



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS



ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE VEGETACIÓN
Y USO DE SUELO DEL "CORREDOR BIOLÓGICO
CHICHINAUTZIN" - MORELOS, UTILIZANDO IMÁGENES
DE SATÉLITE ETM+ DEL AÑO 2000

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

ÁLVARO VEGA GUZMÁN

DIRECTOR DE TESIS
Dr. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA

México, D.F., 2004



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Alvaro Vega Guzmán
FECHA: 10 de septiembre del 2004
FIRMA: 

CON MUCHO CARINO

A MIS PAPAS;

SU EJEMPLO Y APOYO INCONDICIONAL

SON MUY VALIOSOS PARA MI:

GRACIAS.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. José López García, quien me ha brindado un gran apoyo a lo largo de este tiempo; sus acertadas observaciones y paciencia fueron de mucha ayuda.

Al M. en C. Rogelio Oliver Guadarrama, del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, con quien, en forma conjunta, se llevó a cabo el proyecto del cual forma parte este trabajo.

Al Dr. José Lugo Hubp por el apoyo prestado para ingresar al Programa de Becas de Tesis de Licenciatura (PROBETEL).

Al Instituto de Geografía por las amplias facilidades proporcionadas para realizar el presente trabajo dentro de sus instalaciones, y al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota.

Mi agradecimiento también, a los Maestros Alberto López Santoyo, Mauricio R. Aceves García, Oralia Oropeza Orozco y José Manuel Espinoza Rodríguez por la revisión del trabajo escrito; todos sus comentarios y observaciones fueron muy valiosos.

A Pablo, Adriana, Norma, Marco, Gabriela y Lilia.

A todos: GRACIAS

**ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO
DEL “CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN” - MORELOS, UTILIZANDO
IMÁGENES DE SATÉLITE ETM+ DEL AÑO 2000***

**Elaborada por Álvaro Vega Guzmán
Colegio de Geografía
Facultad de Filosofía y Letras*

*Director Dr. José López García
Instituto de Geografía*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
Objetivo general	
Objetivos particulares	
RESUMEN	7
ANTECEDENTES	8
CAPITULO I. EL CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN	
I.1. Localización.....	10
I.2. Características físicas.....	14
I.3. Características socio-económicas.....	16
CAPITULO II. PERCEPCIÓN REMOTA, VEGETACIÓN Y USOS DEL SUELO	
II.1. Concepto de Percepción Remota.....	18
II.2. Percepción Remota Espacial.....	20
II.2.1. El espectro electromagnético.....	20
II.2.2. La firma espectral.....	22
II.2.3. Sensor ETM+.....	23
II.2.4. La resolución.....	25
II.2.5. Las imágenes de satélite.....	27
II.3. Procesamiento de las imágenes satelitales.....	29
II.3.1. Interpretación digital.....	30
II.3.2. Interpretación visual.....	33
II.4. Percepción Remota Aérea.....	34
II.4.1. Fotografía aérea.....	35
II.4.2. Fotointerpretación.....	37
II.5. Importancia del trabajo de campo.....	38

II.6. Vegetación	39
II.6.1. Tipos de Vegetación.....	40
II.7. Usos del suelo	46
II.8. Sistemas de Información Geográfica	47
II.8.1. Modelo Digital de Elevación.....	49

CAPITULO III. MÉTODO

III.1. Materiales	51
III.2. Definición de los límites de la zona en estudio	54
III.3. El trabajo de campo	57
III.4. Definición de la leyenda de trabajo	57
III.5. Fase 1. Clasificación digital	58
III.6. Fase 2. Fiabilidad de la clasificación	60
III.7. Fase 3. Interpretación visual de las imágenes	61

CAPITULO IV. VEGETACIÓN Y USOS DEL SUELO CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN	62
--	-----------

CAPITULO V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Fase 1 y 2	67
Fase 3	77

CONCLUSIONES	82
---------------------	-----------

FUENTES

Referencias y bibliografía consultada	84
Consulta en Internet	86
Cartografía	87

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis forma parte del proyecto interinstitucional entre la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y la Universidad Nacional Autónoma de México, titulado “Evaluación de Tierras del Corredor Biológico Chichinautzin”, en el cual se pretende evaluar el grado de alteración de los recursos naturales de esta zona, para con ello, proponer alternativas de conservación y manejo adecuadas a sus características presentes.

Por lo tanto, la vegetación como un recurso natural debe ser evaluada desde todos los ángulos posibles, el que aquí se abarca es la localización y distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo presentes en la superficie administrativa de las Áreas Naturales Protegidas “Corredor Biológico Chichinautzin”, “Lagunas de Zempoala” y “El Tepozteco” denominadas, como **región integrada, Corredor Biológico Chichinautzin**.

Objetivo general

- ① Elaborar un mapa de vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, utilizando imágenes de satélite obtenidas por el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

Objetivos particulares

- ① Utilizar fotografías aéreas, digitales y analógicas, para obtener puntos muestra de referencia de los tipos de vegetación y usos del suelo presentes en el área en estudio.
- ① Elaborar una clasificación digital sobre las imágenes ETM+ para obtener un primer producto cartográfico de los tipos de vegetación y usos del suelo de la región.
- ① Estimar el grado de precisión de la clasificación digital mediante puntos de referencia obtenidos con trabajo de campo y fotointerpretación.
- ① Interpretar visualmente las imágenes de satélite y con ello reinterpretar la clasificación digital para, finalmente, obtener un mapa confiable de vegetación y usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin.
- ① Establecer el grado de precisión del mapa final utilizando puntos muestra de referencia, obtenidos mediante técnicas de fotointerpretación.

El cuerpo del trabajo está estructurado en cinco capítulos y tres secciones referentes a antecedentes, conclusiones y bibliografía y cartografía consultada. En el apartado antecedentes, se mencionan algunos estudios temáticos que se han elaborado sobre el corredor biológico, e investigaciones representativas desarrolladas en otros lugares utilizando técnicas semejantes a la aquí presentada, mientras que la sección conclusiones, indica los puntos concluyentes una vez finalizado el proyecto.

El capítulo primero presenta un breve marco de referencia espacial de la zona en estudio; estructurado en dos secciones, la primera de ellas menciona la relación que tiene el Corredor Biológico Chichinautzin dentro de la entidad federativa a la que pertenece y establece su localización geográfica, superficie y organización espacial administrativa, mientras que la sección segunda describe sus principales características geográficas físicas.

Las líneas generales de referencia teórica, tanto de la zona en estudio como de las técnicas utilizadas y elementos analizados, se presentan en el capítulo II. Los principios básicos de la percepción remota son señalados en los cuatro primeros apartados, donde se describe su concepto, características, división y métodos de procesamiento de las imágenes satelitales. Se hace mención, también, en el quinto apartado, del papel que juega el trabajo de campo en las investigaciones geográficas, especialmente en las elaboradas mediante la técnica aquí utilizada. El punto sexto y séptimo establecen las características y parámetros considerados en la clasificación de la vegetación y usos del suelo de la zona en estudio. Por último, y para facilitar la integración y análisis de los resultados, fue preciso comprender el concepto y características de los sistemas de información geográfica, por lo que en el punto número ocho se describen los principios básicos de los mismos.

El tercer capítulo describe los métodos empleados para la cumplir los objetivos planteados; la primera parte presenta las características de los diferentes materiales que fueron utilizados en la elaboración del mapa de vegetación y usos de suelo; como segundo punto, se explica el procedimiento que se siguió para determinar los límites administrativos de la zona en estudio, y en tercer término se desarrolla el aspecto referido al trabajo de campo. Una cuarta sección muestra y explica la leyenda de trabajo, mientras que las secciones restantes se refieren a las tres fases en las que fue dividido el proyecto para obtener la cartografía deseada: fase 1, se describe el procesamiento al que fueron sujetas las imágenes de satélite para clasificarlas digitalmente; fase 2, se menciona la manera en que fueron seleccionados puntos muestra de referencia mediante fotointerpretación y trabajos de campo para definir la precisión de la

clasificación digital; fase 3, se establece el procedimiento que se siguió para corregir los errores de la clasificación digital a través de una interpretación visual de las imágenes ETM+.

Los capítulos cuarto y quinto describen y analizan los resultados obtenidos. El primero de ellos señala la vegetación y usos del suelo existentes en la zona en estudio y menciona la existencia de las diferentes categorías establecidas en función de las tres Áreas Naturales Protegidas que integran al corredor biológico. El segundo analiza los resultados que se obtuvieron de acuerdo a cada fase en la que fue dividido el proyecto.

RESUMEN

Aplicando técnicas de interpretación digital y visual sobre imágenes de satélite obtenidas el 21 de marzo del 2000 por el sensor ETM+ del programa Landsat, se elaboró un mapa de distribución de la Vegetación y Usos del Suelo del Corredor Biológico Chichinautzin, integrado por el Área de Protección de Flora y Fauna del mismo nombre y por los Parques Nacionales “Lagunas de Zempoala” y “El Tepozteco”. Estas tres Áreas Naturales Protegidas (ANP) establecen un corredor biológico que sirve de barrera a la creciente conurbación de las manchas urbanas de la región y, a su vez, protege la zona intermedia entre los parques nacionales ya mencionados y asegurara la continuidad de los procesos ecológicos y evolutivos de la biota.

Localizado en la porción noroccidental del estado de Morelos, **el área en estudio, Corredor Biológico Chichinautzin**, posee una superficie de 66,092 ha, y está integrada por tres de las nueve ANP del estado. Constituido por coberturas antrópicas, tales como la agropecuaria y los asentamientos humanos, y coberturas vegetales naturales, como las comunidades de bosque tropical, de coníferas y de latifoliadas, es una región que presenta una constante alteración de sus recursos naturales, dando como resultado una creciente fragmentación de sus diferentes coberturas vegetales.

La cartografía obtenida arrojó una precisión global del 90.15% en relación con la comparación de puntos muestra de referencia obtenidos mediante trabajo de campo e interpretación de fotografías aéreas digitales y analógicas, estableciendo, de esta forma, que el mapa de Vegetación y Usos del Suelo del corredor biológico es confiable. Cualitativamente, esta confiabilidad del mapa fue determinada al sobreponer a una composición en color de las imágenes ETM+ los vectores de las diferentes unidades separadas y observar, con ello, la coincidencia cromática de la composición en color con la clasificación realizada.

El uso del suelo que mayor superficie abarca dentro del corredor biológico es el agropecuario, con un 26.8%, mientras que los tipos de vegetación más representativos son el bosque de pino (21.38%) y el bosque de encino (16.07%); el bosque tropical caducifolio y el bosque mixto representan el 14.42 y 11.22% respectivamente, de las 64,151.2 ha del Corredor Biológico Chichinautzin calculadas digitalmente. El resto de las unidades no supera el 5% de representación espacial mientras que los matorrales no alcanzan el 1% de superficie.

ANTECEDENTES

a) De la zona en estudio

La porción norte del estado de Morelos, perteneciente al Sistema Volcánico Transversal y específicamente al complejo volcánico Chichinautzin, *ha sido objeto de un gran número de trabajos y estudios de diversos enfoques. Entre los aspectos mejor estudiados encontramos la geomorfología, el clima, la vegetación y la fauna. Cabe aclarar que los trabajos anteriores son a nivel general de la zona...* (UAM y UAEM, 1990).

De los trabajos elaborados en el campo de la geomorfología destaca el de *Geomorfología de la Cuenca de México (op. cit.)*, donde se describen, de forma general, las características geomorfológicas de la región norte del estado, y donde hace mención de algunos elementos relevantes de la Sierra Chichinautzin por ser ésta parte de la cuenca. Otros trabajos más recientes (Swinamer 1986; Márquez *et al.*, 1999), además de abarcar la geomorfología de la sierra, estudian aspectos tales como la petrografía, la geoquímica y la petrogénesis de las rocas. Dentro de este mismo campo existen estudios relacionados con el tectonismo, paleomagnetismo y vulcanología.

De la vegetación se han realizado listados florísticos generales del estado, así como análisis de comunidades vegetales y usos de suelo en algunos municipios del corredor o secciones de éste; entre estos se encuentra la tesis realizada por Corbera E. Esteve (1999) donde analiza la producción agropecuaria del municipio de Huitzilac y su relación con el cambio de uso del suelo a lo largo del periodo comprendido entre 1970 y 1993.

Dentro del mismo proyecto entre la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y la Universidad Nacional Autónoma de México, se elaboraron dos tesis de licenciatura paralelas a la aquí presentada. Una de ellas, realizada por Garcíagómez S. Pablo R. (2004), "Evaluación del Cambio de Uso del Suelo en la Región de Tepoztlán, Estado de Morelos", tiene la característica esencial de presentar un análisis espacio-temporal de la zona central del corredor, mediante la interpretación de las fotografías aéreas de los años 1970 y 1993. Con otra temática, Martínez R. Adriana (2003), elaboró un levantamiento de suelos a partir de la delimitación de los mismos mediante la interpretación de las fotografías aéreas del año 1993, auxiliándose con datos recabados en trabajo de campo (descripción y análisis de perfiles edafológicos). El título del

trabajo de tesis es: "Levantamiento de Suelos a Nivel General del Corredor Biológico Chichinautzin".

Con diferente perspectiva se encuentra, en proceso de elaboración, el proyecto de tesis "Estado de Conservación de los Suelos en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos", donde se hace un análisis del grado de conservación de los suelos, por Saucedo R. Norma.

b) De la técnica utilizada

Uno de los estudios realizados sobre la entidad utilizando percepción remota es el elaborado por Trejo y Hernández (1996), donde a partir de imágenes Landsat TM y trabajo de campo identifican digitalmente el bosque tropical caducifolio (selva baja caducifolia), obteniendo con ello una cartografía de la distribución de los bosques de Morelos. Del mismo modo, las imágenes Landsat 7 ETM+ fueron utilizadas para elaborar el Inventario Nacional Forestal 2000 (Instituto de Geografía, SEMARNAP e INEGI). En él, mediante una interpretación visual de las imágenes impresas en composiciones en color y la Serie III de INEGI, se elaboró la cartografía de la vegetación existente en la República Mexicana a escala 1:250,000.

Las imágenes NOAA-AVHRR, pese a ser imágenes con objetivos meteorológicos, son muy utilizadas para la identificación de coberturas vegetales, son, por lo tanto, muchos los trabajos que se han realizado utilizando imágenes meteorológicas. En México, se llevó a cabo un proyecto utilizando los datos del sensor AVHRR auspiciado por el US Department of Agriculture, Servicio Forestal y la FAO de las Naciones Unidas titulado: "Cartografiando el Territorio Forestal de México con el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución", con el objetivo de ayudar a científicos mexicanos a generar mapas de la cobertura forestal del país. Aquí, se clasificaron digitalmente los datos obtenidos por el sensor en diciembre y marzo de 1990, obteniéndose un mapa de México con sus diferentes coberturas vegetales, dichos resultados fueron verificados mediante datos de campo y datos del sensor TM. Un proyecto similar fue iniciado en 1992 por el International Geosphere and Biosphere Programme (IGBP), en él se elaboraron y validaron una serie de datos y productos cartográficos sobre la cobertura global del suelo obtenidos a partir de la clasificación digital de datos del sensor AVHRR. Este proyecto, llamado IGBP-DISCOVER (Data and Information System 1km. Global Land Cover), tuvo como objetivo principal el de elaborar información confiable sobre la cobertura global del suelo y con ello crear modelos que previnieran la degradación del planeta, dicho proyecto finalizó en marzo de 1999 con el análisis de los resultados.

CAPITULO I

EL CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN

I.1. Localización

El área en estudio se encuentra enmarcada dentro de una de las entidades federativas más pequeñas de la República Mexicana: el estado de Morelos (Figura I.1.). Según datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), esta entidad federativa posee una superficie de 4865.954 Km², lo cual representa el 0.25% de la superficie del país¹ (2001), sin embargo, su ubicación le confiere características muy particulares a cada uno de los elementos geográficos que constituyen el espacio morelense y propician una riqueza de especies animales y vegetales reunidas en ambientes diversos.

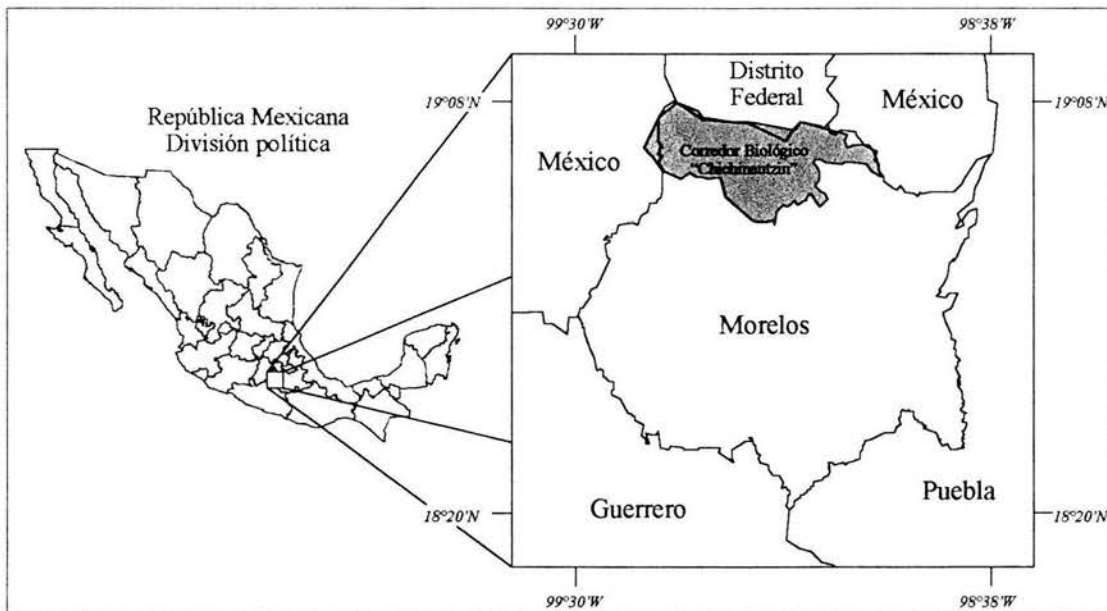


Figura I.1. Localización del Corredor Biológico Chichinautzin dentro del estado de Morelos. (Elaborada por: Vega G., Álvaro)

De acuerdo con los registros disponibles, en el estado de Morelos se encuentran representadas el 10 % de las especies de plantas de México, el 33 % de las especies de aves, el 5 % de los peces de agua dulce, el 14 % de los reptiles y 21 % de las especies de mamíferos mexicanos. Por esta razón se le clasifica en el decimotercer lugar por la importancia de su biodiversidad

1. Los datos referentes a la extensión de la entidad varían según la fuente de consulta; para el Gobierno del estado de Morelos la entidad tiene una superficie territorial de 4959 Km²; mientras que algunos autores, Trejo y Hernández (1996) mencionan que la superficie del estado es de 4999 Km².

respecto a otros estados de la República Mexicana (CONABIO, 2003).

Sus variados escenarios y recursos naturales, así como el impacto sufrido en los ambientes naturales de la entidad en las últimas décadas, han motivado la creación de 9 Áreas Naturales Protegidas² (ANP), 6 de carácter federal³ (SEMARNAT, 2000) y 4 de carácter estatal (INEGI, 2001; Gobierno del Estado, 2001) (Tabla I.1.). Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), citando a Ordóñez y Flores (1995), menciona que es uno de los Estados con mayor proporción de superficie protegida (cuarto lugar en el ámbito nacional).

Ubicado en la porción noroccidental del estado de Morelos, en la vertiente sur del Sistema Volcánico Transversal; entre los paralelos 18°53'21" y 19°07'50" de latitud norte y los meridianos 98°51'56" y 99°21'02" de longitud oeste, y con un rango altitudinal que abarca de los 1,250 a los 3,600 m, la zona en estudio está integrada por tres ÁNP.

2. La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), Título segundo – Biodiversidad–, Capítulo I –Áreas Naturales Protegidas–, Sección II –Tipos y Características de las Áreas Naturales Protegidas–, muestra las categorías de las ANP. Estas son:

Reserva de la Biosfera

Monumentos Naturales

Área de Protección de Recursos Naturales

Santuarios

Parques y Reservas Estatales

Zonas de preservación ecológica de los centros de población

En este trabajo se hace especial mención de dos categorías, por lo que se describen sus características.

Parques Nacionales. Se constituirán de uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general. Sólo podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna y con la preservación de los ecosistemas y de sus elementos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológicos (LGEEPA).

Área de Protección de Flora y Fauna. Se constituirán en los lugares que contienen el hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres. Podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia. Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habiten (LGEEPA).

3. La superficie de las ANP de carácter federal abarca en su extensión parte del Distrito Federal (delegaciones Milpa Alta y Tlalpan) y porciones de los estados de México, Puebla y Guerrero.

<i>Áreas Naturales Protegidas de carácter federal ^(a)</i>		
<i>Categoría</i>	<i>Nombre</i>	<i>Superficie (Ha.)*</i>
Parque Nacional	El Tepozteco	24,000
	Iztaccihuatl-Popocatepetl	25,679
	Lagunas de Zempoala	4,669
Reserva de la Biosfera	Sierra de Huautla	59,030
Área de Protección de Flora y Fauna	Corredor Biológico Chichinautzin	37,302
<i>Áreas Naturales Protegidas de carácter estatal ^(b)</i>		
<i>Categoría</i>	<i>Nombre</i>	<i>Superficie (Ha.)**</i>
Área de Conservación Ecológica	El Texcal	408
Área Natural Protegida	Los Sabinos-Santa Rosa-San Cristóbal de Cuautla	152
Reserva Estatal	Las Estacas	652
	Sierra Monte Negro	7,328
a) Son responsabilidad de la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (SEMARNAT) a través del Instituto Nacional de Ecología (INE). b) Son responsabilidad de la Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente y de los ayuntamientos donde se ubican * SEMARNAT - INE, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, 2000. ** Gobierno del estado de Morelos. México, 2001.		

Tabla I.1. Áreas Naturales Protegidas en el estado de Morelos

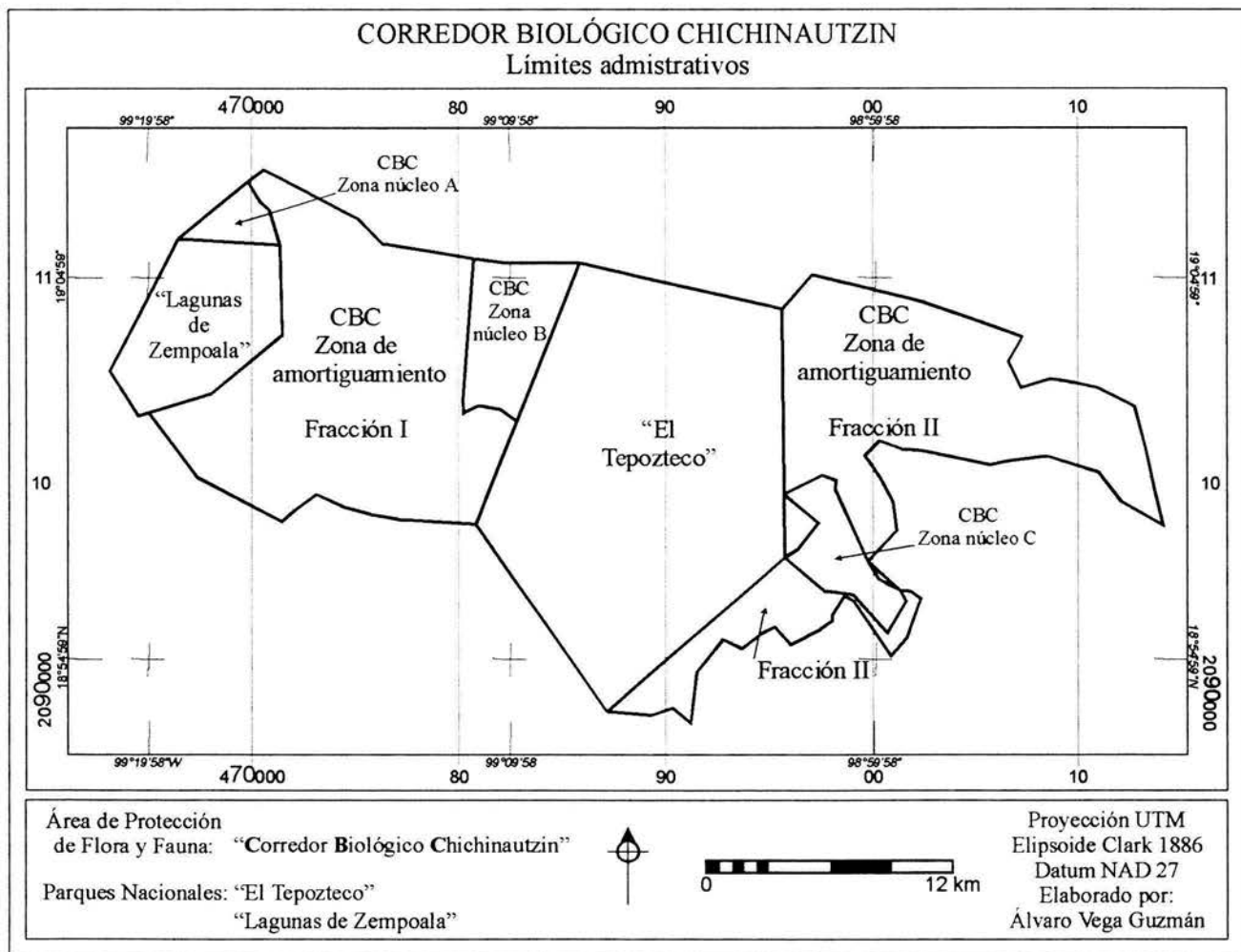
La primera de ellas, el Área de Protección de Flora y Fauna denominada "Corredor Biológico Chichinautzin", fue decretada el día 30 noviembre de 1988. Se creó con el objetivo de establecer un corredor biológico que integrase los Parques Nacionales "Lagunas de Zempoala" y "El Tepozteco" y sirviera de barrera a la conurbación de las manchas urbanas del norte de Morelos y sur del Distrito Federal, el área protege la zona intermedia entre los parques nacionales ya mencionados y asegura la continuidad de los procesos ecológicos y evolutivos de la biota de la zona (INE, 2000).

