Ecuador) (Jensen, 1996).

Los siguientes satélites modificaron su fisonomía y sus características orbitales. La altura de vuelo se reduce a 705 km, aunque mejora el ciclo de recubrimiento a 16 días en ciertas latitudes. El *Landsat 4* fue lanzado con el sensor MultiSpectral Scanner (*MSS*) y uno nuevo llamado Thematic Mapper (*TM*), sensor que tiene una mejor resolución (30 m) y tres nuevas bandas para grabar información. En Marzo de 1984 fue puesto en servicio el *Landsat 5*, el cual actualmente está en servicio. Desafortunadamente el *Landsat 6* no tuvo éxito y cayó fuera de órbita el 5 de Octubre de 1993.

En abril de 1999 fue lanzado y puesto en funcionamiento un nuevo satélite de la familia *Landsat*, el cual llevaba a bordo el nuevo sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (*ETM+*) que incluye nuevas características que lo hace más versátil y eficiente. Entre las nuevas características que presenta este nuevo sensor se encuentra:

- una banda pancromática con resolución espacial de 15m
- una banda de IR térmico con una resolución espacial de 60 m.

En la Tabla II.1 se describen las principales características de los satélites de la familia *Landsat*.

Tabla II.1 Principales características de los satélites de la familia Landsat (INFOCARTO, 2002)

SISTEMA	Lanzado (Fuera de servicio)	SENSOR	RESOLUCION ESPACIAL (m)	ALTURA DE ORBITA (km)	RESOLUCIÓN TEMPORAL (días)
Landsat 1	7/23/72 (1/6/78)	RBV MSS	80 80	917	18
Landsat 2	1/22/75 (2/25/82)	RBV MSS	80 80	917	18
Landsat 3	3/5/78 (3/31/83)	RBV MSS	30 80	917	18
Landsat 4	7/16/82	MSS TM	80 30 120(IR) ¹	705	16
Landsat 5	3/1/84	MSS TM	80 30 120(IR)	705	16
Landsat 6	10/5/93 (10/5/93)	ETM	30 15(PAN) ² 60(IR)	705	16
Landsat 7	15/4/99	ETM	30 15(PAN) ² 60(IR) ¹	705	16

(1) Infrarrojo Térmico

(2) Pancromático

II.2 SENSORES LANDSAT

Como hemos visto la familia de satélites *Landsat* esta provista de diferentes sensores a continuación se describen a grandes rasgos las características que presenta cada uno.

II.2.1 LANDSAT MULTI-SPECTRAL SCANNER (MSS)

Los primeros *Landsat* incorporaron un equipo de barrido multiespectral denominado *MSS* (Multi-Spectral Scanner) y un conjunto de cámaras vidicon (RBV, Return Beam Vidicon). Los programas *Landsat 4* y *5* eliminan las cámaras y lo sustituyen por un sensor denominado Thematic Mapper (*TM*).

El sistema *MSS* es un equipo de barrido óptico-electrónico el cual cuenta con un doble reflector tipo telescopio, un espejo de barrido, filtros y detectores. Con estas componentes la forma de operar es el siguiente, el espejo móvil, oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria del satélite, el cual le permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por este componente óptico, se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten en una señal eléctrica. Esta a su vez, se transforma a un valor numérico, donde la información puede ser almacenada a bordo del satélite o transmitirse a una red de antenas receptoras (Jensen, 1996).

Los detectores convierten el flujo solar reflejado medido dentro del campo de visión instantáneo (*IFOV*, *Instantaneous Field of View*). Donde la señal de voltaje analógica registrada por cada detector es convertida a un valor digital, mediante un convertidor analógico-digital. Así los datos son contabilizados en un formato de 6 bits, permitiendo tener un rango de 64 diferentes tonalidades de grises.

El espejo barreador oscila a través de un desplazamiento de $\pm 5.78^\circ$ fuera del nadir. Este desplazamiento representa un campo de visión resultante de 11.56° el cual combinado con la altura orbital del satélite, le permite al sensor explorar una franja de terreno aproximadamente de 185 km, esta exploración la realiza el espejo barreador en dirección oeste-este al mismo tiempo que el satélite realiza la trayectoria de su órbita en dirección de norte a sur (Fig. II.1).

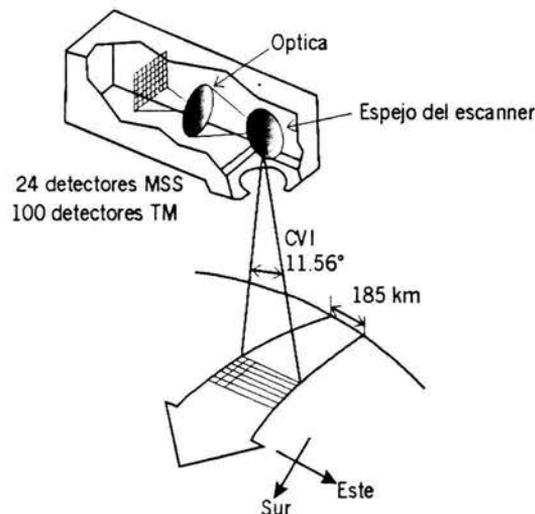


Fig. II.1 Componentes principales del sistema Landsat (Tomada de Jensen, 1996)

Con el objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor *MSS* registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiancia recibida por el sistema focal se transmite a un sistema óptico que la descompone en cuatro bandas y la envía a distintos detectores para ser registrado.

Los sensores del *MSS* codifican cuatro bandas para lo cual dispone de 24 detectores (6 por cada banda). De este modo los seis detectores para cada banda pueden coleccionar las señales en el espectro electromagnético de la siguiente manera: 0.5 a 0.6 μm (verde), 0.6 a 0.7 μm (rojo), 0.7 a 0.8 μm (infrarrojo cercano) y 0.8 a 1.1 μm (infrarrojo cercano) (Jensen, 1996).

De esta forma las bandas 1(verde) y 2 (rojo) del *MSS* son diseñadas para detectar aspectos antrópicos, como áreas urbanas o vías de comunicación, a la vez que proporcionan una información interesante sobre la calidad del agua. Las bandas 3 y 4 (infrarrojo cercano) del *MSS* son ideales para grabar los puntos máximos de la respuesta espectral de la vegetación y para detectar las interfaces de tierra agua.

El IFOV de cada detector para los programas *Landsat 1,2 y 3* que cuentan con el sensor *MSS* y proporciona las bandas del visible e infrarrojo cercano fue enmarcado en un elemento de resolución aproximadamente 79 x 79 m.

De aquí que la señal enviada por el equipo óptico a los detectores sea obtenida a partir de un muestreo en intervalos regulares de tiempo, de tal forma que el sensor graba un valor numérico para cada cierta distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor que se denomina píxel, así durante cada barrido, el voltaje producido por cada detector es hecho un muestreo cada 9.95 μs . Para un detector del sensor *MSS* aproximadamente colecciona 3300 muestras a lo largo de una línea de 185 km, de tal forma que el IFOV de 79 x 79 m llega a representar aproximadamente los 56 m en la superficie para cada muestra, dando como resultado el tamaño de 56 x 79 m para un píxel en la imagen *Landsat MSS*.

Una imagen adquirida por el sensor *MSS* comprende un paralelogramo de 185 X 178 km con un total de 2340 líneas y 3240 columnas. Cada píxel corresponde a una superficie real de 79m de lado, si bien a la transformación digital se le asigna un formato 56 X 79 m lo que explica la disimetría final entre líneas y columnas en la imagen.

Las imágenes *Landsat MSS* proporcionan una capacidad sin precedente para observar grandes áreas geográficas revisando una sola imagen. Por ejemplo aproximadamente se necesitan 5000 fotografías aéreas de una escala 1:15000 para cubrir el área que abarca una imagen *Landsat MSS* (Jensen, 1996)

II.2.2 LANDSAT THEMATIC MAPPER (TM)

Este sensor fue puesto en funcionamiento el 16 de Julio de 1982 (*Landsat 4*) y el 1 de Marzo de 1984 (*Landsat 5*). Su nueva órbita de 16 días y altura de 705 km mejoran la resolución que proporcionaba el sensor *MSS*.

El sensor *TM* frente al *MSS* aumenta el número de detectores de 24 a 100, a la vez que reduce el IFOV, se aumenta los niveles de codificación y se realiza el barrido en dos direcciones, Todo ello permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas y de 6 a 8 bits respectivamente. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo en la banda térmica que registra una menor resolución y solo requiere de cuatro detectores. Con lo cual

los detectores pueden codificar la información en un formato de 8 bits por banda logrando una variedad de 256 diferentes tonos de grises (Jensen, 1996).

El sensor *TM* es un sistema sensor de barrido multi-espectral que permite grabar la energía en las regiones del espectro del visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo térmico. Las cuales tienen una resolución espacial de 30 X 30 m para seis de las siete bandas. La banda 6 infrarrojo térmico tiene una resolución espacial de 120 X 120 m.

Características de las bandas espectrales del sensor Thematic Mapper (TM) (Jensen, 1996).

TM1: 0.45 a 0.52 μm (azul) Proporciona una importante penetración en los cuerpos de agua, también para el análisis de uso de suelos y características de la vegetación. Las longitudes de onda por debajo de los 0.45 μm son substancialmente influenciadas por la dispersión y la absorción atmosférica.

TM2: 0.52 a 0.60 μm (verde) diseñada para discriminar a la vegetación saludable.

TM3: 0.63 a 0.69 μm (rojo) Esta es la banda de absorción de la clorofila de la vegetación sana y representa uno de las más importantes bandas para la discriminación de la vegetación. Es también útil para el mapeo litológico y de suelos. Esta banda puede exhibir más contraste que las bandas 1 y 2 porque se reducen los efectos de la dispersión atmosférica.

TM4: 0.76-0.90 μm (infrarrojo cercano) Útil para la determinación de los tipos de vegetación, contenido de biomasa, para delinear cuerpos de agua y para la discriminación de humedad del suelo.

TM5: 1.55 a 1.75 μm (infrarrojo medio). Esta banda es sensible a la cantidad de agua que hay en las plantas. Tal información es útil en estudios de aridez de campos de cultivo y en estudios para la identificación del vigor de las plantas. Además es una de las pocas bandas que puede ser utilizada para la discriminación entre nubes, nieve y hielo, tan importantes en las investigaciones hidrológicas.

TM6: 10.4 a 12.5 μm (infrarrojo térmico). Esta banda mide la cantidad de flujo radiante infrarrojo emitido por las superficies. Son útil para la localización de actividad geotérmica, clasificación de la vegetación, estudios de humedad de suelos.

TM7: 2.08 a 2.35 μm (infrarrojo medio). Esta es una banda importante para la discriminación de formaciones de rocas geológicas. Ha mostrado una efectividad parcial en la identificación de zonas de alteraciones de rocas hidrotermales.

II.2.3 LANDSAT ENHANCED THEMATIC MAPPER (ETM+)

Fue puesto en servicio desde el año de 1993 (*Landsat 6*) pero desafortunadamente nunca pudo operar, esto fue posible hasta la puesta en órbita del *Landsat 7* en el año de 1999. Este sensor *ETM+* cuenta con las mismas características del sensor *TM* con la diferencia que es capaz de proporcionar una banda pancromática con una resolución espacial de 15m y también se mejoró la resolución espacial en la banda del infrarrojo térmico llevándola de 120m a 60m.

II.3 RESOLUCIÓN ESPACIAL

Es el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen (Fig. II.2). En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen diferenciados y separados en la fotografía (Jensen, 1996).

En los sensores ópticos-electrónicos se utiliza el concepto de campo de visión instantáneo (*IFOV*), que se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado. No obstante, se suele utilizar la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura de vuelo y la velocidad de exploración del sensor. Esa distancia corresponde al tamaño de la unidad mínima de información en la imagen, que se denomina píxel (picture elemental).

La resolución espacial de un sensor óptico-electrónico depende de varios factores, como son: la altura orbital, velocidad de exploración y número de detectores.

La resolución espacial está en relación estrecha con la escala de trabajo final obtenida en la interpretación, cuanto menor sea el tamaño del píxel, menor será la probabilidad de que esté compuesto de dos o más cubiertas de suelo. Un píxel mixto, viene definido por una señal intermedia a la respuesta de las distintas cubiertas que lo componen, en consecuencia puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultará notablemente su identificación correcta.

II.4 RESOLUCIÓN ESPECTRAL

Indica el número y el ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor (Jensen, 1996) (Fig. II.2). Se puede afirmar que un sensor es tanto más idóneo cuando mayor sea el número de bandas que proporciona, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, ya que bandas muy amplias suponen el registro de valores promedio con lo cual se puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

Los sistemas de radar y fotográficos tienen una menor resolución espectral, mientras que los sensores óptico-electrónicos ofrecen un amplio rango de bandas.

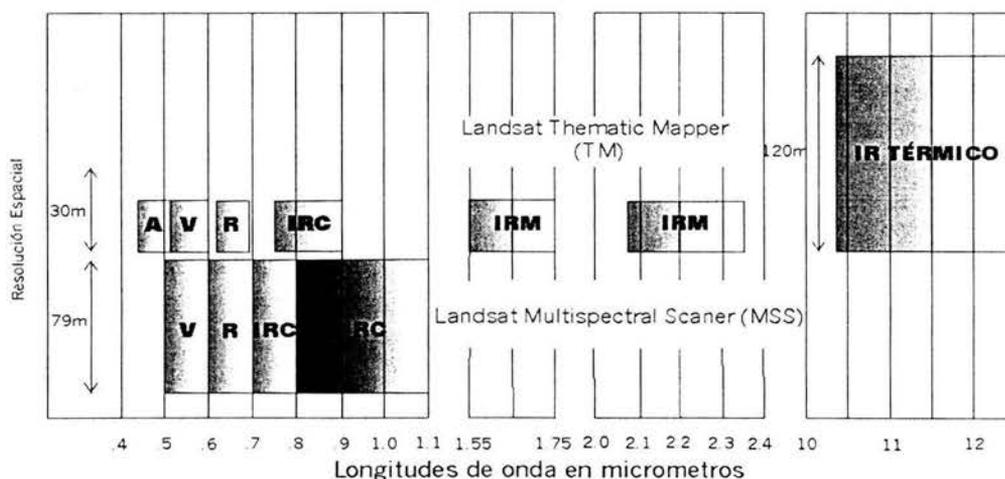


Fig II.2 Resolución espacial y espectral para los sensores MSS Y TM (Tomada de Jensen, 1996)

II.5 RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

Es la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe el sensor (Jensen, 1996). En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogidos en el film. Para los óptico-electrónicos, la imagen usualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número máximo de niveles digitales de la imagen, suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor.

II.6 RESOLUCIÓN TEMPORAL

Referente al periodo que tiene el sensor para adquirir imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Jensen, 1996). El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación), así como el diseño del sensor principalmente del ángulo de observación y de abertura. En la Tabla II.2 se describen las principales características de los sensores en la familia de satélites *Landsat*.

Tabla II.2 Principales características de los sensores del Landsat (INFOCARTO, 2002).

SATÉLITE	SENSOR	RESOLUCIÓN			
		ESPACIAL	ESPECTRAL		TEMPORAL
			BANDA (micras)	REGIÓN (EEM)	
LANDSAT	MULTI-SPECTRAL SCANNER (MSS)	56 x 79 m	1) 0.5-0.6 2) 0.6 - 0.7 3) 0.7 - 0.8 4) 0.8 - 1.1	Verde Rojo Infrarrojo Infrarrojo	18 días
	THEMATIC MAPPER (TM)	- Bandas: 1 a 5 y 7 30 x 30 m - Banda 6 120 x 120 m	1) 0.45 - 0.52 2) 0.52 - 0.60 3) 0.63 - 0.69 4) 0.76 - 0.90 5) 1.55 - 1.75 6) 10.40 - 12.50 7) 2.08 - 2.35	Azul Verde Rojo IR cercano IR medio IR térmico IR medio	16 días
	ENHANCED THEMATIC MAPPER (ETM+)	- Bandas: 1 a 5 y 7 30 x 30 m - Banda 6 60 x 60 m -Pancromático 15 m	1) 0.45 - 0.515 2) 0.525 - 0.605 3) 0.63 - 0.69 4) 0.75 - 0.90 5) 1.55 - 1.75 6) 10.40 - 12.50 7) 2.09 - 2.35 Pan 0.52 - 0.90	Azul Verde Rojo IR cercano IR medio IR térmico IR medio	16 días

Por casi 25 años el programa *Landsat* ha proporcionado datos de alta resolución espacial de la superficie de la tierra para una amplia variedad de usos y para satisfacer diversas necesidades de negocios, ciencia, educación, gubernamentales y de seguridad nacional.

RESUMEN

En este capítulo se describió la historia del programa Landsat desde sus orígenes con el programa espacial (*ERTS*) hasta la fecha actual, así como también se describieron los diferentes tipos de sensores y las características que los diferencian a cada uno, como son la resolución espacial (el objeto más pequeño que puede ser distinguido en la imagen), resolución espectral (indica el número y ancho de la banda) resolución radiométrica y resolución temporal (indica el tiempo que tarda el sensor en adquirir una imagen de la misma zona), estas son las principales características que se deben considerar poder realizar trabajos en Percepción Remota.

III MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

III.1 CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

El principal problema que implica la corrección atmosférica lo representa la variabilidad en que se presenta la dispersión atmosférica en la imagen, ya que determinadas zonas pueden ser más afectadas que otras, debido a que la dispersión está en función de la presencia diversa de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es dependiente de la longitud de onda y varía entre cada imagen haciendo difícil de predecir.

Es preciso realizar al menos una estimación del efecto atmosférico cuando:

- Se pretende realizar combinaciones lineales entre bandas.
- Se intente establecer modelos en relación de los números digitales (DN) con determinados parámetros físicos.
- Se realizan estudios multi-temporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Así, dependiendo de la aplicación, la corrección atmosférica puede ser absoluta, donde un número digital es convertido a una superficie de reflectancia o relativa, donde los mismos valores de números digitales en imágenes corregidas representan la misma reflectancia, independientemente de cual valor pueda ser la reflectancia real de la superficie de la Tierra (Chavez and Mackinnon, 1994).

El algoritmo Dark Object Subtraction DOS (Sustracción de Objetos Oscuros) es quizás la más simple y la corrección atmosférica más ampliamente usada para aplicaciones de clasificación y cambios de detección. Este algoritmo supone la existencia de objetos oscuros (con valores de cero ó superficies de reflectancia pequeñas). El valor mínimo del número digital (ND) en el histograma de la escena es atribuido a los efectos de la atmósfera y es sustraída para todos los píxeles (Chavez, 1989). Algoritmos más sofisticados derivan propiedades ópticas atmosféricas de objetos oscuros en la imagen y corrigen la imagen con la información obtenida.

La corrección atmosférica relativa está basada en la suposición de una relación lineal entre las imágenes a través del tiempo. La relación lineal puede ser determinada por medidas radiométricas sobre rasgos pseudo-invariantes en la imagen, los cuales son objetos espacialmente bien definidos y estables espectral y radiométricamente.

En ciertas circunstancias, la calibración de la imagen en unidades de radiancia requiere de un conocimiento a priori para realizar la clasificación y la detección del cambio usando imágenes multi-temporales (Duggin and Robinove, 1990). El efecto de la atmósfera puede impedir la interpretación apropiada de las imágenes si no es tomada en cuenta. Si tal corrección es necesaria o innecesaria, depende de la información que se deseé obtener y los métodos analíticos usados para extraer la información, para lo cual al escoger un algoritmo para la corrección atmosférica se debe tomar en cuenta el sensor remoto y los datos atmosféricos disponibles.

Para otras aplicaciones en las cuales no se involucra la clasificación y la detección de cambios, las correcciones atmosféricas son innecesarias. Un ejemplo es la clasificación de la imagen con el algoritmo de máxima probabilidad usando una sola imagen. En tanto que las áreas de entrenamiento de la imagen que es clasificada sean de la misma escala relativa (corregida o no corregida), la corrección atmosférica tiene solamente un pequeño efecto en la exactitud de la clasificación (Fraser *et al.*, 1977). Para los datos del Landsat TM el efecto atmosférico dominante es la dispersión, la cual modifica la señal en ciertas longitudes de onda principalmente en la banda del azul, mientras que los efectos de la absorción son generalmente descuidados debido a que las bandas del TM fueron seleccionadas para evitar tal efecto de absorción. Así, la corrección atmosférica más sencilla para una imagen es generalmente equivalente a sustraer una constante de todos los píxeles en una banda espectral. La sustracción de una constante en una banda es equivalente a trasladar el origen del conjunto de datos lo más cercano a cero, lo cual no tiene efectos en la matriz de varianza-covarianza para las clases de interés, de esta manera la sustracción de objetos oscuros para una sola imagen no tiene efectos en los resultados de la clasificación.