Esta ANP se integra por tres zonas núcleo que cubren el 14.47% de sus 37302 Ha totales; su característica principal consiste en que son áreas poco alteradas, donde sus ecosistemas son el hábitat de especies de flora y fauna silvestre que es necesario proteger por ser endémicas o estar en peligro de extinción. Estas zonas núcleo son:

- A) Chalchihuites, cuya superficie es de 783.14 Ha.
- B) Chichinautzin - Quiahuistepec con 2873.11 Ha.
- C) Las Mariposas, con una extensión de 1740.86 Ha.

La superficie restante es denominada zona de amortiguamiento y su objetivo es el de proteger y reducir el impacto en las zonas núcleo. Aquí se realizan diversas actividades productivas tales como: agricultura de temporal, ganadería y explotación forestal. Se realizan también, actividades con fines recreativos, educativos y de investigación.

Por su parte, “El Tepozteco” y “Lagunas de Zempoala” con 24000 y 4790 Ha respectivamente, son las otras dos ANP que integran la zona en estudio y son contiguas al Área de Protección de Flora y Fauna y conservan su categoría de manejo de Parque Nacional (Mapa I.1.).



Mapa I.1. Límites de la zona en estudio denominada: Corredor Biológico Chichinautzin.

El Área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin” y los Parques Nacionales “Lagunas de Zempoala” y “El Tepozteco” integran un sistema más completo que funciona como una zona de continuidad entre tres ANP y definen, en conjunto, la **zona en estudio denominada Corredor Biológico Chichinautzin** (Comisión Nacional de Áreas Naturales

Protegidas). Por lo tanto, la superficie total resulta de la suma de las superficies decretadas correspondientes a cada Área Natural Protegida: 66,092 Ha (Tabla I.2.)

		<i>Superficie (Ha.)</i>
Área de Protección de Flora y Fauna	“Corredor Biológico Chichinautzin”	37,302
Parque Nacional	“Lagunas de Zempoala”	4,790
Parque Nacional	“El Tepozteco”	24,000
<i>Superficie de la zona en estudio</i>		66,092

Tabla I. 2. Superficie total decretada de la zona en estudio Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos-México.

1.2. Características físicas

La extensión del Corredor Biológico Chichinautzin cubre la zona central del complejo volcánico Sierra Chichinautzin.

La actividad volcánica del Cuaternario temprano formó la Sierra Chichinautzin entre los volcanes Ajusco y Popocatepetl (Mooser, 1975), representa por lo tanto, una zona de volcanes jóvenes con promedio de hasta 120 unidades por cada mil kilómetros cuadrados (Lugo *et al.*, 1985) y una edad menor de 50,000 años (Martín del Pozzo, 1990). Dadas las características geológicas de la Sierra, ésta ha sido definida por Fries (1960) como *todas las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, depositados por agua, de composición andesítica o basáltica que descansan encima de la Formación Cuemavaca o de unidades más antiguas*. Él mismo define tres tipos de volcanes en la Sierra Chichinautzin: de lava, conos de escoria y domos de lava.

Según Lugo *et al.* (1985), el relieve de la zona es de los más jóvenes dentro del territorio mexicano, representa *un conjunto montañoso en proceso de formación en lo que fue una superficie inclinada al sur, cortada por valles fluviales*. El mismo autor describe la morfología actual en función de los procesos volcánicos que han ocurrido a lo largo del tiempo, estableciendo que se estructura *por conos volcánicos y lavas que se superponen a la planicie lacustre en algunas localidades con poca altitud (Milpa Alta y Amecameca) y en otras con*

*elevación considerable (entre los volcanes Ajusco y Chichinautzin)*⁵ (*op. cit.*). La Sierra Chichinautzin presenta, así, una gran diversidad en las formas del relieve.

La actividad endógena volcánica ha formado un relieve de tipo acumulativo a través de conos cineríticos, coladas de lava, domos y laderas lávicas; existe, también, relieve endógeno modelado que se expresa en las laderas volcánicas erosionadas y en montañas de plegamiento. Por otra parte, la actividad exógena ha formado zonas de acumulación como piedemonte y aluviones.

La hidrografía del Corredor Biológico Chichinautzin representa una importante zona de recarga de los mantos acuíferos, ya que por su ubicación dentro de la Sierra Chichinautzin es una de las áreas con mayor capacidad de infiltración en el estado; el índice de infiltración según la UAEM-UAM (1990) es del 70%–80%. Esta capacidad de infiltración permite que con el aprovechamiento de estos acuíferos se desarrollen las actividades económicas y domésticas de la región. Las cabeceras hídricas de los ríos Yautepec y Apatlaco, ubicadas dentro del corredor, mantienen el balance hídrico en la zona (*op. cit.*). La recarga de estos elementos hídricos se mantiene constante, producto de las precipitaciones de verano que llegan a alcanzar más de los 1200 mm anuales en los límites superiores de Huitzilac y “Lagunas de Zempoala”, mientras que en el resto de los municipios del corredor se han registrado entre 900 y 1200 mm medios anuales.

Por su parte, las “Lagunas de Zempoala” se localizan muy próximas a la intersección de tres importantes sistemas hidrográficos que son: la cuenca del río Lerma al occidente; la cuenca de México al noreste; y al sur, la cuenca del río Balsas, sistema al cual pertenece el parque; ocupa las vertientes altas de la serranía Ocuilán-Zempoala, así como las estribaciones del Ajusco; laderas que conjuntamente bajan hasta el valle de Cuemavaca formando el vértice suroeste de la cuenca del río Amacuzac, a su vez, afluente tributario del río Balsas.

Unido al elemento hidrográfico y a los materiales de origen volcánico, las unidades edáficas se presentan muy variadas, según Martínez R. (2003) el Corredor Biológico Chichinautzin presenta *14 unidades de suelos representados por cuatro consociaciones y diez asociaciones, en cinco ordenes según Soil Taxonomy: Entisoles, Inceptisoles, Andisoles, Molisoles y Vertisoles.*

5. Hace referencia a la planicie lacustre que representa el piso de la cuenca de México a la altitud promedio de 2240 m ocupada anteriormente por los lagos de Chalco, Texcoco, Zumpango y Xaltocan (Lugo, 1985)

La presencia de esta variedad de suelos está también determinada por el clima y la topografía de la reserva, en las partes más altas se presenta un clima semifrío con temperaturas medias anuales entre los 5 y 12°C; las temperaturas templadas de 12 a 18°C caracterizan sitios con altitudes que oscilan entre los 2000 y 3000 m; en la porción baja, menos de 2000 m, las temperaturas medias anuales oscilan entre 18 y 22°C y le proporcionan un clima semicálido. Lo anterior da como resultado diversos tipos de vegetación: bosques de oyamel, pino, encino en las partes altas, así como diversas asociaciones de los mismos. En la zona baja se presenta el bosque tropical caducifolio. Una gran variedad de asociaciones y vegetación secundaria producto de la perturbación de medio están presentes al igual que extensiones de pastizales.

I.3. Características socio-económicas

En el territorio del Corredor Biológico Chichinautzin se localizan los siguientes municipios: Cuemavaca, Huitzilac, Jiutepec, Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan, Tlayacapan y Yautepec, los cuales, considerando el diagnóstico social elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2003), presentan 104 localidades de diverso tamaño con una población total, para 1995, de 49,667 habitantes; define, también, que las principales áreas de influencia son los núcleos urbanos consolidados y en proceso de crecimiento asentados fuera del Corredor, pero que debido a su cercanía, tamaño o tendencias de crecimiento, son considerados como agentes altamente potenciales de perturbación.

Éste mismo diagnóstico menciona que la cobertura de mejores servicios para las viviendas en el corredor biológico ha aumentado de manera paulatina a lo largo de las últimas décadas; la cobertura en el servicio eléctrico se acerca casi al 100% en muchos de los casos, pero disminuye para el agua entubada al igual que para el servicio de drenaje, donde los porcentajes sufren una importante disminución, conservándose relativamente altos en las áreas urbanas y disminuyendo en los municipios de carácter rural, donde llegan a porcentajes extraordinariamente pequeños en localidades menores de 499 habitantes.

La tenencia de la tierra en el corredor biológico es mixta, predominando la de tipo comunal y ejidal sobre cualquier otra. Destaca en los municipios de Tlalnepantla y Yautepec remanentes de propiedad colonial que datan de antes de la independencia y cuentan con cédula real.

La SEMARNAT (*op. cit.*) menciona que la distribución de los hablantes de lenguas indígenas es desigual y se concentra, en su mayor parte, en la región norte de la entidad, con 70% del total de

población indígena del estado. La mayor parte de los hablantes de lengua indígena se asientan en el pueblo de Santa Catarina y localidades aledañas; la mayor parte de ellos hablan el nahuatl además del español. Su organización agraria es en ejidos, aunque tienen un parcelamiento de facto en sus tierras. Son estos grupos sociales los más vulnerables a la marginación; las localidades del corredor biológico tienen diversos grados de marginación, desde las nulas o muy bajas hasta localidades con alto grado de marginación; el mayor número de localidades consideradas con marginación muy alta se encuentra en el municipio de Tepoztlán y son menores a los 100 habitantes, pero en general las localidades con mayor deficiencia de indicadores de bienestar son aquellas menores de 499 habitantes.

En el Corredor se presentan actividades productivas primarias, secundarias y terciarias. Dentro de las primarias se pueden diferenciar aquellas relacionadas con la producción, como la agricultura (de temporal, los llamados huertos tradicionales o de traspatio) y la ganadería de las actividades extractivas como el ocoteo, la extracción de tierra y de madera.

Dentro de las actividades productivas secundarias, la industria es incipiente, aunque existen diversos talleres para la producción de muebles y existe alfarería, sobre todo en Tlayacapan. Por su parte las actividades terciarias están representadas por todas aquellas relacionadas al turismo, como la gastronomía, hotelería y venta de artesanías.

CAPITULO II

PERCEPCIÓN REMOTA, VEGETACIÓN Y USOS DEL SUELO

II.1. Concepto de Percepción Remota

Los diversos elementos de la superficie terrestre tales como la vegetación, el suelo, las rocas, el agua o construcciones humanas; absorben, reflejan o emiten una cantidad de energía que depende de diversos factores:

- ◆ La longitud de onda y la intensidad de radiación incidente o emitida.
- ◆ Las características de los objetos y elementos, y en particular de las características de absorción.
- ◆ La orientación de estos objetos y elementos con respecto al sol.

La Percepción Remota¹ (PR) se sirve de estos factores y utiliza la radiación electromagnética² como medio de detección y medición de las propiedades de los mismos, se define por lo tanto, como una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre sin tener contacto directo con ella, mediante sensores instalados en plataformas terrestres, aéreas o espaciales, implicando con ello su posterior tratamiento e interpretación para un fin determinado. De esta definición se deduce que la PR puede dividirse, en función del tipo de plataforma, en terrestre, aérea y espacial (Barrett y Curtis, 1992). En este trabajo sólo se tratarán los dos últimos. Chuvieco (2000) menciona seis elementos que se requieren para establecer un sistema de PR, de los cuales los tres primeros son los más importantes (Figura II.1.):

- a) **Fuente de energía**, que supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a éste en cuyo caso se habla de percepción remota pasiva o de un haz energético emitido por el sensor, también llamada percepción remota activa³. La fuente de energía más importante utilizada en la percepción remota pasiva es el Sol.

1. El término en inglés es *remote sensing*. En castellano es utilizada la palabra *teledetección*.

2. El rápido avance de la tecnología aplicada a la percepción remota ha desarrollado los medios necesarios para que la radiación de tipo ondulatoria acústica, así como la de tipo corpuscular (neutrones, electrones o positrones), sean representadas mediante datos digitales (Lira, 1995).

3. La percepción remota activa está estrechamente relacionada con los sistemas radar, los cuales emiten y reciben su propia energía.

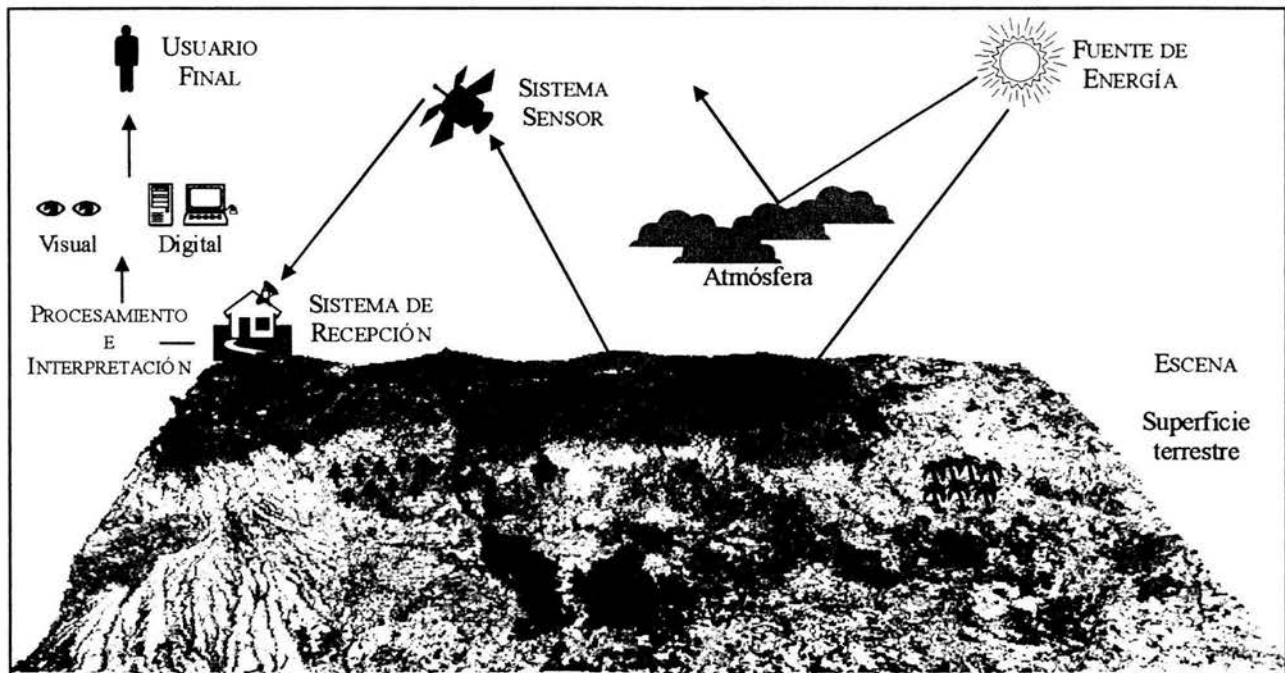


Figura II.1. Elementos del sistema de percepción remota pasiva. (Elaborada por Vega G., Álvaro)

- b) **La escena**, que es todo aquello de lo cual se necesita recabar cierta información, y consiste básicamente en la superficie terrestre; ésta recibe la señal energética procedente de la fuente de energía y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas. La escena se convierte, así, en el espacio geográfico a analizar.
- c) **Sistema sensor**, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo alberga. Los sensores más utilizados son las cámaras fotográficas, digitales o tradicionales, las videocámaras digitales y los sensores satelitales. Los dos primeros colocados sobre plataformas aéreas; aviones o helicópteros, y los segundos, como su nombre lo indica, sobre plataformas espaciales (satélites). Tiene como misión captar la energía de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- d) **Sistema de recepción**, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma⁴.

4. El Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de su Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota (LSIGPR), es un centro de recepción de datos. Desde 1992 empezó a recibir imágenes NOAA directamente, con una estación del tipo APT, con resolución de 4km. A partir de enero de 1996 está funcionando una estación de recepción del tipo HRPT (High Resolution Picture Transmission), con una resolución de 1km. El LSIGPR cuenta con varias colecciones de imágenes Landsat MSS multitemporales y con una colección de imágenes Landsat TM de 1992 y 1993 que cubren la totalidad de los bosques de México (50 Mha). A partir de enero de 1998 se reciben también las imágenes del GOES-8 varias veces al día (Instituto de Geografía, 2002).

- e) **Procesamiento e interpretación de los datos recibidos.** Lira (1995) define el procesamiento *como en un conjunto bien definido y clasificado de realces, que dejan lista la imagen para su posterior descripción.* Esta descripción puede ser de dos tipos, visual o digital, y su función es convertir los datos localizados en la imagen en información específica o temática.
- f) **Usuario final,** *encargado de analizar el documento fruto de la interpretación o procesamiento, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.*

II.2. Percepción Remota Espacial

La característica esencial de la Percepción Remota Espacial consiste en que los sensores óptico-electrónicos que captan la energía reflejada por la superficie terrestre están instalados sobre plataformas satelitales que circundan la Tierra. Esto permite un cubrimiento global de la superficie terrestre. Del mismo modo, los datos que se obtienen son almacenados en formato digital, que una vez procesados, pueden ser representados en forma análoga.

Para procesar y analizar los datos obtenidos es necesario considerar las propiedades de la energía electromagnética, así como las características de los sensores y de los datos obtenidos por los mismos.

II.2.1 El espectro electromagnético

Mediante las propiedades de la radiación electromagnética se puede definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Huygens y Maxwell (Citados por Chuvieco, 2000) establecieron que la radiación electromagnética se comporta como un haz ondulatorio, mientras que Planck y Einstein (Citados por Chuvieco, 2000) consideraron que su comportamiento es como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero. Sin embargo, se ha comprobado que la luz puede comportarse de ambas maneras.

Dentro de la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ , expresada habitualmente en micrómetros, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) y frecuencia (F , hertzios, ciclos por segundo). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia

designa el número de ciclos pasando por un punto en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados: a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con mencionar solamente un término para identificar el tipo de energía mencionado. Por su parte, la teoría cuántica menciona que se puede calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia, el resultado de este cálculo establece que a mayor longitud de onda –o menor frecuencia– el contenido energético será menor y viceversa. Lo anterior implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella proveniente de longitudes cortas.

Aunque la sucesión de valores de una longitud de onda es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. A la organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se le denomina espectro electromagnético. En el espectro electromagnético las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las que abarcan kilómetros (telecomunicaciones) son representadas. (Figura II.2.)

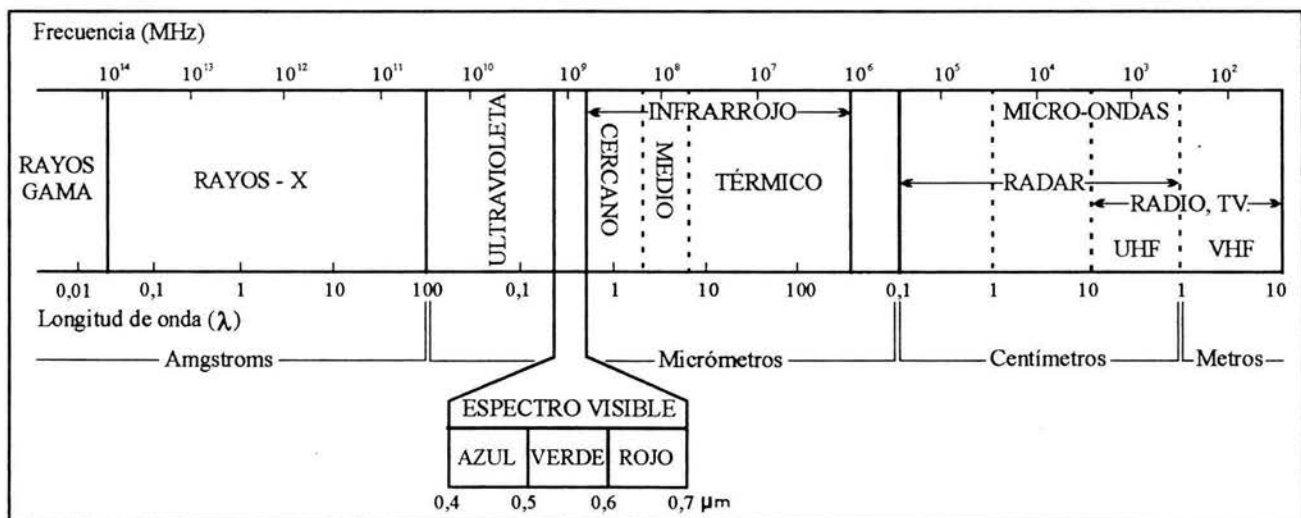


Figura II.2. Espectro electromagnético. (Tomada de Chuvieco, 2000)

Ejemplificando lo anterior, para el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que denominamos color: un objeto es verde si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto, mientras será roja si su reflectividad⁵ se centra en esa banda y es baja en otras.

5. El concepto de reflectividad se refiere a la relación entre el flujo de energía incidente y el reflejado por una superficie.

Por lo tanto, para la manera en que cada superficie terrestre refleje o emita las longitudes de onda del espectro electromagnético se pueden obtener unas curvas de reflectividad espectral que permiten diferenciar entre un tipo de cubierta y otro. Este modo con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda se ha denominado comúnmente firma o signatura espectral (Slater, 1980; Meliá *et al.*, 1986)⁶.

II.2.2. La firma espectral

La figura II.3. muestra el comportamiento espectral teórico de distintos elementos de la superficie terrestre. Algunos de estos elementos tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras que otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, sobre todo en longitudes de onda mayores; la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con valores bajos de reflectividad en el espectro visible y muy elevados en el infrarrojo cercano y menores en el medio.

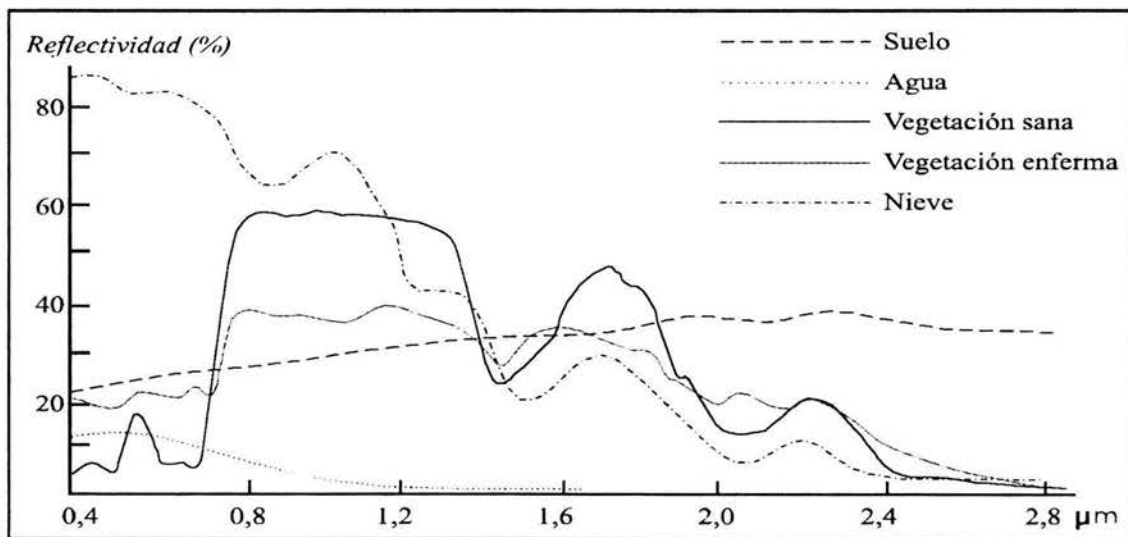


Figura II.3. Firmas espectrales típicas de algunas coberturas terrestres. (Tomada de Chuvieco, 2000)

De lo anterior se deduce que cada superficie terrestre es susceptible de ser diferenciada, una de otra, mediante la obtención y análisis de la firma espectral; sin embargo, las curvas espectrales

6. Citados en E. Chuvieco (2000), "Fundamentos de teledetección".

indicadas previamente sólo pueden considerarse como reflectividades de referencia, ya que fueron obtenidas mediante mediciones de laboratorio, además de que la reflectividad de una cubierta está determinada por una serie de factores externos que modifican el comportamiento espectral teórico de cada una de ellas. Éstos son: 1) ángulo de iluminación solar, muy dependiente de la fecha del año y del momento del paso del satélite; 2) la pendiente y orientación de las laderas o, bien, modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación; 3) influencia de la atmósfera al momento de realizar una dispersión selectiva en distintas longitudes de onda; 4) variaciones ambientales en la cubierta, tales como la asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta o estado fenológico⁷, entre otras; 5) el ángulo del sensor, relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor. De estos factores, los primeros cuatro se relacionan con diversos elementos geográficos, mientras que el último tiene que ver con las características técnicas de los sensores,

La variación de estos factores, tanto temporal como espacial, muestran la complejidad de caracterizar y diferenciar las distintas cubiertas de la superficie terrestre. En suma, no hay superficie terrestre que tenga un comportamiento espectral único y permanente debido a los diversos factores que en ello influyen (Chuvieco, 2000). Sin embargo, las firmas espectrales son de gran utilidad para el análisis de los elementos que se estén estudiando.

II.2.3. Sensor ETM+

El programa Landsat, desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), fue originalmente denominado Earth Resources Technology Satellite (ERTS). Fue el primer programa de satélites de percepción remota para observación de los recursos terrestres puesto en órbita. El primer satélite, de carácter experimental, fue construido para demostrar la viabilidad de cartografiar y monitorear, de forma global y repetitiva, rasgos de la superficie de la Tierra a partir de imágenes orbitales, fue lanzado el 23 de julio de 1972 con la denominación de ERTS-1. El 14 de enero de 1975 el nombre fue cambiado a LANDSAT y hasta la fecha se han llevado al espacio siete satélites de esta serie⁸.

7. Vease el apartado **II.6. Vegetación**.

8. Los satélites ERTS-1 y Landsat 2 y 3 llevaban a bordo los sensores Multispectral Scanner Subsystem (MSS) y Sistem Return Bean Vidicon (RBV), mientras que los Landsat 4 y 5 servían de plataforma a los sensores MS y Thematic Mapper (TM). El Landsat 6 fue puesto en órbita con el sensor ETM+, sin embargo su operación nunca funcionó.

El Landsat 7 es el satélite más reciente del programa; fue lanzado en abril de 1999 con un nuevo sensor a bordo denominado Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que cubre un área de 185x185 Km por escena. Las imágenes que se obtienen están compuestas de 8 bandas espectrales: las bandas del espectro visible y del infrarrojo mantienen la resolución espacial de 30 m del Landsat 5; las bandas del infrarrojo térmico son adquiridas con una resolución de 60 m; y la banda pancromática tiene una resolución espacial de 15 metros (Tabla II.1.). Puede adquirir imágenes desde una latitud de 81°N hasta 81°S y en todas las longitudes del globo terrestre; una órbita del Landsat es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur, y está heliosincronizada, es decir, que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar (NASA, 2002).

<p>Banda 1 (0.45 a 0.52 μm). Correspondiente con el azul visible.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Diferenciación entre suelo y vegetación, y diferenciación entre vegetación conífera y decidua.</i>
<p>Banda 2 (0.52 a 0.60 μm). Corresponde con el verde visible.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Cartografía de vegetación y calidad del agua.</i>
<p>Banda 3 (0.63 a 0.69 μm). Corresponde con el rojo visible.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Absorción de la clorofila, diferenciación de especies vegetales, áreas urbanas, usos del suelo.</i>
<p>Banda 4 (0.76 a 0.90 μm). Correspondiente con el infrarrojo cercano.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Lineamiento de cuerpos de agua, cartografía geomorfológica y geológica, áreas de incendio, agricultura, vegetación.</i>
<p>Banda 5 (1.55 a 1.75 μm). Correspondiente con el infrarrojo medio.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Usos del suelo, medidas de la humedad de la vegetación, diferenciación entre nubes y nieve, vegetación.</i>
<p>Banda 6 1 y 2 (10.40 a 12.50 μm). Correspondiente con el infrarrojo termal.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Stress térmico en las plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo.</i>
<p>Banda 7 (2.08 a 2.35 μm). Correspondiente con el infrarrojo medio.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Identificación de minerales, cartografía hidrotermal.</i>
<p>Banda 8 (0.52 a 0.90). Correspondiente con el pancromático.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Aplicaciones: Permite optimizar las aplicaciones de las otras bandas mediante su combinación.</i>

Tabla II.1. Bandas espectrales captadas por el sensor ETM+ y sus diferentes aplicaciones.

Fuente: Sausen, *et al.*, 1997.

Este sensor proporciona una resolución espacial fina; el detalle de las cubiertas terrestres es mayor; la banda pancromática con su resolución espacial de 15 metros permite obtener ampliaciones hasta una escala de 1:25,000. Su discriminación espectral entre los objetos es de

mejor calidad y tiene una mayor fidelidad geométrica; esto permite minimizar variaciones espaciales internas presentes en su estado bruto y correcciones del ángulo de curvatura de la Tierra, variaciones de velocidad y altura del satélite (Sausen, *et al.*, 1997).

II.2.4. La resolución

Una de las características principales de los sensores remotos satelitales consiste en la habilidad que cada tipo de ellos tiene para discriminar información de la superficie terrestre, por lo que conviene aclarar el concepto de resolución y los diferentes tipos que de ella hay.

La resolución de un sistema sensor se puede definir como la habilidad que tiene para discriminar información. En este concepto tenemos que la separabilidad entre objetos está en íntima relación con la escala de trabajo y con la complejidad del paisaje, es decir; cuando el contraste entre los diversos elementos geográficos sea muy marcado, la identificación de cada uno de ellos se realizará de forma sencilla. Por otro lado, el detalle espacial que proporciona un sensor, así como el número y anchura de las bandas del espectro, su definición temporal y su capacidad para discriminar variaciones de energía, establecen diferentes dimensiones para discriminar cubiertas o establecer modelos de significado físico. A continuación se describirá cada uno de los diferentes tipos de resolución que existen.

Espacial

Tradicionalmente se conoce como la mínima distancia entre dos objetos que un sensor puede distinguir en el terreno. Se expresa en metros (resolución terrestre) o en radianes (resolución del sensor). (Diccionario SELPER)⁹.

La resolución espacial mide la separación angular o lineal entre dos objetos. Cuando un sistema posee una resolución de 30 metros, como el ETM+, significa que objetos distanciados entre sí menos de 30 metros, no serán separados por el sistema. Así, cuando menor sea la resolución espacial del sistema, mayor será el poder de resolución o, sea, mayor su poder de distinguir entre objetos muy cercanos (Novo, 1989, en: Sausen *et al.*, 1997, "Sistemas Sensores Ópticos, LANDSAT").

9. En "Proyecto EDUCA SeRe I – Cuadernos Didácticos para la Enseñanza de la Percepción Remota; Sistemas Sensores Ópticos, LANDSAT", SELPER-INPE. Brasil, 1997.

Temporal

Se define como el intervalo de veces que el satélite observa una misma área del terreno en un determinado periodo (Diccionario SELPER), refiriéndose, por lo tanto, a la periodicidad con que el sistema sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

En cada tipo de satélite la secuencia temporal varía de acuerdo con los objetivos fijados para el sensor. Para el caso de los satélites NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration, el cual sirve de plataforma al sensor Advanced Very Height Resolution Radiometer), cuyo objetivo es obtener datos meteorológicos -fenómenos muy dinámicos, la resolución temporal es de 12 horas, es decir, cada 12 horas el satélite observa la misma área. Caso contrario para los satélites de recursos naturales, que por observar fenómenos menos dinámicos que los meteorológicos, su periodicidad es mucho menor. Así, la resolución temporal del Landsat 7 es de 16 días.

Espectral

Indica el número y ancho de las bandas espectrales que el sensor puede discriminar. Así, un sensor será más sensible cuanto mayor sea el número de bandas de que él disponga, debido a que esto facilita la caracterización espectral de las distintas coberturas (Chuvienco, 2000).

Una alta resolución espectral es obtenida cuando las bandas de un sistema sensor son estrechas y/o cuando se utiliza un mayor número de bandas espectrales. Por el contrario, bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

Radiométrica

La capacidad para detectar las variaciones en la radiancia espectral es definida como la resolución radiométrica y dado que las imágenes se presentan generalmente en sistema digital, este tipo de resolución suele identificarse con el rango de valores que codifica el sensor. Por lo tanto, cuando mayor sea la precisión radiométrica la interpretación de la imagen será de mayor calidad.

En función de la reflectancia de energía que cada elemento y objeto de la superficie terrestre tenga, el sensor le asigna un valor a cada uno de los mismos, a partir del cual se puede identificar e interpretar aquella información que el sensor registra.

II.2.5. Las imágenes de satélite

Considerando los elementos antes descritos, el resultado del primer paso en el proceso de la PR es una imagen digital multispectral que se forma de la siguiente manera: la energía solar interactúa con un elemento físico de la escena llamado Campo Instantáneo de Vista (CIV). El CIV es una subárea o subregión de una escena que se encuentra formando parte del espacio geográfico y su superficie equivale a la resolución espacial que el sensor tenga y, por lo tanto, al tamaño del píxel (contracción de las palabras inglesas *picture element*) que la imagen tendrá. El resultado de la interacción energía solar-CIV es radiación reflejada por el CIV, misma que es captada por el sensor colocado sobre el satélite, y que dependiendo de la resolución espectral para la que esté diseñado, recibirá la información en distintas longitudes de onda (espectro visible, infrarrojo, térmico, etc.).

Para cada longitud de onda los sensores miden la cantidad de radiación reflectada por el CIV, es decir, la señal de voltaje generada por el sensor conforme observa un CIV tras otro, es introducida en un convertidor analógico-digital que la cuantifica empleando una escala que usualmente va de 0 a 255 (Lira, 1996) –dicho de otra forma, 256 niveles posibles para el sensor ETM+ (resolución radiométrica). El sensor está calibrado de tal manera que genera para el CIV más brillante el mayor valor (255) y un 0 para el más oscuro.

Por lo tanto, cada CIV de una escena tiene varios valores que representan las diferentes longitudes de onda que refleja, formando a su vez el elemento base de la imagen, el píxel, almacenado en una posición lógica que va de acuerdo con el lugar relativo correspondiente con la escena. Así, las características espectrales de un CIV quedan representadas por el píxel correspondiente, estando implícitamente registrada su posición y tamaño relativo (Lira, 1996).

Cuando se terminan de medir todos los CIV de una escena se tiene una colección de matrices de números-píxels, una para cada longitud de onda empleado, con lo cual se forma una imagen digital conocida como banda, ya que representa la distribución espacial de los valores de radiación provenientes de la escena para una longitud de onda específica (*op cit.*), a la cual se le conoce como Imagen Digital Multispectral. (Figura II.4.)

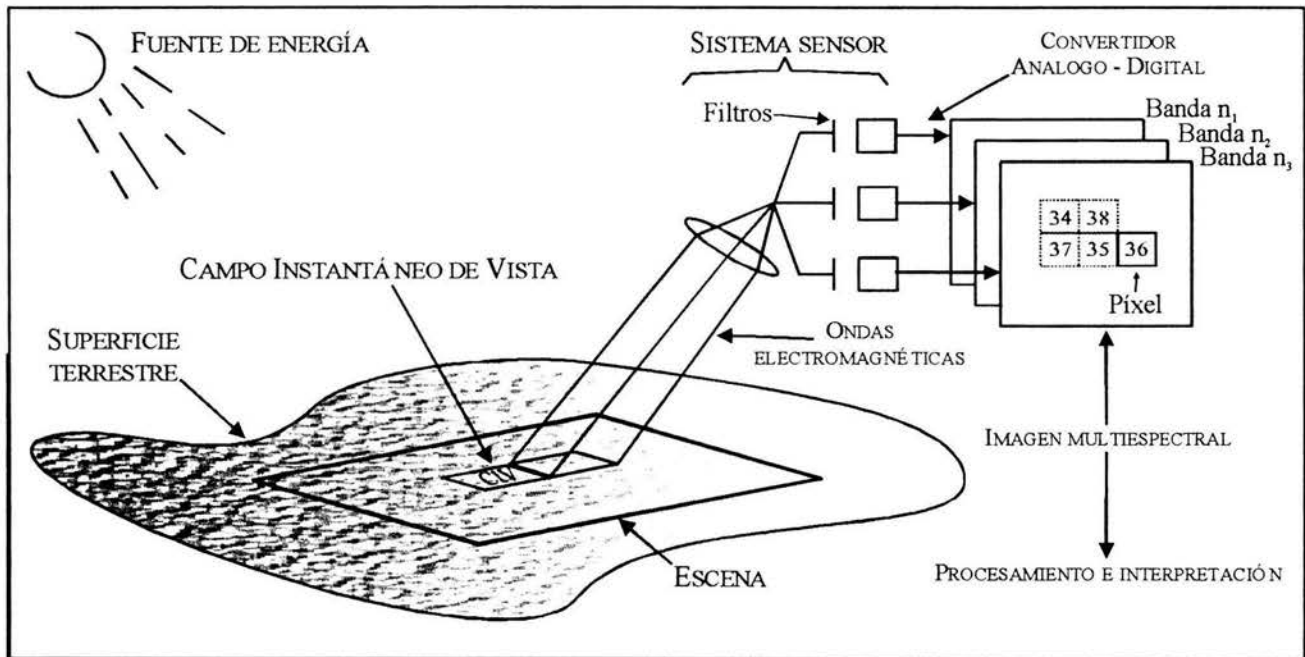


Figura II.4. Diagrama esquemático de la generación de una imagen digital multispectral. (Modificada de Lira, 1996)

Mediante un programa de cómputo, se puede visualizar cada uno de los píxels que representan las diferentes longitudes de onda de los CIV de una escena, ya sea en tonos de grises o de color. Los tonos de grises permiten desplegar una sólo banda asignando un tono oscuro a un valor cero y un claro al valor más alto. Las composiciones en color, permiten desplegar tres bandas simultáneamente asignando a cada una de ellas tonos de colores rojo, verde y azul (Sistema RGB por las siglas en inglés Red, Green and Blue) (*op cit.*).

Para el caso de las imágenes ETM+, son seis el número de bandas que generalmente se utilizan para obtener productos temáticos, tres del espectro visible y tres del infrarrojo, por lo que la combinación de ellas en el sistema RGB puede ser variado dependiendo del objetivo del trabajo. Para conocer el número de bandas que se ha utilizado en una composición en color se utiliza generalmente la siguiente nomenclatura:

Imágenes ETM+, composición en color 432

(R) Rojo para la banda 4, infrarrojo cercano.

(G) Verde para la banda 3, rojo visible

(B) Azul para la banda 2, verde visible

Lo anterior quiere decir que el software realizará una combinación de tres colores entre los píxels de la bandas seleccionadas, así, los píxels de la banda 4 que registraron la longitud de onda del

infrarrojo cercano se visualizarán en la gama del color rojo, mientras que los píxeles que registraron las longitudes de onda del espectro rojo y verde, bandas 3 y 2 respectivamente, serán visualizados en tonos verde y azul (Figura II.5).

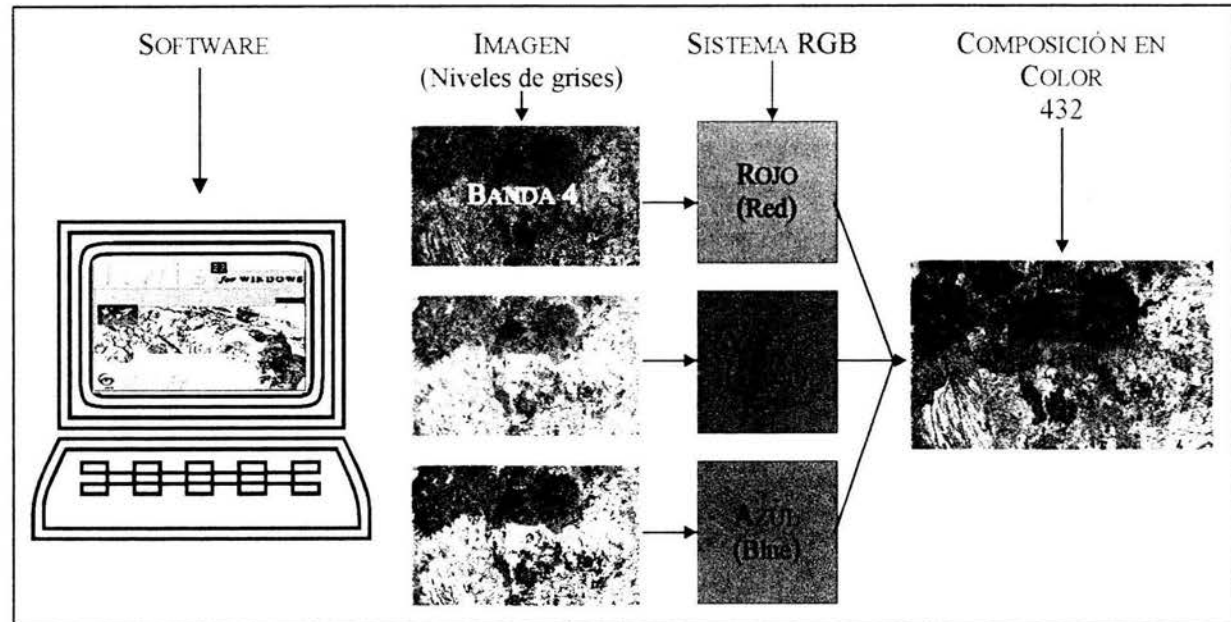


Figura II.5. Ejemplo de una composición en color. (Elaborada por Vega G., Álvaro)

II.3. Procesamiento de las imágenes satelitales

El trabajo de interpretación de imágenes de satélite, principalmente para obtener información temática de ellas, puede ser realizado por dos medios: el digital y el visual. El primero de ellos se centra en la aplicación de algoritmos matemáticos utilizados por los programas computacionales para procesar los datos registrados en los píxeles que integran cada imagen y, con ello, seleccionar la información que el usuario requiera; aquí se utiliza, por lo tanto, la información exclusiva recogida por el sensor; en esencia, una computadora sigue las indicaciones dadas por el usuario y a este último, si se requiere, le corresponde la interpretación de los datos procesados. A diferencia del método digital, el visual implica que el usuario de las imágenes tenga un nivel de referencia alto de la zona a analizar, dado que de él dependerá la adquisición de la información temática deseada y, siendo así, se pueden incluir criterios más complejos para la interpretación visual que dependerán del intérprete y no de un sistema ordenado; es esta una ventaja del sistema visual sobre el digital. Es importante señalar, sin embargo, que las imágenes, aunque se interpretan visualmente, son y deben ser procesadas con algún método que permita el realce de las características físicas deseadas a interpretar para, con ello, facilitar la interpretación.

El método visual es semejante al de fotointerpretación y, por lo tanto, es generalmente, realizado sobre material analógico sin que por ello se discrimine la interpretación visual sobre una imagen digital.

II.3.1. Interpretación digital

La clasificación digital es el medio más utilizado para obtener información temática de una imagen satelital, es un proceso que convierte los valores espectrales de los píxels, comúnmente llamados Niveles Digitales (ND) contenidos en las imágenes multispectrales, en una imagen con un número de categorías establecidas por el usuario, así, de varias imágenes codificadas en 256 ND posibles, imágenes ETM+, y sin una significación física precisa, se pasa a tener una sola imagen, permitiendo, con ello, crear una cartografía de la zona en cuestión y generar información temática de la superficie terrestre (usos de suelo: agricultura, bosques, áreas urbanas, cuerpos de agua y unidades litológicas, entre otras).

La clasificación digital de una imagen se asemeja, también, a la fotointerpretación, en donde a partir de un patrón asociado a cada cubierta y de acuerdo a un criterio de tono, textura, color y forma se delimita en las fotografías zonas que correspondan con ese patrón previamente establecido. En el esquema de clasificación digital basta con traducir los criterios analógicos por digitales: esos patrones de asociación a las cubiertas terrestres pueden ser definidos por el usuario o automáticamente y son llamados áreas de entrenamiento, ya que esos datos permiten “entrenar” al clasificador digital elegido, para discriminar clases espectrales de coberturas de interés. Las clasificaciones digitales pueden, así, dividirse en dos tipos de acuerdo en cómo son obtenidas las estadísticas de entrenamiento:

a) Clasificación no supervisada.

Para realizar una clasificación no supervisada no es preciso un conocimiento previo del área en estudio. El proceso se basa en la búsqueda automática de clases espectrales homogéneas mediante las diversas técnicas de clasificación que para este fin existen. Basta con introducir el número de clases en las que se quiera dividir la imagen y seleccionar las bandas espectrales de las mismas en una composición en color RGB e interpretar así, los resultados de este proceso, ya que las categorías espectrales obtenidas no siempre pueden catalogarse como áreas informacionales que se pretenden deducir, por lo que corresponde al usuario encontrar las correspondencias entre los grupos obtenidos y las categorías de interés.

De lo anterior resulta que, las áreas de entrenamiento utilizadas en este método son definidas automáticamente a través de valores homogéneos de los píxels ubicados en la imagen. Es, por lo tanto, un método muy útil cuando se pretende encontrar los grupos de valores espectrales homogéneos de una imagen y, con ello, realizar una clasificación posterior mucho más acorde con la realidad.

b) Clasificación supervisada.

Es necesario tener un conocimiento previo de la zona en estudio, ya sea mediante trabajo de campo y/o información auxiliar: fotografías aéreas o cartografía temática. Las áreas de entrenamiento son resultado de este conocimiento que se debe tener de la zona y son obtenidas por el interesado en realizar la clasificación mediante áreas muestra o áreas tipo obtenidas en campo y/o mediante la fotointerpretación de imágenes áreas digitales o analógicas.

El proceso se puede dividir en dos pasos: el primero de ellos, denominado fase de entrenamiento, consiste en establecer polígonos con las categorías deseadas para la clasificación. Dicha información puede digitalizarse y georreferenciar para sobreponer en las imágenes de satélite o bien digitalizarlas directamente sobre las mismas, pudiendo haber más de un área de entrenamiento para cada categoría y con ello representar las diversas opciones que se tienen de una categoría. Definidas las áreas de entrenamiento, se puede establecer, gráficamente, la forma en que cada una de ellas separa y distingue un elemento.

La gráfica, denominada *feature space* (características espaciales), muestra un resumen visual de la separación de clases de los píxels seleccionados como de entrenamiento; los niveles digitales de una banda son colocados en un eje horizontal y los niveles digitales de otra banda en el eje vertical, de esta manera se observa la posición de los píxels de acuerdo a su separabilidad en ambas bandas, y donde se podrá, además, observar la homogeneidad o heterogeneidad de las áreas de entrenamiento y determinar aquellas que causarían conflicto en la fase siguiente, dado que de la buena selección de cada área de entrenamiento dependerán, en gran medida, los resultados de la clasificación. Es esta etapa la más importante dentro del proceso de una clasificación supervisada.

Chuvieco (2000) citando a Schowengerdt (1983) menciona que el tamaño del área de entrenamiento requiere ser de un mínimo de $m+1$ píxels por categoría, donde m es el número de bandas que integran el análisis, siendo conveniente superar este límite. Por otro lado, varios autores recomiendan seleccionar un número de píxeles comprendido entre 10 m y 100 m , donde

este número mínimo de píxeles se relaciona con el grado de asociación espacial entre los Niveles Digitales (ND) de la imagen. Pese a ello, es más conveniente elegir varios campos pequeños que uno sólo de mayores dimensiones (Chuvieco, 2000). Otra alternativa para seleccionar las áreas de entrenamiento es señalar píxeles puros, garantizando con ello que las áreas sean suficientemente homogéneas. Se puede también seleccionar píxeles aleatoriamente, dentro de campos de mayor tamaño, en lugar de admitirlos todos. De igual forma, algunos autores recomiendan seleccionar píxeles aislados por cada categoría en número suficiente para estimar la variabilidad espectral de dicha clase.

De esta forma, en la segunda etapa –fase de asignación–, se etiqueta, mediante el clasificador seleccionado, cada píxel de la imagen con una de las categorías definidas en la fase de entrenamiento, siendo el resultado una nueva imagen con sus píxeles clasificados en una de las categorías definidas previamente.

c) Matriz de confusión.

Como parte del proceso de clasificación y para estimar el grado de confiabilidad de la misma, se realiza el cálculo de una matriz de confusión; aquí se compara información adicional certera con los resultados de la clasificación.

Se denomina matriz de confusión dado que en ésta se recogen los conflictos que se presentan en las categorías resultantes de la clasificación. Las filas ocupan así, las clases de referencia, es decir, punto muestra en los cuales se tiene la certeza de la clase que se les asigna y son, por supuesto, diferentes de los de las áreas de entrenamiento; las columnas son ocupadas por las clases de la clasificación realizada; en consecuencia, tanto filas como columnas tendrán el mismo número y significado; es una matriz cuadrada $n \times n$, donde n indica el número de categorías.