La naturaleza innecesaria de la corrección atmosférica en la clasificación con una sola imagen puede ser extendida para una posterior clasificación en una detección de cambio (Singh, 1989) donde imágenes múltiples son clasificadas individualmente y los mapas resultantes son comparados para identificar los cambios.

Similarmente, las correcciones atmosféricas son también innecesarias para la detección de cambios con base en la clasificación de composiciones múltiples de imágenes, en las cuales los datos de las imágenes son rectificadas y ordenados en un solo conjunto de datos, y entonces clasificados como si fuera una sola imagen. Así, la corrección atmosférica es innecesaria cuando se tienen áreas amplias de entrenamiento de la imagen que está siendo clasificada.

La diferenciación de la imagen es otra técnica comúnmente utilizada para la detección del cambio, (Singh, 1989) en la cual la no-correlación registrada en los datos imágenes de las es sustraída pixel por pixel. Así las fronteras entre los cambios y los píxeles estables son identificadas por la diferencia de la imagen. Si las imágenes son ó no corregidas por efectos atmosféricos se obtienen diferencias en las imágenes como en las ecuaciones III.1 y III.2.

$$D'_{ijk} = (DN_{ijk}(1) - C - (DN_{ijk}(2) - A_k(2))) \quad (III.1)$$

$$D_{ijk} = (DN_{ijk}(1) - DN_{ijk}(2) = -DN'_{ijk} + C) \quad (III.2)$$

donde DN'_{ijk} y DN_{ijk} son las diferencias en los píxeles, con y sin corrección atmosférica respectivamente. $DN_{ijk}(1)$ y $DN_{ijk}(2)$ son los DNs (niveles digitales) (i,j) de datos 1 y 2 por canal k. $A_k(1)$ y $A_k(2)$ son los efectos aditivos atmosféricos de banda k por datos 1 y 2. La constante C es la diferencia en efectos atmosféricos aditivos entre dos datos. $A_k(1) - A_k(2)$. El efecto de corrección atmosférica es equivalente a trasladar los valores límite C unidades en la diferencia del histograma de la imagen. De hecho los límites generalmente no son conocidos *a priori*, y tienen que ser encontrados empíricamente (Jensen, 1996). En tales circunstancias, las correcciones atmosféricas pueden ser omitidas cuando se usa la diferenciación de imágenes para la detección del cambio. Sin embargo para los algoritmos de cambio de detección que suponen un promedio de cero para las clases estables en la diferenciación de imágenes, la normalización radiométrica se necesita ser aplicada antes de tomar la diferencia.

En contraste, es necesario corregir los efectos atmosféricos antes de la clasificación y cambio de detección en otras situaciones. El algoritmo Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, índice de vegetación de la diferencia normalizada) es por lo general usada para monitorear

la vegetación dinámica (Michener and Houhoulis, 1997). El NDVI para imágenes Landsat TM se calcula como:

$$\text{NDVI} = (\text{TM4}-\text{TM3})/(\text{TM4}+\text{TM3}) \quad (\text{III.3})$$

Considerando los efectos atmosféricos, la ecuación se escribe:

$$\text{NDVI} = (\text{TM4}-\text{TM3})-(\text{A}_4-\text{A}_3)/(\text{TM4}+\text{TM3})-(\text{A}_4-\text{A}_3) \quad (\text{III.4})$$

Donde A3 y A4 son los efectos atmosféricos aditivos para TM3 y TM4 respectivamente. La ecuación indica que los efectos atmosféricos contaminan a las señales de NDVI y la modificación es no lineal. De igual forma el simple cociente de índice de vegetación (TM4/TM3 para datos de Landsat TM) esta contaminada por los efectos atmosféricos.

Es posible usar un modelo atmosférico para corregir los datos del sensor remoto, el cual es calculado usando datos como el año de la imagen, altitud, latitud y longitud del área de estudio. Esta aproximación puede ser útil cuando la atenuación atmosférica es relativamente pequeña comparada con las señales en el terreno.

El uso de un modelo, en conjunto con medidas atmosféricas in situ adquiridas al mismo tiempo de la adquisición de los datos es mucho mejor. Algunas veces los datos in situ pueden ser proporcionados por otros instrumentos de sondeo atmosférico que se encuentran a bordo de la plataforma del sensor. El modelo atmosférico puede estar muy bien afinado usando las condiciones de información locales.

III.1.1 ALGORITMO DARK OBJECT SUBTRACTION (DOS)

El procedimiento para eliminar la dispersión atmosférica, está basado en una regresión entre bandas. Partiendo de delimitar en la imagen de interés zonas de baja radiancia (áreas de aguas claras y profundas) para obtener los niveles digitales de los píxeles incluidos en esas áreas. A partir de estos valores, se calcula una regresión entre las bandas que presentan una mayor dispersión (TM1, TM2, TM3 y TM4 para el caso de imágenes del sensor *TM*) y una de ellas donde la dispersión sea menos intensa (típicamente la banda del infrarrojo medio, TM7). Esta recta de regresión debería pasar a través del origen del sistema de coordenadas formado por las dos bandas. En caso contrario se supone que el desplazamiento de la recta es debido a la dispersión, por lo que basta con conocer el punto en el que ésta corta al eje de la banda a corregir (ordenada al origen), para sustraer este valor a todos los niveles digitales de dicha banda.

III.1.2 ALGORITMO DE NORMALIZACIÓN DE UNA IMAGEN

Este simple método está basado primariamente en el hecho de que los datos del infrarrojo (>0.7µm) están ampliamente libres de los efectos de dispersión atmosférica, puesto que la región del visible (0.4 a 0.7µm) es la que está fuertemente influenciada por estos efectos. Normalmente los datos reunidos en las longitudes de onda correspondientes al visible (bandas TM1, TM2, TM3) tienen un valor mínimo muy alto, el cual está asociado a la dispersión atmosférica en esas longitudes de onda.

Contrariamente, la absorción atmosférica sustrae la brillantez de los datos grabados en intervalos de longitud de onda más grandes (bandas TM4, TM5, y TM7). Como se muestra en el

capítulo anterior la dispersión de Rayleigh es la más común y la que afecta principalmente las longitudes de onda más cortas, lo que confirma que el valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmósfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre.

En consecuencia, una corrección atmosférica sencilla consiste en restar los valores mínimos de cada banda, situando el origen del histograma en cero (Jensen 1996).

salida $BV_{ij,k}' = BV_{ij,k} - \text{el valor mínimo de baja frecuencia}$ (III.5)

donde

$BV_{ij,k}$ = es el valor inicial del píxel en la línea i, columna j, de la banda k
 $BV_{ij,k}'$ = al valor del píxel ajustado en la misma banda.

III.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CLASES

Las imágenes de Percepción Remota son una representación espacial en dos dimensiones de la interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra. Esta energía está expresada como valores de brillantez que son representados en tonos de gris. Puesto que cada uno de los píxeles que componen la imagen está representado por su valor de brillantez, se puede construir una gráfica de la frecuencia de ocurrencia de cada valor de brillantez disponible (histograma). El rango de valores de brillantez se presenta en las abscisas, mientras que la frecuencia de ocurrencia de cada uno de estos valores en la ordenada.

La información proporcionada por el sensor puede ser discriminada mediante el análisis del contraste digital de cada banda. La idea del contraste digital puede ilustrarse como un símil fotográfico. Una fotografía aparece con poco contraste, cuando no existe una gran diferencia entre sus tonos más claros y más oscuros. De la misma forma, podemos definir digitalmente el contraste por relación a los números digitales máximos y mínimos de una imagen asociados a los valores de los histogramas.

Los valores máximo y mínimo, el rango y la desviación estándar, encontrados en el análisis del histograma son parámetros que pueden dar elementos para juzgar la necesidad de expandir o comprimir el contraste, en función de las capacidades de visualización que se requieran.

Los cultivos de riego suelen ofrecer una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos, por tanto ambas cubiertas están formadas por especies vegetales similares. Sin embargo, el significado temático es claramente distinto. En consecuencia para interpretar los tonos que ofrece la imagen debe tenerse en cuenta el comportamiento espectral de las distintas cubiertas de interés.

Como un ejemplo tenemos que el color verde de la vegetación se debe a la clorofila, la cual absorbe el rango del espectro visible al azul y al rojo, mientras que en el rango del verde en el espectro visible se encuentra un máximo local de reflexión. Las hojas presentan una alta reflexión en la región del infrarrojo cercano llamada meseta que es característica de los tejidos sanos de las hojas. La pendiente pronunciada en la curva entre el rasgo de absorción de la clorofila en $0.68 \mu\text{m}$ y la meseta del infrarrojo es llamada límite rojo y se relaciona con las concentraciones de clorofila en las hojas. Las características de absorción de la vegetación son observadas entre los $1.4 \mu\text{m}$ y $1.9 \mu\text{m}$ los cuales están relacionados con el contenido de agua.

III.2.1 COMPOSICIONES A COLOR

Muchas técnicas han sido aplicadas en los datos proporcionados por los sensores remotos para la identificación de los patrones de usos de suelos, de modo que se ha encontrado que las composiciones de falso color (*CFC*) de las imágenes y los cocientes de las imágenes proporcionan una información muy útil para el mapeo de los cambios de usos de suelo, (Prakash and Gupta 1998).

A partir de la información multi-espectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar uno de los tres colores primarios (azul, verde y rojo) a una banda distinta de la imagen seleccionada con el criterio y el orden que se estime más eficiente para resaltar la reflectancia de los materiales seleccionados (Fig. III.1). El proceso permite visualizar simultáneamente tres bandas de distintas regiones del espectro electromagnético, lo que facilita la interpretación visual de algunas cubiertas.

Entre las múltiples combinaciones de color que se han empleado en el análisis visual, la más destacada es sin duda la denominada composición de color infrarrojo. Donde los colores (cañones del monitor) azul, verde y rojo se aplican la banda verde (TM2; MSS1), rojo (TM3; MSS2) e infrarrojo cercano (TM4; MSS4) respectivamente, ya que desde el inicio de la serie del programa Landsat los sensores *MSS* sólo permitían esta composición debido a que no podía adquirir información en otras bandas del espectro. Esto es también el caso de los sensores instalados en los satélites SPOT por lo cual sigue siendo la composición multi-banda más frecuente.

Cuando se comenzaron a adquirir imágenes del sensor *TM*, se abrió la posibilidad de diseñar nuevas composiciones. La inclusión de una banda en el azul permite al sensor *TM* obtener composiciones de color natural (*CCN*), asignando las bandas TM1, TM2 y TM3 a los colores azul, verde y rojo respectivamente (Tabla III.1).

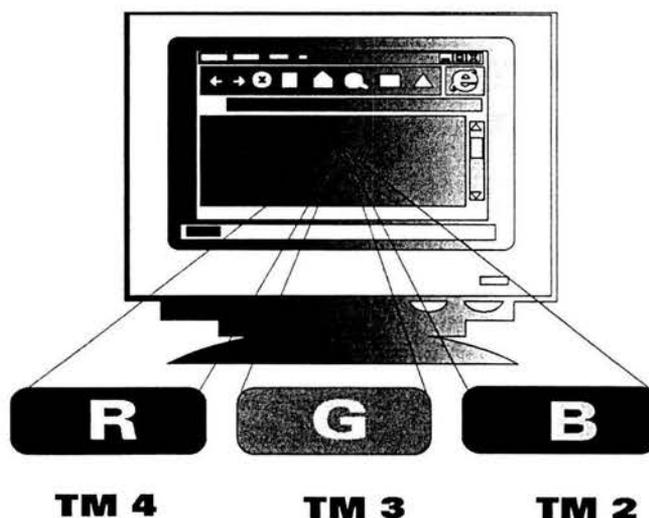


Fig.III.1 Composición en falso color

Otras composiciones a color tienen por objetivo la utilización de información de las tres regiones principales del espectro electromagnético que pueden grabar los sensores *TM*, (Kwarteng y

Chavez, 1998). De esta forma la *CFC* que presuntamente puede discriminar diferentes cubiertas debe considerar las respuestas espectrales que tienen ciertos materiales o cubiertas de suelos que se pretendan estudiar, para formar una *CFC* con esas características se toma en cuenta una banda en el visible (TM1, TM2 ó TM3) en el infrarrojo cercano (TM4) y en el infrarrojo medio (TM5 ó TM7).

Estudios realizados con imágenes Landsat han demostrado que una de las mejores combinaciones de falso color para discriminar los rasgos más característicos de la vegetación puede ser las bandas TM3, TM4 TM5 (Luque S.S. 2000). Mientras que para trabajar con imágenes del sensor *MSS* Benson y DeGloria (1985) se encontró que las bandas TM4, TM3 y TM2 tienen aproximadamente la misma sensibilidad espectral que las bandas 4, 2 y 1 del sensor *MSS*; De esta forma se tiene que las bandas del infrarrojo (*MSS*3, *MSS*4; TM3, TM4, TM5) fueron las más adecuadas para mostrar las características espectrales de la vegetación (Luque, 2000).

Tabla III.1. Composiciones estándar que se generan con los sensores *MSS*, TM y ETM.

Despliegue de color en el monitor	Composición de color natural (CCN)	Composición de color infrarrojo (CIR)	Composición a falso color (CFC)
Rojo	TM 3; ETM3	TM4; ETM4; MSS4	TM4; ETM4
Verde	TM 2; ETM2	TM3; ETM3; MSS2	TM5; ETM5
Azul	TM 1; ETM1	TM2; ETM2; MSS1	TM3; ETM3

Independientemente de las bandas que se incluyan en una composición, es conveniente considerar algunos aspectos sobre el proceso que permite obtener esas combinaciones en color. Una composición en color puede conseguirse de acuerdo a dos procesos, denominados aditivo y sustractivo. En el proceso aditivo, cualquier color se obtiene por la suma de los tres colores elementales: azul, verde y rojo. La suma de tres colores primarios permite lograr un color complementario: azul + verde = cian; azul + rojo = magenta y verde + rojo = amarillo, mientras que la suma de los tres proporciona el blanco. Por el contrario, el proceso sustractivo se basa en la absorción de la luz que ejercen los colores complementarios: el cian absorbe la luz roja, el magenta absorbe el verde y el amarillo el azul. Los tres en combinación suponen la formación de tonalidades de grises (Fig. III.2).

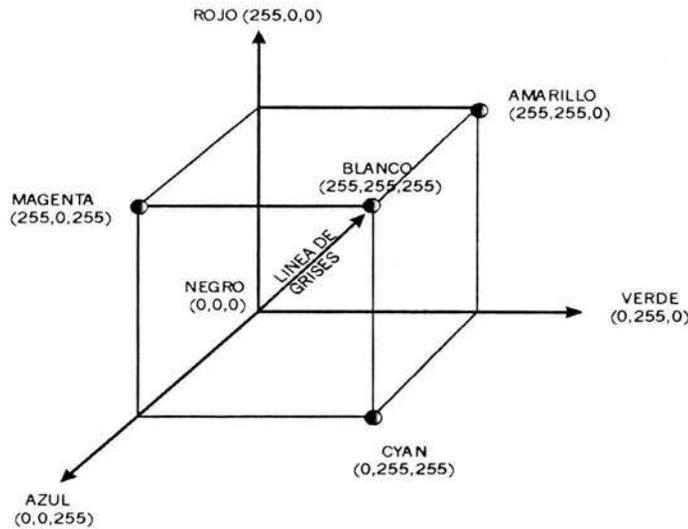


Fig. III.2 Sistema de coordenadas RGB (Tomada de Jensen, 1996)

II.2.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)

Esta técnica muestra la transformación para relacionar la respuesta espectral de la biomasa. El (NDVI) es calculado con la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{ROJO}) / (\text{NIR}+\text{ROJO}) \quad (\text{III.6})$$

donde:

NIR: es la banda representada por el infrarrojo cercano (MSS banda 4; TM y ETM banda 4)

ROJO : es la banda representada por la banda del rojo (MSS banda 2; TM y ETM banda 3)

A partir de la generación de mapas con el NDVI se puede establecer una base para la elaboración de mapas boléanos.

III.3 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Los datos proporcionados por un sensor remoto pueden ser analizados para obtener información temática útil. La clasificación multiespectral es uno de los métodos más frecuentemente usados para la extracción de información. Este procedimiento supone que las imágenes de una área específica son recolectadas en múltiples regiones del espectro electromagnético y que cuenten con un buen registro geométrico. La clasificación multiespectral puede ser realizada usando una variedad de algoritmos, entre los que se destacan la clasificación supervisada y la clasificación no supervisada.

III.3.1 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La clasificación no supervisada requiere sólo una mínima cantidad de parámetros suministrados por el analista. Este es un proceso en el cual las operaciones numéricas son realizadas para asignar un agrupamiento de píxeles (cluster) de acuerdo a sus propiedades espectrales. El analista permite a la computadora seleccionar las clases promedio y matrices de covarianza que son usados en la clasificación.

La clasificación no supervisada no utiliza zonas de entrenamiento como las bases de su clasificación, de este modo las clases que resultan de una clasificación no supervisada son clases espectrales. En tanto que el analista debe comparar los datos clasificados con algunos datos de referencia para determinar la identidad y valor de la información de las clases espectrales.

Las principales consideraciones para realizar este método son básicamente tres:

- La selección de las bandas espectrales utilizadas para la clasificación. Pueden ser bandas originales o productos de alguna transformación o filtro.
- La selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre los píxeles que componen la imagen.

El analista debe combinar y reetiquetar los *cluster* (acumulación o nube de píxeles) dentro de una clase de información.

Los algoritmos operan dentro de dos pasos principalmente; el primer paso consiste en que el programa lee las propiedades espectrales de cada píxel a través del conjunto de datos y

secuencialmente construye los cluster, el cual esta asociado a un vector promedio. En el segundo paso, una mínima distancia promedio es aplicada al conjunto de datos píxel por píxel al elemento principal donde cada píxel es asignado a uno de los vectores promedio creados en el paso 1. El primer paso por lo tanto automáticamente crea las firmas de cluster para ser usadas por el clasificador supervisado (Jensen, 1996).

PASO 1: *CONSTRUYENDO EL CLUSTER*

Durante el primer paso el analista es requerido para suministrar 4 tipos de información

1. - R, distancia radial en el espacio espectral, usado para determinar cuando un nuevo cluster debe ser formado
2. -C, una distancia, entre *cluster* en el espacio espectral, parámetro usado cuando los cluster pueden ser fusionados.
3. -N, número de píxeles para ser evaluados entre cada unión importante de cluster.
4. - C_{max} , el máximo numero de *cluster* para ser identificados por el algoritmo.

El analista puede omitir estos parámetros y utilizar valores predeterminados por el algoritmo, si no se quiere tener una interacción directa con este.

PASO 2: *ASIGNACION DEL PIXEL A UN CLUSTER USANDO UNA MÍNIMA DISTANCIA*

Posteriormente el *cluster* asociado a un vector promedio es usado en una clasificación algorítmica de mínima distancia para clasificar todos los píxeles dentro de C_{max} cluster.

III.3.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

En una clasificación supervisada la identidad y ubicación de los tipos de cubierta de suelo son conocidas a priori, a través de una combinación del análisis de campo, fotos aéreas, mapas y experiencia personal. La primera etapa a desarrollar en una clasificación supervisada se presenta cuando el analista identifica áreas representativas de cada tipo de cubierta de interés en la imagen y desarrolla una descripción numérica de los atributos espectrales, con el fin de definir las áreas que serán usadas como sitios de referencia para cada clase de cubierta de suelo. Posteriormente cada píxel tanto dentro como fuera de los sitios de referencia es evaluado y asignado a la clase que tiene más alta probabilidad de ser miembro.

III.3.2.1 SELECCIÓN DEL SITIO DE ENTRENAMIENTO

La selección del sitio de entrenamiento es realizada usualmente mediante la digitalización en pantalla sobre una imagen de falso color (usando un stretch, si es necesario para obtener un mejor contraste), o la recolección de la información in situ. Esto es realizado para la creación de uno o más archivos vectores de los sitios de entrenamiento (límites de polígonos vectoriales que definen las áreas de interés), para los cuales también se calculan los parámetros estadísticos multivariados (promedio, media, desviación estándar, matriz de varianza y covarianza, matriz de correlación), que son de suma importancia en una clasificación supervisada (Jensen, 1996).