La diagonal de esta matriz indica el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre dos fuentes (clasificación y realidad), mientras que los localizados fuera de esta diagonal suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la exactitud global de la clasificación. Los residuos en las filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, dicho de otra manera, indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría no fueron incluidos en ella; éstos se denominan errores de omisión. Los residuales de las columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad, es decir, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra, denominados errores de comisión (Tabla II.2.).

El interés del análisis de esta tabla proviene de su capacidad para plasmar los conflictos en las categorías y, con ello, conocer la precisión global de la clasificación y la precisión y fiabilidad conseguida para cada una de las clases y sus respectivos conflictos.

		Clasificación digital						Precisión
		Bosque	Matorral	Cultivos	Urbano	Descubierto	Agua	
Puntos de referencia	Bosque	440	40	0	0	30	10	83
	Matorral	20	220	0	0	40	10	71
	Cultivos	10	10	210	10	50	10	58
	Urbano	20	0	20	240	100	10	56
	Descubierto	0	0	10	10	230	0	88
	Agua	0	20	0	0	0	240	89
	Fiabilidad	90	76	88	92	51	86	
Precisión global = 73.15%								

Tabla II.2. Ejemplo de una matriz de confusión. (Modificada de International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences, 1997)

II.3.2. Interpretación visual

En primer término, se establece una identificación de los rasgos geográficos más importantes presentes en la imagen; con el apoyo de mapas similares en escala, se pueden identificar por ejemplo, los cursos de agua más importantes de la zona, aspectos humanos como vías de comunicación, asentamientos humanos y, por último, los accidentes geográficos y vegetación o incendios. A partir de esta primera identificación, se pueden utilizar posteriormente, criterios más complejos en la interpretación visual.

Algunos criterios son los mismos a los utilizados en la fotointerpretación: tono, textura, estructura, sombras, etc. y deben ser utilizados con precaución en imágenes de satélite, dado que son materiales muy distintos.

El tono hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor dependiendo de la banda del espectro: con la intensidad luminosa, representada en una escala de grises, los píxeles o zonas oscuras de una imagen indican que el sensor detectó poca radiancia y los píxeles claros lo contrario, así, el tono se relaciona con el comportamiento espectral que tienen las diferentes cubiertas de la superficie terrestre. Lo anterior permite que mediante el tono se puedan diferenciar unos elementos de otros. Sin embargo, el ojo humano distingue más variaciones cromáticas que de intensidad luminosa, por lo que el color se convierte en un elemento importante en el análisis visual, sobre todo si a esto le agregamos que para ver en color una

imagen satelital, se deben combinar tres bandas espectrales en lo denominado composición en color teniendo, así, tres bandas combinadas del espectro en vez de una. Una correcta composición en color permite, dependiendo del elemento a interpretar, una discriminación más precisa de las diferentes cubiertas que se tengan en la superficie terrestre; para las imágenes ETM+, las bandas más utilizadas para distinguir las cubiertas son: una del espectro visible, otra del infrarrojo cercano y otra del medio. Lo general es asignarles, en la composición en color, el rojo al infrarrojo cercano, el verde al infrarrojo medio o al visible rojo y el azul al visible rojo o verde (Chuvieco, 2000).

La cualidad de una imagen con aparente rugosidad o suavidad de una región es lo denominado como textura. La textura puede variar dependiendo de diversos factores: ángulo de observación del sensor, condiciones de iluminación o longitud de onda por ejemplo. En todo caso la textura permite discriminar determinadas cubiertas que pueden presentar un comportamiento espectral uniforme (*op. cit.*).

La referencia espacial que sobre la zona se tenga es importante para una interpretación visual; es necesario así, conocer cuáles son las principales características de localización de los elementos para diferenciarlos de acuerdo con las mismas. Por ejemplo, con la vegetación es preciso saber cómo es su comportamiento a diferentes altitudes y sus asociaciones con otros tipos de vegetación. Es de interés, también, considerar la temporalidad de las imágenes, saber su fecha de adquisición, lo que permitirá determinar aquellas características de los elementos propias de una época del año determinada, y comparándolas con imágenes de la misma zona pero de fechas diferentes se logrará un mayor detalle en el análisis visual. Regresando al caso de interpretación de la cubierta vegetal, la temporalidad de las imágenes permite considerar aspectos como la fenología, humedad, relacionada a su vez con la precipitación pluvial, entre otros. Criterios adicionales como la sombra, relacionada con el relieve y la latitud de la zona geográfica; el patrón espacial, que se refiere a la organización particular de objetos que forman una determinada cubierta; o el contorno y forma, relacionados con la geometría de los elementos de la superficie terrestre, son útiles en la interpretación visual.

II.4. La Percepción Remota Aérea

La percepción remota aérea consiste en la colocación de un sensor fotográfico sobre una aeronave, mediante el cual se pueden obtener imágenes fotográficas de la superficie terrestre susceptibles de cuantificar y cualificar.

II.4.1 Fotografía aérea

Una fotografía aérea es un registro instantáneo de los detalles de un terreno (Ortiz y Cuanalo, 1978); como su nombre lo indica, se obtiene mediante cámaras fotográficas analógicas o digitales (sensores) montadas sobre vehículos aéreos, para ello, la cámara fotográfica utiliza las longitudes de onda del espectro electromagnético. El objetivo recoge el haz de luz de los rayos reflejados o emitidos por un objeto y los guía hacia el plano imagen donde se forma la imagen del terreno. Estas imágenes pueden ser espectralmente registradas en diversos tipos de formatos, los más tradicionales son las películas en blanco y negro pancromáticas o infrarrojas y las películas a color, ya sean normales o infrarrojas. En la actualidad, el registro de las imágenes aéreas se realiza también en formato digital, generalmente en color e infrarrojo monocromático.

El beneficio de este último sistema de registro lleva consigo varias ventajas: primero, se logra obtener un mayor detalle de las características del terreno fotografiado debido a la alta resolución espacial de las cámaras digitales, facilitando la fotointerpretación; segundo, el formato digital permite elaborar de forma más directa mosaicos semicontrolados y controlados y procesar y analizar el material mediante sistemas de información geográfica; tercero, las imágenes se pueden imprimir el número de veces que se requiera; cuarto, por su bajo costo de adquisición con respecto al sistema aerofotográfico convencional se puede mantener un monitoreo constante de las zonas de interés (Prado, *et al.*, 2001).

Las imágenes aéreas pueden dividirse en verticales y oblicuas¹⁰. Las primeras se consideran como tal cuando el eje óptico de la cámara en el momento de la exposición es sensiblemente vertical, es decir, cuando el eje óptico no se aparta en un ángulo mayor de 5°. En las fotografías aéreas oblicuas el eje óptico de la cámara forma un ángulo menor de 90° con el plano del terreno (Figura II.6).

La resolución espacial de una imagen aérea suele definirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía (Chuvieco, 2000), mientras que la escala está determinada por la relación entre una distancia medida en el terreno y su correspondiente medida en la fotografía. Un método para determinar la escala de una fotografía consiste en comparar una distancia medida en la foto y su correspondiente medida sobre un mapa de escala conocida.

10. Los criterios más empleados para clasificar las fotografías aéreas se basan en el campo angular de la cámara y en la inclinación del eje de la cámara. Aquí se considera solamente la segunda clasificación.

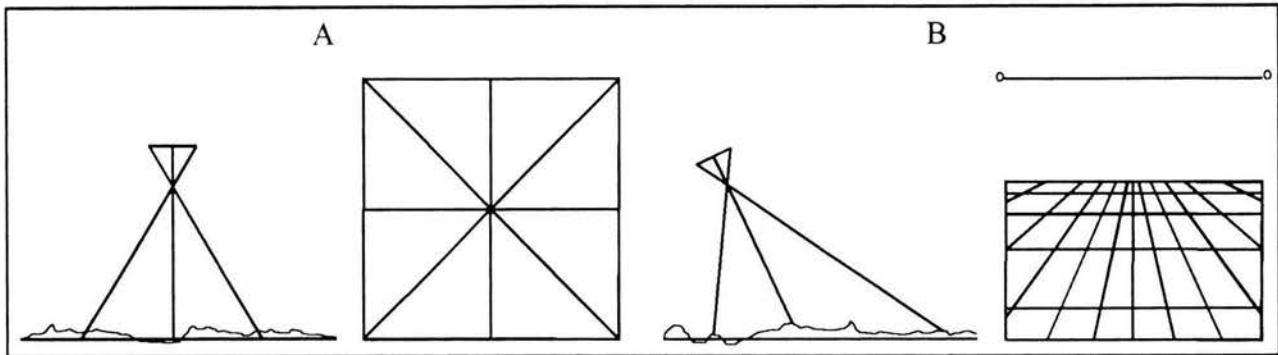


Figura II.6. Tipos de Fotografías aéreas. A) vertical, B) oblicua. (Tomada de Deagostini, 1978)

No existe, sin embargo, una escala verdadera en las fotografías aéreas ya que éstas presentan distorsiones geométricas¹¹, donde se suman además, los accidentes de la forma del terreno y los errores inherentes a la propia fotografía.

Para la toma de fotografías aéreas, un avión se desplaza sobre un terreno en líneas paralelas en una dirección en los dos sentidos (generalmente norte-sur, o bien, este-oeste). A esto se le llama líneas de vuelo y deben presentar un traslape longitudinal de un 60% (dos fotos sucesivas tienen en un 60% de su área las mismas características) y un traslape lateral de un 30% entre líneas de vuelo¹². Esta característica de sobreposición en las fotografías permite una visión estereoscópica de las imágenes, es decir, se puede observar el terreno en tres dimensiones, facilitando la fotointerpretación de las mismas.

El principio básico de estereoscopia consiste en la visión binocular, para ello se emplean dos fotografías tomadas desde puntos diferentes, cada una es observada monocularmente –el ojo izquierdo ve la fotografía izquierda y el ojo derecho ve la fotografía derecha– llegando al cerebro una imagen virtual en tres dimensiones de un mismo objeto, dicha técnica se facilita con un estereoscopio de espejos.

11. Se denominan deformaciones geométricas de las fotografías a un grupo de desplazamientos o imperfecciones que afectan la calidad de la imagen desde el punto de vista cuantitativo. Las deformaciones más comunes son: desplazamiento debido al relieve, desplazamiento debido a la inclinación de la fotografía, distorsión y el error combinado.

12. La sobreposición longitudinal se considera normal cuando comprende entre el 55 y 60%, deficiente cuando es del 50% y excesiva cuando sobrepasa el 65%; la sobreposición lateral se considera normal de 20 a 30%, deficiente un 10% y excesiva cuando es mayor del 35%.

II.4.2. Fotointerpretación

Una imagen obtenida por medio de una fotografía aérea, sea o no digital, es una abstracción del terreno en la que los aspectos fisiográficos y culturales físicos tales como topografía, vegetación, suelos, drenaje, caminos, casas etc., iluminados directamente por el sol y por la luz reflejada en las nubes, aparecen diferenciados por tono, color, textura y forma. Estos últimos cuatro elementos son los que permiten que la interpretación de una fotografía aérea se lleve a cabo. El propósito es, por lo tanto, identificar los diferentes componentes del paisaje y suministrar información de interés para un fin determinado.

Guerra (1980) menciona dos conceptos muy diferentes en el campo de la fotointerpretación¹³: el primero de ellos es el de fotoidentificación y consiste en *“el reconocimiento de la verdadera naturaleza de los objetos y rasgos reales que se reproducen en las fotografías aéreas por medio de sus correspondientes imágenes”*, la fotoidentificación es un proceso objetivo, pues cada uno de los elementos que se identifiquen será siempre el mismo para cualquier especialista que vea los resultados de la identificación. Caso contrario para el proceso de fotointerpretación, pues una vez identificados los elementos de interés adquirirán un carácter subjetivo dependiendo del especialista que realice la interpretación de los datos identificados; la fotointerpretación es el paso siguiente de la fotoidentificación y por lo tanto el análisis formal de las fotografías aéreas. Así, el objetivo de la interpretación fotográfica es el *“desentrañar y valorar el significado de los rasgos u objetos reales reproducidos por sus imágenes en las fotografías aéreas una vez identificados, desde el punto de vista que interese a la investigación que se esté realizando”*.

13. Para Deagostini (1978) el proceso de fotointerpretación se divide en tres fases: foto lectura, que se refiere al reconocimiento e identificación de objetos (edificios, caminos, límites entre otros); fotoanálisis, definido como el proceso de separar y analizar las partes que componen un todo y establecer su interrelación con el fin de identificar el elemento estudiado basándose en las características de sus componentes individuales; y la fotointerpretación, donde se incluyen los procesos anteriores y un estudio más detallado de los elementos capturados en la imagen.

Ortiz y Cuanalo (1978), citan en la obra ya mencionada a Christian y Stewart (1968) para describir tres métodos de fotointerpretación: identificación directa, interpretación asociativa e interpretación deductiva, cuyos conceptos coinciden con los descritos por Deagostini.

II.5. Importancia del trabajo de campo

Dentro de los estudios geográficos, el trabajo de campo funciona como una estrategia destinada a reforzar el trabajo de gabinete e indispensable para validar y comparar los resultados obtenidos, es un aspecto que no se puede evitar en el análisis espacial.

Dentro de la percepción remota, ya sea espacial o aérea, el trabajo de campo es una herramienta necesaria para establecer una relación de exactitud entre la clasificación y/o fotointerpretación y la realidad del elemento analizado, de lo cual se deduce que los datos recabados en campo sirven como datos de referencia para validar la exactitud de los resultados de la investigación.

El trabajo de campo puede ser realizado en tres etapas:

- ◆ Reconocimiento general del área en estudio. En esta etapa debe darse una familiarización del intérprete con el espacio geográfico a analizar.
- ◆ Trabajos de campo. En los cuales, tanto para trabajos de fotointerpretación como para trabajos de clasificación digital, se establecen las áreas tipo o áreas muestra en función de las características de la zona y de los objetivos del trabajo y donde se debe establecer, además, una correlación entre la imagen y la realidad, es decir, se seleccionan áreas representativas de una cobertura vegetal o uso de suelo de la superficie terrestre que se quiera discriminar, llamados también datos de referencia o de campo, así como patrones –de vegetación, de drenaje, etc. (en la clasificación digital se suele confundir y utilizar la traducción de las palabras en inglés *training sites* –sitios o áreas de entrenamiento– sin embargo, la traducción literal al castellano de estas palabras no representan el concepto ya mencionado, puesto que en el idioma español las áreas de entrenamiento se pueden referir a varios contextos, lo que causa una confusión en las personas no especializadas en el tema; una razón por la que se utiliza normalmente la traducción literal de *training sites*, es debido a que durante el proceso de clasificación digital, las áreas muestra “entrenan” al clasificador digital elegido para discriminar clases espectrales de coberturas de interés, siendo la etapa de entrenamiento una fase del proceso de clasificación e inherente sólo a una parte de un proceso digital). Mediante esta etapa del trabajo de campo se afina la leyenda de trabajo basada en las características de la zona y con dicha información se realiza el análisis, fotointerpretación y clasificación de las imágenes.

- ◆ Revisión de campo, donde una vez obtenida la fotointerpretación o clasificación de la imagen, se verifican los resultados y realizan las correcciones necesarias para establecer el grado de fiabilidad en estos procesos y del resultado cartográfico que se desea obtener.

II.6. Vegetación

La vegetación es un elemento de la superficie terrestre susceptible de ser analizada mediante datos de sensores remotos.

La flora de una región determinada está constituida por taxones que la componen (especies, géneros y familias), es decir, su composición florística. La vegetación por el contrario, se refiere al agrupamiento o asociación de estas especies para constituir comunidades vegetales (González, 1997). Este mismo autor menciona que la vegetación se puede clasificar considerando su fisionomía, su estructura y su fenología. La fisionomía es la apariencia que muestran las formas de vida dominantes, la estructura la distribución en el espacio de las mismas, tanto en sentido horizontal, lo que nos da la cobertura, como en sentido vertical, lo que nos da la estratificación. La fenología indica la respuesta que tienen las plantas ante algunas características del ambiente como precipitación y temperatura, expresándose en la pérdida del follaje, los tiempos de floración etc. Sin embargo, la variedad de comunidades vegetales presentes en México conlleva a problemas de ubicación, descripción y distribución de la misma.

Una clasificación muy usada para cartografiar las asociaciones vegetales es la elaborada por Rzedowski (1983) (Tabla II.3.), en la cual las descripciones de las asociaciones vegetales que él mismo presenta son tomadas como parámetros que definen las posibles categorías en las cuales pueden ser divididos los tipos de vegetación.

Considerando las asociaciones vegetales que describe Rzedowski, se menciona a continuación las características de los tipos de vegetación que él mismo establece y que a su vez determinan los parámetros de clasificación de los mismos.

COMUNIDAD VEGETAL	TIPO DE CLIMA	ASOCIACIÓN VEGETAL	TIPO DE VEGETACIÓN
COMUNIDADES ARBÓREAS	TROPICAL	BOSQUE TROPICAL	BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO
		TRANSICIONALES	BOSQUE DE ENCINO-BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO
	TEMPLADO	BOSQUE DE CONIFERAS	BOSQUE PINO
			BOSQUE OYAMEL
		BOSQUE MIXTO (CONIFERAS/LATIFOLIADAS)	BOSQUE DE ENCINO-BOSQUE DE PINO BOSQUE DE PINO - BOSQUE DE ENCINO
BOSQUE DE LATIFOLIADAS	BOSQUE ENCINO		
COMUNIDADES ARBUSTIVAS-HERBÁSEAS		MATORRALES	MATORRAL CRASIRROSULIFOLIO
PASTIZALES		PASTIZALES	PASTIZALES NATURALES PASTIZALES INDUCIDOS

Tabla II.3. Clasificación de la vegetación según Rzedowski, 1983.

II.6.1. Tipos de Vegetación

Asociación vegetal de clima tropical, bosques tropicales

Tipo de vegetación: Bosque Tropical Caducifolio¹⁴

Denominado como un conjunto de bosques propios de regiones de clima cálido y dominado por especies arborescentes, generalmente del género *Bursera*, que pierden sus hojas en la época seca del año durante un lapso variable que por lo general oscila alrededor de seis meses, se desarrolla en México más frecuentemente por debajo de la cota de 1500 m con temperaturas medias anuales del orden de 20° a 29°C, donde la humedad es el aspecto de mayor importancia en su distribución desigual a lo largo del año, dividiéndose éste en dos estaciones bien marcadas: la lluviosa y la seca. El número de meses secos consecutivos varía de 5 a 8 y el monto de la precipitación media anual es más frecuentemente entre 600 y 1200 mm. De acuerdo con la

¹⁴ Rzedowski (1983) denomina a este tipo de vegetación Bosque Tropical Caducifolio y Miranda y Hernández X (1963) refiriéndose al mismo tipo que Rzedowski y, al aplicarlo a la totalidad del territorio nacional, optó por transformarlo en "Selva Baja Caducifolia".

clasificación de Köppen (1948), el tipo de clima más común correspondiente a esta formación vegetal es el Aw, aunque también hay algunos sitios con clima BS y Cw.

Muestra una franca preferencia por los suelos someros pedregosos y se localiza a menudo sobre laderas de cerros. En general estos son suelos bien drenados y por lo común jóvenes, con características derivadas de la roca madre, que puede ser tanto ígnea, como metamórfica. En estado natural o de escasa perturbación es una comunidad densa, con una altura que oscila entre los 5 y 15 m, donde los árboles que lo constituyen forman comúnmente un techo de altura uniforme. Las copas de las especies del estrato dominante son convexas o planas y su anchura a menudo igual o mayor a la altura de la planta. Los troncos generalmente son retorcidos, se ramifican a corta altura o casi desde la base y su diámetro rara vez sobrepasa los 50 cm. La principal característica de esta formación vegetal es la pérdida de sus hojas durante un periodo de 5 a 8 meses; con lo que el bosque posee dos aspectos: el exuberante en lluvias, y el del letargo estacional en secas.

Asociaciones vegetales de clima templado, bosque de coníferas

Tipos de vegetación: Bosque de pino

Bosque de oyamel

Bosque de pino.

El grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 m. A elevaciones mayores los pinares también son frecuentes y constituyen el único tipo de bosque que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea; aproximadamente a 4000 msnm en el centro y sur del país (Miranda, 1947; Miranda, 1952; Beaman, 1962)¹⁵. Sus límites climáticos se pueden aproximar a una temperatura media anual entre 10 y 20°C y una precipitación pluvial entre 600 y 1000 mm anuales que se concentra en 6 a 7 meses; esto los colocaría dentro de los climas de tipo Cw de la clasificación de Köppen. Es notable la preferencia que muestran los pinares de México por áreas cubiertas por rocas ígneas, tanto antiguas como recientes. Es común observar que el contacto entre roca ígnea y sedimentaria marina corresponde a un límite neto entre el pinar y otra comunidad vegetal. Son frecuentes los suelos rojizos, más o menos arcillosos, derivados de basaltos, así como los suelos andesíticos, de tonalidades cafés, y los suelos oscuros, bastante frecuentes a altitudes superiores a los 3000 m. Sin embargo, la deficiencia de drenaje es un factor que al parecer no toleran.

15. Citados por Rzedowski, 1983.

Distribución geográfica y estructura de los bosques de pino en México; en gran medida se encuentran bajo una influencia antrópica muy fuerte; por un lado debido a una explotación forestal inadecuada, por el otro a la expansión de zonas agropecuarias o urbanas, y principalmente por la acción de los incendios.

En esta comunidad vegetal la dominancia puede estar dada por una sola especie de *Pinus* o repartirse entre dos o más especies del mismo género. La altura del bosque es variable, en la mayoría de los casos oscila entre 8 y 25 m, pero puede alcanzar los 40 m. Los troncos de los pinos son generalmente rectos y cuando estos árboles forman un bosque, sólo suelen persistir las ramas superiores que forman una copa más o menos hemisférica característica.

Bosque de oyamel.

En México, este tipo de vegetación está prácticamente restringido a sitios de alta montaña, por lo común entre 2800 y 3600 m de altitud, estando confinados a las laderas de cerros, a menudo protegidos de la acción de vientos fuertes y de insolación intensa. En muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. No se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados, pero tal hecho quizá está en función de la influencia humana.

La precipitación media anual es por lo común superior a 1000 mm, distribuida en 100 o más días con lluvia apreciable. Ordinariamente, el número de meses secos no es mayor a cuatro, mientras que las temperaturas medias anuales varían de 7 a 15°C si se toman en cuenta los límites altitudinales habituales del bosque. El bosque de oyamel prácticamente no interrumpe sus actividades de fotosíntesis, absorción y transpiración, si acaso sufre una disminución durante los periodos más frío y seco del año. La dominancia principal de este tipo de vegetación recae en especies del género *Abies*.

Los substratos geológicos del bosque de abetos son variados, pero predominan los de origen volcánico, sobre todo andesitas y basaltos. De acuerdo con Madrigal (1967)¹⁶ estos suelos son típicamente profundos, bien drenados, pero húmedos durante todo el año. La tolerancia de esta comunidad con respecto a la temperatura es mucho mayor de lo que podría suponerse, siendo el

16. Citados por Rzedowski, 1983.



factor limitante de su distribución altitudinal la humedad. Los bosques de abeto de México, en general, constituyen un piso altitudinal definido.

La altura de la comunidad varía por lo general entre 20 y 40 m, aunque puede alcanzar hasta 50 m. Las copas de los árboles presentan de ordinario una forma triangular y se ramifican desde niveles relativamente bajos. Las elevaciones del Sistema Volcánico Transversal, Distrito Federal y Morelos, son las que ostentan a menudo esta comunidad en el piso altitudinal correspondiente.

Asociaciones vegetales de clima templado, bosque mixto de coníferas y latifoliadas

Tipos de vegetación: Bosque de pino-Bosque de encino

Bosque de encino-Bosque de pino

Son bosques en donde una o varias especies de *Pinus* y una o más de *Quercus* son codominantes. Su estructura generalmente presenta un estrato superior, dominado por los pinos, y uno más bajo, donde dominan los encinos. En general es raro encontrar árboles maduros de pino en los niveles inferiores del dosel, al parecer debido a sus fuertes exigencias de luz directa.

Es una comunidad cerrada, más o menos caducifolia, cuya altura varía de 10 a 30 m. Debido al amplio rango ecológico que poseen las especies de *Quercus* y la intensa acción antrópica a la que se encuentra expuesta, ostentan una gran variedad fisonómica.

Se distribuye entre los 1500 y 2800 msnm.. La temperatura media anual se ubica entre 10 y 20° C y la precipitación pluvial oscila entre 600 y 1200 mm al año. Comúnmente se establece sobre suelos con buen drenaje, tanto rocosos como bien desarrollados, derivados de substratos geológicos ígneos.

En virtud de que las exigencias ecológicas de las especies de *Pinus* y de *Quercus* son similares, frecuentemente se les encuentra asociadas: ya sea como una franja transicional entre un encinar y un pinar, como resultado de la perturbación antrópica o debido a las condiciones del medio abiótico.

Asociaciones vegetales de clima templado, bosque de latifoliadas

Tipos de vegetación: Bosque de encino

Los encinares mexicanos son comunidades muy características de las zonas montañosas; junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de las áreas de clima templado y semihúmedo y más del 95% de la extensión de los mismos se ubica entre 1200 y 2800 msnm, siendo muy comunes en el Sistema Volcánico Transversal.

Se han observado sobre diversas clases de roca madre, tanto ígneas como sedimentarias y metamórficas, así como en suelos profundos de terrenos aluviales planos. No es rara su presencia en suelos someros de terrenos muy rocosos e inclinados o de pedregales. Prosperan típicamente en condiciones de clima Cw de la clasificación de Köppen, pero también se extienden hacia climas Cf, Cs, Cx', Af, Am, Aw y Bs. La gran mayoría de los encinares tiene una precipitación anual entre los 600 y 1200 mm y la temperatura media anual más frecuente es de 12 a 20°C.

La mayoría de los bosques de encino del país están formados por árboles bajos y de troncos más bien delgados. Caracterizados por el género *Quercus*, son comunidades cuya altura varía entre los 2 y 30 m, alcanzando ocasionalmente los 50 m. Varían de totalmente caducifolios a totalmente perennifolios.

Asociaciones vegetales transicionales

Tipos de vegetación: Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio

Bosque tropical caducifolio-Bosque de encino

Representa la franja transicional que resulta del contacto entre dos o más comunidades vegetales. Dentro de ésta se establece una nueva comunidad vegetal, la cual puede presentar una fisonomía propia o la apariencia intermedia de las comunidades colindantes. Se puede determinar considerando el área límite entre una asociación vegetal, de un determinado tipo de vegetación, y otra asociación vegetal, perteneciente a un tipo de vegetación distinto al de la primera.

Debido al carácter termófilo de los encinares y la relativa facilidad con que establecen relaciones simbióticas con otras plantas, se asocian con los elementos del bosque tropical caducifolio. Se presenta como la mezcla de los elementos florísticos de ambas comunidades, adquiriendo una fisonomía propia, a partir de la codominancia de los géneros *Quercus* y *Bursera*.

En el corredor biológico se presenta gran cantidad de plantas epífitas y parásitas, principalmente asociadas a los representantes del género *Quercus*. Es un bosque de entre 15 y 25 m de altura, constituido estructuralmente por un estrato arbóreo superior de encinos y elementos de bosque tropical caducifolio. Es importante mencionar que se presenta como una comunidad siempre verde, en virtud de que se desarrolla en una zona de relativamente alta humedad atmosférica, en general, los elementos propios del bosque tropical caducifolio no llegan a perder sus hojas en la época seca del año. Esta peculiaridad dificulta su adecuada identificación, ya que su aspecto

puede llevarnos a incorporarla como una comunidad del bosque tropical perenifolio o en dado caso al subperenifolio; incluso puede ser confundida con el bosque mesófilo de montaña.

Asociación vegetal de matorrales

Tipo de vegetación: Matorral crasirrosulifolio

En esta comunidad dominan las plantas suculentas cuyas hojas se agrupan en forma de roseta. Se trata de un matorral denso cuya altura generalmente no pasa de un metro. Es una comunidad típica del Sistema Volcánico Transversal, la cual, aun cuando no se restringe a éste, posee una reducida superficie en nuestro país. Básicamente se localiza en zonas de climas húmedos y subhúmedos.

Principalmente se desarrolla sobre rocas ígneas, predominantemente en substratos derivados de vulcanismo reciente. No obstante, es posible encontrar pequeños manchones en las zonas más abruptas de cerros constituidos por rocas sedimentarias e incluso metamórficas. La humedad atmosférica, relativamente alta a la que se encuentra expuesta, permite que se desarrolle tanto en laderas carentes de suelos como en muros y escarpes rocosos.

Los elementos más característicos son especies de *Agave*, *Hechtia* y *Dasyllirion*, que forman un estrato subarbutivo espinoso y perennifolio bastante denso en general. A menudo se presentan uno o dos estratos arbustivos más altos.

Asociación vegetal de pastizales

Tipo de vegetación: Pastizal natural

Pastizal inducido

Las comunidades vegetales en que el papel predominante corresponde a las gramíneas se reúnen en esta categoría. La presencia de ellas está determinada claramente por el clima, muchas otras son favorecidas, al menos en parte, por las condiciones edáficas o bien por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos. Es curioso observar que, por un lado el hombre transforma y mantiene como pastizales otras asociaciones vegetales, mientras por el otro transforma los pastizales naturales en campos agrícolas. Probablemente esto se explica a partir del hecho de que los pastizales naturales generalmente se presentan en grandes extensiones planas, idóneas para la agricultura, mientras los pastizales inducidos más bien se ubican en terrenos montañosos. También cabe observar que, en general, son comunes en zonas de topografía plana o ligeramente ondulada y con menor frecuencia se presentan sobre declives pronunciados. Parece preferir, así mismo, suelos derivados de roca volcánica, y por lo general,

esta franja ocupa una porción de transición entre los bosques por un lado y los matorrales por el otro.

No hay pastizales que pudieran considerarse como totalmente libres de alguna influencia humana, el grado de injerencia del hombre es muy variable y con frecuencia difícil de estimar. Los pastizales antropógenos algunas veces corresponden a pastizales que prosperan una vez destruidos los bosques de *Pinus* y *Quercus*, característicos en general de las zonas montañosas.

II.7. Usos del suelo

La superficie terrestre no es ocupada en su totalidad por las actividades del hombre, sin embargo, algunas porciones son modificadas profundamente al ser utilizadas con fines agropecuarios o como asentamientos humanos por ejemplo, otras en cambio, han permanecido relativamente inalteradas por las actividades de la sociedad. *Las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se conocen como usos del suelo* (SEMARNAT, 2002).

En los sitios menos modificados, el uso del suelo está determinado precisamente por la vegetación natural del mismo: bosques, selvas y matorrales, que constituyen la categoría "primaria". En las regiones donde una porción de la comunidad biológica ha sido explotada parcialmente o bien se está recuperando después de su remoción, la vegetación es calificada como "perturbada" o "secundaria" respectivamente. Se conoce como "cobertura antrópica" a aquellos lugares donde la vegetación ya es totalmente diferente de la original al ser modificada por el hombre; dentro de esta categoría se incluyen diferentes tipos de cubierta, tales como: agrícola, ganadera o urbana (Tabla II.4.).

De cobertura vegetal natural	De cobertura antrópica
<p>Forestal <i>(Bosque de oyamel, Bosque de pino, Bosque de encino, Bosque mixto, Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio, Bosque tropical caducifolio, Matorral)</i></p>	<p>Agropecuario Asentamientos Humanos Cuerpos de agua</p>

Tabla II.4. Usos del suelo.

De cobertura vegetal natural:

Forestal: Representa el conjunto de los diferentes tipos de vegetación:

Uso de suelo forestal: Bosque de oyamel
 Bosque de pino
 Bosque de encino
 Bosque mixto
 Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio
 Bosque tropical caducifolio
 Matorral

En ella se encuentran agrupados vegetación primaria y perturbada. No se hace distinción entre el grado de perturbación de los tipos de vegetación como pudiera ser su densidad de cobertura aparente, dado que sólo se establece la presencia de determinado tipo de vegetación. Se asume, además, que existe vegetación secundaria, pero tampoco se le diferencia de modo alguno, pues se establece la dominancia de los tipos de vegetación presentes.

De cobertura antrópica

Agropecuaria: Éste incluye tanto zonas agrícolas de temporal como de riego, y zonas de pastizales, naturales o inducidos, utilizadas como campos de pastoreo de diferentes especies de ganado. Pese a que se pueden encontrar pastizales naturales, éstos son utilizados para la agricultura o pastoreo.

Asentamientos Humanos: Incluye asentamientos tanto con características urbanas como rurales.

Cuerpo de agua: Su aprovechamiento puede ser de tipo turístico o de sus recursos naturales.

II.8. Sistemas de Información Geográfica

El panorama actual que presentan los sistemas computacionales de información ha permitido que los geógrafos transformen el modo en que guían sus investigaciones así como el modo en que contribuyen a la sociedad. Esta forma de comunicación en las últimas dos décadas se ha utilizado en disciplinas como la cartografía, la fotogrametría, la percepción remota y, en el análisis estadístico espacial y el modelaje de procesos y patrones espaciales; los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido que se agilicen las técnicas tradicionales de investigación, mostrándose como una tecnología integradora de los sistemas en estudio.

La manipulación de una o más variables geográficas a través de un SIG ha agilizado los métodos manuales de análisis espacial al permitir integrar cualquier cantidad de información que el usuario requiera. Debido a esto, el manejo adecuado de un SIG permite realizar diversos análisis espaciales que facilitan la toma de decisiones.

Las diversas definiciones de un SIG están en función de los diferentes tipos que de ellos hay, así como de sus fines y propósitos, sin embargo, en ninguna de estas se deja de lado su característica principal: georreferenciar los datos que en él se encuentren. Por lo tanto, en un SIG un sistema común de coordenadas espaciales es el medio de referencia primario, aunado a esta característica, los elementos que completan su definición son los siguientes:

- a) entrada de datos: mapas, fotografías aéreas, imágenes de satélite, datos estadísticos.
- b) almacenamiento, recuperación y consulta de datos.
- c) manipulación, transformación, análisis y modelado.
- d) reporte de los datos mediante mapas, planos, gráficas, cuadros estadísticos.

La información almacenada en un SIG se puede utilizar mediante capas de información temáticas (Figura II.7.) que pueden ser manipuladas de acuerdo con el estudio que se realice; la flexibilidad del SIG permite que se utilicen o no todas las capas de información simultáneamente. Esto ofrece ventajas de tiempo y costos y de manejo de una mayor diversidad de información: valoraciones del uso del suelo, monitoreo de servicios urbanos y recursos naturales, localización de áreas de alto riesgo de inundaciones, erupciones volcánicas, etc.

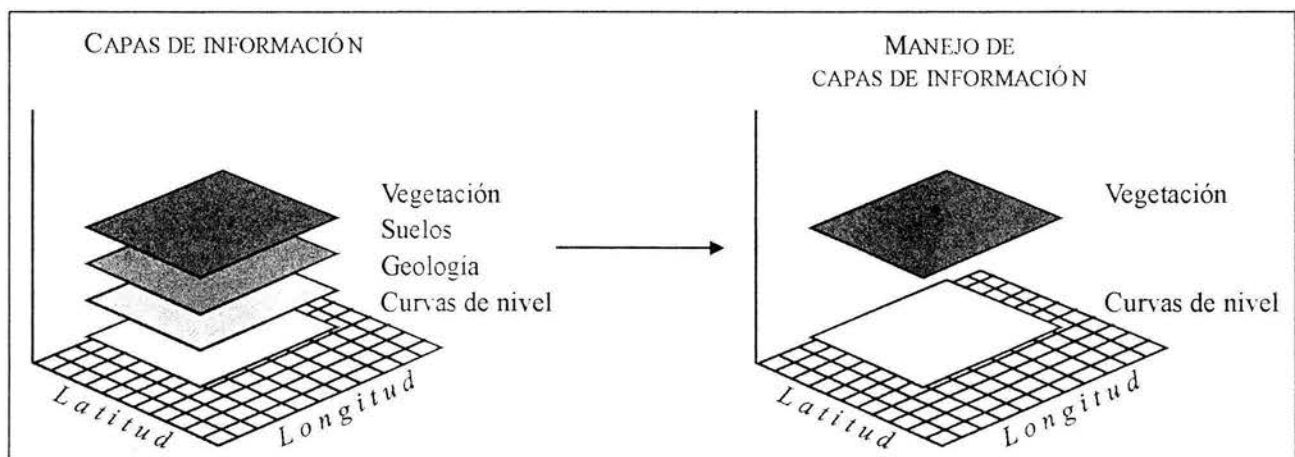


Figura II.7. Información almacenada en un Sistema de Información Geográfica mediante capas temáticas. (Modificado de Foote, 2000)

Los dos modelos gráficos a partir de los cuales los datos contenidos en un SIG pueden ser representados son el raster y el vector. El primero se basa en la localización de los datos mediante una matriz, donde la intersección de una columna con una línea forman un píxel con la información geográfica almacenada (un valor numérico: altitud, reflectancia; o un nombre temático: tipos de vegetación, área urbana, caminos, etc.). La georreferencia de este modelo se logra mediante la relación de un sistema de coordenadas geográficas y las celdas. El modelo vectorial, por su parte, permite localizar la información almacenada mediante modelos geométricos (puntos, líneas y polígonos) definidos por un eje de coordenadas geográficas, cada uno de estos elementos geométricos lleva consigo también la información geográfica almacenada (Figura II.8.).

II.8.1. Modelo Digital de Elevación

La información que en un SIG se puede manipular es tanto cualitativa como cuantitativa. La de tipo cuantitativo es común que se organice en los denominados Modelos Digitales del Terreno o MDT¹⁷, es decir, una estructura numérica de datos donde se representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1990): temperaturas, precipitación, elevaciones, pendientes, etc..

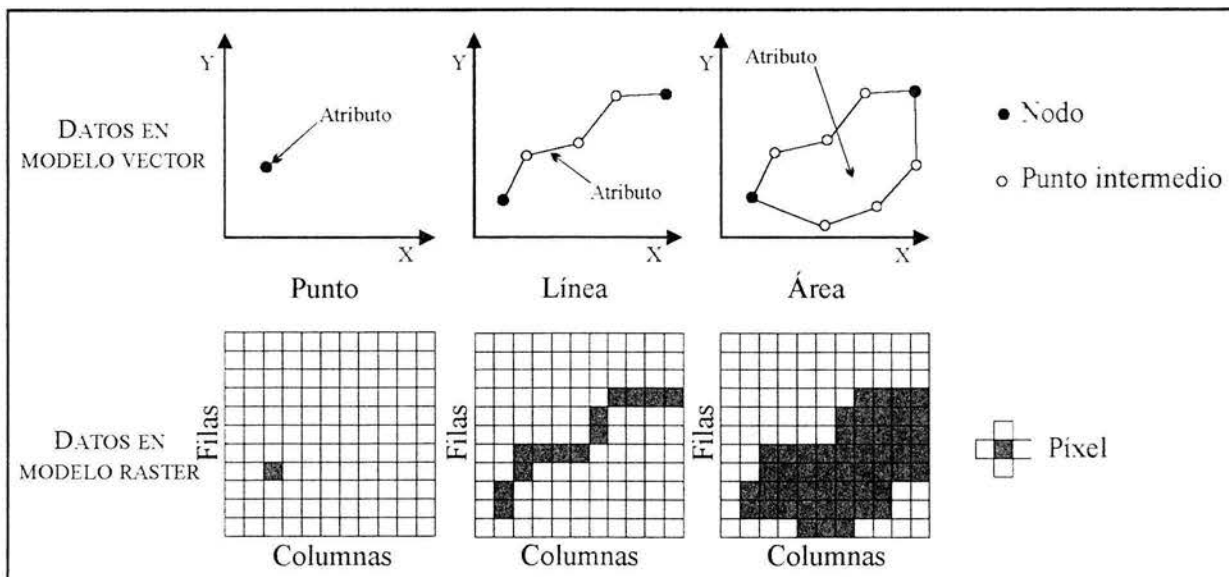


Figura II.8. Representación vector y raster de puntos, líneas y áreas.
(Modificada de International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences, 1997)

17. En inglés *digital terrain model* o DTM.

Un modelo, como una abstracción de la realidad, sólo puede representar parte de las propiedades de la misma, un ejemplo de ello son los Modelos Digitales de Elevación (MDE)¹⁸ donde también, mediante una estructura numérica de datos se representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno¹⁹. La unidad básica de información en un MDE es un punto acotado definido por una terna compuesta por un valor de altitud, z , al que lo acompañan valores correspondientes de x (longitud) e y (latitud) (Felicísimo, 1990). Con estas características es posible elaborar modelos de elevación en tres dimensiones.

Como parte de un SIG, un MDE puede ser representado tanto en formato raster como vectorial. Generalmente, para el modelo vectorial se utiliza la red irregular de triángulos –TIN, *triangulated irregular network*– y para el modelo raster una matriz irregular. La estructura TIN se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados, cada uno de los cuales se adapta a una zona con características de pendientes similares; una estructura de matriz irregular es el resultado de sobreponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada.

Felicísimo (*op. cit.*) menciona que los métodos básicos para conseguir los datos de altitudes pueden dividirse en dos grupos: directos cuando las medidas se realizan sobre el terreno real e indirectos cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente.

18. El MDE es conocido también como DEM por sus iniciales en inglés; *digital elevation model*.

19. En la cartografía convencional la descripción gráfica de las elevaciones es realizada a través del mapa topográfico o una carta hipsográfica. Por otro lado, es común se utilice como sinónimo del MDE el término MDT.

CAPITULO III

MÉTODO

III.1. Materiales

Las características técnicas de cada una de las cartas temáticas consultadas y de las imágenes aéreas y satelitales se presentan en los siguientes párrafos. Se añade también, una breve descripción del modelo digital de elevación que se utilizó para el análisis de los resultados.

Cartas temáticas

Las principales cartas temáticas utilizadas fueron las topográficas elaboradas por el INEGI a escala 1:50,000, cuyas características cartográficas son las siguientes: el esferoide utilizado es el de Clarke de 1866 y la proyección es Transversa de Mercator; estas cartas poseen también una cuadrícula cada 1000 m que representa la proyección UTM (Universal Transversa Mercator) y utilizan el datum NAD 27 (North American Datum 1927).

Son seis las cartas que cubren la zona en estudio, sus nombres correspondientes son: Milpa Alta, Tenango y Cuernavaca, estas tres con una equidistancia entre curvas de nivel de 10 metros y, Amecameca, Cuautla y Tenancingo con 20 metros de equidistancia entre curvas de nivel¹.

Se utilizó también una carta hipsográfica elaborada por la Universidad Autónoma Metropolitana y el Gobierno del estado de Morelos escala 1:50,000 que cubre en una sola hoja el área del corredor, en ella se muestran los límites que el área en estudio ocupa; el nombre de la carta es "Estado de Morelos, Área de Protección de Flora y Fauna, Corredor Biológico Chichinautzin" y fue elaborada en 1989 con una equidistancia entre curvas de nivel de 100 metros. El mapa geológico del estado de Morelos (Instituto de Geología, 1977) fue consultado para establecer los límites de la entidad, su escala aproximada es de 1:100,000.

Fotografías aéreas

Con el objetivo de facilitar la selección de las áreas muestra, la interpretación digital, y sobre todo la visual, se utilizaron tanto fotografías aéreas digitales como convencionales, permitiendo

1. Las claves de las cartas temáticas de INEGI mencionadas, se pueden consultar en el apartado: Referencias – Cartografía.

identificar con mayor detalle algunas de las características de los tipos de vegetación y uso de suelo.

a) Analógicas

Las fotografías aéreas convencionales fueron obtenidas por el INEGI en abril de 1993; 15 líneas de vuelo cubren en su totalidad la zona en estudio a una escala promedio de 1:20,000. El registro de la superficie terrestre fue realizado en formato de película blanco y negro pancromático con una orientación de vuelo norte-sur e impresas en un tamaño de 23 cm x 23 cm.

La sobreposición lateral del 20% que tiene cada línea de vuelo y el traslape longitudinal del 60% entre imagen e imagen permite que el material se pueda utilizar estereoscópicamente.

b) Digitales

El vuelo para obtener las fotografías digitales aéreas fue llevado a cabo el 26 de noviembre de 2001 por el Instituto de Geografía de la UNAM. Éste cubrió la porción sur del Distrito Federal y la zona norte del estado de Morelos, por lo que el cubrimiento aerofotográfico abarcó parte de la zona en estudio.

Doce líneas de vuelo, con promedio de 38 fotografías por línea, cubren la región noreste del corredor a una escala promedio de 1:7,000. Se registraron en la gama del espectro visible y se elaboró una base de datos adicional que registró la coordenada UTM central de las imágenes mediante un sistema de ubicación global² (GPS por sus siglas en inglés, **Global Positioning System**), así como la altitud del vuelo, la fecha, hora y zona geográfica a la que pertenece el estado.

El vuelo se planeó para que el material resultante, una vez impreso, se trabajara estereoscópicamente. La sobreposición longitudinal en promedio fue de 70% (excesiva) y la lateral de menos del 10% (deficiente).

2. Es un método por el cual se obtienen las coordenadas exactas de un punto determinado, ya sea en geográficas o en alguna proyección establecida en el equipo que se opere. Las coordenadas se obtienen directamente de satélites que orbitan la Tierra.

Imágenes de satélite

Los datos de percepción remota utilizados para la realización de este trabajo consisten en los adquiridos por el sensor ETM+ a bordo del satélite LANDSAT 7.

El conjunto de datos fue obtenido el día 21 de marzo del 2000. Están integradas por un canal pancromático con una resolución espacial de 15 m; 3 bandas visibles y 3 bandas en el infrarrojo con una resolución de 30 m, y con una resolución de 60 m 2 bandas en el infrarrojo térmico³.

Las imágenes completas cubren porciones de los estados de Morelos, Guerrero, México, Puebla, Tlaxcala y en su totalidad al Distrito Federal, fueron registradas utilizando cartas 1:50,000 y verificadas utilizando vectores provenientes de información 1:250,000. En promedio se consideró aceptable un defasamiento de 120 metros entre el vector y el rasgo en la imagen⁴.

De este conjunto de datos se realizó un recorte de la zona en estudio, obteniéndose para el caso de la imagen pancromática, 3934 líneas y 2401 columnas. En el caso de las imágenes infrarrojas térmicas 600 líneas y 984 columnas. Para las imágenes con datos del espectro visible e infrarrojo cercano el número de líneas fue de 1025, y el número de columnas de 1835.

Fueron georeferenciadas tomando como base la proyección UTM y considerando el elipsoide de Clarke de 1866 y el datum NAD 27. Los límites del recorte corresponden a las siguientes coordenadas geográficas: paralelos 18°52'15" y 19°08'55" de latitud norte y, meridianos 98°50'46" y 99°22'09" de longitud oeste (Figura III.1.).

3. Dichas imágenes son propiedad de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, actualmente Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Universidad Nacional Autónoma de México; fueron proporcionadas por el Instituto de Geografía de la UNAM a través del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota.

4. Archivo de datos (metadatos) de las imágenes ETM+ obtenidas en la fecha ya señalada en el texto.

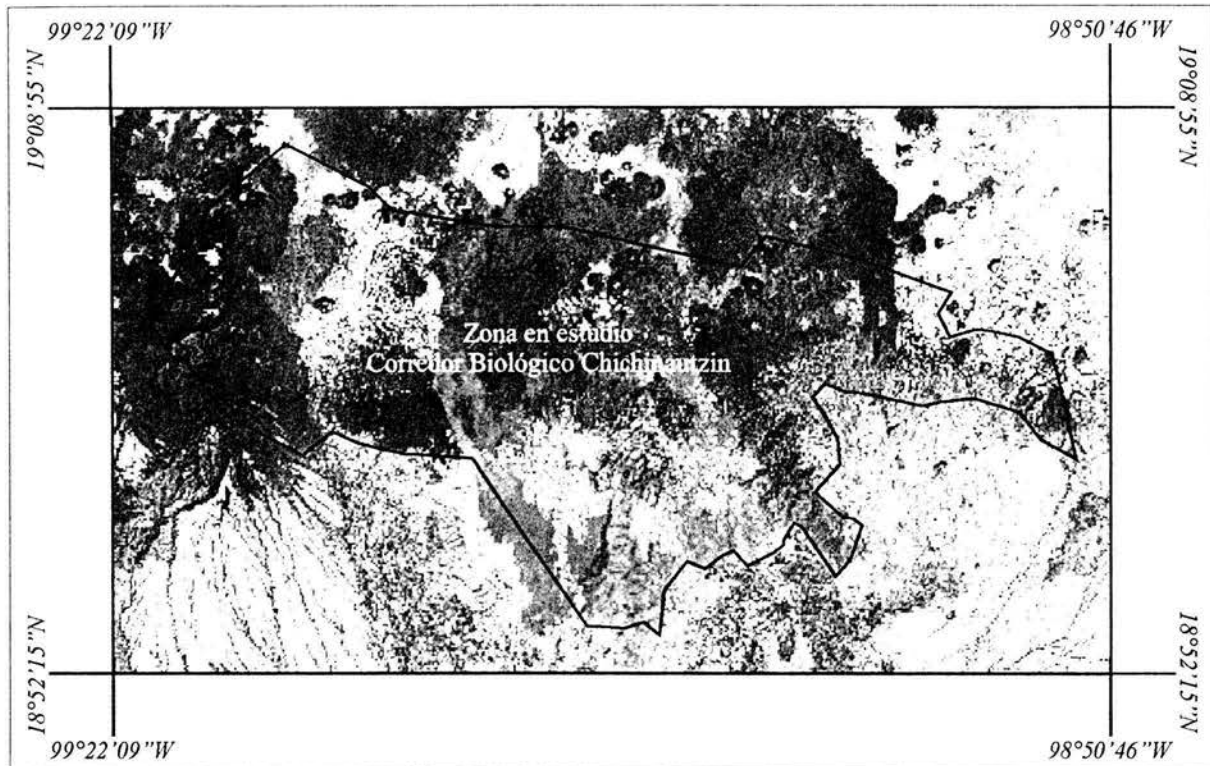


Figura III.1. Coordenadas extremas del recorte de la imagen de satélite ETM+.