Cuando se trabaja dentro de las 6 bandas del *Landsat Thematic Mapper*, entonces cada píxel en cada área piloto es representado por un vector medido X_c tal que:

$$X_c = \begin{pmatrix} B_{ijol} \\ B_{ijol} \\ B_{ijol} \\ B_{ijol} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{vijjk} \end{pmatrix} \quad (III.7)$$

donde B_{vijjk} es el valor de brillantez para los i, j píxel en la banda k . Los valores de brillantez para cada píxel, en cada banda, en cada clase pueden ser analizados estadísticamente para permitir una media del vector medido M_c para cada clase.

$$M_c = \begin{pmatrix} \mu_{c1} \\ \mu_{c2} \\ \mu_{c3} \\ \mu_{c4} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_{c+k} \end{pmatrix} \quad (III.8)$$

donde μ_{cha} representa la media de los datos obtenida para la clase c en la banda k . El vector también puede ser analizado para proporcionar la matriz de covarianza para la clase c tal que:

$$V_c = V_{ckl} = \begin{pmatrix} COV_{c11} & COV_{c12} & \dots & COV_{c1n} \\ COV_{c21} & COV_{c22} & \dots & COV_{c2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ COV_{cn1} & COV_{cn2} & \dots & COV_{cnn} \end{pmatrix} \quad (III.9)$$

donde COV_{ckl} (ecu. III.9) es la covarianza de la clase c entre las bandas k y l . Para brevedad de la notación para la matriz de covarianza para la clase c se escribirá solo V_c .

El analista selecciona áreas de prueba representativas para cada clase, recolecta la estadística espectral para cada píxel encontrado dentro de cada sitio de entrenamiento, para lo cual por regla general se tienen que digitalizar suficientes píxeles de tal forma que la cantidad de los píxeles sea al menos 10 veces el número de las bandas usadas en la imagen a clasificar.

A partir de esta relación se establece un patrón de respuesta espectral que es la base para la clasificación. De este modo se tienen que localizar áreas que presenten la misma respuesta del espectro electromagnético y que sea diferente a la respuesta de otros materiales existentes en la imagen. Sin embargo, en la práctica es difícil lograr la determinación de firmas consistentemente distintas por las siguientes razones:

- El principal problema para diferenciar los tipos de vegetación es que no presentan un patrón de respuesta espectral consistente.
- Los cambios en iluminación (debido a la pendiente o el periodo del año) y las variaciones de humedad también pueden producir variaciones significativas de los patrones de respuesta espectral.

III.4 ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN

La clasificación supervisada se puede realizar a través de diferentes algoritmos, los comúnmente utilizados son: clasificación supervisada por el algoritmo de paralelepípedo, mínima distancia, máxima probabilidad, los cuales se describen a continuación.

III.4.1 PARALELEPÍPEDOS

Es una regla de decisión basada en un modelo booleano. Los datos de las zonas de entrenamiento en n bandas espectrales son usados en la realización de la clasificación. Los valores de brillantez de cada píxel de la imagen multiespectral son usados para producir un vector n-dimensional $M_c = (\mu_{ck}, \mu_{c2}, \mu_{c3}, \dots, \mu_{cn})$ donde μ_{ck} es el valor medio de las zonas de entrenamiento obtenidos para la clase c en la banda k a partir de m posibles clases, previamente definidas. S_{ck} es la desviación estándar de la zona de entrenamiento de la clase c de banda k a partir de m clases posibles. Usando una desviación estándar, el algoritmo del paralelepípedo decide si BV_{ijk} (valor de brillantez de un píxel) esta en la clase c, sí y solo sí:

$$\mu_{ck} - S_{ck} \leq BV_{ijk} \leq \mu_{ck} + S_{ck} \quad (III.10)$$

donde:

$c=1,2,3,\dots,m$, número de clases

$k=1,2,3,\dots,n$, número de bandas

Por lo tanto los límites están definidos por:

$$L_{ck} = \mu_{ck} - S_{ck}$$

$$H_{ck} = \mu_{ck} + S_{ck}$$

El algoritmo del paralelepípedo es:

$$L_{ck} \leq BV_{ijk} \leq H_{ck} \quad (III.11)$$

Los límites son para un paralelepípedo n-dimensional en el espacio característico. Cuando un píxel desconocido no satisface cualquiera de los criterios es asignado a una categoría desconocida. Aunque no es posible analizar visualmente en más de tres dimensiones, si es posible crear un paralelepípedo n-dimensional para los propósitos de clasificación.

Analizaremos un ejemplo de cómo los valores de dos píxeles desconocidos a (40,40) y b (10,40), correspondientes a las bandas A y B, son asignados a 5 clases predeterminadas, tal que contamos con la información elemental (μ y S) para cada una. A partir de la información proporcionada por las firmas espectrales se construyen los márgenes de los paralelepípedos (Fig. III.3), de los cuales se parte para la realización de este algoritmo.

Dentro del límite más alto y más bajo del paralelepípedo es posible determinar si el valor de brillantez de un píxel de la banda k, satisface el criterio de cualquiera de los 5 paralelepípedos (clases). Por ejemplo el píxel “a” tiene un valor de 40 en ambas bandas A y B. Si satisface la banda al criterio de la clase 1 ($31.27 \leq 40 \leq 41.23$), pero no satisface el criterio de la banda B. Por lo tanto el proceso continúa evaluando el criterio del paralelepípedo para las clases 2 y 3, las cuales tampoco satisfizo. Sin embargo cuando el valor de brillantez del píxel “a” es comparado con la clase 4, Nosotros encontramos que sí satisface el criterio para la banda A ($33.9 \leq 40 \leq 44.21$) y la banda B ($29.09 \leq 40 \leq 41.91$) entonces el píxel es asignado a la clase 4 (Tabla III.2).

Esta misma lógica es aplicada para clasificar al píxel b. Desgraciadamente los valores de brillantez de 10 en la banda A y 40 en banda B nunca caen dentro de algún paralelepípedo. Por lo tanto es asignado a una categoría desconocida. Incrementando el tamaño a ± 2 o 3 desviaciones estándar se incrementará el tamaño de los paralelepípedos. Esto podrá resultar que el píxel “b” será asignado a una de las clases. Sin embargo este proceso arrojará un error mayor en la clasificación.

Tabla III.2 Ejemplo de clasificación con el algoritmo de paralelepípedo.

CLASE	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	PÍXEL A (40,40) SATISFACE EL CRITERIO	PÍXEL B (10,40) SATISFACE EL CRITERIO
1 BANDA A BANDA B	36.7-4.53=31.27 55.7-10.72=44.98	36.7+4.53=41.23 55.7+10.72=66.4	SÍ NO	NO NO
2 BANDA A BANDA B	54.8-3.88=50.92 77.4-11.16=66.24	54.8+3.88=58.68 77.4+11.16=88.5	NO NO	NO NO
3 BANDA A BANDA B	20.2-1.88=18.32 28.2-4.31=23.89	20.2+1.88=22.08 28.2+4.31=32.51	NO NO	NO NO
4 BANDA A BANDA B	39.1-5.11=33.99 35.5-6.41=29.09	39.1+5.11=44.21 35.5+6.41=41.91	SÍ SÍ (ASIGNADO A LA CLASE 4)	NO NO
5 BANDA A BANDA B	9.3-0.56=8.74 5.2-0.71=4.49	9.3+0.56=9.86 5.2+0.71=5.91		NO NO (PÍXEL ASIGNADO A UNA CLASE)

El algoritmo de paralelepípedo es operacionalmente un método eficiente de clasificación para los datos proporcionados por un sensor remoto. Desgraciadamente, debido al traslape de algunos paralelepípedos, es posible que un píxel desconocido sea candidato para satisfacer a más de una clase, en tal caso usualmente es asignado a la primera clase para la cual satisfizo el criterio de este algoritmo (Jensen, 1996).

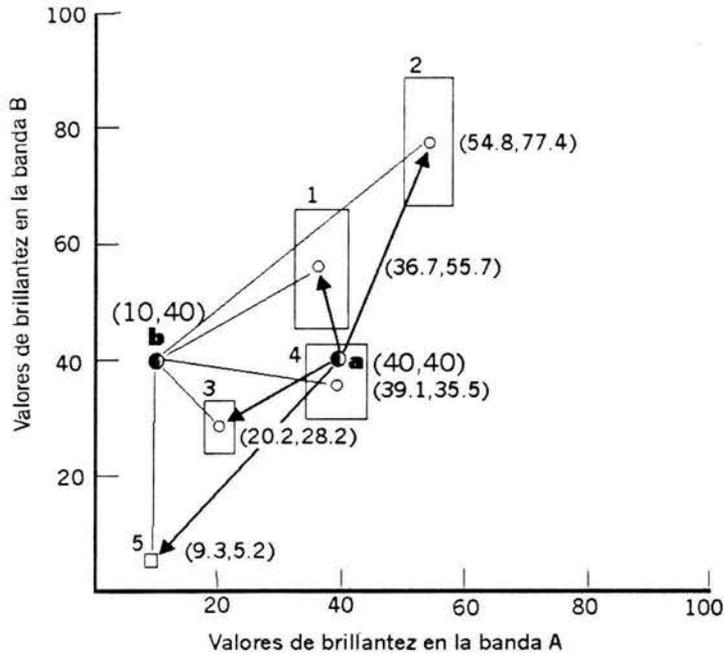


Fig. III.3 Ejemplo de clasificación para dos píxeles (Tomada de Jensen, 1996)

III.4.2 MÍNIMA DISTANCIA

Esta regla de decisión es operacionalmente simple y comúnmente usada. Cuando se usa apropiadamente, esto puede traer como resultado una clasificación exacta comparable con otros algoritmos, tal como el algoritmo de máxima probabilidad, que será descrito más adelante.

Para el algoritmo del paralelepípedo se requiere el vector promedio para cada clase en cada banda μ_{ck} , de las zonas de entrenamiento. Para realizar la clasificación de mínima distancia, el algoritmo debe calcular la distancia para cada vector promedio μ_{ck} a cada píxel desconocido BV_{ijk} . Esto es posible calculando la distancia Euclidiana basada en el teorema de Pitágoras.

En esta discusión demostraremos el método de clasificación por mínima distancia usando las distancias medidas aplicadas a dos puntos (a y b) (Fig. III.3).

La distancia euclidiana del punto a (40, 40) al promedio de la clase 1 (36.7, 55.7) medida en la banda A y B está dada por la ecuación

$$Dist = \sqrt{(BV_{ijk} - \mu_{ck})^2 + (BV_{ijl} - \mu_{cl})^2} \tag{III.12}$$

De donde μ_{ck} y μ_{cl} representa los vectores promedio para la clase c medida en las bandas k y l .

En nuestro ejemplo esto será: la distancia del punto a al promedio de la clase 1

$$Dist = \sqrt{(BV_{ijA} - \mu_{1A})^2 + (BV_{ijB} - \mu_{1B})^2} \tag{III.13}$$

La distancia del punto *a* al promedio de la clase 2 en esas mismas dos bandas será:

$$Dist = \sqrt{(BV_{ijA} - \mu_{2A})^2 + (BV_{ijB} - \mu_{12B})^2} \tag{III.14}$$

Hay que notar que el subíndice para la clase *c* es incrementado de 1 a 2. Calculando la distancia euclidiana de un punto *a* al promedio de las cinco clases, es posible determinar la distancia más corta.

En la Tabla III.3 se listan las operaciones asociadas a este algoritmo, donde se calculan las distancias para las cinco clases de tipos de cubiertas. Esto revela que el píxel *a* debe ser asignado a la clase 4 porque obtuvo la mínima distancia de 4.59. La misma lógica puede ser aplicada para evaluar el píxel desconocido *b*. Este es asignado a la clase 3 porque obtuvo la mínima distancia de 15.75. Cabe hacer una observación, en la cual cualquier píxel desconocido será definitivamente asignado a una de las cinco clases usando este algoritmo.

Tabla III.3 Clasificación con el algoritmo de mínima distancia.

CLASE	DISTANCIA DEL PIXEL <i>a</i> (40,40) A LA MEDIA DE CADA CLASE	DISTANCIA DEL PIXEL <i>b</i> (10,40) A LA MEDIA DE CADA CLASE
1	$\sqrt{(40-36.7)^2 + (40-55.7)^2} = 16.04$	$\sqrt{(10-36.7)^2 + (40-55.7)^2} = 30.97$
2	$\sqrt{(40-54.8)^2 + (40-77.4)^2} = 40.22$	$\sqrt{(10-54.8)^2 + (40-77.4)^2} = 58.35$
3	$\sqrt{(40-20.2)^2 + (40-28.2)^2} = 32.04$	$\sqrt{(10-20.2)^2 + (40-28.2)^2} = 15.75$ se asigna el píxel <i>b</i> para esta clase
4	$\sqrt{(40-39.1)^2 + (40-35.5)^2} = 4.59$ se asigna el píxel <i>a</i> para esta clase	$\sqrt{(10-39.17)^2 + (40-35.5)^2} = 29.45$
5	$\sqrt{(40-9.3)^2 + (40-5.2)^2} = 46.4$	$\sqrt{(10-9.3)^2 + (40-5.2)^2} = 34.8$

Muchos de los algoritmos de mínima distancia permiten al analista especificar una distancia límite, superior al promedio de las clases, cuando un píxel no es asignado a la categoría aún a pesar de que se encuentra más cerca al promedio de la categoría. Por ejemplo si el límite 10.0 fuera especificado, el píxel *a* aún sería clasificado en la clase 4 por que tuvo una mínima distancia de 4.59, la cual está por debajo de este límite. Inversamente, el píxel *b* no sería asignado a la clase 3 porque la mínima distancia de 15.75 fue más grande del límite de 10.0. De este modo el punto *b* será asignado a una categoría no clasificada (Jensen, 1996).

Cuando más de dos bandas son evaluadas en una clasificación es posible extender la lógica del algoritmo entre dos puntos en *n* dimensiones usando la ecuación.

$$Dist_{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \tag{III.15}$$

III.4.3 DE MÁXIMA PROBABILIDAD

El clasificador de máxima probabilidad evalúa cuantitativamente la varianza y covarianza, de cada firma espectral, responsable cuando se clasifica un píxel desconocido. Para realizar esto, se hace una suposición, la distribución de la nube de puntos que forma el conjunto de datos en los sitios de entrenamiento tiene una distribución normal (Gausiana). Bajo esta suposición la distribución de un patrón de respuesta puede ser descrita completamente por el vector promedio y la

matriz de covarianza. Dados esos parámetros, se puede calcular la probabilidad estadística del valor de un píxel dado para ser miembro de una cubierta de suelo. En la Fig. III.4 se muestran los valores de probabilidad en un espacio tridimensional. Donde el eje vertical es asociado a la probabilidad de un píxel que es evaluado como miembro de una de las clases. El resultado es una superficie en forma de campana, la cual es llamada *función de densidad de probabilidad* y representa una función para cada firma espectral.

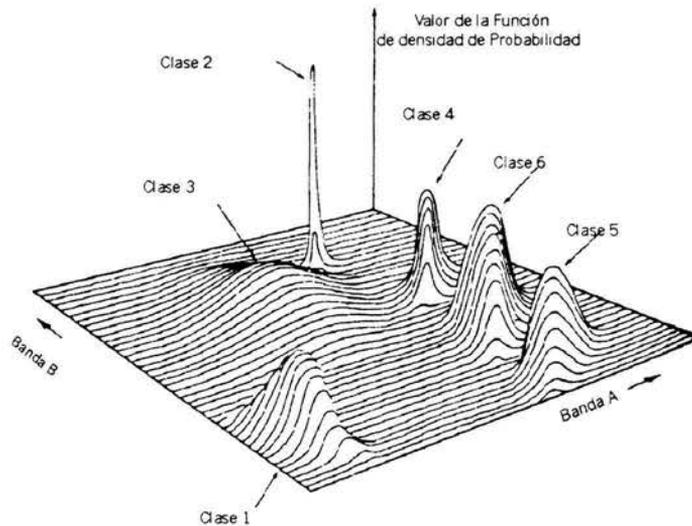


Fig. III.4 Función de densidad de probabilidad, definido para el clasificador de máxima probabilidad (Tomada de Lillesand and Kiefer, 1987)

Las funciones de densidad de probabilidad son usadas para clasificar un píxel desconocido calculando la probabilidad del píxel de pertenecer a cada categoría. Después de evaluar la probabilidad en cada firma, el píxel será asignado a la clase más probable (valor más alto de probabilidad) o es etiquetado como un píxel desconocido si los valores de probabilidad están por debajo de los límites fijados por el analista. En esencia, el clasificador de máxima probabilidad delinea los contornos de igual probabilidad.

La clasificación por máxima probabilidad hace uso de datos estadísticos como el vector M_c para cada clase y la matriz de covarianza de la clase c .

La regla de decisión aplicada a la medida desconocida del vector X es:

X esta en la clase c sí y solo sí:

$p_c \geq p_i$ donde $i=1,2,3, \dots, m$ clases posibles y

$$p_c = \{-0.5 \log_e[\det(V_c)]\} - [0.5(X - M_c)^T V_c^{-1}(X - M_c)] \quad (III.16)$$

y $\det(V_c)$ es el determinante de la matriz de covarianza V_c . Por lo tanto para clasificar la medida del vector X de un píxel desconocido dentro de una clase, la regla de decisión de máxima probabilidad calcula los valores de p_c para cada clase. Entonces asigna el píxel para la clase que tiene el valor más grande (o máximo valor).

La medida del vector X usado en cada paso del cálculo consiste de n elementos (el número de bandas que son analizadas). Por ejemplo, si todas las 6 bandas fueran analizadas, cada píxel desconocido tendrá un vector de medida X de

$$X = \begin{pmatrix} BV_{ij1} \\ BV_{ij2} \\ BV_{ij3} \\ BV_{ij4} \\ BV_{ij5} \\ BV_{ij6} \end{pmatrix} \quad (III.7)$$

La ecuación (3.6) supone que cada clase tiene una probabilidad igual de ocurrencia en el terreno.

Cuando en las aplicaciones de imágenes se tiene una probabilidad más alta de encontrar algunas clases más que otras, entonces: primero el analista determina la probabilidad "a priori" a la probabilidad anticipada de ocurrencia para cada clase en la escena, y cada clase c puede tener un peso de probabilidad. La ecuación para el algoritmo llega a ser:

$$p_{ca}(a_c) \geq p_i(a_i) \text{ donde } i=1,2,3,\dots,m \text{ posibles clases y}$$

$$p_c(a_c) = \log_e(a_c) - \{0.5 \log_e[\det(V_c)]\} - [0.5(X-M_c)^T V_c^{-1}(X-M_c)] \quad (III.17)$$

Esta regla de decisión es idéntica al Teorema de Bayes exceptuando que cada clase no tiene la misma probabilidad (Jensen, 1996).

III.5 EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD EN LOS MAPAS

Los mapas temáticos extraídos de los datos proporcionados por sensores remotos son generados usando los patrones de respuesta espectral, con los cuales los algoritmos de clasificación etiquetan a todos los píxeles de acuerdo con una clase coherente.

Con la llegada de técnicas más avanzadas para el tratamiento digital de una imagen de satélite, surge la necesidad de desarrollar una evaluación de la exactitud, la cual ha recibido un renovado interés. Esto no quiere decir que la evaluación de la exactitud es de poca importancia para las técnicas más tradicionales en Percepción Remota. Sin embargo, dada la complejidad de la clasificación digital, es más que una necesidad evaluar la confiabilidad de los resultados. Tradicionalmente, la exactitud de la fotointerpretación ha sido aceptada como correcta sin ninguna confirmación. De hecho, la clasificación digital es generalmente evaluada con referencia a la fotointerpretación, ya que esta se considera 100% correcta. Esta suposición raramente es válida y puede guiarnos a una evaluación muy pobre y falsa de una clasificación digital.

Por lo tanto, es esencial que los investigadores y los usuarios de la Percepción Remota tengan un fuerte conocimiento de los factores que deben ser considerados, así como las técnicas usadas en la realización de cualquier evaluación de la exactitud.

La forma más común de representar la evaluación de la exactitud de los mapas temáticos extraídos de los datos proporcionados por sensores remotos está en términos de una matriz de error. Usar una matriz de error para representar la exactitud es lo que ha sido recomendado por investigadores (Story and Congalton 1986; Congalton 1991) y fue adaptada como una convención estándar para reportarla.

Una matriz de error es un arreglo de números demarcado dentro de renglones y columnas las cuales expresan el número de unidades de muestra (píxeles, cluster de píxeles, o polígonos) asignados a una categoría relativa, en relación con la categoría real verificada en el campo. La columna usualmente representa los datos de referencia, mientras que los renglones indican la clasificación generada por los datos de la clasificación.