Modelo Digital de Elevación

Se obtuvo por medio de método indirecto a partir de la digitalización de las curvas de nivel impresas en las cartas topográficas 1:50,000 de INEGI. La digitalización de las curvas se hizo cada 100 metros y la interpolación de las mismas se logró mediante el SIG ILWIS v.2.3 (Integrating Land Water and Information System) aplicando el modelo de matrices regulares. El tamaño de los píxeles se estableció en 30 metros por lo que el número de columnas y filas correspondió con el de las imágenes ETM+ del espectro visible (1025 líneas y 1835 columnas). Para visualizar el área en estudio en tres dimensiones y con el objetivo de obtener una mayor caracterización de los resultados, el modelo fue georreferenciado utilizando las mismas características cartográficas de las imágenes de satélite.

III.2. Definición de los límites de la zona en estudio

La definición de los límites administrativos de cada una de las áreas naturales protegidas que integran el área en estudio, Corredor Biológico Chichinautzin, se realizó considerando las coordenadas de los vértices establecidos en los decretos publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF).

Los vértices que marcan la pauta para realizar la delimitación del Parque Nacional “Lagunas de Zempoala”, fueron modificados el 19 de mayo de 1947; en él se consideran, a diferencia del decreto publicado el 27 de noviembre de 1936, donde únicamente se mencionan los nombres de parajes y cerros que ubican los vértices, los rumbos y distancias que establecen los linderos del Área Natural Protegida. Sin embargo, al elaborar el plano de esta poligonal se encontraron inconsistencias significativas, mismas que ya han sido identificadas por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Se realizaron, así, los ajustes necesarios para el cierre del polígono considerando las cimas de los cerros que se mencionan en el decreto y con ello tener delimitada esta ANP. (Figura III.2.)

Los límites de las fracciones I y II, así como de las zonas núcleo del Área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin”, fueron también construidos tomando en cuenta las coordenadas, rumbos y distancias publicados en el DOF del día 5 de diciembre de 1988. Se encontró también, en esta delimitación, una discrepancia con los límites utilizados por la SEMARNAT y los aquí elaborados (Figura III.3.). Sin embargo, el límite utilizado en este trabajo es el construido de acuerdo a los datos establecidos en dicho decreto.

Por último, la definición limítrofe del Parque Nacional “El Tepozteco” fue realizada sin problema alguno, pues coincidió con lo estipulado en el decreto creado el día 22 de enero de 1937.

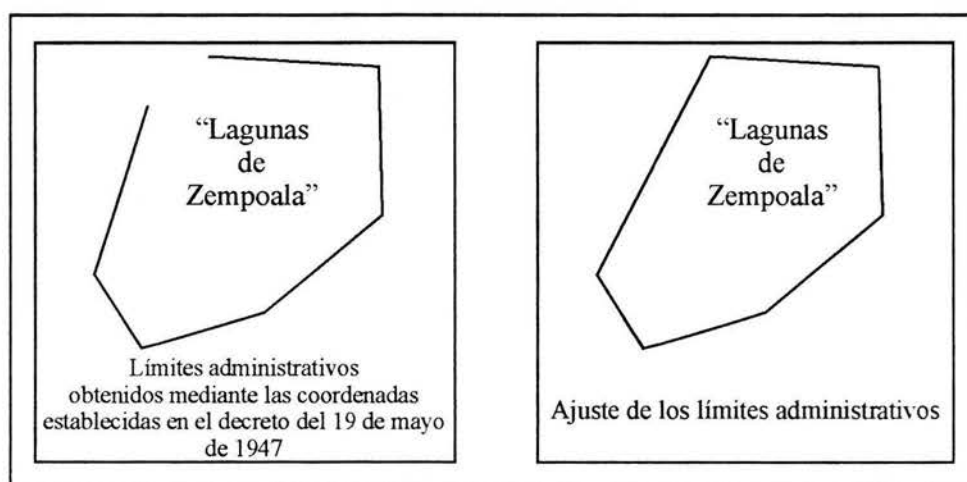


Figura III.2. Límites administrativos del Parque Nacional “Lagunas de Zempoala”

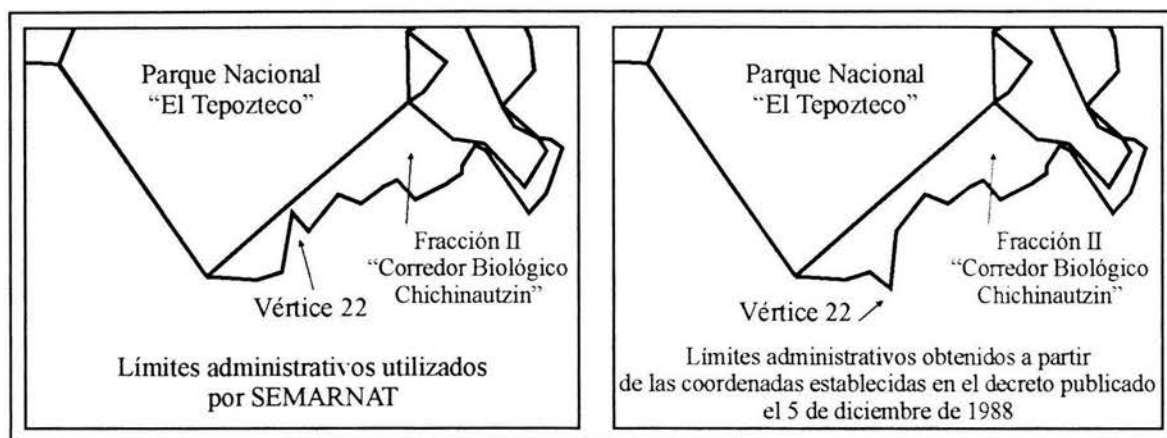


Figura III.3. Sur de los límites administrativos del Área de Protección de Flora y Fauna "Corredor Biológico Chichinautzin"

Cabe observar que estos límites fueron elaborados con ayuda de los SIG AutoCad Map 2000 e ILWIS v.2.3. Lo anterior significa que los límites fueron trabajados digitalmente y con ello sujetos a cálculos muy exactos, por lo que en estos casos, existe una discrepancia en los valores de las superficies decretadas y los obtenidos en el sistema digital; esto no significa que los valores de las superficies obtenidos sean erróneos; en último caso, corresponderían a los valores reales de superficie en función de las coordenadas establecidas en los decretos para cada vértice. De esta forma, y dado que es prácticamente imposible ajustar los datos digitales con los datos de superficie establecidos en decreto, el análisis de los resultados se realizó con los datos de superficie que el sistema digital calculó (Tabla III.1.).

Área Natural Protegida		Superficie decretada (ha)	Superficie calculada digitalmente (ha)
Área de Protección de Flora y Fauna "Corredor Biológico Chichinautzin"	Zona núcleo Chalchihuites	783.14	777.72
	Zona núcleo Quiahuištepec	2873.11	2868.43
	Zona núcleo Las Mariposas	1740.86	1745.74
	Zona de amortiguamiento	31905.28	32002.72
Parque Nacional "Lagunas de Zempoala"		4790	4795.57
Parque Nacional "El Tepozteco"		24000	21961.02
Total		66092.39	64151.2

Tabla III.1. Comparación entre los datos de superficie decretada y los obtenidos mediante el sistema digital

III.3. El trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en una serie de visitas programadas al Corredor Biológico Chichinautzin; en la primera de ellas, de reconocimiento, se establecieron las características principales de la zona; su accesibilidad, áreas de mayor conservación y fragmentación, tipos de vegetación, usos del suelo y principales poblados, entre los aspectos más importantes. Los trabajos siguientes permitieron localizar y cartografiar puntos de referencia para establecer áreas muestra de la vegetación, principalmente, y de los usos del suelo predominantes en la zona, y ser utilizados, así, como campos de entrenamiento y de referencia durante el proceso de clasificación y verificación.

Dudas que se generaron respecto al tipo de vegetación y usos de suelo de algunas zonas observadas mediante fotografías aéreas e imágenes de satélite, fueron resueltas en las mismas salidas, llegando, con ello, a una obtención de datos muestra muy precisos en cuanto a la distribución y localización de la vegetación y usos de suelo del corredor.

III.4. Definición de la leyenda

La leyenda de trabajo (Tabla III.2.) se estableció en función de los diferentes tipos de vegetación y usos de suelo presentes en la zona y considerando las observaciones realizadas durante los trabajos de campo e interpretación fotográfica, así como las características de la vegetación descritas por Rzedowski. Se consideró, también, la fragmentación de la vegetación y las características de las imágenes en cuanto a su capacidad para discriminar un elemento de otro. La clasificación de la vegetación presentada en la tabla II.3. y los usos del suelo de la tabla II.4., permitieron establecer una guía de los elementos vegetales y usos del suelo a considerar en los procesos de fotointerpretación, selección de áreas muestra y clasificación digital y visual. Se consideró, además, la complejidad y fragmentación del elemento analizado para lograr una mayor exactitud en el mapa a realizar. Un elemento más que fue considerado al elaborar la leyenda de trabajo fue la escala de representación; la Asociación Cartográfica Internacional menciona que la escala límite idónea para las imágenes ETM+ es de 1:100,000 (López-Vizoso, 1989. Citado por Chuvieco, 2000). Sin embargo, lo anterior no impide que estas mismas imágenes puedan ser utilizadas para obtener productos cartográficos a escala 1:50,000, dado que a esta escala se pueden realizar estudios de áreas urbanas, agricultura y usos del suelo (Sausen *et al*, 1997).

LEYENDA DE TRABAJO Vegetación y Usos de suelo			
Usos del suelo		Vegetación	
Forestal	(F)	Bosque Tropical Caducifolio	(BTC)
Agropecuario	(Agr)	Bosque de pino	(BP)
Asentamientos Humanos	(AH)	Bosque de encino	(BQ)
Afloramiento rocoso	(AR)	Bosque de oyamel	(BO)
Cuerpos de agua	(CA)	Bosque mixto (Bosque de encino-Bosque de pino, Bosque de pino - Bosque de encino)	(BM)
<i>Las Lagunas de Zempoala se incluyen como una capa vectorial adicional, dado que en las imágenes de satélite no es posible distinguir las espectral o visualmente.</i>		Bosque de encino-Bosque Tropical Caducifolio	(BQ-BTC)
<i>De igual forma, los afloramientos rocosos no representan un uso de suelo como tal, pero se incluyen dada la extensión que ocupan.</i>		Matorral crasirosulifolio	(Mat)
		<i>En la cartografía se antepone la letra F al tipo de vegetación para indicar su uso de suelo.</i>	

Tabla III.2. Leyenda de trabajo para la elaboración de la cartografía del Corredor Biológico Chichinautzin.

III.5. Fase 1. Clasificación digital

El procesamiento digital de las imágenes se realizó con el software ILWIS v.2.3 y v.3.0. En primer lugar, y con el objetivo de observar las regiones homogéneas de las imágenes, se aplicó sobre una composición en color RGB 432 el método de clasificación no supervisada clusters (agrupaciones). Se optó por utilizar esta composición, dado que los límites entre las áreas urbanas y el suelo expuesto son bien definidos, apareciendo en tonos de azul. La banda 4, infrarrojo cercano (en rojo) es bastante sensible a la clorofila, permitiendo que se observen variaciones de la vegetación, que aparecen en tonos de rojo (Sausen *et al.*, 1997).

El método clusters consiste en que el algoritmo matemático utilizado selecciona en la imagen píxeles cuya característica espectral sea semejante y diferenciable de otras y a los cuales clasifica asignándole un identificador numérico; el número de *clusters* en que se desee dividir los ID de los píxeles dependerá en gran medida de la persona que realiza este procesamiento dado que los diferentes tipos de software que existen para ello presentan esta opción, permitiendo, así, elegir el número deseado de *clusters* o clases que el usuario decida. En este caso, se consideró

conveniente realizar diversas pruebas aplicando a la composición en color el método clusters con varios números de clases, desde tres hasta quince clases.

La clasificación supervisada consistió en la delimitación, primero vectorial, de las áreas de entrenamiento, donde se consideraron algunos puntos y áreas muestra obtenidas en trabajo de campo para seleccionar regiones que representaran los diferentes tipos de vegetación y usos de suelo que existen en la zona (excepto la categoría Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio); en la determinación de su tamaño se consideraron los resultados de la clasificación no supervisada en cuanto a las áreas de mayor homogeneidad por un lado, y por otro, se consideró la fragmentación y la densidad de las coberturas vegetales, con lo cual se estableció más de un área de entrenamiento y de diversos tamaños para cada tipo de vegetación y usos de suelo.

Las áreas de entrenamiento fueron posteriormente registradas en formato raster sobre una composición en color 543 (fase de entrenamiento).

La composición en color 543, permitió una diferenciación visual muy clara entre los límites de las categorías utilizadas en la leyenda: la combinación con dos bandas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético, permite que el suelo expuesto y los asentamientos humanos se visualicen en tonos rosados y azules respectivamente, mientras que la vegetación es mostrada en diversas tonalidades de verde y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de la misma (Sausen *et al.*, 1997).

Los píxeles de las áreas de entrenamiento, una vez registrados, fueron visualizados mediante una gráfica de características espaciales, colocando la banda del visible rojo (banda 3) en el eje vertical y la banda del infrarrojo cercano (banda 4) en el eje horizontal; con ello se logró observar el grado de discriminación entre una clase y otra, e inferir el resultado de la fase de asignación al observar la sobreposición existente entre los píxeles de diferentes clases.

Durante la fase de asignación, se aplicó el método de Mínima Distancia de Mahalanobis (Minimum Mahalanobis Distance), consistente en que a partir de los valores medios y de una matriz varianza-covarianza de las respuestas espectrales de las áreas de entrenamiento para cada banda espectral de la composición en color, el clasificador elige aquellos píxeles cuyos ID tengan valores semejantes a los de entrenamiento y en función de esto les asigna una de las categorías ya determinadas.

El proceso de clasificación digital fue aplicado sobre el recorte completo de la imagen raster ya establecida, sin embargo, se consideró conveniente realizar un recorte a los resultados del proceso de clasificación, para obtener con ello, únicamente el polígono correspondiente al área administrativa del Corredor Biológico Chichinautzin, y realizar los análisis debidos sobre esta superficie.

III.6. Fase 2. Fiabilidad de la clasificación

La clasificación digital fue sujeta a un análisis de fiabilidad para estimar qué tan precisos fueron los resultados de este proceso; se realizó una matriz de confusión en la cual se compararon 189 puntos muestra recabados en campo de los cuales se conocía su posición (coordenadas) dentro de los límites de la zona y su atributo de vegetación o uso del suelo. Se rasterizaron a una resolución de 30 m y se estableció una superficie de 90 x 90 m (3 x 3 píxeles) dado que en el trabajo de campo fueron elegidas áreas que superaban estas superficies.

Para calcular la matriz de confusión fue homogeneizada la leyenda utilizada en los campos de entrenamiento con la leyenda de vegetación y usos del suelo propuesta, considerando, para ello, que las categorías asignadas en la clasificación digital correspondían a un solo tipo de vegetación o uso del suelo; de esta manera, se comparó el mismo número y nombre de categorías, tanto para la clasificación digital como para los puntos muestra. Se obtuvo así, una primera matriz de confusión denominada: Puntos de campo-Clasificación digital.

Para aumentar el número de puntos muestra se obtuvieron, mediante interpretación de fotografías aéreas digitales y convencionales, áreas muestra de las categorías establecidas en la leyenda, arrojando un total de 484 nuevos puntos. La georreferenciación de estos puntos fue lograda mediante la visualización simultánea de las fotografías aéreas y la composición en color 543 de las imágenes ETM+, ubicando rasgos de referencia, tales como localidades, vías de comunicación y cerros.

De estos 484 puntos derivados de fotointerpretación estereoscópica, 281 fueron sumados a los 189 puntos obtenidos mediante trabajo de campo, dando un total de 470 puntos de referencia, mismos que sirvieron para calcular una nueva matriz de confusión denominada: Puntos de campo y fotointerpretación-Clasificación digital, los que fueron rasterizados a 30 m, asignándoseles una superficie de 90 x 90 m (3 x 3 píxeles).

III.7. Fase 3. Interpretación visual de las imágenes

Establecida la fiabilidad del proceso de clasificación digital y, considerando como elementos de referencia para la interpretación visual los errores de la clasificación, los puntos muestra de campo y fotointerpretación, el trabajo de campo, los parámetros de clasificación de la vegetación según Rzedowski y la composición en color 543, la clasificación digital fue corregida visualmente. Fueron, así, reclasificados a su categoría más precisa, aquellos píxeles que contenían un atributo diferente al observado en campo o en las fotografías aéreas. De igual forma, algunas regiones cuya clasificación no correspondió con los parámetros establecidos por Rzedowski y que, a su vez, coincidieron con observaciones de campo, fueron reinterpretados a una categoría más precisa.

En esta parte del proceso, se incluyó la categoría Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio, dado que con observaciones de campo e interpretación fotográfica se logró discriminar este tipo de vegetación, cosa que no sucedió en la clasificación digital. Mediante la observación de la gama de colores presentes en la composición en color y el trabajo de campo, se reinterpretaron algunos píxeles cuya categoría no correspondía con la observada sobre dicha composición en color.

Fue considerada también en este proceso de interpretación visual, la escala de representación del mapa final, 1:50,000, y, en función de ello, se asignó a algunas superficies inferiores al área mínima cartografiable la categoría dominante. Varios autores recomiendan que el área mínima cartografiable no sea inferior a 4 mm^2 , medidos a escala del mapa (Anderson, *et al.*, 1976; Campbell, 1987. Citados por Chuvieco, 2000): a escala 1:50,000, 4 mm^2 ($4 \times 4 \text{ mm}$) equivalen a 4 hectáreas ($200 \times 200 \text{ m}$) y, considerando una resolución espacial de la imagen de 30 metros, se eliminaron polígonos que tuvieran una superficie menor de 7×7 píxeles ($210 \times 210 \text{ m}$), es decir categorías que tuvieran menos de 49 píxeles de superficie.

Una primera prueba de fiabilidad del mapa final, se realizó con una comparación visual del mismo con la composición en color 543. Mediante la sobreposición vectorial de los polígonos de vegetación y usos del suelo en la composición en color, se observó la correspondencia cromática de la imagen con la separación de unidades vegetales y de usos del suelo. Se utilizaron, por último, los puntos muestra restantes de la fotointerpretación para calcular una nueva matriz de confusión del mapa final. El cálculo estadístico de la fiabilidad del mapa de Vegetación y Usos del suelo del Corredor Biológico Chichinautzin se elaboró con 203 puntos muestra que incluyeron la categoría Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio.

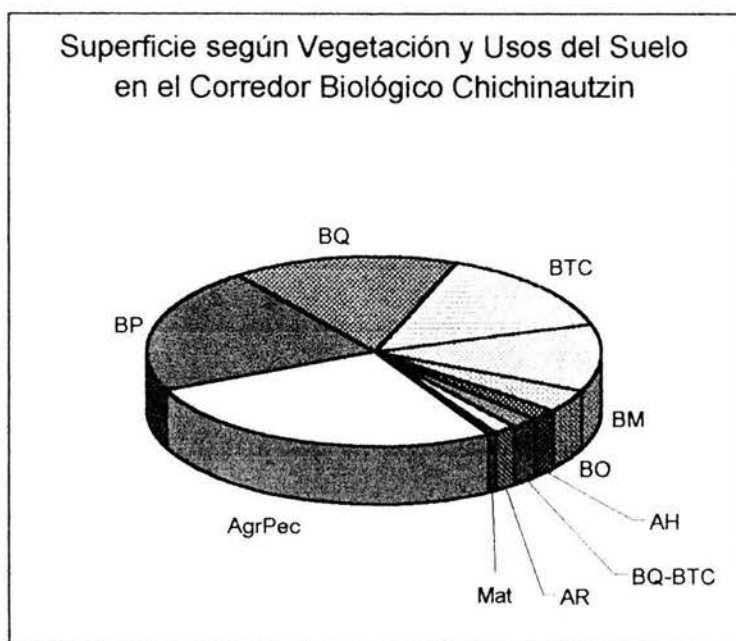
CAPITULO IV

VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN

La cartografía obtenida mediante el procesamiento digital y visual de las imágenes ETM+ del 21 de marzo del 2000, muestra la localización y distribución de la vegetación y usos del suelo en el área integrada Corredor Biológico Chichinautzin (Mapa: Vegetación y Usos del Suelo).

Cinco categorías representan el 89.89% de las 64151.2 ha de superficie del área en estudio, estas son: Agropecuaria (26.8%), Bosque de pino (21.38%), Bosque de encino (16.07%), Bosque tropical caducifolio (14.42) y Bosque mixto (11.22%).

El 10.11% lo cubren cuatro categorías, de las cuales ninguna supera el 5% de representación espacial: Bosque de oyamel con 4% de superficie, Asentamiento humano con 2.0%, Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio con 1.93% y Afloramientos rocosos con 1.75%, mientras que el Matorral no supera el 1% de superficie: 0.43% (Gráfica IV.1.).













Gráfica IV.1. Porcentaje de superficie que abarca la vegetación y usos del suelo en la zona analizada.

VEGETACIÓN Y USOS DEL SUELO, CORREDOR BIOLÓGICO CHICHINAUTZIN, 2000.



— Corredor Biológico Chichinautzin
 - - - Área Natural Protegida

-  Bosque de pino
-  Bosque de oyamel
-  Bosque de encino
-  Bosque mixto
-  Bosque topical caducifolio

-  Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio
-  Matorral
-  Agropecuario
-  Asentamientos humanos
-  Afloramientos rocosos

1 : 240000
 0 10 km



Proyección: UTM
 Elipsoide: Clark 1886
 Datum: NAD 27

Elaborado por: Alvaro Vega Guzmán
 Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras
 Universidad Nacional Autónoma de México

El área en estudio, Corredor Biológico Chichinautzin, se encuentra integrado por tres áreas naturales protegidas: **Área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin”, Parque Nacional “El Tepozteco” y Parque Nacional “Lagunas de Zempoala”**. A continuación se presenta la vegetación y usos del suelo que en cada una de ellas existen.

Área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin”. Esta ANP posee las diez categorías definidas en la leyenda de trabajo. El conjunto de los diferentes tipos de vegetación representa el 66.82% del total de hectáreas que tiene esta zona, 37394.60; mientras que el 2.64% restante se encuentra dividido entre las categorías Afloramiento rocoso, Asentamiento humano y Matorral. El uso del suelo que mayor superficie abarca es el Agropecuaria con 11428.72 ha, equivalentes al 30.56%. (Tabla IV.1.)

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
AgrPec	11428.72	30.56
BP	7740.43	20.70
BQ	7104.98	19.00
BM	5237.94	14.01
BTC	3690.43	9.87
BO	1172.83	3.14
AR	557.43	1.49
AH	385.78	1.03
Mat	39.61	0.11
BQ-BTC	36.46	0.10
Total	37394.60	100.00

Tabla IV.1. Distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin”

Tiene tres zonas núcleo poco alteradas inmersas en dos áreas de amortiguamiento denominadas Fracción I y II. A continuación se observa el tipo de cobertura vegetal que posee cada una de estas zonas.

Zona núcleo 1, Chalchihuites. Posee en su mayoría una alto porcentaje de cobertura vegetal, 93.97% respecto de sus 777.72 ha, el resto del área es abarcado por el uso del suelo Agropecuario (Tabla IV.2.).

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
BP	667.26	85.80
BO	63.56	8.17
AgrPec	46.90	6.03
Total	777.72	100.00

Tabla. IV.2.
Zona núcleo “Chalchihuites”

Zona núcleo 2, Chichinautzin–Quiahuistepec. Seis de las diez categorías se encuentran en esta zona núcleo, de las cuales cuatro son de algún tipo de vegetación natural (bosque de pino, bosque de oyamel, bosque mixto y bosque de encino) y representan el 99.31% de la cobertura total de la zona (Tabla IV.3.).

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
BP	1765.82	61.56
BO	584.79	20.39
BM	457.14	15.94
BQ	40.87	1.42
AgrPec	19.45	0.68
AR	0.36	0.01
Total	2868.43	100.00

Tabla. IV.3.
Zona núcleo “Quiahuistepec”

Zona núcleo 3, Las Mariposas. La vegetación abarca una superficie del 98.13% respecto del total del área núcleo (1745.74 ha), representada principalmente por el bosque tropical caducifolio (93.79%) y por encinares (4.3%). El 1.87% está dado por la categoría Agropecuario. (Tabla IV.4.).

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
BTC	1637.35	93.79
BQ	75.80	4.34
AgrPec	32.59	1.87
Total	1745.74	100.00

Tabla. IV.4.
Zona núcleo “Las Mariposas”

Zona de amortiguamiento, fracción I y fracción II. Poco más del 60% de su superficie tiene algún tipo cobertura vegetal, destacan los bosques de encino, pino y el bosque mixto, cuyas coberturas conjuntas suman el 53.36%. Por su parte el bosque tropical caducifolio, el bosque de oyamel y el bosque de encino-bosque tropical caducifolio cubren el 8.17%.

El 35.40% es ocupada por terrenos agropecuarios y el 3.07% restante es superficie de afloramientos rocosos, asentamientos humanos y matorrales. (Tabla. IV.5.).

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
AgrPec	11329.78	35.40
BQ	6988.31	21.84
BP	5307.36	16.58
BM	4780.80	14.94
BTC	2053.08	6.42
AR	557.07	1.74
BO	524.48	1.64
AH	385.78	1.21
Mat	39.61	0.12
BQ-BTC	36.46	0.11
Total	32002.72	100.00

Tabla. IV.5. Distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el área de Protección de Flora y Fauna “Corredor Biológico Chichinautzin” según zona de amortiguamiento.

Parque Nacional “Lagunas de Zempoala”. Esta ANP posee, en más de tres cuartas partes, pinares, seguida de elementos de oyamel y, en menor porcentaje, el uso del suelo Agropecuario. Sin rebasar el 1% de cobertura espacial, existen tres elementos más: bosques mixtos, bosques de encino y asentamientos humanos (Tabla. IV.6.).

Vegetación y Uso del suelo	Superficie Ha.	%
BP	3799.90	79.24
BO	612.70	12.78
AgrPec	371.62	7.75
BM	5.85	0.12
BQ	5.22	0.11
AH	0.27	0.01
Total	4795.57	100.00

Tabla. IV.6. Distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el Parque Nacional “Lagunas de Zempoala”.

Parque Nacional "El Tepozteco". Se integra principalmente por coberturas agropecuarias (23.91%) y de bosque tropical caducifolio (25.36%), sin embargo, los encinares, pinares, el bosque mixto y el bosque de encino-bosque tropical caducifolio, están también presentes, sumando estos últimos un 39.42% de cobertura espacial. El parque posee la mayor cobertura de asentamientos humanos, 4.07%, en comparación con el Parque Nacional "Lagunas de Zempoala" y el Área de Protección de Flora y Fauna "Corredor Biológico Chichinautzin" (Tabla. IV.7.).

Vegetación y Usos del suelo	Superficie Ha.	%
BTC	5568.69	25.36
AgrPec	5251.45	23.91
BQ	3367.25	15.33
BP	2176.95	9.91
BM	1915.35	8.72
BQ-BTC	1199.21	5.46
AH	893.58	4.07
BO	783.84	3.57
AR	567.78	2.59
Mat	236.94	1.08
Total	21961.02	100.00

Tabla. IV.7. Distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el Parque Nacional "El Tepozteco".

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Fase 1 y 2

El resultado del primer procesamiento que se realizó sobre las imágenes de satélite, fue una clasificación no supervisada aplicando el método clusters sobre una combinación en color 432.

Dado que el número de clases en las que fue dividida la composición en color abarcó pruebas con un rango de tres hasta quince clases, se observó que las clasificaciones realizadas por debajo de una asignación de siete clases, no diferenciaban entre cubiertas totalmente diferentes, es decir, generalizaban las cubiertas presentes, por ejemplo, la categoría Agropecuario se etiquetaba como Asentamiento humano o viceversa, o bien, cubiertas muy diferenciables, como la vegetación, incluía píxels que en realidad se observaban desprovistos de vegetación. Por el contrario, clasificaciones por arriba de siete clases fragmentaban demasiado las cubiertas, teniendo así, una serie de subcategorías por cada categoría distinguible visualmente en la composición en color, provocando con ello que no se apreciaran de forma clara los principales usos del suelo del corredor.

La clasificación no supervisada de siete clases permitió observar un punto medio entre la generalización y la fragmentación de las clases, y establecer, así, zonas homogéneas de algunas categorías de uso del suelo y vegetación (Imagen V.1.).

La selección de áreas de entrenamiento para elaborar la clasificación supervisada fue realizada considerando que para cada tipo de cobertura distinguida se visualizaron diferentes categorías, determinadas por factores diversos, entre ellos: la fragmentación y densidad de cobertura aparente de la vegetación, la humedad, sombras y tipo de cultivos.

La zona en estudio ha sido sujeta a una intensa explotación de sus recursos forestales y edáficos, mismo que ha provocado fragmentación y diversidad de coberturas vegetales: grandes masas vegetales han sido taladas para dar paso a usos de suelo agrícola y asentamientos humanos, provocando con ello que se abran áreas para pastizales o campos agrícolas entre las masas vegetales o, en el peor de los casos, que se elimine totalmente la vegetación. Del mismo modo, la tala de la vegetación primaria ha dado lugar a que la densidad de la cobertura vegetal

sea cada vez más abierta o semicerrada, lo que a su vez da origen a vegetación secundaria o zonas desprovistas de vegetación.

Al momento de seleccionar las áreas de entrenamiento correspondientes a cada tipo de vegetación, y para cubrir todas las posibilidades de identificación de las mismas durante la clasificación digital y abarcar una gama más amplia de áreas de entrenamiento, fueron consideradas tanto la fragmentación como diversidad de coberturas vegetales. Se observó que debido a este factor la respuesta espectral variaba entre elementos de la misma clase localizados en regiones o zonas distintas; visualmente, la variación cromática observada en la composición en color 543 mostró que, tanto la fragmentación como la densidad de cobertura aparente, influían en diversos elementos de la superficie terrestre que, aunque siendo los mismos, se observaban como pertenecientes a otras clases.

Las diferentes elevaciones del terreno, tales como volcanes, conos cineríticos o lahares, provocaron algunas regiones de sombras durante la adquisición de los datos, mismas que en las composiciones en color fueron observadas. Así, pese a tener imágenes libres de nubes y con las mínimas distorsiones atmosféricas, se identificaron, en la ladera norte de algunas elevaciones, regiones de tonalidad oscura, mismas que fueron asociadas a sombras provocadas por estos accidentes topográficos. De esta manera, se logró obtener diferentes subcategorías de un mismo tipo de vegetación o uso del suelo durante la selección de las áreas de entrenamiento.

La humedad fue, también, un elemento a considerar en la diferenciación de algunas coberturas vegetales. La imagen fue adquirida en el mes de marzo, época seca del año, por lo que se sabía que el bosque tropical caducifolio, por ejemplo, tendría un aspecto seco dada su condición fenológica de pérdida de follaje en este periodo de tiempo; por el contrario, se observó, al sobreponer un mapa de mesoclimas sobre la imagen, que los encinares se localizaban en la franja más húmeda del corredor, misma que en la composición en color presentaba una coloración muy distintiva. Por otro lado, los campos de cultivo presentaban diferentes tonalidades cromáticas, semejándose a regiones de asentamientos humanos principalmente, que bien podía ser producto de su alto contenido de humedad, o bien, por su probable baja humedad se confundía con el bosque tropical caducifolio.

Entre los factores ya mencionados, para discriminar acertadamente los campos agropecuarios, se consideró la diversidad de cultivos en la región. Dado que cada cultivo respondería de diferente manera a la incidencia de los rayos solares y que el sensor registraría esta diferencia, fue preciso

establecer más de un área de entrenamiento para las diferentes tonalidades de las zonas agropecuarias en la composición en color.

Por otra parte, durante el desarrollo y análisis de las fases I y II, se incluye la categoría Invernadero, ya que espectralmente estas construcciones son visibles en las composiciones en color y digitalmente se pudieron discriminar utilizando puntos de referencia de campo.

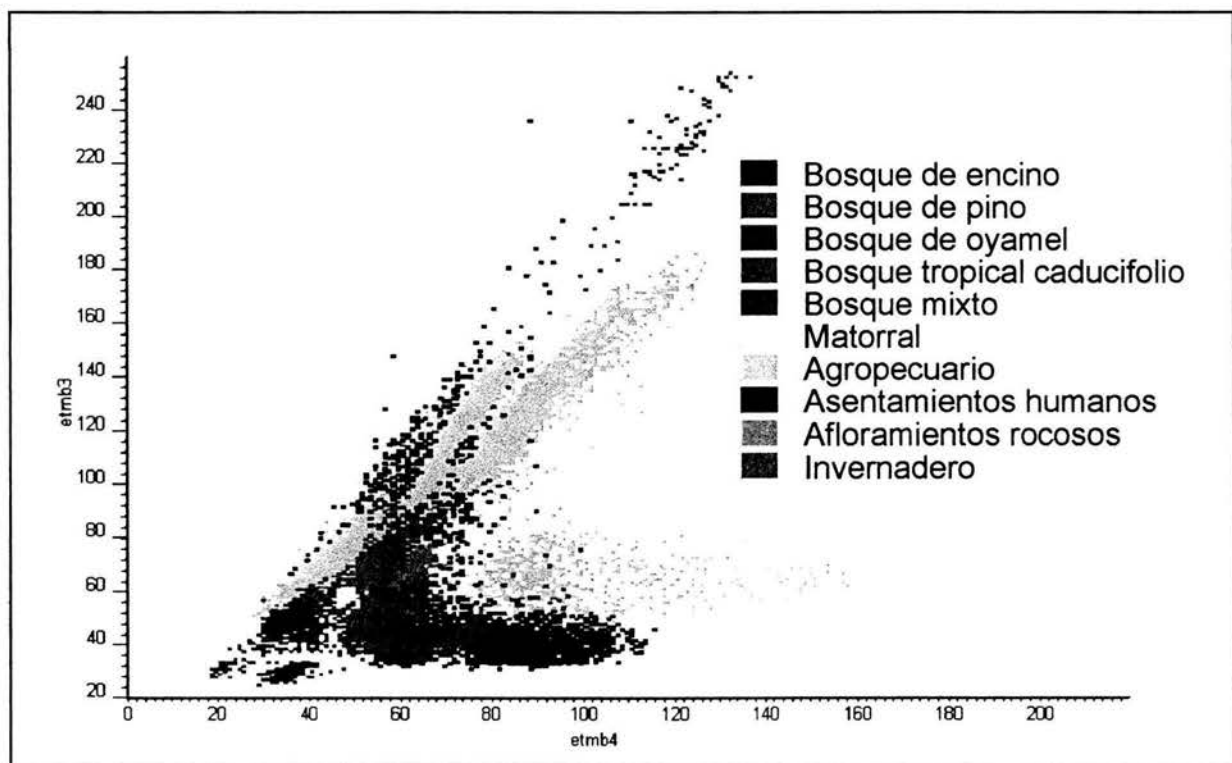
Considerando los criterios anteriores, las regiones homogéneas identificadas en la clasificación no supervisada y las observaciones realizadas en los trabajos de campo, se registraron diversas categorías por cada clase de uso de suelo para abarcar la variabilidad espectral y cromática de cada una (Tabla V.1.).

Categoría principal	Variaciones de la categoría	Numero de áreas de entrenamiento	Factores que influyen en la división de la categoría
Bosque de encino	Encino 1	6	Fragmentación, cobertura cerrada, semicerrada y abierta, humedad.
	Encino 2	4	
	Encino 3	2	
Bosque de pino	Pino 1	7	Fragmentación, cobertura cerrada, semicerrada y abierta.
	Pino 2	1	
	Pino 3	3	
Bosque de oyamel	Oyamel 1	4	Sombras, coberturas cerradas y semicerradas, asociación con pino.
	Oyamel 2	4	
Bosque tropical caducifolio	BTC 1	7	Condición fenológica, fragmentación.
	BTC 2	12	
	BTC 3	8	
Bosque Mixto	Pino/Encino	7	Cobertura, asociación vegetal.
Matorral	Matorral	3	Respuesta espectral
Agropecuario	Agr 1	16	Tipo de cultivo, humedad, observación de campo.
	Agr 2	8	
	Agr 3	9	
	Agr 4	8	
	Agr 5	11	
	Agr 6	6	
	Agr 7	4	
	Agr 8	6	
Asentamiento humano	AH 1	5	Densidad de construcciones, sombras.
	AH 2	11	
Afloramiento rocoso	AR	3	Respuesta espectral
Invernadero	Invernadero	2	Respuesta espectral

Tabla V.1. Definición de las subcategorías y criterios utilizados para la selección de las áreas de entrenamiento.

Los datos sobre los cuales se seleccionaron y registraron las áreas de entrenamiento consistieron en la integración de las bandas 5,4 y 3 mediante una composición en color RGB.

Registrados los píxeles de entrenamiento correspondientes a las diversas categorías de cada clase establecida, se elaboró la gráfica de características espaciales de los mismos. En esta gráfica se le asignó, para su distinción, un color determinado a cada clase y se integraron las subclases de cada categoría a una sola; se consideró que aunque se establecerían varias subclases, todas ellas pertenecían a una clase única determinada en la leyenda de trabajo (Gráfica V.1.).



Gráfica V.1. Características espaciales de las áreas de entrenamiento seleccionadas.

Una primera observación de la gráfica muestra que dos de las bandas a utilizar para la clasificación supervisada discriminan de forma correcta cada una de las clases de uso de suelo que se pretenden identificar, dado que se observan nubes de píxeles relativamente homogéneas por cada clase; si bien existen algunas sobreposiciones de clases un tanto exageradas como la de Bosque de pino y Bosque mixto o la de Asentamientos humanos y Agropecuario por ejemplo; esto se debe a los mismos factores considerados en la selección de las áreas de entrenamiento.

En la gráfica se utilizan las bandas 3 y 4, ya que en ellas los Niveles Digitales (ND) refieren elementos cuya respuesta espectral es muy diferente, infiriendo, por consiguiente, que esta respuesta espectral distinta proviene de elementos de la superficie terrestre también distintos.

Se puede apreciar que uno de los usos del suelo que mayor dificultad tendrá para su clasificación será el bosque mixto, ya que los valores de los píxeles seleccionados para discriminar esta clase se encuentran mezclados entre los niveles digitales del bosque de pino, por lo que aunque se discrimine correctamente, existirán píxeles de bosque mixto que se clasifiquen como pinares o píxeles correspondientes a bosque de pino que se clasifiquen como bosque mixto. Por el contrario, una de las clases que supondrá pocos problemas en su clasificación será el bosque de encino, pues entre los ND de los píxeles que representan esta clase y otras, existe poca sobreposición; se observa, por lo tanto, una agrupación homogénea de píxeles de encinares en ambas bandas; algunos píxeles seleccionados como bosque de pino bien pueden clasificarse como bosque de encino, dado que algunos de ellos se ubican en esta categoría.

El bosque tropical caducifolio y el bosque de oyamel mantienen también cierta sobreposición con otras categorías, sin embargo, se puede inferir que serán discriminados correctamente en la clasificación supervisada dado que sus ND mantienen zonas homogéneas en la gráfica.

Por otro lado, los píxeles de la clase Agropecuario se entremezclan con varias categorías como el Bosque de encino, Asentamientos humanos y Bosque tropical caducifolio, suponiendo con ello que algunos píxeles que no corresponden a la categoría Agropecuario serán clasificados como tal.

Píxeles catalogados como Matorral y Afloramientos rocosos mantienen una separación distintiva en ambas bandas pese a ubicarse en la gráfica entre nubes de píxeles de otras categorías, lo que hace suponer que algunos píxeles serán clasificados como Matorral o Afloramientos rocosos sin serlo.

Otra zona de entrenamiento que está correctamente discriminada en ambas bandas es la de Invernadero, pues aunque son píxeles un tanto dispersos, sus ND son muy distintivos; lo anterior se explica debido a que la respuesta espectral de estas construcciones es fácilmente detectable por el sensor ETM+, resultando con ello que se puedan clasificar digitalmente sin mayores problemas.

Para seleccionar el método de clasificación supervisada se realizaron pruebas de clasificación utilizando los métodos programados en el software ILWIS v. 3.0. Se tuvo, así, que el método de paralelepípedos dejaba sin clasificar una gran cantidad de píxeles, mostrando en el resultado una imagen temática muy fragmentada y con regiones de píxeles bastante amplias sin una significación específica; el método de Mínima Distancia clasificó erróneamente píxeles cuya categoría correspondía en realidad a otra y dejó sin clasificar algunos de ellos; se mostraban por lo tanto, categorías clasificadas erróneamente y una gran cantidad de píxeles aislados sin una clase determinada. Considerando lo anterior, la fase de asignación fue realizada sobre la composición en color 543 aplicando el método de Mínima Distancia de Mahalanobis. Este método de clasificación resultó ser el que mejor separó cada una de las categorías de vegetación y usos de suelo y, que además, le asignó a cada píxel alguna categoría establecida, por lo que ninguno de ellos se quedó fuera de ser clasificado.

Visualmente, comparado el resultado de este proceso con la composición en color 543, se observó que la separación de las clases correspondía con la variación cromática de la imagen, lo que supuso una clasificación supervisada correcta (Imagen V.2.)

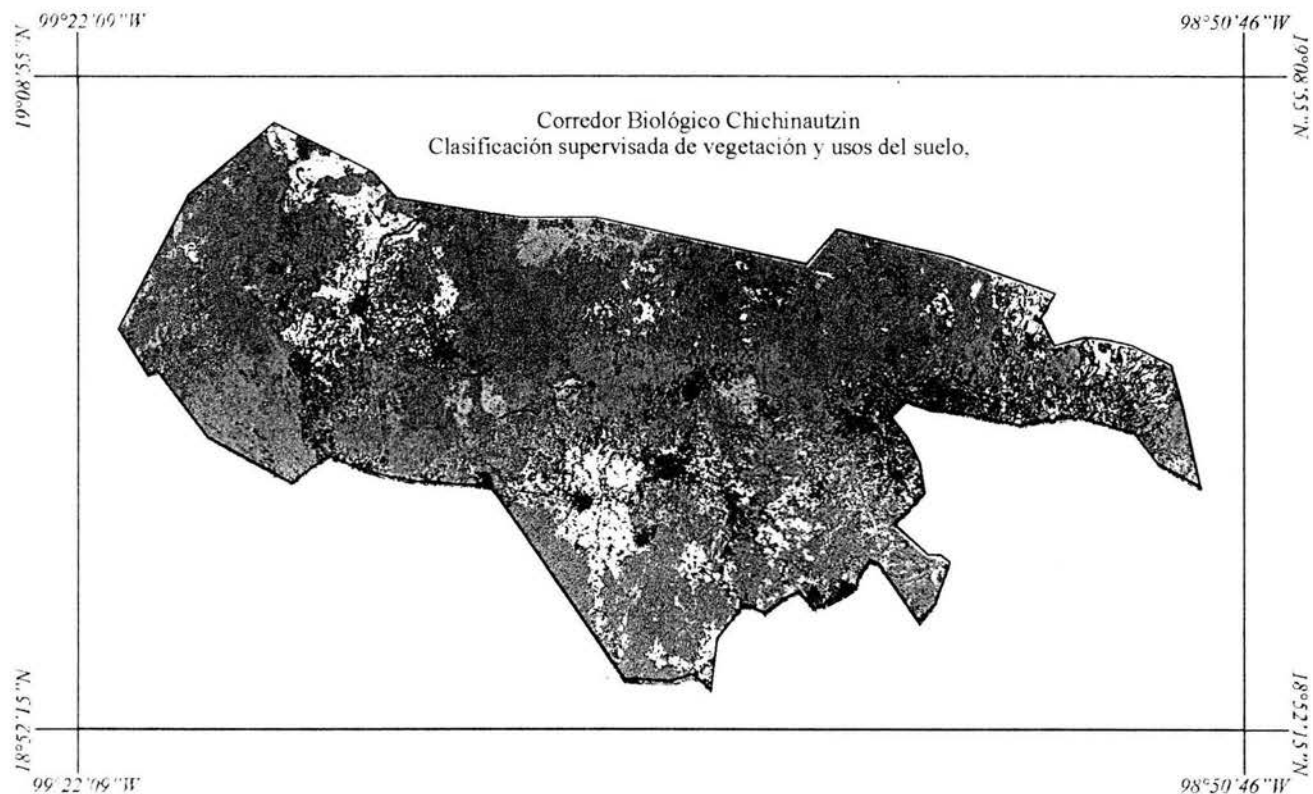


Imagen V.2. Clasificación supervisada utilizando el método de Mínima Distancia de Mahalanobis. El área es un recorte de la imagen correspondiente a los límites administrativos del área en estudio.

Pese a haber realizado la clasificación supervisada sobre el recuadro completo de la imagen, se consideró conveniente elaborar un recorte exclusivo del área del Corredor Biológico Chichinautzin para elaborar sobre ella los análisis de fiabilidad y exactitud (Imagen V.3.). Lo anterior se hizo considerando que:

1) el interés del estudio recae en el polígono señalado por los límites administrativos decretados en el Diario Oficial de la Federación;

2) los trabajos de campo abarcaron el área de este polígono, por lo tanto, no se contaba con información adicional para realizar la cartografía de tipos de vegetación y usos del suelo del recorte completo de la imagen y,

3) el cubrimiento aerofotográfico se concentró en estos límites. Así, el análisis de fiabilidad de la clasificación supervisada fue elaborado sobre este recorte.



Imagen V.3. Recorte del recuadro de la imagen para obtener el polígono correspondiente al área en estudio.

Fueron utilizados un total de 189 puntos de referencia (Tabla V.2.) para calcular la fiabilidad y el grado de exactitud para cada clase mediante una matriz de confusión (Tabla V.3.).

Categoría	Puntos de campo	No. de píxeles
Bosque de encino	24	216
Bosque de pino	30	270
Bosque de oyamel	6	56
Bosque tropical caducifolio	17	153
Bosque Mixto	12	108
Matorral	3	27
Agropecuario	41	369
Asentamiento humano	19	171
Afloramiento rocoso	2	18
Invernadero	2	18
Total	189	1406

Tabla V.2. Puntos de referencia utilizados, obtenidos en trabajo de campo, según tipo de vegetación y usos del suelo.

		Resultados de la Clasificación supervisada										
Categorías		BQ	BP	BO	BTC	BM	Mat	AH	AgrPec	AR	Inv	Exactitud
Puntos de referencia	BQ	175	6	0	0	19	0	7	9	0	0	81
	BP	11	104	17	1	123	1	11	2	0	0	39
	BO	0	20	30	1	0	0	3	0	0	0	58
	BTC	11	3	0	90	6	1	5	32	5	0	59
	BM	16	19	0	0	65	0	6	2	0	0	60
	Mat	0	0	0	6	0	20	1	0	0	0	74
	AH	5	0	0	3	0	0	123	40	0	0	72
	AgrPec	0	16	4	64	15	0	72	190	8	0	51
	AR	0	0	0	0	2	0	2	0	14	0	78
	Inv	0	0	0	0	0	0	4	0	0	14	78
	Fiabilidad	80	62	59	55	28	91	53	69	52	100	
		Exactitud global = 65.96 %										

Tabla V.3. Matriz de confusión: Puntos de campo – Clasificación supervisada.

La coincidencia entre puntos de referencia y clasificación supervisada tiene una exactitud global del 65.96%, que resulta baja considerando a Anderson, *et. al.* (1976), quien sugiere que la exactitud global de la clasificación debe ser de al menos de un 75% y que dicha exactitud debe ser similar para todas las categorías utilizadas.

Se puede observar que, como se mencionó en el análisis de características espaciales, el Bosque de encino fue una de las coberturas que mejor se clasificó con un 81% de exactitud, es decir, que del total de píxeles con esa categoría, un 81% coincidió con los píxeles clasificados

como tal, mientras que el resto de píxeles fueron clasificados erróneamente en otra categoría, sobre todo en la de Bosque mixto. De la misma manera, el Bosque mixto fue la categoría que más errores de comisión tuvo, es decir, píxeles que siendo clasificados como Bosque mixto pertenecían realmente a otra, sobre todo Bosque de pino; esto mismo provocó que los pinares tuvieran el menor porcentaje en exactitud, 39%, dado que 123 píxeles clasificados como Bosque mixto, pertenecían a la categoría de Bosque de pino.

Las categorías Matorral, Asentamientos humanos, Afloramientos rocosos e Invernadero fueron las que menos errores de omisión tuvieron, abarcando un rango de exactitud de 72-78%, mismo que puede ser explicado por que se tenía un alto nivel de referencia obtenido mediante trabajo de campo y que permitió seleccionar áreas de entrenamiento más adecuadas a la realidad; así, el principal error de comisión se da en la categoría de asentamientos humanos, donde varios píxeles fueron clasificados como Agropecuario.

Por su parte los píxeles representantes de la categoría Invernadero tienen una fiabilidad del 100% ya que ninguno de ellos fue incluido en otra categoría diferente, fundamentando con ello que la clasificación digital utilizando imágenes del sensor ETM+, y por la respuesta espectral de este tipo de estructuras, permitió discriminar fácilmente esta categoría.

Tanto el bosque tropical caducifolio como la categoría Agropecuaria, tuvieron problemas para su discriminación, ya que píxeles que debieron ser clasificados como agropecuario fueron incluidos en la categoría Bosque tropical caducifolio y viceversa.