Una matriz de error es una manera muy efectiva para representar la exactitud, ya que la exactitud de cada categoría está claramente descrita con ambos errores producidos en la clasificación, el error por inclusión (error de comisión) y el error por exclusión (error de omisión) (Tabla III.4).

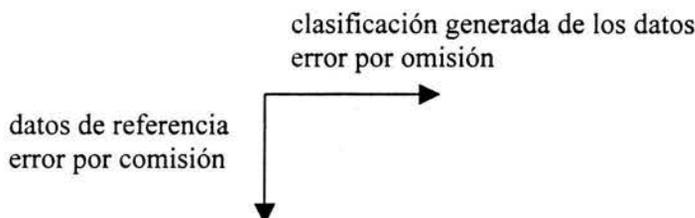
Los errores por comisión resultan cuando los píxeles son identificados incorrectamente y están asociados a una clase a la cual no pertenecen, o cuando impropriamente separamos una clase dentro de más clases. El error por omisión ocurre cuando simplemente no se reconoce los píxeles que deberían ser identificados como pertenecientes a una clase en particular.

La matriz de error puede ser usada como un punto de partida para una serie de técnicas estadísticas descriptivas y analíticas. Quizás la estadística descriptiva más simple es la exactitud total, la cual es obtenida dividiendo el total de píxeles correctos (la suma de la diagonal mayor) entre el número total de píxeles en la matriz de error. Además, las exactitudes de las categorías individuales pueden ser procesadas en una manera similar. Sin embargo, este caso es un poco más complicado, ya que uno tiene la opción de dividir el número de píxeles correctos en esa categoría entre cualquiera del total del número de píxeles correspondientes a renglones o columnas (Story and Congalton 1986).

Un ejemplo muestra las ventajas de considerar la exactitud total del productor y usuario. La matriz de error mostrada en la Tabla III.4 indica que la exactitud total del mapa es del 74%. Sin embargo al suponer que nosotros estamos más interesados en la capacidad para clasificar la clase comercial. Nosotros podemos calcular la exactitud del productor conforme a esta categoría, dividiendo el número total de píxeles correctos en la categoría comercial (65) entre el número total de píxeles proporcionados por los datos de referencia de esa categoría (75). Esta división da como resultado la exactitud del productor de 87%, la cual es buena. Si termináramos aquí uno podría concluir que aunque esta clasificación tiene una exactitud total regular del 74%, el resultado es adecuado para la categoría comercial.

Tabla III.4. Ejemplo de una matriz de error.

	comercial	urbano	forestal	otros	total posible
comercial	65	4	22	24	115
urbano	6	81	5	8	100
forestal	0	11	85	19	115
otros	4	7	2	90	104
total	75	103	115	141	434



Para obtener la exactitud del usuario se necesita dividir el número total de los píxeles correctos en la categoría comercial (65) entre el número total de los píxeles clasificados en la categoría comercial (115) con lo cual se obtiene el valor del 57%. En otras palabras, aunque el 87% de las áreas clasificadas en la clase comercial han sido identificadas correctamente, solo el 57% de las áreas llamadas comercial son realmente comercial.

exactitud del productor	exactitud del usuario
comercial =65/75=87%	65/115=57%
urbano =81/103=79%	81/100=81%
forestal =85/115=74%	85/115=74%
otros =90/141=64%	90/104=87%

$$\text{exactitud total del mapa} = \frac{65 + 81 + 85 + 90}{434} = 74\%$$

para obtener la exactitud para cada clase

$$\text{Exactitud en la clase } X = \frac{\text{Pixeles correctos en la clase a evaluar}}{\text{Pixeles correctos en la clase a evaluar} + \text{Pixeles por omisión} + \text{Píxeles por comisión}}$$

III.6 DETECCIÓN DEL CAMBIO

Muchos algoritmos digitales han sido desarrollados para los propósitos de análisis de la detección del cambio. Entre los que se incluyen están la sobre posición de la imagen, la diferenciación de la imagen, cociente de la imagen, análisis de componentes principales, clasificación espectral y temporal, comparación de una post-clasificación (Jensen, 1996).

Investigaciones involucradas en estudios de la detección del cambio usando imágenes de satélite han concebido un gran rango de metodologías para diferentes ambientes de estudios.

Los procedimientos para la detección del cambio pueden ser agrupados bajo tres grandes grupos, caracterizados por la transformación de los datos producidos y las técnicas usadas para delimitar las áreas de cambios significativos: 1) realce de las imágenes 2) clasificación de datos múltiples y 3) comparación de dos clasificaciones de cubiertas de suelo independientes.

El realce de la imagen involucra la combinación matemática de la imagen para diferentes fechas, las cuales pueden ser una sustracción de bandas, cocientes de regresión de imágenes o análisis de componentes principales. En principio, estas técnicas son aplicadas para el mejoramiento del contraste de la imagen y para aislar los píxeles que han cambiado. La clasificación directa de datos múltiples está basada en un sólo análisis partiendo de una base de datos combinada para identificar las áreas de cambio. La comparación de la post-clasificación es un análisis comparativo de imágenes obtenidas en diferentes momentos después de previas clasificaciones independientes.

III.6.1 ÁLGEBRA DE IMÁGENES

Es posible identificar simplemente la cantidad de cambios entre dos imágenes mediante el cociente o la diferenciación de las mismas bandas en dos imágenes que han sido previamente rectificadas a un mapa base común (Jensen, 1996).

La diferenciación de imágenes involucra la sustracción, la imagen clasificada de una fecha t_1 a otra de fecha t_2 para producir una imagen clasificada residual, la cual representa el cambio entre las dos fechas. La sustracción resulta en valores positivos y negativos en áreas de cambio de clasificación y de valores de cero en áreas donde no hay cambio en la nueva imagen.

El cambio en la imagen producida usando diferenciación de imágenes usualmente produce una distribución de los valores de brillantez aproximadamente en forma Gausiana, donde los píxeles que no sufrieron cambio en los valores de brillantez están distribuidos alrededor del promedio y los píxeles que sufrieron cambios son encontrados en la cola de la distribución. El cociente de bandas involucra exactamente la misma lógica, excepto que en la división los píxeles que no tienen cambio cuando se efectúa el cociente tienen el valor de 1 en la imagen del cambio.

III.6.2 ANÁLISIS DE MATRIZ DE CAMBIO

El método más obvio de cambio de detección es un análisis comparativo de clasificación espectral para los tiempos t_1 y t_2 producidos independientemente. En este contexto se observa que el mapa de cambio de dos imágenes es generalmente tan exacto como el producto de las exactitudes de cada clasificación individual (Jensen, 1996).

Este es el método cuantitativo más comúnmente usado para la detección del cambio. En él se requiere la rectificación y clasificación de cada imagen, estos mapas son entonces comparados píxel a píxel usando una matriz de detección del cambio, para evaluar los cambios sufridos en los tiempos t_1 y t_2

RESUMEN

En este capítulo se han descrito los métodos de procesamiento de la información que se utilizaron para el presente estudio, los cuales inician con los algoritmos de corrección atmosférica, para eliminar el error que pudiera producir en el análisis, posteriormente se describen las técnicas para la identificación de las clases de interés, como las composiciones a color y el Índice de Vegetación Normalizado, una vez identificadas las clases de interés se describen los métodos de clasificación: como la clasificación no supervisada y la clasificación supervisada, posteriormente se describen las técnicas para la evaluación de la exactitud de estas clasificaciones y finalmente realizar la comparativa del cambio que se registra en este estudio multi-temporal.

IV IDENTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

IV.1 DEFINICIÓN DE UN SIG

Hoy en día la definición de un SIG (Sistema de Información Geográfica) es un tanto compleja debido a que tiene diferentes áreas de aplicación como lo pueden ser en los negocios, universidades, organismos gubernamentales y privados así como por un número de profesionistas por lo cual existen diversas definiciones:

“Un sistema de captura, almacenamiento, corrección, manipulación, análisis y presentación de datos que están espacialmente referenciados sobre la tierra” (Department of the Environment, 1987).

“Es un sistema de información diseñado para trabajar con datos georeferenciados mediante coordenadas espaciales ó geográficas. En otras palabras, un SIG es a la vez una base de datos con funcionalidades específicas, para datos referenciados espacialmente y un conjunto de operaciones para trabajar con datos”(Star y Estes, 1991).

“Un sistema compuesto por elementos informáticos (Hardware y Software) y métodos diseñados para permitir la adquisición, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (National Center for Geographic Information and Analysis., 1990).

“Un sistema computarizado compuesto por hardware, software, datos y aplicaciones que es usado para registrar digitalmente, editar, modelar y analizar datos espaciales y presentarlos en forma alfanumérica y gráfica”(Hewlett Packard, 1993).

En este sentido, las definiciones de SIG son similares y establecen que un Sistema de Información está diseñado para trabajar con datos referidos espacial ó geográficamente. Entonces, un SIG es una mezcla de recursos humanos, información y datos geográficos digitales, procedimientos automatizados, manuales y el procesamiento de datos con el hardware y el software adecuados, que se utilizan para responder a consultas sobre rasgos geográficos (Gutiérrez y Gould, 1994)

La base de un Sistema de Información Geográfica es, una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (formato raster), o bien capas que representan objetos (formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos incrementando la complejidad del sistema (UM, 2003).

SIG RASTER

En el modelo raster el punto o píxel tiene una forma de malla de puntos cuadrados ó

rectangulares que contienen valores numéricos y que representan las entidades cartográficas y sus atributos, asimismo determinan la resolución. En este tipo de SIG la georreferenciación y la topología son implícitas a la posición columna y fila del píxel en la malla. Cada atributo es almacenado en una capa propia. De tal forma que la separación entre datos cartográficos y datos temáticos no existe pues cada capa representa un único tema y cada celda contiene un único dato numérico.

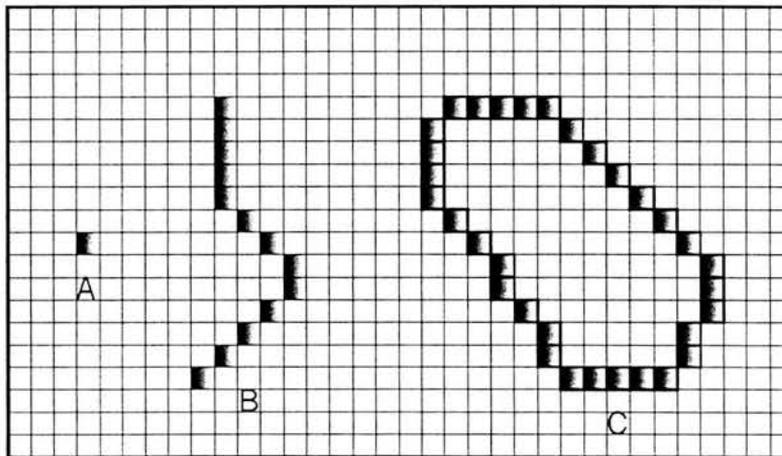
La precisión de la georreferenciación en el modelo raster está marcada por la porción del terreno que representa el píxel, la cual es la unidad de medida lineal y superficial mínima del sistema. A veces no se especifica como está georreferenciada la celda, respecto a su ángulo superior izquierdo, ángulo inferior izquierdo ó respecto a su centro. El modelo conceptual raster tiene limitaciones en cuanto a la precisión de la georreferenciación, con un margen de error equivalente a la mitad de la base y de la altura del píxel.

El modelo raster presenta una organización muy simple de los datos, lo cual permite realizar con gran facilidad ciertos procesos de análisis como ejemplo al llevar a cabo operaciones numéricas y lógicas entre planos.

En una capa se puede representar el uso de suelo mediante un grupo de celdas colindantes que tienen un mismo valor temático.

La representación de las características de la superficie terrestre se realiza de la siguiente forma (Fig. IV.1)

- Un elemento puntual se representa mediante una celda.
- Un elemento lineal mediante una secuencia de celdas alineadas.
- Un elemento poligonal mediante una agrupación de celdas contiguas.



A) Punto

B) Línea

C) Polígono

Fig. IV.1 Objetos espaciales básicos en un SIG raster (Tomada de Vega, 2001)

Uno de los inconvenientes que se asocia al modelo raster es la falta de exactitud en el momento de localizar los elementos, también afecta la exactitud de la forma y el tamaño de los elementos poligonales, aunque ambas características se puedan inferir aproximadamente a partir de la configuración que presentan las celdas. Para aumentar la exactitud de un punto se debe incrementar el nivel de resolución, es decir trabajar con celdas que presentan superficies más pequeñas en el mundo real.

El formato raster permite representar superficies tridimensionales, ya que a las coordenadas de localización (x, y) se le añade una tercera (z) para representar el valor de la variable, como la altitud, la litología o el uso del suelo.

Un conjunto de celdas y sus valores constituyen una capa o nivel de información. Si se quiere almacenar información relativa a distintas variables, se han de incluir tantas capas o niveles como variables se considere, con lo cual se pueden realizar una multitud de operaciones para relacionar unas capas con otras.

En un SIG raster se puede incorporar información contenida en mapas por medio de un scanner (barredor óptico) La información digital puede importarse directamente de archivos raster o convertirse a partir de archivos vectoriales mediante procesos de rasterización. Una de las principales fuentes de información para los SIG raster es la utilización de imágenes de satélite en formato digital para su tratamiento y análisis, como es el caso de este estudio.

SIG VECTOR

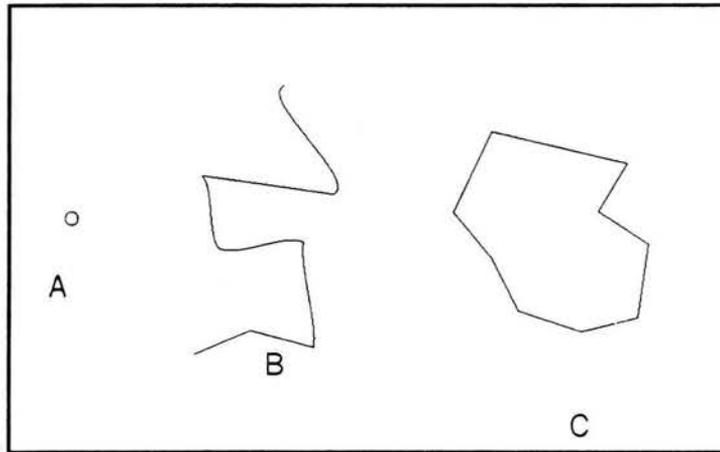
El modelo vectorial se basa en tres principios básicos: el nodo que es la unidad básica para representar entidades con posición, pero sin dimensión, la línea o el arco que representa entidades de una dimensión y el polígono ó la área que se utiliza para representar las entidades bidimensionales.

La posición de los datos puede ser georreferenciada por medio de un sistema de coordenadas. Los atributos no espaciales son almacenados, en una base de datos alfanuméricos interrelacionada con la base de datos cartográficos. La principal ventaja de este modelo respecto al otro sistema es su capacidad de expresar las relaciones espaciales existentes entre las entidades. En el modelo vectorial el foco de interés se sitúa en las entidades, en su posicionamiento sobre el espacio.

Para modelar las entidades del mundo real se utilizan tres tipos de objetos espaciales: puntos, líneas y polígonos (Fig. IV.2).

- Los puntos son objetos espaciales de dimensión cero. Tienen una localización en el espacio pero no tienen longitud ni ancho.
- Se puede representar mediante puntos cualquier elemento cuyas dimensiones sean despreciables desde una perspectiva cartográfica.
- Las líneas son objetos espaciales de una dimensión, ya que tienen longitud pero no anchura. Las líneas están definidas mediante una sucesión de puntos.
- Habitualmente se presentan mediante líneas los elementos que se integran en las redes, ya sean naturales como las redes hidrográficas o artificiales como las carreteras.

- Los polígonos son objetos especiales de dos dimensiones, ya que tienen longitud y anchura. Se presentan mediante una sucesión de líneas que cierran. Ejemplo, las parcelas del catastro son elementos que se representan como polígonos en la base de datos.



A) Punto

B) Línea

C) Polígono

Fig. IV.2 Objetos espaciales básicos en un SIG vector (Tomada de Vega, 2001)

En la tabla IV.1 se describen las principales ventajas y desventajas que se tienen al momento de utilizar un SIG vector o raster.

Tabla IV.1 Principales características del SIG raster y SIG vector (Vega, 2001).

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
RASTER	<p>El tratamiento de algoritmos es mucho más sencillo y simple de escribir que en los sistemas vectores.</p> <p>Los sistemas de cuadrícula son más adecuados para las entradas en forma de retícula como en el caso de las imágenes digitales</p> <p>Los sistemas reticulares son más compatibles con los dispositivos de salida de forma reticular como las impresoras y otras terminales gráficas.</p>	<p>Las necesidades de almacenamiento son mucho mayores en comparación con los sistemas vectoriales.</p> <p>La representación de un recurso depende del tamaño de la celda y resulta especialmente difícil representar adecuadamente los rasgos lineales, como las líneas topográficas, carreteras, líneas férreas, etc.</p> <p>La mayor parte de los datos de entrada están digitalizados en formato vector y deben ser convertidos a un formato reticular para poder almacenarlos en un sistema raster</p>
VECTOR	<p>Se necesita menos capacidad de almacenamiento que en los sistemas reticulares.</p> <p>El mapa original puede representarse en su resolución original. Múltiples atributos pueden ser fácilmente representados</p>	<p>Los algoritmos para las funciones realizadas son más complejos y menos confiables que en los sistemas reticulares.</p> <p>Los datos espaciales de variación continua (como las imágenes de satélite) no pueden ser representados en forma de vector, y hay que convertirlos al sistema reticular para procesar la información de este tipo.</p>

FUNCIONALIDAD DE LOS SIGs

Las concepciones que tienen del SIG dependen mucho en cuanto a que se van a aplicar y del objetivo mismo del proyecto que se desarrolle.

Existen al menos cinco argumentos básicos para la utilización de un SIG, los cuales son (Domínguez, 2000):

- Un SIG permite realizar comparaciones entre escalas y perspectivas emulando una cierta capacidad de representación de diferentes lugares al mismo tiempo.
- Un SIG permite diferenciar entre cambios cualitativos y cuantitativos; aportando una gran capacidad de cálculo.
- Un SIG permite gestionar un gran volumen de información a diferentes escalas y proyecciones.
- Un SIG integra espacialmente datos tabulares y geográficos junto a cálculos sobre variables (topología).
- Un SIG admite multiplicidad de aplicaciones y desarrollos.

Por estos motivos, se puede afirmar que cada vez los SIGs son una herramienta más imprescindible para todas aquellas personas que utilizan información geográfica.

IV.2 MAPAS TEMÁTICOS EN LA EVALUACIÓN DE CAMBIO DE USO DE SUELO

Un mapa es una representación de la realidad y no la realidad misma. Para entender esa realidad deberemos utilizar unas convenciones (Domínguez, 2000). En primer lugar la realidad a representar es generalmente volumétrica y por lo tanto implica un cambio de tres dimensiones a dos. Este cambio de tres a dos dimensiones se suele suplir describiendo la tercera dimensión como un atributo (así por ejemplo una cota de una montaña tendría una localización de coordenadas X e Y que podemos leer sobre el mapa y un atributo z, que sería la altura).

Otro aspecto muy importante es el paso de una superficie esférica a otra plana. Para ello utilizamos las proyecciones. Las proyecciones sirven para representar sobre un plano la superficie esférica de la Tierra con la menor deformación posible, utilizando para ello una red de meridianos y paralelos. Existen cientos de proyecciones en función de la forma en la que se da este proceso. Las podemos agrupar en tres sistemas básicos: cilíndricas, cónicas y acimutales ó polares. Las primeras utilizan como plano de proyección un cilindro tangente a la superficie de la Tierra. En el segundo caso se trataría de un cono tangente o secante. Y en el tercero el plano de proyección es tangente a un solo punto (Fig. IV.3).

Las principales propiedades de las proyecciones se definen en función de las dimensiones mejor conservadas (o menos deformadas). Las proyecciones conformes no deforman los ángulos, las equivalentes las superficies y las equidistantes las distancias.

El tercer aspecto a tener en cuenta es la escala. La escala de un mapa es la relación que existe entre éste y la realidad. Si la realidad es una escala 1:1, un mapa a escala 1:50,000 representaría, por ejemplo, 500 m. de una carretera en un tramo de 1cm. Sí hablamos de pequeña

escala cuando utilizamos mapas a partir de 1/200,000, de escalas medias entre ésta y el 1/25,000 y de gran escala de ahí hacia abajo. La escala de un mapa será la que determine el nivel de información del mismo.

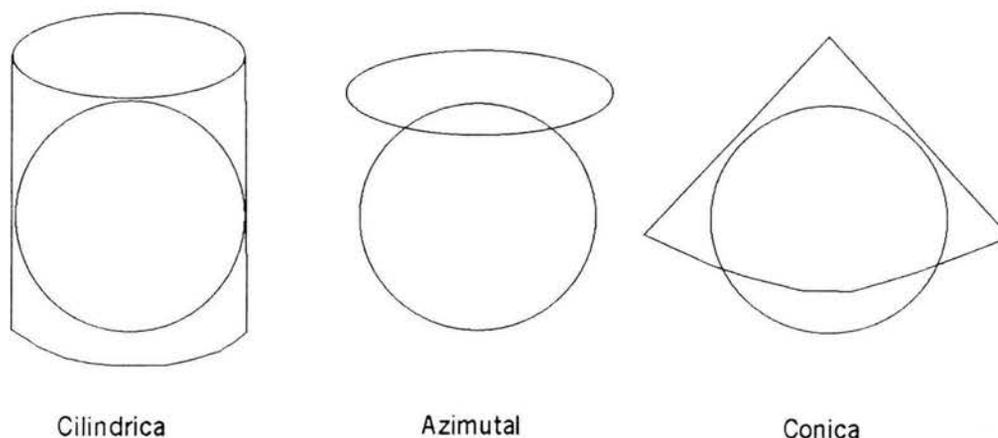


Fig. IV 3 Proyecciones (Tomada de Domínguez, 2000)

Podemos definir un mapa temático como aquel que, sobre una base cartográfica simplificada, representa fenómenos geográficos, tanto cualitativos como cuantitativos. Un mapa temático es en buena medida la conclusión del proceso estudiado y es habitual tanto en ciencias sociales como en ciencias de la Tierra. De esta forma el mapa será la suma de las fuentes y de la propia aportación o interpretación personal del investigador (Domínguez, 2000).

Se puede considerar como fuentes habituales para la elaboración de la cartografía temática las siguientes:

- Las estadísticas
- Otros mapas
- Las encuestas y descripciones literarias
- El trabajo de campo
- Las imágenes

Son múltiples las clasificaciones tipológicas que se realizan en la Cartografía Temática. Entre ellas podemos distinguir:

Clasificación	Ejemplos
Mapas físicos / cartografía temática de recursos y actividades humanas	Mapas de ríos / mapa de producción agraria
Mapas cuantitativos / cualitativos	Densidad de población / calidad paisajista
Información / investigación	Mapa topográfico / mapa geomorfológico
Dinámicos / estáticos	Cambios de uso de suelo / producción agraria
Analíticos, sintéticos y tipológicos	

Una clasificación habitual es la que distingue entre los mapas analíticos, sintéticos y tipológicos:

- Analíticos:
 - Forman parte de un tema más general
 - Son fáciles de leer y de realizar
 - Relacionan la variable con su entorno geográfico
 - Ejemplos: Isoyetas, puntos, círculos proporcionales, población

- Sintéticos elementales:
 - Analizan la relación entre variables
 - Se obtienen por superposición de analíticos
 - La variable cartografiada es producto de otras dos
 - Utiliza cálculos numéricos sencillos
 - Su lectura es más compleja
 - Ejemplos: mapas de densidad

- Sintéticos avanzados:
 - Utilizan un tratamiento estadístico más complejo
 - Tienen múltiples variables de entrada
 - Poseen una mayor abstracción y generalización
 - Ejemplos Mapas geomorfológicos

- Tipológicos:
 - Son mapas complejos
 - De lectura más difícil
 - Ejemplos: Tipos climáticos, dominios de vegetación tipologías agrarias

Un mapa es un documento que nos tiene que hablar, ha de ser capaz de transmitir al usuario la información que la persona que lo realiza ha determinado. Para ello, ha de estar sujeto a las normas y convenciones del lenguaje cartográfico.

La variación de los valores temáticos en el espacio y en el tiempo de los objetos, son las características determinadas que se conocen como atributos (o variables), con lo cual se representa la variación que se produce en el mundo real.

Un mapa de uso de suelo actual presenta ciertas diferencias con respecto a otro de la misma región unos años antes. El tiempo lleva asociada la idea de cambio, de este modo se considera que las distribuciones espaciales se van modificando con el transcurso del tiempo.

La representación más común de los procesos de cambio es (Gutiérrez y Gould, 1994):

- Secuencia de mapas: Ello equivale a una sucesión de mapas referidos a determinados momentos. Es lo que se hace, por ejemplo, cuando se quiere presentar la evolución del uso del suelo de una región.

- Diferencias temporales de mapas: Se trata de expresar las diferencias entre dos momentos

para las distintas unidades de observación. Ello es posible cuando se trabaja con variables cuantitativas (cambios en los usos del suelo entre “n” años).

Para detallar el cambio que sufre una área de estudio es preciso identificar las diferencias de los estados de un objeto, por medio de la observación a diferentes lapsos de tiempo.

IV.3 MAPAS DE USO DE SUELO

Los recursos naturales de una determinada región serán mejor utilizados en la medida en que se conozca con mayor exactitud su estado actual, su potencial productivo y su fragilidad, de esta forma sé esta en mayor posibilidad de planear su explotación, conservación y su restauración, de tal manera que se asegure al máximo su aprovechamiento, sin causar un deterioro de los recursos, lográndose una conservación del equilibrio ecológico. Esto se logra mediante la generación de información temática como son los mapas (Martínez, 1995).

Por ello el papel que desempeña un mapa es comunicar la información espacial al usuario. El objetivo de un mapa de uso de suelo es que sirva como una herramienta de manera ilustrativa y técnica para visualizar todas zonas aptas para una explotación adecuada.

Uno de los aspectos más relevantes de la cartografía es el uso del color el cual nos aporta información, contribuye a aumentar el interés visual del mapa y facilita la jerarquización de los contenidos.

El color debe ser un medio de comunicación del mapa elaborado. Esto implicará una adecuada combinación de rigor científica y estético.

En este sentido, podemos utilizar no sólo el tono sino también la luminosidad. De este modo los colores más oscuros tendrán un valor mayor que los colores claros. Al realizar una escala graduada de colores debemos tener esto en cuenta asignando a los valores mayores el tono más oscuro.

La cartografía temática debe ser concebida como la aportación de un proceso investigador. En ella será relevante el uso de símbolos y colores, que están diseñados para actuar como un “medio de comunicación” de los objetivos de nuestro trabajo. Las características de rigor y legibilidad serán indispensables para alcanzar adecuadamente esos objetivos (Domínguez, 2000).

IV.4 MODELOS BOOLEANOS EN UN SIG

Una de las aplicaciones más importantes dentro de un SIG es la creación de modelos o escenarios, para predecir resultados. Entre más factores se tomen en cuenta para el modelado, éste será más complejo y más difícil de trabajar, por lo cual la lógica booleana se presenta como una alternativa en el manejo de información dentro de un SIG (López, 2000).

El álgebra de mapas constituye el marco teórico de la mayor parte de las operaciones realizadas con SIG a partir de capas de información de tipo raster, pueden desarrollarse operaciones de muy diverso tipo que se clasifican en(UM, 2003):

Operadores locales.

Operadores de vecindad.
Operadores de área.

OPERADORES LOCALES

Los operadores locales generan una nueva capa a partir de una o más capas previamente existentes. Cada píxel de la nueva capa recibe un valor que es función de los valores de ese mismo píxel en las demás capas.(Fig. IV.4)

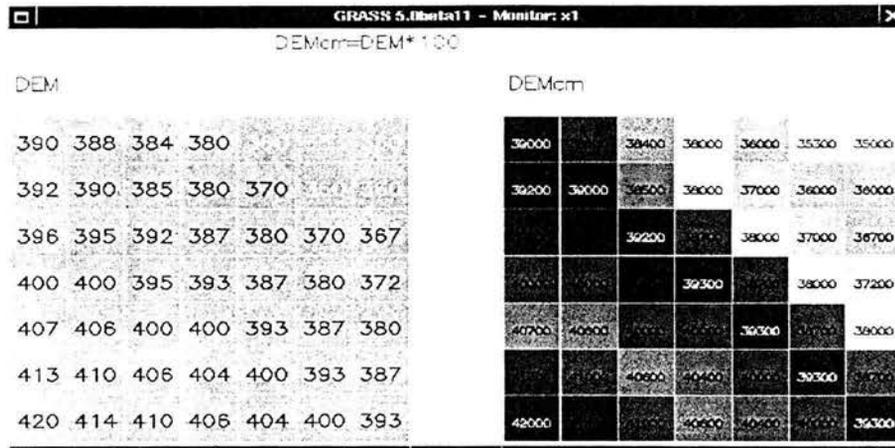


Fig. IV.4 Resultados de una imagen aplicando un operador local.
(Tomada de UM, 2003)

OPERADORES DE VECINDAD

Los operadores de vecindad adjudican a cada píxel un valor que es función de los valores de ese mismo píxel y de los 8 píxeles contiguos, en una o varias capas. Los ejemplos más habituales son el filtrado de imágenes y el cálculo de pendiente y orientación a partir de un Modelo Digital de Terreno.(Fig. IV.5)

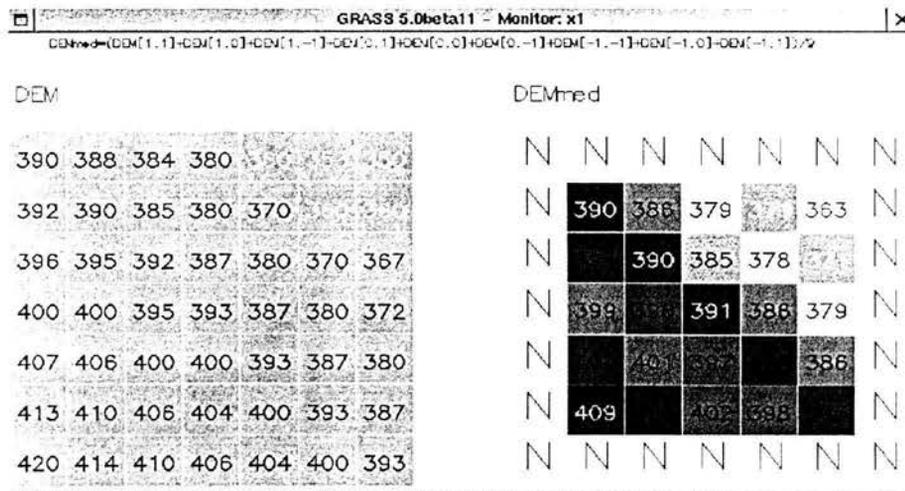


Fig. IV.5 Resultados de una imagen, aplicando el operador de vecindad.
(Tomada de UM, 2003)

OPERADORES DE ÁREA

Son aquellos que calculan algún parámetro (superficie, perímetro, índices de forma, distancias, estadísticos) para una zona previamente conocida. Puede tratarse de diferentes niveles de una variable cualitativa (superficies con diferente litología por ejemplo) o digitalizada e introducida por el usuario.

Los primeros programas de SIG desarrollaron módulos para los operadores más comunes. Con el tiempo se fueron desarrollando módulos de propósito general que permitían establecer operadores locales simples, operaciones matemáticas entre mapas o con un sólo mapa; mientras que los operadores de vecindad o área más comunes seguían realizándose en módulos aparte.

OPERADORES BOOLEANOS

Los primeros tipos de operaciones usadas en el análisis de álgebra de mapas fueron los operadores de lógica booleana.

Los operadores de lógica booleana consisten principalmente en AND, OR, NOT y XOR, los cuales producen resultados de dos tipos, falsos y verdaderos (Tabla IV.1). Estos operadores se explican mejor con la ayuda de diagramas de Venn, donde cada círculo en el diagrama representa al conjunto de datos identificados por un criterio específico (Fig. IV.6).

A diferencia de las operaciones aritméticas los operadores booleanos no mantienen la propiedad conmutativa.

El uso de los operadores booleanos en la modelación de un SIG es muy común, ya que al modelar se manejan varios supuestos; estos se obtienen mediante el uso de varios mapas, pero algunas veces sólo se trabaja con una parte de la información contenida en estos mapas, es decir, información que cumpla las características necesarias para un determinado estudio (López, 2000).

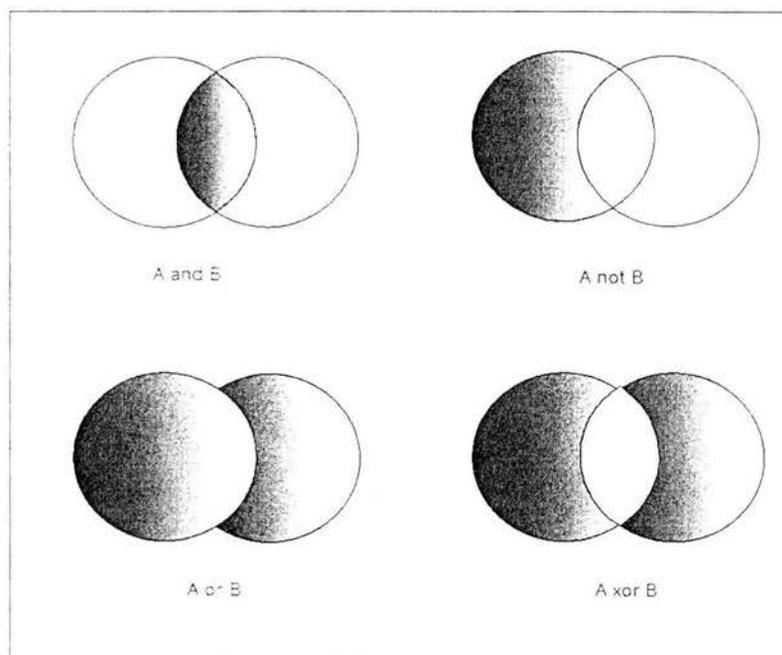


Fig. IV.6 Diagramas de Venn mostrando los resultados de la aplicación de operadores booleanos (Tomada de López, 2000)

Tabla IV.1 Tabla “falso –verdadero” de los operadores booleanos (López, 2000)

A	B	<i>NOT A</i>	<i>A AND B</i>	<i>A OR B</i>	<i>A XOR B</i>
V	V	F	V	V	F
V	F	F	F	V	V
F	V	V	F	V	V
F	F	V	F	F	F

RESUMEN

En este capítulo se describen los conceptos elementales para poder definir a un SIG así como la definición de un mapa, el cual es elemento fundamental de para la realización de un SIG. La detección del cambio es el proceso para identificar diferencias en el estado de un objeto por medio de la observación en diferentes lapsos de tiempos, si pensamos en el tiempo nos lleva a la asociación de cambio, y para poder identificarlo, las imágenes de satélite procesadas y digitalizadas es ideal para la generación de mapas, ya que proporcionan una gran utilidad para el estudio, caracterización y detección de cambios estacionarios, o de largo plazo, para poder poner al día la información sobre el suelo, vegetación geología, etc.

V PROCESADO DE LAS IMÁGENES Y RESULTADOS

V.1 PRE-PROCESADO DE LAS IMÁGENES

El procesamiento de las imágenes fue realizado en una computadora DELL con procesador Pentium II, memoria RAM de 384 MB y sistema operativo Windows 98.

El software utilizado fue *Idrisi 32 for Windows* por la “Graduate School of Geography” de la Universidad de Clark.

Para el presente estudio se utilizaron tres juegos de imágenes multiespectrales de los sensores MSS (cuatro bandas y resolución espacial de 60 m) TM (6 bandas y resolución espacial de 25 m) y ETM (6 bandas y resolución espacial de 30 m).

Como información secundaria se utilizó el mosaico de fotografías del vuelo realizado a la Ciudad de México en la fecha 31 de Enero y 01 de Febrero del 2001, obtenido por el Instituto de Geografía además de una imagen pancromática de alta resolución espacial (5m).

El pre-procesamiento digital de las imágenes se inició con el despliegue en pantalla y el cálculo de las estadísticas de los datos de las imágenes multiespectral, esto fue para tener una visión adecuada de la calidad en que se encontraban las mismas.

Posteriormente, se procedió a la elección de algoritmo “normalización de la imagen usando el ajuste del histograma” para poder realizar las correcciones atmosféricas. Esta decisión fue tomada basándose en lo descrito en el Capítulo III, donde se probaron dos algoritmos de correcciones atmosféricas y se obtuvo mejores resultados con el algoritmo seleccionado.

La corrección atmosférica de las imágenes consistió en restar los valores mínimos de cada banda, situando el origen del histograma en cero. Obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla (V.1).

Las correcciones geométricas se realizan para georeferenciar a la imagen y usarla como mapa, la técnica más común que se utiliza para este tipo de correcciones es la triangulación de puntos de control en el terreno, visualmente distinguibles en la imagen. Sin embargo los errores geométricos no afecta la respuesta espectral de los datos de las bandas y no influyen en los resultados de los procesos de realce espectral ni de clasificación, por lo cual se omitió esta corrección para el presente trabajo. Cabe hacer mención que se tomo como verdadera la georeferenciación de la imagen ETM+ del año 2000, la cual esta referida en una proyección UTM de la Zona 14 Norte, Datum NAD 27 (México) y Elipsoide de referencia Clarke de 1866.

Tabla V.1 Correcciones radiométricas para las bandas no térmicas de las imágenes.

DATOS ORIGINALES

BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO	BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO	BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO
MSS1	8	107	TM1	33	255	ETM1	47	255
MSS2	1	125	TM2	9	167	ETM2	30	255
MSS3	1	60	TM3	4	217	ETM3	22	255
MSS4	1	66	TM4	15	221	ETM4	16	255
			TM5	6	256	ETM5	12	255
			TM7	1	255	ETM7	6	255

DATOS CORREGIDOS

BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO	BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO	BANDA	MÍNIMO	MÁXIMO
MSS1	0	97	TM1	0	212	ETM1	0	204
MSS2	0	121	TM2	0	152	ETM2	0	217
MSS3	0	53	TM3	0	203	ETM3	0	228
MSS4	0	61	TM4	0	198	ETM4	0	233
			TM5	0	236	ETM5	0	235
			TM7	1	255	ETM7	0	239

V.2. REALCE ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA COBERTURA.

El procesamiento digital de imágenes es extremadamente amplio e involucra algunas veces procesos matemáticos complejos; sin embargo, la idea fundamental del procesado digital es simple, el cual consiste en suministrar a la computadora un píxel a la vez, la computadora inserta estos píxeles en algoritmos, almacenando los resultados con los cuales se puede formar una nueva imagen, esta puede ser desplegada y manipulada por procesos adicionales.

El objetivo principal de aplicar las técnicas de realce a las imágenes, es el de mapear las áreas urbanas y de vegetación a partir de la extracción de la información espectral contenidas en la imagen. Para mejorar la respuesta espectral tanto de las áreas con vegetación y urbanas se mejoró el contraste visual para enfatizar las variaciones de alta y baja reflectancia de las zonas de interés.

En el despliegue de una imagen muchas veces no es posible discriminar la información y sólo con la aplicación de ciertos algoritmos se puede mejorar la apariencia de la imagen para el ojo humano, uno de estos algoritmos es *el stretch lineal con saturación*, con el cual se puede mejorar el contraste visual en blanco y negro de cada imagen.

El histograma de una imagen puede ser desplegado dentro de un rango de 256 tonos de grises, por ejemplo el histograma asociado a la banda TM4 (del año 1992) muestra el valor mínimo de 0 y un máximo de 198, considerando que la mayor parte de los valores digitales se encuentran entre 0 y 80, éstos tienden a estar agrupados al centro dando una semejanza de campana de Gauss

(Fig. V.1) mientras que pocos son los valores digitales que ocupan los extremos, debido a esto no se puede obtener un contraste adecuado de la imagen, ya que son pocos los tonos que se tienen en el despliegue de la imagen, este contraste no puede proporcionar una discriminación adecuada de las áreas de interés. El contraste puede ser mejorado considerablemente, forzando una porción muy limitada de números digitales que se encuentran en los extremos, a representar valores que los lleven a una asignación de tonos negros ó blancos en el despliegue de la imagen, para así ocupar el rango total de tonos en el despliegue (256 tonos). Esto permitirá una concentración de colores o tonos disponibles sobre la mayoría de los píxeles que tienen los valores intermedios (Fig. V.2).

Una superficie ocupada por vegetación vigorosa ofrece tonos oscuros en las bandas visibles del espectro, (TM1, TM2 Y TM3; MSS2) como consecuencia de la alta absorción de los pigmentos de las hojas en esas longitudes de onda. Por lo contrario, aparece en tonos claros en la imagen correspondiente al infrarrojo cercano (TM4; MSS4).

Mientras que una superficie ocupada por zonas urbanas ofrecerá tonalidades claras en las bandas del espectro visible (TM1, TM2 y TM3; MSS1 y MSS2), debido a la alta reflectancia de los materiales que componen las zonas urbanas como lo puede ser el pavimento, concreto, techos de lámina etc. Por lo contrario, aparece en tonos oscuros en la imagen correspondiente al infrarrojo cercano (TM4).

V.2.1 COMPOSICIONES DE FALSO COLOR

La técnica de composición de color convierte imágenes de blanco y negro a imágenes en color, en el cual cada uno de los colores es representado por una banda de la imagen original. Las composiciones en color son útiles para representar con un color en particular materiales específicos, cuya intensidad es proporcional a los valores de brillantez contenidos en la imagen.

Las composiciones a color que se generaron para la identificación de las cubiertas de suelo fueron las descritas en la Tabla V.2

Tabla V.2 Composiciones de color.

Despliegue de color en el monitor	Composición de color natural (CCN)	Composición de color infrarrojo (CIR)	Composición a falso color (CFC)
Rojo	TM 3;ETM3	TM4; ETM4; MSS4	TM4; ETM4
Verde	TM 2;ETM2	TM3; ETM3; MSS2	TM5; ETM5
Azul	TM 1;ETM1	TM2; ETM2; MSS1	TM3; ETM3

Con lo cual se identificó las siguientes zonas.

CCN

Esta CCN permite tener una apariencia natural del terreno, como la que percibe el ojo humano, de este modo se tiene una perspectiva similar de un vuelo en el área de estudio. La vegetación tiene tonalidades de verdes oscuros a tonalidades de negros, pero en la cual no es posible identificar las clases de vegetación que se encuentran en la escena.

Las zonas urbanas están representadas en una tonalidad de grises claros, las zonas altamente pobladas están representadas en color blanco, mientras que existen zonas urbanas con una gran cantidad de mezclas de píxeles en colores, lo cual dificulta la identificación de las mismas. Esta composición proporciona información para poder delimitar las zonas urbanas de las zonas de vegetación que existen en la escena (Fig. V.3 a).

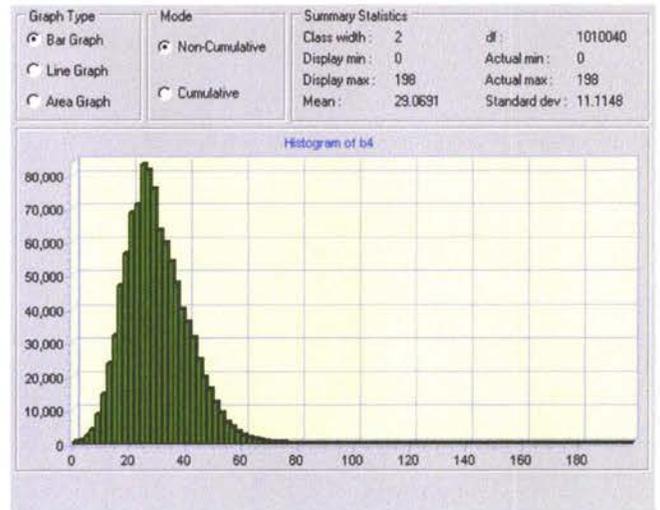
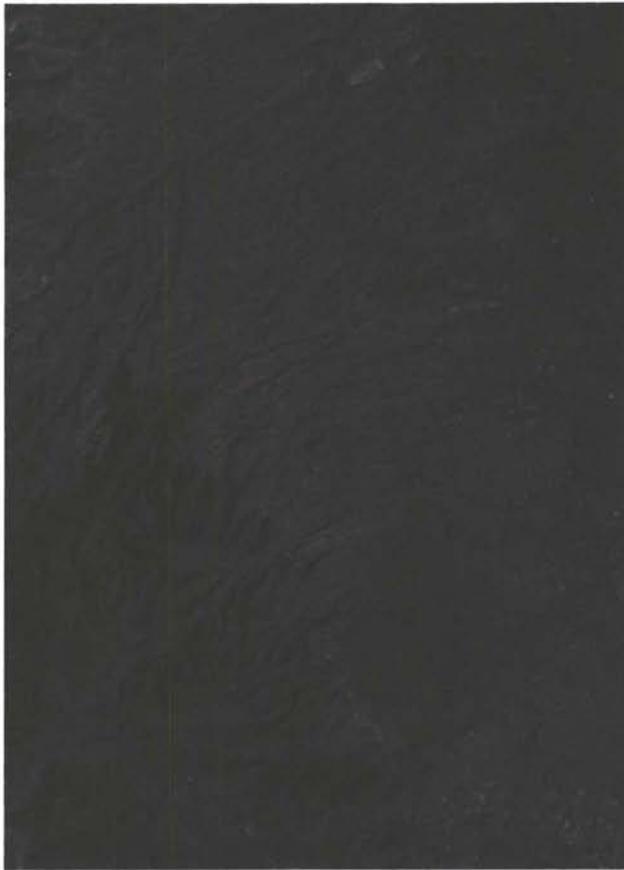


Fig. V.1 Imagen e histograma de la banda original TM4

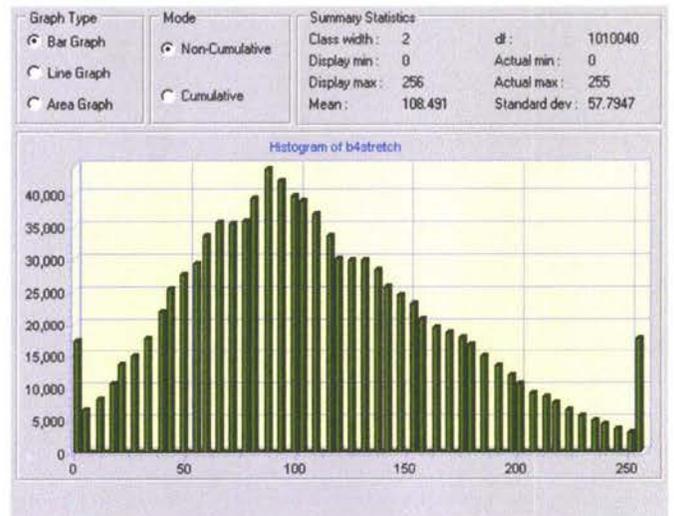


Fig. V.2 Imagen e histograma de la banda Tm4 después de de aplicar el stretch lineal con saturación

CIR

Esta composición supone originar una nueva clave de color, extraña a la forma habitual como apreciamos el color, pero de gran valor temático. Mediante los tonos rojos y magenta se puede identificar la vegetación vigorosa, como cultivos de riego, prados de montaña y bosques con vegetación espesa. Con los tonos rosas se identifican las áreas vegetales menos densas y/o vegetación en un estado temprano de crecimiento.

El azul oscuro a negro representa superficies cubiertas total o parcialmente por cuerpos de agua, mientras que los tonos grises a azul metálico son característicos de las zonas urbanas. En esta composición es posible distinguir las zonas residenciales ya que presentan una combinación de píxeles característicos de la vegetación y de zonas urbanas, así como también las principales vías de comunicación (Fig. V.3 b).

CFC

Los tonos azules y cian representan las zonas urbanas. Las zonas urbanas con una infraestructura urbana bien definida tienen un color azul. Las zonas residenciales se distinguen ya que presentan una combinación de áreas verdes y superficies de construcción dando una mezcla de píxeles, mientras que las zonas altamente pobladas tienen tonos cian con mucho brillo y las principales vialidades tienen un azul oscuro.

Las zonas de cultivo, parques y campos deportivos tienen tonos que van del anaranjado al amarillo dependiendo de la proporción de humedad que presentan, cuanto más humedad presente la vegetación aparecerá con tonos anaranjados y por consiguiente los tonos amarillos corresponderán a zonas que no tienen tanta humedad. Mientras que la vegetación más abundante en el bosque, está representada por un tono café oscuro. Las zonas que no tienen una vegetación tan espesa están representadas por tonos verdes, entre más intenso sea el color, mayor cantidad de vegetación tendrá la zona (Fig. V.3 c).

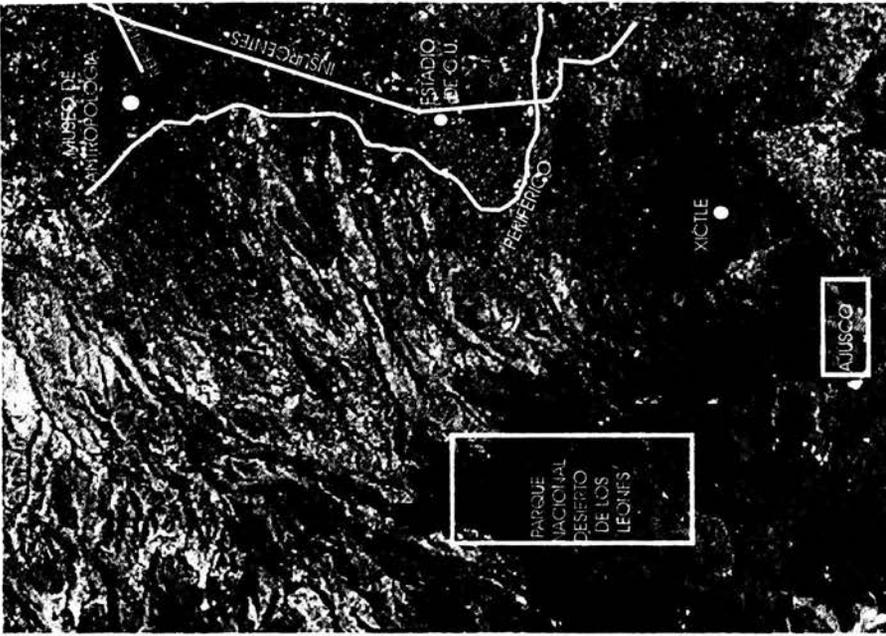
V.2.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)

El NDVI es un índice derivado de la medida de la reflectancia en las porciones del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético, el cual sirve para describir la cantidad de biomasa fotosintéticamente activa en un área.

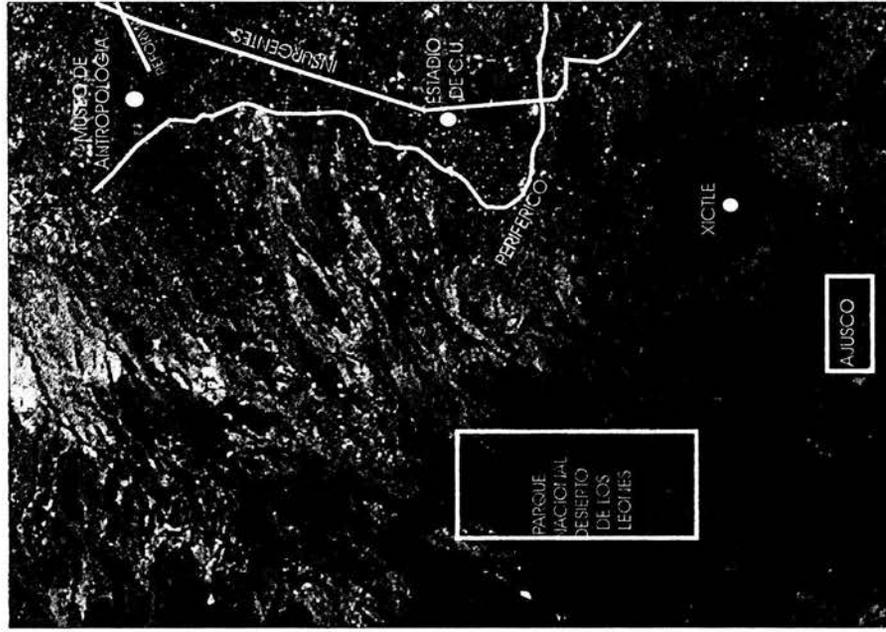
Las imágenes que se generan al aplicar el índice se encuentran en un rango de valores que van de -1 a 1 , donde los valores cercanos a 1 son los tonos verdes que están relacionados directamente con la cantidad de materia vegetal fotosintéticamente activa y los valores cercanos a -1 representados por tonos rojizos se relacionan con la pérdida, estrés ó ausencia de la actividad fotosintética, lo cual es indicativo de la presencia de entornos urbanos ó suelos desnudos.

En la imagen de 1972 (Fig. V.4 a) se puede ver que el contenido de material vegetal cubre más del 50% de la zona de estudio, mientras que los entornos urbanos solo se tienen su desarrollo en la parte Noreste de la zona de estudio y aún no se tiene una presencia significativa de suelo desnudo.

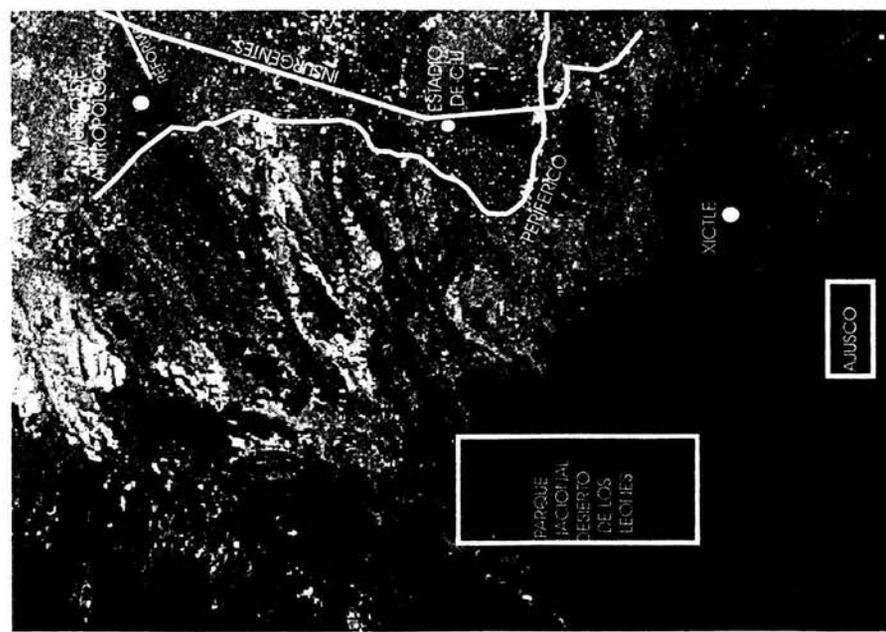
En la imagen de 1992 (Fig. V.4 b) puede ser visible la pérdida del material vegetal, y el crecimiento de la mancha urbana es notorio, mientras que es notable la presencia del suelo desnudo en las zonas aledañas al Ajusco.



a) Composición a color natural
RGB 321



b) Composición de color Infrarrojo
RGB 432

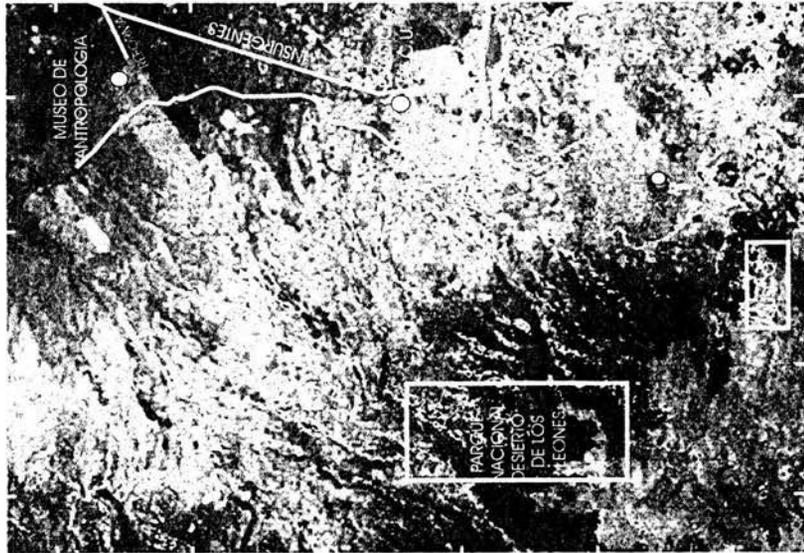


c) Composición de falso color
RGB 453

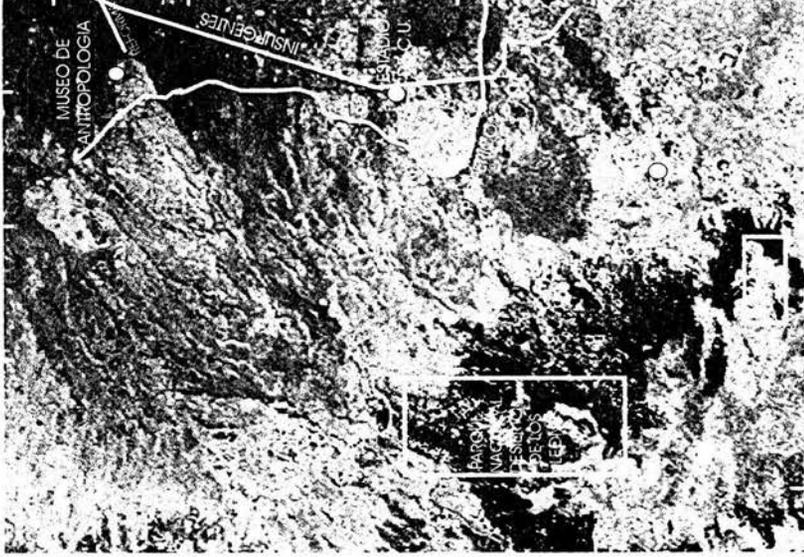
Fig. V.3 Composiciones a color para la identificación de cubiertas de suelo



465000

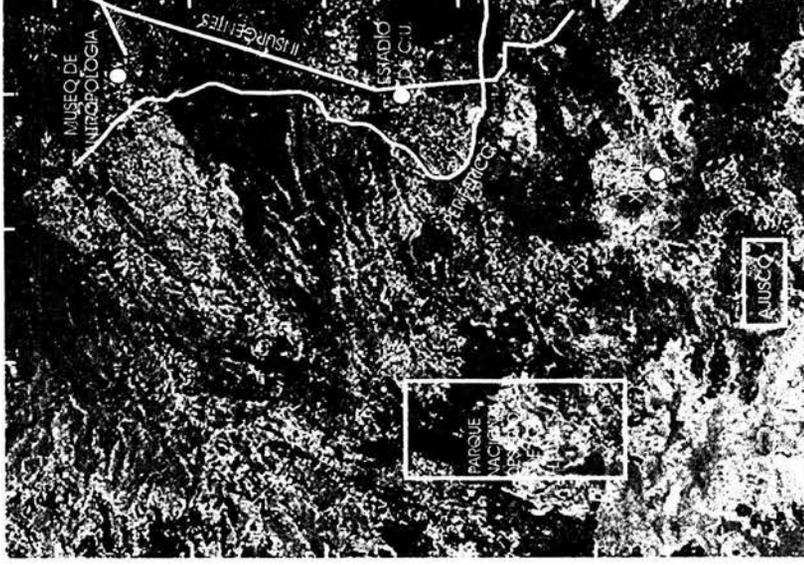


a) NDVI del año de 1973

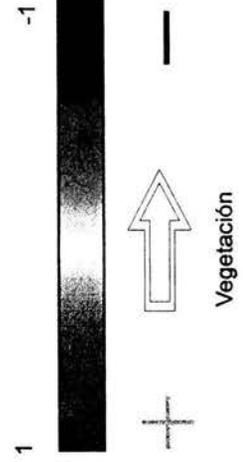


b) NDVI del año de 1992

480000



c) NDVI del año del 2000



Proyección UTM Zona 14N
Datum NAD 27
Elipsoide de Referencia Clark 1866

Fig. V.4 Índice de Vegetación Normalizado

En la imagen del 2000 (Fig. V.4 c) se observa claramente que el suelo urbano tiene un crecimiento muy significativo, en cuanto a las áreas de suelo desnudo también se ha incrementado siendo muy notable éste en el cerro del Ajusco y en sus cercanías, así como en El Parque Nacional Desierto de los Leones, esto da un claro panorama de la pérdida de vegetación que se ha registrado en los últimos 30 años.

Estas imágenes generadas a partir del índice del NDVI se utilizaron para estimar las zonas que ofrecían una cubierta de suelo vegetal y de suelo urbano ó desnudo, una disminución en el nivel del NDVI puede estar relacionado con cambios encaminados a desarrollos residenciales, proyectos de urbanización ó la presencia de stress en la vegetación misma.

V.3 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LAS IMAGÉNES

En Percepción Remota una clasificación es un procedimiento en donde los datos (píxeles) son asignados a un grupo de cubierta de clases acordes a la naturaleza de una reflectancia específica.

En este proceso se involucraron para el caso de la imagen MSS las cuatro bandas, para el caso de la imagen TM se utilizaron las seis bandas no térmicas al igual que en la imagen ETM, el procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Se realizaron composiciones de color del tipo CCN, CIR y CFC. En las cuales se localizaron zonas representativas de los 8 tipos de cubiertas (Tabla V.3) que fueron identificadas en la imagen, denominadas zonas de entrenamiento.

Tabla V.3 Descripción de las clases utilizadas para la clasificación.

CLASE	DESCRIPCIÓN
Urb. Popular (1)	Zonas de conjuntos habitacionales característicos de zonas populares, con casas de dimensiones pequeñas y de un nivel, calles angostas y escasa vegetación.
Urb. Comercial (2)	Zona con edificaciones bien definida, comercial y de oficinas de mas de un nivel de construcción.
Urb. Residencial (3)	Zonas residenciales, las cuales cuentan con construcciones grandes y áreas verdes.
Infraestructura Vial (4)	Infraestructura vial y zona industrial.
Mezcla de Vegetación (5)	Zonas ajardinadas, las cuales cuentan con una mezcla de vegetación que va desde árboles de pino, eucalipto, pirul, setos, matorrales hasta pasto.
Vegetación de Ribera (6)	Vegetación que incluyen por un lado las zonas verdes dentro de entornos urbanos como lo son campos de fútbol, golf etc. y por otra parte aquella masa vegetal correspondiente a vegetación de ribera.
Vegetación de Bosque (7)	Zonas de bosque, principalmente de pinos y óyameles. Se definen en entornos forestales.
Suelo Semi-desnudo (8)	Suelo desnudo, que en su mayoría están desprovistos de vegetación ó zonas agrícolas sin cultivar.

- Se digitalizaron polígonos alrededor de la zona de entrenamiento, asignando una etiqueta a cada tipo de cubierta.
- Se analizaron los píxeles dentro de cada zona de entrenamiento y se crearon las curvas de respuesta espectral (firma espectral) esto para cada tipo de cubierta (Fig. V.5). Las firmas espectrales para cada cubierta de suelo son totalmente diferentes entre ellas.
- Se clasificaron las imágenes con el algoritmo de clasificación por **mínima distancia**.

Obteniéndose finalmente los mapas temáticos de uso de suelo para las tres imágenes (Fig. V6).

V.4 MAPAS TEMÁTICOS DE USO DE SUELO.

Una vez realizada la clasificación supervisada se obtuvo mapas temáticos, de los cuales se evaluó la exactitud de los resultados arrojados por la clasificación mediante la matriz de error, comprobándose así la autenticidad de los resultados obtenidos.

La matriz de error es un arreglo de números demarcados dentro de renglones y columnas las cuales expresan el número de unidades de muestra (píxeles) asignados a una clase relativa (clasificada en la imagen) con relación a la clase real (verdad de campo) verificada mediante la fotointerpretación.

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado de 1000 puntos (con el comando SAMPLE del software Idrisi) sobre la imagen clasificada del año 2000, para generar una capa vectorial con los puntos de muestreo, esta capa fue sobrepuesta en el mosaico de fotografías y en la imagen pancromática de alta resolución (información secundaria), con lo cual se realizó una fotointerpretación, para verificar si en verdad las unidades de muestra (1000 puntos) fueron clasificadas correctamente. Obteniéndose los siguientes resultados descritos en la Tabla V.4.

En la Tabla V.4 de resultados se asignó una nueva clase llamada cero, ya que fueron píxeles que no estaban clasificados dentro de las 8 clases consideradas. Al observar los valores resultantes arroja una exactitud total de mapa del 88% mientras que la exactitud para el usuario se encuentra en el rango del 64% al 100% y la exactitud del productor varía del 67% al 100%.

Para los mapas temáticos del 1973 y 1992 se omitió la evaluación de la exactitud, debido a que se realizó el mismo proceso de clasificación, asumiendo que cuentan con la misma exactitud del mapa temático de uso de suelo del 2000.

V.5 MODELO BOOLEANO PARA DETERMINACIÓN DE CAMBIO DE USO DE SUELO.

A partir de la generación de imágenes aplicando el Índice de Vegetación Normalizada se realizó una reclasificación de los píxeles de la imagen, obteniéndose dos clases, una donde se concentra todo los píxeles que ofrecen una respuesta espectral característica de vegetación y la segunda clase donde se agrupan los píxeles que tienen una respuesta espectral característica de zonas urbanas y suelos desnudos, A las dos clases generadas se les asignó un valor y a su vez un color.

La clase de zonas urbanas y suelos desnudos están referidas con un color negro y con un valor de 1. Mientras que la clase de vegetación tiene el asociado el color verde y un valor de 0.

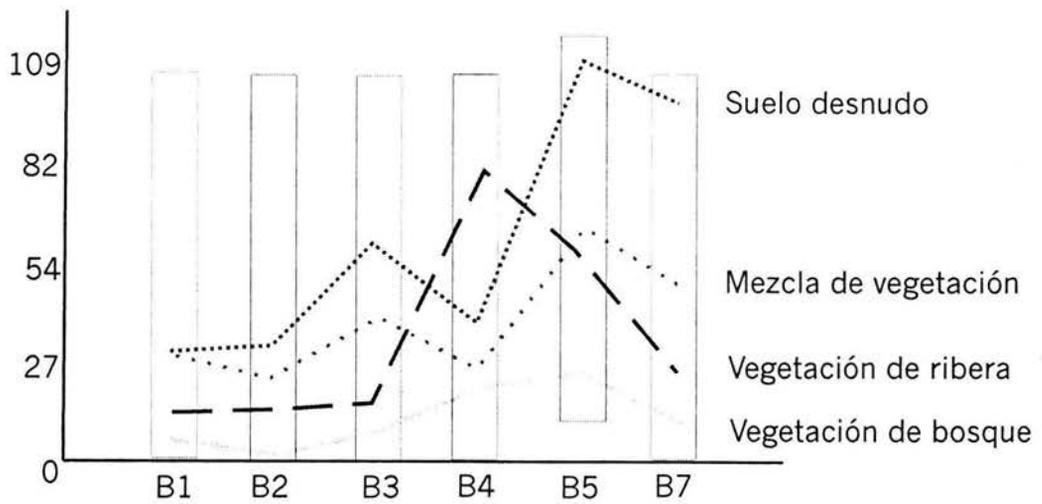
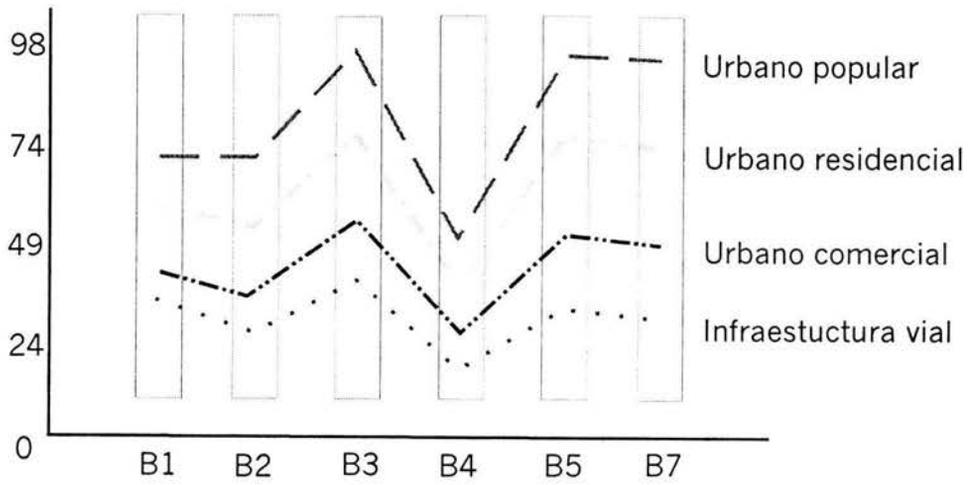


Fig.V.5 Firmas espectrales de las ocho clases utilizadas para la clasificación

CLASE	F O T O G R A F I A										EXAC. USUARIO
	Urb. Pop.	Urb. Com.	Urb. Res.	Infr. Vial	Mez. Veg.	Veg. Rib.	Veg. Bos.	Suelo Des.	0	TOTAL	
Urb. Popular	78	5	2	0	0	0	0	34	3	122	0.64
Urb. Comercial	0	82	8	2	0	0	0	1	4	97	0.85
Urb. Residencial	7	7	137	4	0	0	0	15	2	172	0.80
Infraestructura Vial	0	0	1	12	0	0	1	0	0	14	0.86
Mezcla de Vegetación	0	0	0	0	226	2	4	11	0	243	0.93
Vegetación de Ribera	0	0	0	0	0	52	0	0	0	52	1.00
Vegetación de Bosque	0	0	0	0	0	1	136	0	0	137	0.99
Suelo Desnudo	2	0	2	0	0	0	0	135	2	141	0.96
0									0		
TOTAL	87	94	150	18	226	55	141	196	11	978	
EXAC PRODUCT	0.90	0.87	0.91	0.67	1.00	0.95	0.96	0.69	0.88	Exactitud Total	

I M A G E N
2000

Tabla V.4 Matriz de error para la imagen clasificada del año del 2000.

En el mapa booleano de 1972 (Fig. 5.7 a) se tiene una perspectiva completa del estado en el cual se encontraba la mancha urbana con respecto a las áreas de vegetación que cubrían mucho más del 50% de la zona de estudio de estudio.

En el mapa booleano de 1992 (Fig. 5.7 b) empieza a ser notable la pérdida de vegetación y el crecimiento de la zona urbana en la periferia de la ciudad.

En el mapa booleano del 2000 (Fig. 5.7 c) es perceptible el deterioro sufrido en los Parques Nacionales como se ve toda la parte alta del cerro del Ajusco ha sufrido una deforestación y erosión del suelo, lo mismo ha sucedido en el desierto de los Leones y prácticamente en todo alrededor del Xictle.

Posteriormente de la realización de los mapas booleanos, aplicando el operador **OR** de la lógica booleana (Tabla V.5), se generaron mapas donde pueden ser perceptible las zonas de cambio registrado en este estudio multitemporal.

Cuatro son las clases que se pueden distinguir en estos mapas, las cuales se describen a continuación:

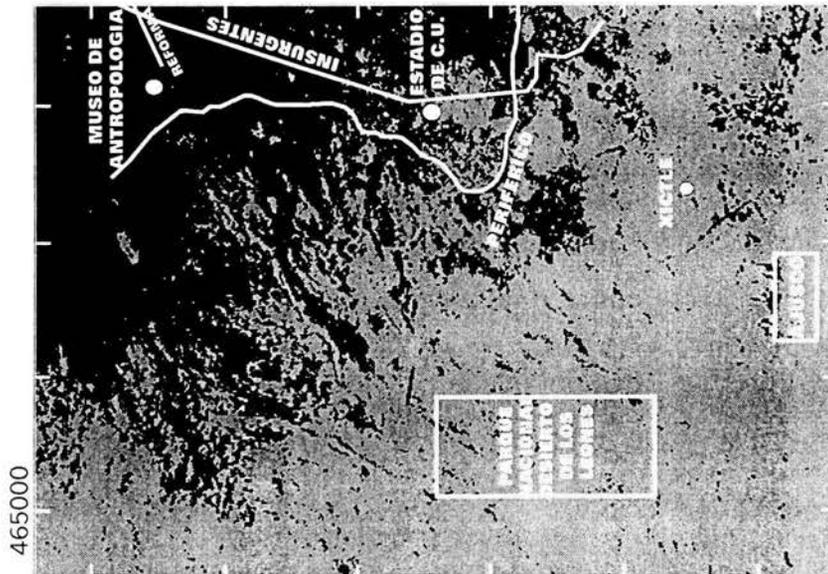
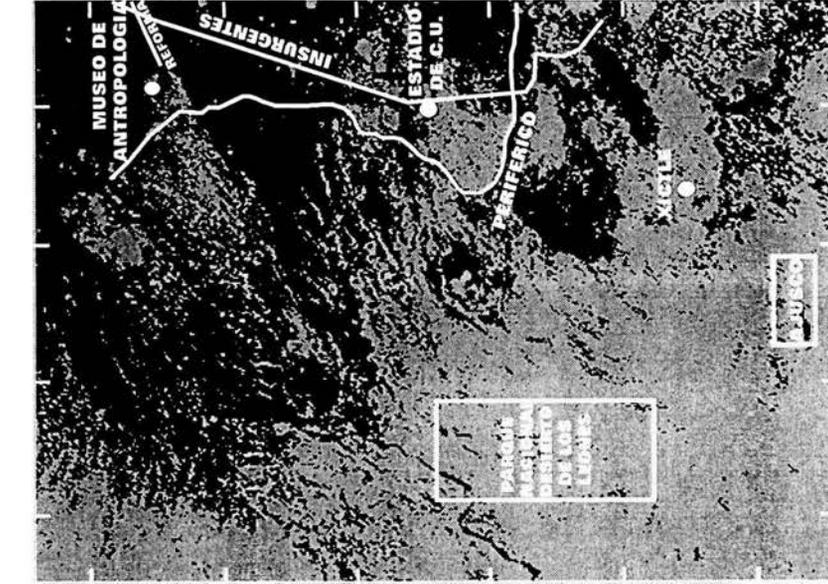
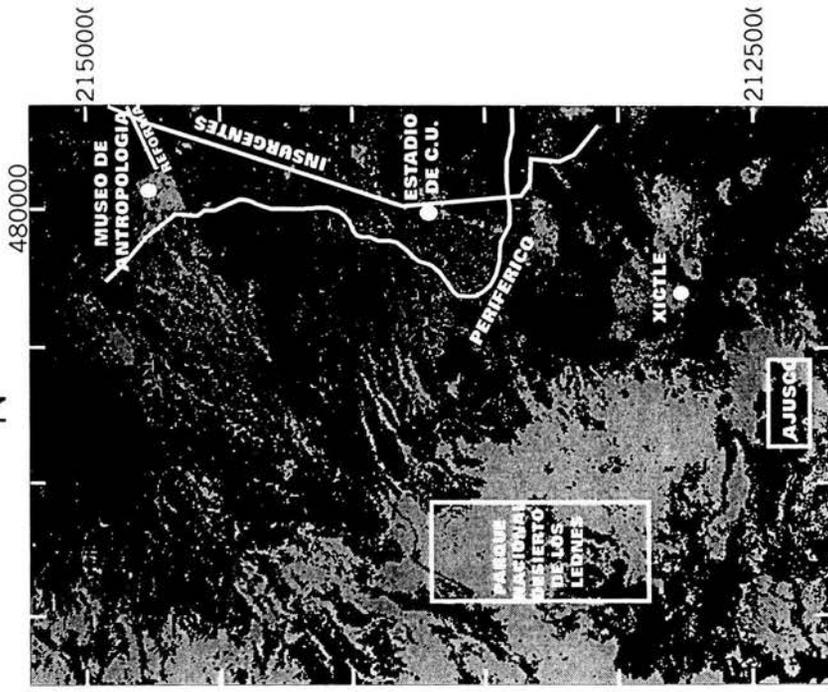
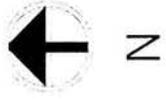
- Áreas urbanas sin cambio, las cuales están representadas por un color negro.
- Áreas que engloban todas las clases de vegetación que no han sufrido cambio alguno y las cuales están representadas por el color amarillo.
- Una área de cambio, la cual esta definida por zonas de vegetación que se modificaron pasando a ser parte de las áreas urbanas o suelos desnudos y están representados por un color azul.
- Una área de cambio, constituida por suelos desnudos que has sido reforestados identificados por un color verde.

En el mapa de cambio generado entre los años de 1973 y 1992 (Fig. 5.8 a), es muy notable el crecimiento de las áreas urbanas y el crecimiento del área de suelo desnudo que se tiene, el avance que tienen las zonas urbanas es hacia el sur. Los Parques nacionales como el Ajusco y el Desierto de los Leones no presentan una deforestación aún muy significativa. Mientras que las zonas de suelo desnudo que pasan a un tipo de vegetación, están ubicadas dentro de la mancha urbana, como es el Bosque de Chapultepec.

En el mapa de cambio generado entre los años de 1973 y 2000 (Fig. 5.8 b), es impresionante el cambio que tiene la vegetación, ya que Los Parques Nacionales como el Ajusco El Desierto de los Leones y el Xictle se observa una transformación del suelo vegetal pasando a ser parte de una infraestructura de tipo urbano. La única región que se ha reforestado se encuentra en el Bosque de Chapultepec.

Tabla V.5 Resultados del operador booleano.

Mapa del 73	Mapa del 2000	Operador booleano OR
1 (urbana)	1 (urbana)	2 (áreas urbanas sin cambio)
0 (vegetación)	1 (urbana)	1 (cambio de vegetación a zonas urbana ó suelo desnudo)
0 (vegetación)	0 (vegetación)	0 (vegetación sin cambio)
1(urbana)	0 (vegetación)	1 (cambio de zonas urbana ó suelo desnudo a vegetación)



a) Mapa booleano del año de 1973

b) Mapa Booleano del año de 1992

c) Mapa booleano del año del 2000



Zonas de vegetación

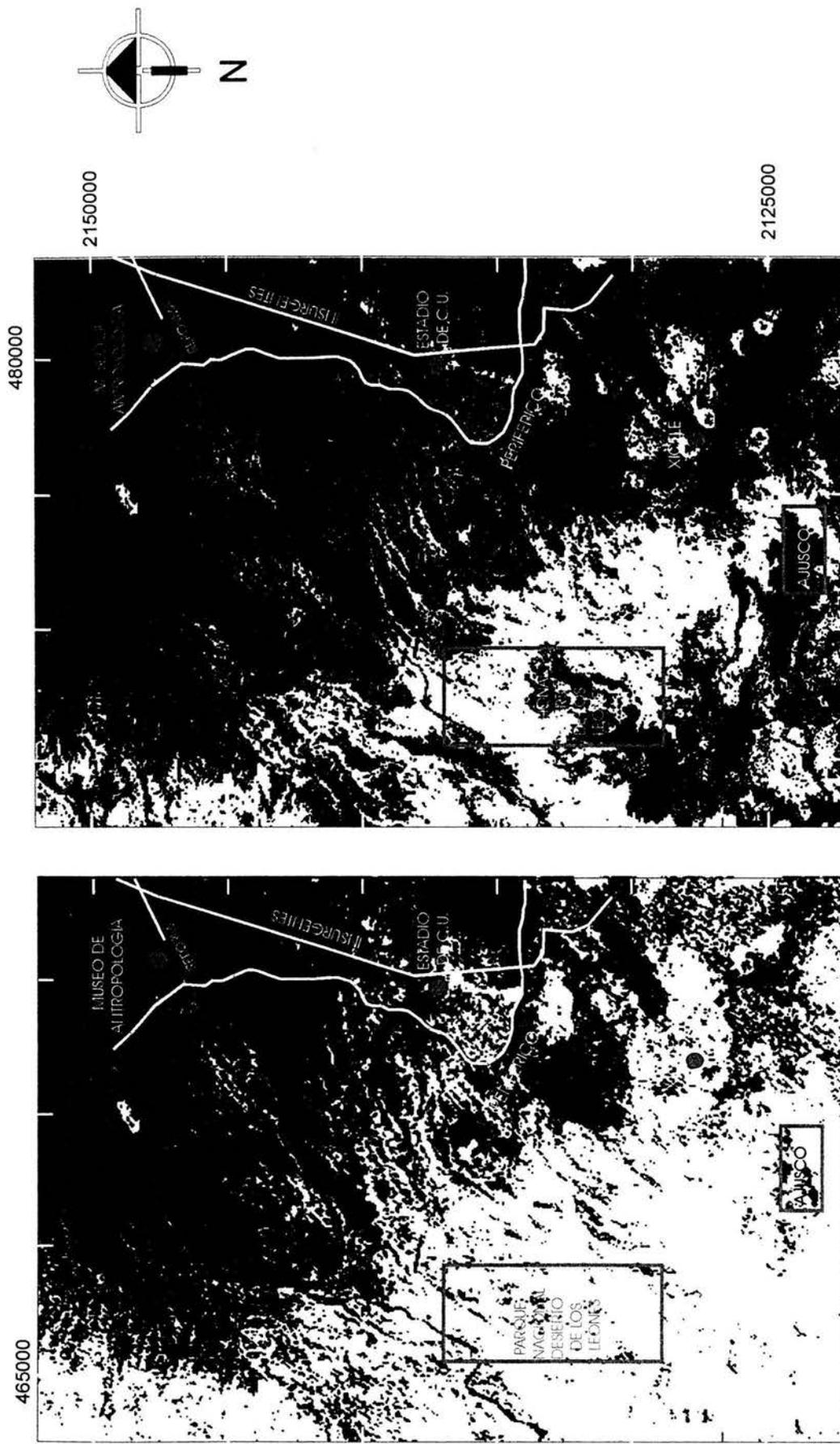


Zonas urbanas y suelo desnudo



Proyección UTM Zona 14N
Datum NAD 27
Elipsoide de Referencia Clark 1866

Fig. V.7 Mapas booleanos



a) Mapa de cambio entre los años de 1973 y 1992

b) Mapa de cambio entre los años de 1973 y 2000

■ Áreas Urbanas sin cambio
 □ Vegetación sin cambio
 ■ Áreas de cambio, vegetación que pasa a áreas urbanas ó suelo desnudo
 ■ Áreas de cambio, suelo desnudo que pasa a áreas de vegetación

Proyección UTM Zona 14N
 Datum NAD 27
 Elipsoide de Referencia Clark 1866

0 km 5

Fig. V.8 Mapas de cambio de vegetación generados a partir del NDVI

V.6 MATRIZ DE CAMBIO DE USO DE SUELO.

La matriz de cambio es una representación ideal para reportar los datos obtenidos de una clasificación, ya que proporciona una cuantificación del área y porcentaje contenida en cada una de las clases y la variación que se ha presentado dentro de las clases tomadas en cuenta en la clasificación.

La matriz de cambio reporta el cambio que han sufrido las clases tanto en kilómetros cuadrados como en porcentaje, la diagonal principal de la matriz significa el área de la clase que no ha sufrido cambio alguno, de esta forma los cambios reportados con signo negativo representa el área y porcentaje que se ha perdido de esta clase, mientras tanto el signo positivo tiene el significado de incremento en área original de la clase.

En la matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto a 1992 (Tabla V.6) se reporta:

La clase urbano popular reporta una pérdida, ya que en 1973 contaba con 58.845 km² y para 1992 sólo se contaba con 15.099 km².

La clase urbano comercial reporta un aumento, ya que en 1973 contaba con 65.896 km² y para 1992 se reporta 91.202 km².

La clase urbano residencial reporta una pérdida, en 1973 contaba con 132.429 km² y para 1992 se reporta 75.411 km².

La clase de infraestructura vial y zonas industriales reporta un aumento, en 1973 contaba con 5.697 km² y en 1992 se reporta 22.132 km².

La clase de mezcla de vegetación tiene un aumento, en 1973 contaba con 78.091 km² y para 1992 reporta 198.766 km².

La clase de vegetación de ribera reporta una pérdida, en 1973 contaba con 46.407 km² y para 1992 reporta 34.636 km².

La clase de vegetación de bosque reporta una pérdida, en 19973 contaba con 208.556 km² y para 1992 reporta 147.232 km².

La clase de suelo desnudo reporta un aumento, en 1973 contaba con 35.607 km² y para 1992 reporta 47.054 km².

En la matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto a 1992 se nota un incremento muy notable en la clase de infraestructura vial y zonas industriales, mientras que en las clases pertenecientes a la vegetación de ribera y bosque sufren una pérdida de área.

En la matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1992 respecto al 2000 (Tabla V.7) se reporta:

La clase urbano popular reporta un aumento, para 1992 contaba con 15.099 km² y para el año del 2000 se reporta 80.199 km².

La clase urbano comercial reporta una pérdida de área, en 1992 contaba con 91.202 para el 2000 se reporta 53.213 km².

La clase urbano residencial reporta un aumento de área, en 1992 contaba con 75.411 km² y para el año del 2000 reporta 121.703 km².

La clase de infraestructura vial y zonas industriales reporta una pérdida de área en 1992 contaba con 22.132 km² y para el año del 2000 reporta 15.938 km².

La clase de mezcla de vegetación reporta una pérdida, en 1992 contaba con 198.766 km² y para el año del 2000 se reporta 158.789 km².

La clase de vegetación de ribera reporta una pérdida de área, en 1992 contaba con 34.636 km² y para el año del 2000 se reporta 30.005 km².

La clase de vegetación de bosque reporta una pérdida de área, en 1992 contaba con 147.232 km² y para el año del 2000 se reporta 89.807 km².

La clase de suelo desnudo reporta un aumento de área, en 1992 contaba con 47.054 km² y para el año del 2000 se reporta 81.878 km².

La matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1992 respecto al 2000 reporta un aumento muy significativo en la clase de urbano popular, mientras que la vegetación de ribera y vegetación de bosque mantienen una tendencia de perdida de área.

En la matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto al 2000 (Tabla V.8) se reporta:

La clase urbano popular reporta un aumento de área, en 1973 contaba con 58.846 km² y para el 2000 se reporta 80.199 km².

La clase urbano comercial reporta una pérdida de área, en 1973 contaba con 65.896 km² y para el 2000 se reporta 53.213 km².

La clase urbano residencial reporta una pérdida de área, en 1973 contaba con 132.429 km² y para el 2000 se reporta 121.703 km².

La clase de infraestructura vial y zonas industriales reporta un aumento de área, en 1973 contaba con 5.697 km² y para el 2000 se reporta 15.938 km².

La clase de mezcla de vegetación reporta un incremento de área, en 1973 contaba con 78.091 km² y para el 2000 se reporta 158.789 km².

La clase de vegetación de ribera reporta una pérdida de área, en 1973 contaba con 46.407 km² y para el 2000 se reporta 30.005 km².

La clase de vegetación de bosque reporta una pérdida de área, en 1973 contaba con 208.556 km² y para el 2000 se reporta 89.807 km².

La clase de suelo desnudo reporta un aumento de área, en 1973 contaba con 35.607 km² y para el 2000 se reporta 81.878 km².

La matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto al 2000 reporta un esquema global del cambio que se ha registrado en la zona de estudio donde se ratifica la tendencia que se observaba en las dos matrices anteriores, se aprecia una aumento en la clase urbano popular y una perdida en las clases de vegetación de ribera y de bosque, así como también el aumento de la clase perteneciente a suelo desnudo y zonas agrícolas sin cultivar.

En la Tabla V.9 se da un resumen de las tres matrices de cambio.

Tabla V.6 Matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto a 1992 reportada en Km.

		IMAGEN 1973								
CLASES		Urb. Pop.	Urb. Com.	Urb. Res.	Infr. Vial	Mez. Veg.	Veg. Rib.	Veg. Bos.	Suelo Des.	TOTAL
I	Urb. Popular	6.048	2.057	4.598	0.866	0.723	0.532	0.084	0.193	15.099
M	Urb. Comercial	11.144	38.425	26.793	0.740	7.403	1.492	1.967	3.238	91.202
A	Urb. Residencial	22.487	12.489	25.194	2.291	6.275	3.423	0.974	2.280	75.411
G	Infraestructura Vial	1.650	9.103	7.231	0.161	1.944	0.297	0.932	0.815	22.132
E	Mezcla de Vegetación	7.637	2.867	41.215	0.615	39.383	16.888	70.548	19.613	198.766
N	Vegetación de Ribera	2.310	0.175	6.989	0.209	6.595	11.273	6.062	1.024	34.636
1992	Vegetación de Bosque	0.255	0.289	3.388	0.059	8.617	4.262	123.206	7.158	147.232
	Suelo Desnudo	7.315	0.492	17.024	0.758	7.152	8.241	4.784	1.288	47.054
	TOTAL	58.8456	65.8962	132.4296	5.697	78.0912	46.4076	208.5561	35.6076	
CAMBIO EN (km²)		-43.746	25.305	-57.019	16.435	120.675	-11.772	-61.324	11.446	
CAMBIOEN EN %		-74.34	38.40	-43.06	288.48	154.53	-25.37	-29.40	32.15	

Tabla V.7 Matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1992 respecto al 2000 reportada en km.

		IMAGEN 1992								
CLASES		Urb. Pop.	Urb. Com.	Urb. Res.	Infr. Vial	Mez. Veg.	Veg. Rib.	Veg. Bos.	Suelo Des.	TOTAL
I	Urb. Popular	7.283	11.272	20.226	2.013	17.605	6.615	2.075	13.111	80.199
M	Urb. Comercial	1.413	23.646	9.639	6.351	8.542	0.796	0.972	1.855	53.213
A	Urb. Residencial	4.584	38.672	34.255	6.152	22.989	4.013	2.462	8.576	121.703
G	Infraestructura Vial	0.281	3.947	1.462	1.851	4.343	0.337	3.143	0.574	15.938
E	Mezcla de Vegetación	0.738	9.531	5.579	3.737	82.908	6.191	42.077	8.028	158.789
N	Vegetación de Ribera	0.071	1.003	0.587	0.753	11.272	3.521	11.676	1.123	30.005
2000	Vegetación de Bosque	0.039	0.415	0.285	0.435	12.320	1.599	73.976	0.738	89.807
	Suelo Desnudo	0.691	2.716	3.379	0.840	38.787	11.564	10.852	13.048	81.878
	TOTAL	15.0993	91.2015	75.411	22.1319	198.7659	34.6356	147.2319	47.0538	
CAMBIO EN (km²)		65.100	-37.988	46.292	-6.194	-39.977	-4.631	-57.425	34.824	
CAMBIOEN EN %		431.14	-41.65	61.39	-27.99	-20.11	-13.37	-39.00	74.01	

CLASES	1973		1992		1973		1992		1973	
	AREA (km ²)	AREA (%)								
Urb. Popular	-43.746	-74.34	65.100	431.14	21.353	36.29				
Urb. Comercial	25.305	38.40	-37.988	-41.65	-12.683	-19.25				
Urb. Residencial	-57.019	-43.06	46.296	61.39	-10.727	-8.10				
Infraestructura Vial	16.435	288.48	-6.194	-27.99	10.241	179.76				
Mezcla de Vegetación	120.675	154.53	-39.977	-20.11	80.698	103.34				
Vegetación de Ribera	-11.772	-25.37	-4.631	-13.37	-16.403	-35.34				
Vegetación de Bosque	-61.324	-29.40	-57.425	-39.00	-118.750	-56.94				
Suelo Desnudo	11.446	32.15	34.824	74.01	46.270	129.94				

Tabla V.9 Resumen de las matrices de cambio.

Tabla V.8 Matriz de cambio entre la imagen clasificada de 1973 respecto al 2000 reportada en km.

		IMAGEN 1973								
CLASES		Urb. Pop.	Urb. Com.	Urb. Res.	Infr. Vial	Mez. Veg.	Veg. Rib.	Veg. Bos.	Suelo Des.	TOTAL
I M A G E N 2000	Urb. Popular	19.199	9.464	27.090	2.045	9.599	8.944	1.558	2.301	80.199
	Urb. Comercial	6.492	19.592	17.512	0.484	4.750	1.076	1.553	1.754	53.213
	Urb. Residencia	22.023	26.250	38.663	2.216	15.228	6.119	4.819	6.385	121.703
	Infraestructura Vial	1.044	3.595	4.254	0.080	1.950	0.305	3.899	0.811	15.938
	Mezcla de Vegetación	4.973	4.748	22.714	0.339	21.681	7.679	80.353	16.302	158.789
	Vegetación de Ribera	0.988	0.723	2.836	0.047	3.083	5.648	15.526	1.154	30.005
	Vegetación de Bosque	0.158	0.279	0.933	0.030	1.533	1.146	84.596	1.133	89.807
	Suelo Desnudo	3.969	1.247	18.427	0.456	20.267	15.491	16.253	5.768	81.878
	TOTAL	58.8456	65.8962	132.4296	5.697	78.0912	46.4076	208.5561	35.6076	
CAMBIO EN (km²)		21.353	-12.683	-10.727	10.241	80.698	-16.403	-118.750	46.270	
CAMBIO EN %		36.29	-19.25	-8.10	179.76	103.34	-35.34	-56.94	129.94	

RESUMEN

En este capítulo se aplicó toda la metodología descrita anteriormente, desde el inicio del pre-procesado de las imágenes, con las correcciones atmosféricas, las técnicas para la identificación de clases, la clasificación, así como la evaluación de la exactitud en los mapas de uso de suelo generados y la interpretación de las matrices cambio que se generaron, para poder encontrar la variación que ha sufrido cada clase en el lapso de tiempo del estudio realizado con las imágenes.

CONCLUSIONES

La clase urbano residencial y urbano comercial han perdido extensión de área para dar paso al crecimiento de una clase urbano popular en 21.353 km², lo cual puede ser un indicador del deterioro de las condiciones de vida en la zona de estudio.

La clase correspondiente a infraestructura vial y zona industrial ha crecido 10.241 km² lo que representa el 179% del área que contaba en 1973, esto da un indicativo a cerca del desarrollo que se ha sustentado en los entornos urbanos.

La clase correspondiente a vegetación de ribera tiene una pérdida de 16.403 km² lo que representa que el 12% del área original que se tenía en 1973 se conserva, mientras que el 19% se transformo en una clase urbano popular, el 33% paso a la clase de suelo desnudo y el 17% se transformo en una mezcla de vegetación.

La clase de vegetación de ribera se ha transformado en suelo desnudo y zonas populares.

La clase correspondiente a una vegetación de bosque reporta una pérdida de 118.75 km² lo que representa que solo el 41% del área original que se tenía en 1973 se conserva, mientras que el 39% pasa a una clase de mezcla de vegetación y el 8% paso a ser parte de la clase de suelo desnudo

La clase de vegetación de bosque se ha transformado en una mezcla de vegetación y suelo desnudo.

La clase referente a la mezcla de vegetación sufrió una ganancia de 80.698 km², esta fue obtenida a partir de la pérdida de área de la clase de vegetación de ribera y vegetación de bosque.

La clase de suelo desnudo y terrenos sin cultivar sufrió una ganancia de 46.270 km² esta se debe a la transformación que se dio en las tres clases que contenían vegetación.

Como consecuencia del crecimiento urbano se ha reducido la zona forestal y agrícola y se ha transformado la composición de los paisajes naturales que se consideran desde hace años como Parques Nacionales, teniendo como consecuencia la pérdida de flora y fauna la alteración de los ciclos hidrológicos naturales la erosión del suelo y la contaminación en todos sus ámbitos.

La Percepción Remota provee una fuente de datos viable para extraer eficientemente y con un bajo costo la información acerca de las cubiertas de suelo para ordenar, inventariar y monitorear efectivamente esos cambios.

RECOMENDACIONES

Es importante continuar con el desarrollo de esta metodología para poder utilizar el procesamiento digital de imágenes de satélite como una herramienta para la validación y actualización de la información geográfica existente.

Desarrollar métodos y estrategias de evaluación espacial de zonas urbanas, especialmente en formato digital para facilitar el empleo de nuevas técnicas para la planeación del desarrollo urbano.

Realizar un estudio similar para todo el Distrito Federal y la zona conurbana.

Implementar nuevos programas para la conservación y rescate de las áreas forestales que se encuentran en la vecindad del Distrito Federal.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrett, E., and Curtis, L.F., 1992, *Introduction to environmental Remote Sensing*, 3th ed., Champan & Hall.
- Benson, A. S., and DeGloria, S.D., 1985, "Interpretation of Landsat-4 thematic Mapper and Multispectral scanner data for forestry surveys", *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 51: 1281-1289.
- Bocco G. and Sánchez R., 1995, "Cuantificación del crecimiento de la mancha urbana usando percepción remota y sistemas de información geográfica. El caso de la ciudad de Tijuana, Baja California" (1973-1993). *VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, Vol. II, pp. 789-795.
- Chavez, P. S., 1989, "Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper. Multispectral images". *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 55: 1285-1294.
- Chavez, P.S., y Mackinnon, D.J., 1994, "Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States using remotely sensing images", *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 60: 571-583.
- Chuvieco E., 1990, *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid, RIALP Ediciones.
- CONABIO, 20001, Biodiversidad, <http://www.conabio.gob.mx>.
- Congalton, R. G., 1991, "A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data", *Remote Sensing. Environ*, 37: 35-46.
- Conghe S., Woodcock C E., Seto K., Lenney M., Macomber S. A., 2001, "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to correct atmospheric effects?", *Remote Sensing. Environment*, 75: 230-244.
- Department of the Environment, 1987, *Handling Geographic Information*, Londres, HMSO.
- Domínguez, B. J., 2000, "Breve Introducción a la Cartografía y los Sistemas de Información Geográfica(SIG)". *Informes Técnicos Ciemat*, No 943.
- Duggin, M. J., and Robinove, C.J., 1990, "Assumptions implicit in remote sensing data acquisition and analysis", *Int. J Remote Sensing*, 11: 1669-1694.
- Fraser, R. S., Bahethi, O.P., and Al-Abbas, A.H., 1997, "The effect of the atmosphere on the classification of satellite observation to identify surface features", *Remote Sensing of Environment*, 6: 229-249.
- Gutierrez P. J. y Gould M., 1994, *SIG: Sistemas de Información Geográfica*, Madrid, Síntesis.
- Hewlett Packard, 1993, *Spatial data processing with computer system*, Hewlett Packard.

- INEGI, 2002, Entidades, <http://www.inegi.gob.mx>.
- INFOCARTO, 2002, Landsat, <http://www.infocarto.es/>
- Jensen, J.R., 1996, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2nd ed. Prentice Hall.
- Kwarteng A. Y. and Chavez, Jr P. S., 1998, "Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data", *Int. J. Remote Sensing*, 19: 1651-1662.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, .W., 1987, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 2nd ed. John Wiley & Sons.
- López M. C., 2000, Evaluación del cambio de uso del suelo en la Vertiente Oriental de la Cuenca de México utilizando imágenes de Percepción Remota, Tesis, UNAM, México.
- Luque S.S., 2000, "Evaluating temporal change using Multi-Spectral Scanner and Thematic Mapper data on the landscape of a natural reserve: the New Jersey Pine Barrens, a case study", *Int. J. Remote Sensing*, 21: 2589-2611.
- Martinez Montoya J.F., 1995, "Uso del suelo en Ahualco y Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí", México. *VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, Vol. II, pp. 845-851.
- Mas J.-F., 1999, "Monitoring lands-cover changes: a comparison of change detection techniques", *Int. J. Remote Sensing*, 20: 139-152.
- Michener, W. K., and Houhoulis, P.F., 1997, "Detection of vegetation changes with extensive flooding in a forested ecosystem", *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 63: 1363-1374.
- NASA, 2002, Landsat, <http://rst.gsfc.nasa.gov>.
- NCGIA, 1994, National Center for Geographic Information and Analysis de E.U., *Core Curriculum*. Santa Barbara, Universidad de California.
- Prakash A. and Gupta R. P., 1998, "Land-use mapping and change detection in a coal area a case study in the Jharia coalfield, India", *Int. J. Remote Sensing*, 19: 391-410.
- Prol-Ledesma R.M., Uribe-Alcántara E.M. and Diaz-Molina O., 2002, "Use of cartographic data and Landsat TM images to determine land use change in the vicinity of Mexico City". *Int. J. Remote Sensing*, 9: 1927-1933.
- Ridd K.M. and Liu J., 1998, "A Comparison of Four Algorithms for Change Detection in an Urban Environment", *Remote Sensing Environment*, 63: 95-100.
- Ruiz-Armenta J.R. and Prol-Ledesma R.M., 1998, "Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico" *Int. J. Remote Sensing*, 19: 1981-200.
- Serway, R.A., 1997, *Física, Vol. II*, 4th ed., McGraw-Hill.

- Singh, A., 1989, "Digital change detection techniques using remotely-sensed data". *Int. J Remote Sensing*, 10: 989-1003.
- Spring, 2002, Sensor, <http://www.dpi.inpe.br/spring/>
- Star y Estes, 1991, *Geographic Information System an introduction*, Nueva Yersey, Englewood Cliffs.
- Story M. and Congalton R., 1986, "Accuracy assessment: a user's perspective", *Photogramm. Eng. Remote Sensing*. 52: 397-399.
- Szekielda, K.H., 1988, *Satellite Monitoring of the earth*, Jhon Wiley & Sons.
- UM, 2003, SIG, <http://www.um.es/~geograf>
- Vargas M. F., 1984, Parques, <http://www.planeta.com/ecotravel/mexico>
- Vega C. G., 2001, El papel de la cartografía digital en el funcionamiento de los SIG, Tesis, UNAM, México.