El bajo porcentaje de exactitud global puede ser explicado considerando que el corredor biológico representa una zona fragmentada y, por ello mismo, la respuesta espectral capturada por el sensor es muy variada, lo que implica a su vez, que los niveles digitales de los píxeles se confundan con categorías muy distintas unas de otras. Otro aspecto a considerar, es que los puntos obtenidos en campo representan una distribución espacial generalmente ligada a los accesos de vías de comunicación terrestre disponibles, tales como caminos pavimentados y terracerías, por lo que esta distribución espacial de puntos de referencia se limita a éstos, donde si bien, algunos de ellos pueden ser obtenidos por interpolación visual, no siempre se puede obtener gran cantidad de puntos de referencia por este medio, ya que los accidentes topográficos y la misma vegetación limitan la visión.

Considerando lo anterior, se utilizaron fotografías aéreas para, mediante interpretación estereoscópica, ampliar el número de puntos de muestra y con ellos mejorar la exactitud global de la

clasificación supervisada y obtener un mayor grado de referencia espacial de la distribución de los tipos de vegetación y usos del suelo en el corredor y, elaborar con mayor exactitud la interpretación visual.

El total de puntos muestra de referencia, considerando los de trabajos de campo y los obtenidos mediante fotointerpretación, suman un total de 470 (Tabla V.4.).

Categoría	Puntos muestra		No. total de puntos	No. total de píxeles
	Campo	Fotointerpretación		
Bosque de encino	24	39	63	567
Bosque de pino	30	42	72	648
Bosque de oyamel	6	6	22	198
Bosque tropical caducifolio	17	35	52	468
Bosque Mixto	12	24	36	324
Matorral	3	6	9	81
Agropecuario	41	73	114	1026
Asentamiento humano	19	36	55	495
Afloramiento rocoso	2	9	11	99
Invernadero	2	0	2	18
Total	189	281	470	3924

Tabla V.4. Puntos de referencia utilizados, obtenidos en trabajo de campo e interpretación aerofotográfica, según tipo de vegetación y usos del suelo.

De acuerdo con Anderson *et. al.* (1976), la nueva matriz de confusión obtenida con los puntos anteriores, alcanzó el valor mínimo propuesto de exactitud global. Se obtuvo una exactitud global de la clasificación supervisada de aproximadamente 76% (Tabla V.5.), lo que indica que hay una coincidencia del 76% entre puntos de referencia obtenidos con trabajo de campo e interpretación aerofotográfica y los píxeles clasificados digitalmente, dada por el mayor número de píxeles comparados y de una distribución espacial de puntos más amplia.

La exactitud de cada categoría aumentó por arriba del 70%, excepto para el bosque de pino, cuyo problema de discriminación es la confusión de sus niveles digitales con los del bosque mixto; sin embargo, su grado de exactitud aumentó en relación con la matriz de confusión obtenida a partir de los puntos de campo únicamente, pasando de 39% a 63%.

		<i>Resultados de la clasificación supervisada</i>										
<i>Categorías</i>		BQ	BP	BO	BTC	BM	Mat	AH	AgrPec	AR	Inv	<i>Exactitud</i>
<i>Puntos de referencia</i>	BQ	473	21	0	0	38	0	8	27	0	0	83
	BP	16	409	21	4	168	1	19	8	2	0	63
	BO	0	36	146	1	1	0	11	3	0	0	74
	BTC	12	4	0	349	6	1	9	82	5	0	75
	BM	31	43	0	0	237	0	7	6	0	0	73
	Mat	0	1	0	20	1	57	1	0	1	0	70
	AH	5	0	0	4	0	0	393	93	0	0	79
	AgrPec	10	20	4	80	17	0	142	743	10	0	72
	AR	0	0	0	3	7	0	4	0	85	0	86
	Inv	0	0	0	0	0	0	4	0	0	14	78
<i>Fiabilidad</i>		86	77	85	76	50	97	66	77	83	100	
		Exactitud global = 75.93 %										

Tabla V.5. Matriz de confusión: Puntos de campo y fotointerpretación – Clasificación supervisada.

La categoría Agropecuario, pese a que también aumentó en su porcentaje de exactitud de 51 a 72%, sigue mostrando la dificultad que tuvo el clasificador para su discriminación, ya que en esta nueva matriz se observa de forma más clara que varios píxeles que debieron tener esta etiqueta fueron clasificados como asentamientos humanos o bosque tropical caducifolio principalmente, sin dejar de lado que su confusión abarca todas las categorías establecidas, excepto la de Invernadero por las razones ya mencionadas.

Los valores de fiabilidad de cada clase aumentaron, también, con la adición de puntos de referencia. A excepción de las categorías Bosque mixto y Asentamientos humanos, las restantes superan el 76% de fiabilidad llegando en el caso de Matorral a un porcentaje de 97%.

Estos nuevos resultados permiten afirmar que la clasificación supervisada tiene un grado de confiabilidad muy aceptable, mismo que sirve de base para facilitar la interpretación visual.

Fase 3

La clasificación digital sirvió de base para realizar una discriminación más adecuada a la realidad de los tipos de vegetación y usos del suelo de la zona en estudio. La ventaja de realizar este proceso visual recae en la utilización e integración de criterios de interpretación que en el proceso digital no se pueden incluir, tales como los parámetros que marcan la pauta para separar los tipos de vegetación y las observaciones de campo por ejemplo.

Fueron integrados, así, diversos criterios para reclasificar a su categoría más adecuada aquellos píxels que se incluyeron en una categoría distinta a la que pertenecían; mediante una diferenciación visual en función del color observado en una composición en color de las bandas 543 y de observaciones de campo, así como de características altitudinales de los tipos de vegetación, se logró discriminar el bosque mixto, mismo que se confundía con el bosque de pino y el bosque de encino. De esta forma, píxeles que fueron clasificados digitalmente como bosque mixto fueron reclasificados visualmente como bosque de pino.

El bosque de encino fue separado sobreponiendo un mapa de climas sobre la composición en color 543 y se observó la coincidencia del clima templado húmedo, mismo que coincidió con lo mencionado por Rzedowski, con una franja verde claro en la composición en color y que abarca un rango altitudinal de 1900 a 2500 m, así, aquellos píxeles que no abarcaron estos criterios fueron asignados a otra categoría más adecuada a sus características. De la misma manera, píxeles que fueron clasificados como bosque tropical caducifolio y que superaban en su localización altitudinal los 1600 m, fueron reclasificados a la categoría Agropecuario, ya que estos dos elementos tendían a confundirse por su respuesta espectral semejante y que se observa en la matriz de confusión Puntos de campo y fotointerpretación–Clasificación supervisada.

La categoría Asentamientos humanos, por su parte, fue delimitada en función de su apariencia cromática en la composición 543 y con ello se reclasificaron como Agropecuario o Bosque tropical caducifolio aquellos píxeles que no se ubicaban en regiones visualmente urbanas en la composición en color. Tanto el matorral como los afloramientos rocosos fueron delimitados considerando las observaciones de campo y su localización en la clasificación digital, misma que coincidió con las primeras, sin embargo, su confusión con las categorías Agropecuario o Bosque tropical caducifolio hizo necesario sobreponer en la imagen 543 un mapa de litología y así separarlas adecuadamente; dado que existían píxeles aislados etiquetados como Afloramientos rocosos o Matorral, estos fueron eliminados al considerar el área mínima cartografiable ya que dichos píxeles no superaban esta superficie.

Este último criterio, área mínima cartografiable, fue considerado al eliminar aquellos píxels que formaran polígonos, de cualquier categoría, que no superaban las 4 ha, ya que no serían representativos espacialmente una versión análoga del mapa a escala 1:50,000. Un ejemplo de ello es la categoría Invernadero, que para hacer el análisis de la fase tres fue eliminada, dado que una vez realizada la interpretación visual se obtuvo una superficie de 2.34 ha para esta categoría, inferior a las 4 ha establecidas como área mínima cartografiable. Los invernaderos por

lo tanto fueron reasignados a la categoría Asentamientos Humanos. Píxeles de todas las categorías que se localizaron en forma aislada y que no representaban una superficie mayor al área mínima cartografiada fueron reclasificados a la categoría dominante que los rodeaba.

Durante la interpretación visual fue incluida la categoría Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio, misma que se observó en los trabajos de campo y fotointerpretación y que no fue incluida en la clasificación digital pues se confundía totalmente con las zonas agropecuarias; identificadas las zonas donde esta unidad se presentaba, se reclasificaron los píxeles establecidos como Agropecuarios, Asentamientos humanos o Afloramientos rocosos a su categoría más adecuada de Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio.

Para mostrar el cambio que sufrió la clasificación digital una vez reinterpretada visualmente, se elaboró un cuadro comparativo de número de píxeles por categoría en ambas clasificaciones: digital y visual (Tabla V.6.).

Categoría	Interpretación digital		Interpretación visual a partir de la clasificación digital	
	No. de píxeles	%	No. de píxeles	%
Bosque de encino	87626	12.28	114529	16.05
Bosque de pino	121908	17.09	152493	21.38
Bosque de oyamel	19395	2.72	28516	4.00
Bosque tropical caducifolio	102625	14.39	103045	14.44
Bosque mixto	112685	15.80	79987	11.21
Invernadero	182	0.03	-	-
Asentamiento humano	89007	12.48	14231	1.99
Agropecuario	161825	22.68	190968	26.77
Afloramiento rocoso	14985	2.10	12496	1.75
Matorral	3125	0.44	3072	0.43
Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio	-	-	14026	1.97
Total	713363	100	713363	100

Tabla V.6. Comparación entre el número de píxeles por categoría una vez realizada la interpretación visual.

Tanto las categorías Bosque de encino y Bosque de pino, como la de Bosque de oyamel, aumentaron su porcentaje en cobertura espacial; los dos primeros en aproximadamente 4% y la

segunda en 2%, mismo que se relaciona con el decremento en cantidad de píxeles de la categoría Bosque mixto de aproximadamente 4%; dicho de otro modo, píxeles etiquetados digitalmente como bosque mixto, visualmente fueron reclasificados como pinares principalmente y encinares.

El aumento de la categoría Bosque de oyamel se relaciona con el decremento de píxeles etiquetados como Asentamientos humanos, pues se observó que los niveles digitales de ésta última, se confundían con los del bosque de oyamel, y mediante interpretación visual se logró hacer una discriminación más adecuada del bosque de oyamel - asentamientos humanos.

Por su parte, se explica el decremento de píxeles en cerca del 10% de la categoría Asentamiento humano, relacionándolo con el aumento de la categoría Agropecuario y la distribución de los píxeles restados en varias de las categorías, entre ellas la de Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio. En las categorías Afloramientos rocosos y Matorral, la disminución en su cantidad de píxeles se relaciona con la adición del Bosque de encino-Bosque tropical caducifolio y Agropecuario.

La confiabilidad del mapa final de “Vegetación y Usos del Suelo del Corredor Biológico Chichinautzin” fue establecida mediante el cálculo de una nueva matriz de confusión. En ella se comparan los 203 puntos de referencia restantes, obtenidos mediante fotointerpretación, y la interpretación visual (Tabla V.7.).

		<i>Resultados de la interpretación visual</i>										
<i>Categorías</i>		BQ	BP	BO	BTC	BM	Mat	AH	AgrPec	AR	BQ-BTC	<i>Exactitud</i>
<i>Puntos de referencia</i>	BQ	171	0	0	0	0	0	0	0	0	9	95
	BP	18	300	5	9	0	0	0	0	0	0	90
	BO	0	10	107	0	0	0	0	0	0	0	91
	BTC	0	0	0	90	0	0	0	18	0	0	83
	BM	22	13	0	0	127	0	0	0	0	0	78
	Mat	0	0	0	9	0	27	0	0	0	0	75
	AH	0	0	0	4	0	0	182	30	3	0	84
	AgrPec	0	0	0	0	0	0	0	270	0	0	100
	AR	0	0	0	3	0	0	0	6	31	5	69
	BQ-BTC	9	0	0	7	0	0	0	2	0	36	67
	Fiabilidad	78	93	96	78	100	100	100	83	91	72	
Exactitud global = 90.15 %												

Tabla V.7. Matriz de confusión: Puntos obtenidos mediante fotointerpretación – Interpretación Visual.

La matriz de confusión indica que la precisión de cada clase aumentó en relación con los resultados de matriz Puntos de campo y fotointerpretación–Clasificación supervisada, en poco más del 10% en promedio, excepto para la categoría de Afloramientos rocosos, que bajó de 86 a 69%, mismo que puede ser explicado por una mala posición de los puntos de referencia al momento de calcular sus coordenadas. El bosque de encino-bosque tropical caducifolio, presentó una precisión baja en relación a lo propuesto por Anderson (1976), sin embargo, su bajo porcentaje de precisión está dado por la confusión que existió con categorías que integran a esta misma: Bosque de encino y Bosque tropical caducifolio; ello proporciona un grado de confiabilidad cualitativo un poco más alto, ya que, después de todo, la confusión se encuentra entre elementos con las mismas características.

El bosque mixto presenta la misma dificultad que se observó desde el inicio del trabajo, ya que pese a haber aumentado su precisión en 5% en relación con los resultados de la segunda matriz, sigue mostrando dificultad para discriminarse de los encinares y pinares.

La coincidencia del 100% de los puntos de referencia de la categoría Agropecuario con la interpretación visual, es justificable considerando que visualmente es una unidad de fácil discriminación tanto en las imágenes ETM+ como en las fotografías aéreas, sobre todo si son digitales, y del mismo modo, se facilita la georreferencia de puntos muestra, dado que existen más puntos de referencia para su ubicación, tales como las parcelas o caminos diversos.

El alto porcentaje de fiabilidad, donde 6 de 10 categorías superan el 90%, permite deducir que la interpretación visual alejó el error de clasificar píxeles en una categoría a la que no pertenecen. Tal es el caso de las unidades de Bosque mixto, Matorral y Asentamientos humanos que, teniendo una fiabilidad del 100%, indican que los criterios utilizados para separarlos de otras unidades fueron correctos.

Como resultado final de este nuevo análisis, se obtuvo una precisión global del 90% utilizando técnicas de interpretación visual; dicha precisión indica que la distribución espacial, presentada en la cartografía de “Vegetación y Usos del Suelo del Corredor Biológico Chichinautzin”, es confiable.

CONCLUSIONES

El mapa final, "Vegetación y Usos del Suelo del Corredor Biológico Chichinautzin", obtenido a través de la combinación de técnicas digitales y visuales de interpretación de imágenes ETM+ del programa Landsat, es cuantitativamente confiable en un 90% de precisión al presentar la localización y distribución de las coberturas mencionadas. Cualitativamente, la confiabilidad fue dada por la coincidencia de las diferentes unidades clasificadas con la variabilidad cromática de la composición en color 543 de las imágenes de satélite.

La elaboración de una clasificación no supervisada y, en segundo término, una clasificación supervisada de las imágenes de satélite, fue de gran ayuda para establecer las bases de una interpretación visual de las coberturas vegetales y usos del suelo más adecuada a la realidad.

Los trabajos de campo, la adquisición de puntos muestra obtenidos mediante fotointerpretación y la información bibliográfica permitieron ampliar el marco de referencia espacial de localización y distribución de los elementos tratados.

Considerando que, durante el proceso, en una interpretación visual de imágenes de satélite se integran elementos y criterios de referencia inherentes a los conocimientos y habilidades de la persona que realiza el trabajo, es recomendable realizar una interpretación visual posterior a una clasificación digital, pues con ello se reduce el margen de error del producto deseado y en consecuencia aumenta su precisión y confiabilidad.

Las fotografías aéreas, especialmente las obtenidas en formato digital, utilizadas tanto para localizar áreas muestra como para adquirir un marco de referencia espacial y de coberturas más sólidas, fueron de gran apoyo al realizar un trabajo con las características del presente, pues permitieron observar detalles que difícilmente se podrían visualizar en las imágenes de satélite, incluso en campo. Este tipo de material permitió, también, localizar de forma más precisa los tipos de vegetación en la imagen de satélite y, del mismo modo, validar los resultados obtenidos.

El alto grado de alteración de los recursos naturales del corredor biológico, ha producido un área natural protegida demasiado fragmentada en cuanto a los elementos que aquí fueron analizados; así, los tipos de vegetación con sus diferentes densidades de cobertura, el constante crecimiento

de la frontera agropecuaria y de asentamientos humanos y, con ello el acelerado cambio del uso del suelo, son factores que dificultaron la clasificación de la vegetación y usos del suelo.

Entre los elementos que mayor dificultad ofrecieron para su discriminación, están los asentamientos humanos, las coberturas vegetales de bosque mixto y bosque de encino-bosque tropical caducifolio, mismos que requirieron mayor atención en su separación.

El Corredor Biológico Chichinautzin es un área natural en constante amenaza de pérdida de recursos forestales, relacionada con la categoría que mayor superficie relativa ocupa en la zona: la agropecuaria y que, a su vez, se relaciona con la utilización del recurso suelo y con la posible pérdida de captación de agua de los mantos freáticos que abastecen de agua a ciudades como Cuernavaca o Tepoztlán. Por lo anterior, es necesario poner más atención a esta región y destacar la importancia que tiene tanto a escala local con estatal.

FUENTES

Referencias y bibliografía consultada

Anderson, J.R.. (1976). **A land use and land cover classification system for use with remote sensor data**. Geological Survey Professional Paper 964. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Barrett, Eric C. and Curtis, Leonard F.. (1992). **Introduction to Environmental Remote Sensing**. Chapman & Hall, London.

Chuvieco, Emilio. (2000). **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Madrid.

Corbera E., Esteve. (1999). **Diagnostico de la producción agropecuaria y forestal. Huitzilac, estado de Morelos, México**. Tesis de licenciatura. Centro de Investigaciones Biológicas, UAEM-Centre d'Estudis Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona.

Deagostini R., Daniel. (1978). **Introducción a la fotogrametría**. Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá-Colombia.

Diario Oficial de la Federación. (27 de noviembre de 1936). **Decreto que crea el Parque Nacional "Lagunas de Zempoala", 30-09-1936**.

Diario Oficial de la Federación. (Fecha de publicación desconocida). **Decreto que declara Parque Nacional "El Tepozteco", los terrenos que rodean al pueblo de Tepoztlán, Morelos, 22-01-1937**.

Diario Oficial de la Federación. (Segunda publicación 5 de diciembre de 1988). **Decreto por el que se declara el área de protección de la Flora y Fauna silvestres, ubicada en los municipios de Huitzilac, Cuernavaca, Tepoztlán, Jiutepec, Tlalnepantla, Yautepec, Tlayacapan y Totolapan, Morelos**.

Diario Oficial de la Federación. (Fecha de publicación desconocida). **"Lagunas de Zempoala" Modificación de linderos, 19-05-1947**.

Fries, C. (1960). "Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central-meridional de México". **Boletín del Instituto de Geología**, núm. 60, México.

García, Enriqueta. (1988). **Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen**. Offset Larios, México.

González M., Francisco. (1996). **Algunos aspectos de la evolución de la vegetación en México**. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 58: 129-136, México.

González M., Francisco. (1997). **Tipos de vegetación de México**. México. Inédito.

Guerra Peña, Felipe. (1980). **Fotogeología**. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

- Gutiérrez P., Javier, M. Gould. (Fecha de publicación desconocida) **SIG: Sistemas de Información Geográfica**. Madrid.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2001). **Anuario estadístico del estado de Morelos**. México.
- International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences. (1997). **User's Guide: ILWIS 2.1 for windows**. The Netherlands.
- Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente**. Publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 28 de enero de 1988, con modificaciones publicadas en el Diario Oficial de la Federación de fecha 7 de enero del 2000. México.
- Lira, Jorge. (1995). Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes. **Cuadernos del Instituto de Geofísica**, núm. 9. UNAM, México.
- Lugo, H., J. (1984). "Geomorfología del sur de la Cuenca de México". **Seria Varia**, t. 1, núm. 8, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo H., J., M.A. Ortiz P., J.L. Palacio P., G. Bocco V. (1985). "Las zonas más activas en el Cinturón volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala)". **Geofísica Internacional**, 24 (1): 83-96.
- Márquez, A., S. P. Verma, F. Anguita, R. Oyarzun, J. L. Brandle. (1999). "Tectonics and volcanism at the front of the central Trans-Mexican volcanic belt". **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, 93 (1-2): 125-150.
- Martín del Pozzo, A.L. (1990). **Geoquímica y paleomagnetismo de la Sierra Chichinautzin**. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Matínez Rodríguez, A. Adriana. (2003). **Levantamiento de suelos a nivel general del Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos**. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Mooser, F. (1975). "Historia geológica de la cuenca de México". **Memoria. Obra del Sistema de Drenaje Profundo**, p. 9-30. Departamento del Distrito Federal, México.
- Ortiz Solorio, Carlos A., H. E. Cuanalo de la Cerda. (1978). **Metodología del levantamiento fisiográfico; un sistema de clasificación de tierras**. Colegio de Posgraduados Chapingo, México.
- Prado, J., G. Bisiacchi, J.L. Palacio, A. Peralta, R. Bermúdez, U. Martínez, J.M. Becerril, M. Rodríguez. (2001) "Sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de alta resolución". México. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 18° Biennial Workshop on Color Photography and Videography in Resource**. Assessment Massachusetts, Amherst Mass, EE.UU. Mayo 16-18.
- Romero García, R. (1998). **El Corredor Biológico Chichinautzin**. Tesis de licenciatura, Facultad de Derecho, UNAM, México.
- Rzedowski, J.. (1983). **Vegetación de México**. Limusa, México.

Scanvic, Jean-Yves. (1989). **Teledetección Aplicada**. Madrid.

Schenk, Toni. (1999). **Digital Photogrammetry, vol. I**. TerraScience, United States.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002a). **Informe de la situación del medio ambiente en México, 2002; compendio de estadísticas ambientales**. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Infoteca. (2002b). **Vegetación y uso del suelo –2000- Inventario Forestal, metadatos**. México.

Swinamer, Ralph Terrance. (1986). **The geomorphology, petrography, geochemistry, and petrogenesis of the volcanic rocks in the Sierra del Chichinautzin, México**. Tesis de maestría, Queen's University, Kingston, ON, Canadá.

The Forest Service Remote Sensing Steering. (1996). **Guidelines for the Use of Digital Imagery for Vegetation Mapping**. United States.

Trejo, I. y J. Hernández. (1996). "Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite". **Boletín del Instituto de Geografía**, núm. especial 5: 11-18, UNAM, México.

Universidad Autónoma Metropolitana-Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (1990). **Programa Integral de Manejo para el Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre y Acuática "Corredor Biológico Chichinautzin", estado de Morelos, México**.

Consulta en Internet

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2003). **Biodiversidad**. <<http://www.conabio.gob.mx>> México.

Felicísimo, Ángel M. (1990a). **El Modelo Digital de Elevaciones**. <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index.html>>

Felicísimo, Ángel M. (1990b). **Glosario de términos usados en el trabajo con sistemas de información geográfica**. <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index.html>>.

Felicísimo, Ángel M. (1999). **La utilización de los MDT en los estudios del medio físico**. <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index.html>>

Felicísimo, Ángel M. (1994). **Modelos Digitales del Terreno; introducción y aplicación en las ciencias ambientales**. <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index.html>>

Foote, Kenneth E., Lynch, M. (2000). **Geographic Information Systems as an Integrating Technology: Context, Concepts, and Definitions**. Department of Geography, University of Texas at Austin. <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro.html>> USA.

Gobierno del Estado de Morelos. (2001) **Nuestro patrimonio ecológico**. <<http://www.edomorelos.gob.mx>> México.

Instituto Nacional de Ecología. (2000). **Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas**. <<http://www.ine.gob.mx>> México.

National Aeronautics and Space Administration. (2002). **Landsat 7; Science Data Users Handbook**. <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html> USA.

Sausen, Tania Ma., J. Borges E., E. Miglioranza. (1997). Modulo I "Sistemas Sensores Ópticos, LANDSAT". **Programa EDUCA SeRe – Elaboración de material didáctico para la enseñanza de la percepción remota**. Cuatro módulos. <<http://www.ltid.inpe.br/selper/frame.html>>. SELPER–Capítulo Brasil, INPE I.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). **Biblioteca digital**. <<http://www.semarnat.gob.mx>>. México.

Cartografía

Gobierno del estado de Morelos, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, UAM. (1989). **Estado de Morelos, Área de Protección de Flora y Fauna, Corredor Biológico Chichinautzin**. Tema hipsografía, (escala 1:50,000), México.

Hernández Lozano, J. y J. Lugo. (1989). "Densidad de volcanes cuaternarios de la República Mexicana" (escala 1:8,000,000). **Atlas Nacional de México**, t.2, hoja IV.3.2. Instituto de Geografía, UNAM, México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1985). **Amecameca**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14B41, México.

INEGI. (1987). **Cuatla**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14B51, México.

INEGI. (1982). **Cuernavaca**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14A59, México.

INEGI. (1992.) **Milpa alta**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14A49, México.

INEGI. (1986). **Tenancingo**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14A58, México.

INEGI. (1974). **Tenango**. Tema topografía, (escala 1:50,000), clave E14A48, México.

Rodríguez T. R. y E. López R. (1977). **Carta geológica del estado de Morelos**. (escala 1:100,000) Instituto de Geología, UNAM, México.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA