

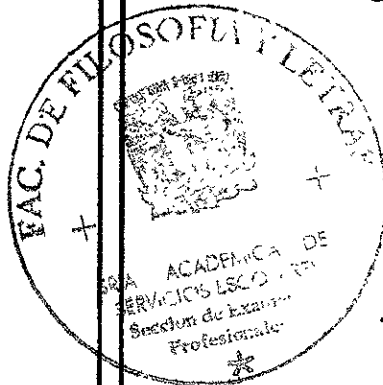


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

28

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

Evaluación del Cambio de uso del Suelo
en la Vertiente Oriental de la Cuenca
de México Utilizando Imágenes de
Percepción Remota



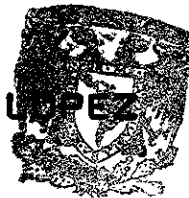
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LIC. EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A

CELIA LÓPEZ MIGUEL



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
DIRECCION DE TESTES
COLEGIO DE GEOGRAFIA

DR. JOSE LUIS PALACIO PRIETO

277573



CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DEL 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



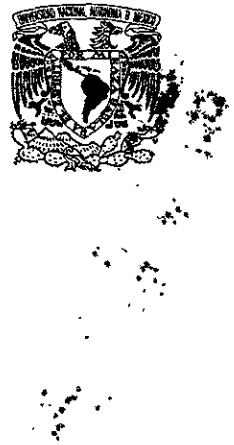
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA



Evaluación del cambio de uso del suelo en la Vertiente Oriental de la
Cuenca de México. Utilizando imágenes de Percepción Remota

CELIA LÓPEZ MIGUEL



DEDICATORIAS

A mis padres: Con todo mi amor y cariño

A ti madre Eva Miguel te doy las gracias por haberme dado la fuerza de seguir adelante aún cuando los tiempos se tornaban difíciles, por compartir mis alegrías y mis tristezas, por consentirme y cuidarme, por enseñarme el valor del trabajo, por enseñarme a no ser egoísta. Pero sobre todo quiero darte las gracias porque siempre estuviste a mi lado, ¡esta TESIS es tuya! A ti papá Felix López te dedico esta tesis como símbolo de agradeciendo a tus esfuerzos realizados y por haber tenido que separarte de nosotras para sacarnos adelante. A ambos deseo que Dios los conserve por muchísimo tiempo y juntos lograremos todas las metas trazadas.

A mis siete hermanas:

EVA (Evita). Gracias por enseñarme a luchar por ser cada día mejor y por tener siempre un consejo de hermana mayor. Gracias a Celida, Mary y Thaly.

FELISA (Fe) Gracias por haber sacrificado gran parte de tu juventud en el bienestar de la familia y sobre todo por haberme cuidado y protegido durante mi niñez; ¡gracias por consentirme y cumplirme todos mis caprichos!, de igual manera quiero agradecer a Francisco Sánchez Ayala por todo su apoyo.

LETICIA. (Lety) Gracias por enseñarme a ser paciente y sobre todo a respetar a los demás. También quiero darte las gracias por haberme apoyado en los momentos de decisión para aprender a "volar con mis propias alas" y por haberle dado vida a dos seres tan especiales (Julito y Adrianucha) los cuales le han dado alegrías a mi vida en los momentos de tristeza. Gracias a "Javis" por sus consejos y su apoyo.

CELIDA (Flaca) A ti te debo gran parte de mi desarrollo profesional pero sobre todo en mi vida personal ¡eres lo máximo!, gracias por preocuparte siempre por mi. Gracias a Jesús Ureña, Celidita y Jesusito.

Ana (Anita) Gracias por haberme hecho compañía en mis noches de miedo a la obscuridad y por haberme impulsado para seguir adelante en mis estudios. Porque juntas compartimos muchas aventuras en "Pepe Grillo" ¿Te acuerdas?

Lourdes (pelusa) Gracias por soportar mis regañones y sobre todo por haberle dado vida al niño más hermoso Diego (ratón) ¿Por qué te lo llevaste?

Gabina (gallina) Espero que esta tesis (al igual que muchas cosas más) te sirvan de aliciente para que dentro de muy poco tiempo tu hagas lo mismo. Gracias por compartir conmigo tantas noches de desvelo y soportar la luz de la lámpara alumbrándote la cara ¡Sorry! enana.



A ARTURO:

No tengo las palabras suficientes para agradecerte todo cuanto has hecho por mí. Gracias por compartirme tus gustos, "tiempo", aficiones, música, sueños...etc. Estoy segura que sin tu ayuda y sin tu apoyo no lo hubiera logrado. Gracias a ti soy ¡LIBRE!. ¡I'll always love you because You are my life!!.

AGRADECIENTOS

Agradezco infinitamente al **Dr. José Luis Palacio Prieto** por su apoyo en el desarrollo de esta tesis. Gracias por enseñarme a investigar, descubrir y analizar nuevos campos de la Geografía lo cual me ha llevado a ser, profesionalmente, cada vez mejor. Gracias por su amistad y su preocupación en la finalización de este trabajo ¡por fin acabamos!

Gracias al único Biólogo con corazón de Geógrafo y alma de Ingeniero Armando Peralta Higuera, por haber aceptado ser mi sinodal y sobre todo gracias por tu amistad y confianza. Eres una de las pocas personas que hace de las cosas ordinarias algo extraordinario lo cual va encaminado a favor del desarrollo de la ciencia y el conocimiento.

Gracias al Dr. Jorge López Blanco por aceptar ser mi sinodal, por todos sus comentarios y sugerencias para el mejoramiento de esta tesis. Gracias por escucharme y brindarme su apoyo en momentos "difíciles". Gracias a la Dra. Irma Trejo por ser mi sinodal, por tu atención prestada en la revisión de esta tesis y sobre todo gracias por todos tus valiosísimos consejos y comentarios, me ayudaste más de lo que te imaginas. Gracias a la Mtra. Laura Luna por haber sido mi sinodal y por sus comentarios.

Gracias a la Dra. Ma. Teresa Sánchez por su paciencia y preocupación durante el desarrollo de esta tesis. Gracias a la Mtra. Concepción Basilio Romero, al Lic. José Cabrera Reyes, a la Sra. Rosa Sibata Molina (Rosita) y a Susana por todas las facilidades otorgadas en la consulta de material bibliográfico y cartográfico de la Biblioteca del Instituto de Geografía. Gracias a Josefina Hernández Lozano y Amado Bernal Campos, del Laboratorio de SIG Y PR, por el apoyo brindado en la adquisición de las imágenes de satélite. Gracias a la Dra. Isabel Ramírez por los consejos y el prestamos de material bibliográfico. Gracias a Ana y Magda por su amistad y por todo el "apoyo" durante los tiempos difíciles.

Gracias al Ing. Fernando Mercado, al Mtro. Benjamín Sánchez, al Mtro. Julio Martínez y al Ing. Vicente Nieto por su confianza y espera depositada en el desarrollo de esta tesis. A través de ellos le doy las gracias a la Comisión Nacional del Agua de la Gerencia Regional del Lago de Texcoco por el apoyo financiero otorgado a la presente investigación.

Gracias a mi doctora Silvia Rojas Reséndiz por ser mi consejera, amiga y sobre todo por cuidar de mi salud física y mental.

Agradezco de manera muy especial a María del Carmen Avendaño por su desinteresada y gran amistad, gracias por enseñarme a amar y vivir la vida sin hipocresías, por su honestidad, por ser parte de su familia, por su franqueza, por su verdad, por su cariño y confianza, ¡ah! y por supuesto gracias por haberme regalado a mi siberian husky (Laika), cada día está más preciosa.

A ti Antonio (Lic. Navarrete) te doy las gracias por ayudarme en las cuestiones técnicas durante el desarrollo de esta tesis, por enseñarme el valor de la "exactitud" y sobre todo por ser mi amigo. A ti Guadalupe (Guadalupana) te agradezco el haber compartido un sin número de aventuras durante todo este tiempo que llevamos de conocernos (y lo que nos falta) y aunque no lo creas, ¡gracias por tu amistad!. Gracias a Oscar Jurado por su amistad y sinceridad.

Arturo + Celia + Guadalupe + Antoño = LOS CUATRO FANTÁSTICOS.



- I N D I C E -

Introducción

Antecedentes.....	1
Objetivos.....	5
0.1 Materiales y Métodos.....	6

CAPITULO 1. Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG)

1.0 Fundamentos de la Percepción Remota.....	21
1.0.1 Sensores Remotos.....	21
1.0.2 Firmas Espectrales.....	24
1.1 Resoluciones utilizadas en Percepción Remota.....	26
1.1.1 Resolución espacial.....	27
1.1.2 Resolución espectral.....	27
1.1.3 Resolución radiométrica.....	28
1.1.4 Resolución temporal.....	28
1.2 Principales Satélites utilizados ene el manejo de recursos naturales.....	29
1.2.1 Landsat.....	29
1.2.2 Spot.....	30
1.3 Productos obtenidos de la PR y sus aplicaciones.....	31
1.3.1 Percepción Remota Convencional.....	32
a) Fotografía Aérea.....	32
b) Imágenes de Satélite.....	32
1.3.1.1 Métodos de georreferenciación.....	34
1.3.1.2 Clasificaciones espectrales con imágenes de satélite.....	36
1.3.2 Percepción Remota Alternativa.....	38
1.3.2.1 Videoteledetección (Video digital).....	38
1.3.2.2 Fotografía Aérea Digital (FAD).....	40
1.4 Sistemas de Información Geográfica.....	43
1.4.1 Conceptos básicos sobre SIG.....	43
1.4.1.1 Componentes de un SIG.....	45
1.4.2 Creación de escenarios dentro del SIG.....	47
1.4.3 Calidad de la base de datos y fuentes de error.....	49
1.4.4 Areas de aplicación de los SIG.....	50

CAPITULO 2 Características Geográficas de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México

2.1	Localización.....	52
2.2	Geología y Fisiografía.....	53
2.3	Clima.....	54
2.4	Hidrología.....	55
2.5	Suelos.....	56
2.6	Vegetación.....	58
2.7	Uso del Suelo.....	58
2.7.1	Zonas agrícolas.....	58
2.7.1.1	Agricultura de riego.....	59
2.7.1.2	Agricultura de temporal.....	59
2.7.2	Zonas erosionadas.....	59
2.7.3	Zonas nopaleras.....	60
2.7.4	Zonas urbanas.....	60
2.8	Población.....	63

CAPITULO 3 Resultados y Conclusiones

3.0	Resultados.....	64
3.0.1	Componentes Principales.....	64
3.0.2	Exactitud de las clasificaciones espectrales.....	67
3.0.2.1	Matrices de error de las clasificaciones no supervisadas sin mejoramiento...67	
a)	Clasificaciones no supervisadas, 1973.....	67
b)	Clasificaciones no supervisadas, 1985.....	70
3.0.2.2	Matrices de error de las clasificaciones no supervisadas mejoradas.....73	
a)	Clasificaciones no supervisadas, mejoradas 1973.....	73
b)	Clasificaciones no supervisadas, mejoradas 1985.....	76
3.0.2.3	Matrices de error de las clasificaciones supervisadas sin mejoramiento.....79	
a)	Clasificaciones supervisadas, 1973.....	79
b)	Clasificaciones supervisadas, 1985.....	82
c)	Clasificación supervisada, 1994.....	85
3.0.2.4	Matrices de error de las clasificaciones supervisadas mejoradas.....87	
a)	Clasificaciones supervisadas mejoradas, 1973.....	87
b)	Clasificaciones supervisadas mejoradas, 1985.....	90
c)	Clasificación supervisada mejorada, 1994.....	93
3.0.2.5	Comparación de la exactitud entre las clasificaciones con mejoramiento y sin mejoramiento por medio del SIG.....99	
3.0.3	Usos del suelo multitemporales (1973, 1985 y 1994).....	100
a)	Uso del suelo, 1973.....	100
b)	Uso del suelo, 1985.....	101
c)	Uso del suelo, 1994.....	103
3.0.4	Cambios de uso del suelo 1973, 1985 y 1994.....	104
3.1	Conclusiones.....	111
	Bibliografía.....	116

ANTECEDENTES

El uso del suelo es la organización espacial de los recursos naturales y de las actividades económicas en un espacio específico (Campbell, 1996; Escalona, 1998).

En el caso concreto de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México (cuya extensión aproximada es de 170 000 has, y comprende las cuencas de 11 ríos en la parte oriente de dicha Cuenca) se trata de una zona fuertemente afectada por el crecimiento urbano, sobretudo el de la Ciudad de México (Cruickshank, 1995). Considerando los antecedentes históricos del área, se tiene que se trata de una zona conformada espacialmente por el establecimiento y desarrollo de una importante actividad agrícola desde la época prehispánica. Este hecho fue aprovechado por los españoles en el establecimiento de haciendas y encomiendas que tenían la función de abastecer al mayor centro poblacional, que en ese momento era, la Capital de la Nueva España. Después de la conquista española se crearon haciendas y las tierras del piedemonte texcocano se dedicaron al pastoreo de ganado menor, sustituyendo el uso del suelo agrícola de manera controlada a través del terraceo y el riego por terrenos de pastoreo incontrolados (Pérez, 1975). La principal actividad de las haciendas de Texcoco era la agricultura de cereales, así como la manutención de ganado lanar y la obtención de carbón del bosque. Con lo antes expuesto se observa que los usos del suelo no son estáticos y los cambios responden o se motivan básicamente por la demanda de nuevos espacios.

En los últimos años el conocimiento del uso del suelo ha despertado gran interés en varios países ya que el crecimiento horizontal incontrolado de las grandes ciudades, el “desarrollo”, cada vez mayor, de las áreas suburbanas y la instalación de complejos industriales en las zonas periurbanas, han generado cambios acelerados en el uso del suelo.

La formación de las áreas metropolitanas en América Latina, y particularmente en México, es un fenómeno de la segunda mitad del siglo XX. En México este proceso se inicia prácticamente en la década de los cuarenta, como resultado de la industrialización sustitutiva de importaciones. Se da comienzo a una etapa de urbanización acelerada que se caracterizó por su notable concentración en la Ciudad de México. Notablemente, desde esta época, la capital del país se ha constituido en el



núcleo principal de la economía nacional y su dinámica económica ha sido el principal determinante de su desarrollo demográfico y su expansión urbana (Aguilar, 1993).

Entre 1983 y 1988 se destaca la tendencia a reproducir la “formación de tipo metropolitano”. Es interesante observar la correlación entre una optimización de los indicadores industriales acompañados de un deterioro progresivo de las condiciones de producción agropecuaria al norte de la cuenca de México, con núcleos múltiples alrededor de Huehuetoca-Zumpango y en el oriente, en donde la cabecera municipal de Texcoco se perfila como una “ciudad intermedia” dentro del *hinterland* mismo del ámbito metropolitano de la ciudad (Delgado, 1991). El crecimiento urbano en la Ciudad de México se ha dado de las delegaciones centrales hacia la periferia y municipios conurbados del Estado de México, favoreciendo el proceso de metropolización.

Cuando se analiza la disponibilidad territorial existente en la cuenca de México y su potencial de utilización en áreas del desarrollo social y del bienestar general de la población, nos encontramos con que la zona metropolitana prácticamente no tiene territorio sobre el cual crecer. Esto puede deberse a que son escasísimos los terrenos con aptitud agrícola, de alta productividad porque en la cuenca de México no los hay; pero sí en términos relativos, con una cierta productividad que conviene y es necesario -a menos que queramos incurrir en algún tipo de “suicidio” ecológico-conservar para la utilización agropecuaria (Falcón, 1990).

Por otra parte, siendo México un país netamente agrícola, necesita cuantificar y planificar lo que la tierra produce y lo que deberá producir para satisfacer las necesidades crecientes de una población que se desarrolla con ritmo acelerado. Ante esta situación, el crecimiento de espacios para la agricultura y la gran dependencia de la utilización de los recursos naturales para el crecimiento económico han sido las causas principales de la deforestación y la degradación ambiental en términos generales.

Rojas (1992) realizó un estudio concerniente al diagnóstico y pronóstico en los cambios de uso del suelo en la región del centro de México. En dicho trabajos se hace énfasis en los cambios de uso del suelo agrícola durante los años 1970 a 1987, y tomando como base el hecho de que el uso y la explotación inadecuada de los diferentes ecosistemas ubicados en esta región, afectan directamente



al potencial agrícola de la zona, traduciéndose en un detrimento de los cambios naturales y la calidad de vida de sus habitantes, ya sea en el campo o en las ciudades de esta región.

Algunos procesos socioeconómicos antiguos y recientes planteados por lo general al margen de cualquier criterio de sustentabilidad, ocasionan un profundo deterioro del territorio nacional. La ganadería extensiva, la intensificación agrícola y la agricultura itinerante de subsistencia, el crecimiento urbano desorganizado y en general la aplicación de modelos tecnológicos inadecuados para la diversidad natural del país, explican en gran medida la transformación a gran escala de nuestros ecosistemas; dicha transformación se ha acelerado a partir de la segunda mitad del siglo XX, en el contexto de procesos agrarios específicos, proyectos regionales de desarrollo agropecuario, procesos de colonización formal e informal y de la rápida expansión demográfica (Instituto Nacional de Ecología; (INE) 1996). Por lo anterior, se puede afirmar que los costos ecológicos, económicos y sociales, derivados de la transformación del uso del suelo son bastante notables ya que se ven reflejados en el deterioro ambiental, la pérdida de hectáreas de suelo y la manifestación de procesos de erosión muy severos.

Acerca de los cambios de uso del suelo, se dice que son provocados por factores múltiples, lo cual genera diversas tendencias dependiendo de la dinámica particular de cada región (Valdéz, 1996). En este caso la Vertiente Oriental de la Cuenca de México es fuertemente afectada por el crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Las zonas en donde es más notorio el crecimiento son: Chimalhuacán, Chalco y Ciudad Nezahualcoyotl en el Estado de México. Como antecedente de lo antes expuesto se encuentra la carta "Cambio de uso del suelo en la Cuenca de México 1950-1990", editada por SIGSA (1997), la cual concluye sobre dos fenómenos diametralmente opuestos, pero complementarios:

- El crecimiento de la Ciudad de México, que ha aumentado un 315%; y
- La reducción de las zonas inundables o cuerpos de agua en un 90% de su superficie original.

En la carta se observa que la ciudad ha crecido de una manera importante hacia la porción oriente, donde los cambios se han dado sobre terrenos de cultivo y zonas de inundación del antiguo Lago de Texcoco, mientras que al poniente y sur de la Ciudad buena parte del crecimiento se ha dado sobre zonas antes cubiertas con vegetación.



Tomando en consideración la problemática en la zona de estudio, la evaluación del cambio de uso del suelo es particularmente importante pues es necesario tener un inventario y una estimación de este recurso de tal manera que se pueda contribuir con información cuantitativa y cualitativa para coadyuvar con los planes y trabajos de recuperación ambiental que hasta hoy, la Comisión Nacional del Agua, ha venido realizando durante más de 20 años (Cruickshank, 1995).

La cobertura del suelo es un término que engloba un amplio rango de aplicaciones. Por cobertura del suelo entendemos el tipo de ocupación existente sobre él, ya sea ésta vegetación natural, cultivos agrícolas o espacios urbanos. Este tipo de cartografía resulta básica en la planificación del territorio, ya que resulta preciso conocer la dedicación actual del terreno para proponer cualquier mejora (Chuvioco, 1990).

La presente investigación forma parte de un convenio entre UNAM-CNA (Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional del Agua), de manera más concreta, dicho convenio, se celebró entre la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, Gerencia Lago de Texcoco y el Instituto de Geografía (IGg). El objetivo central de este convenio fue la adquisición de imágenes de video y fotografía aérea digital para, entre otros, la evaluación de las tareas de conservación de suelo, agua y vegetación en la Cuenca Tributaria Oriental y la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco. Dentro de sus objetivos particulares se encuentra la elaboración de cartografía actual de uso del suelo y uno de los materiales a utilizar es el video y la fotografía aérea digital, como material alternativo de percepción remota, previo al reconocimiento de campo.

Una herramienta señalada como fundamental para mejorar y facilitar el trabajo asociado a la evaluación de recursos es la tecnología conocida como Percepción Remota* (Gilruth y Hutchinson 1990, Sader *et. al.* 1990, Myers 1993, Sader *et. al.* 1994, Skole y Tucker 1993). La PR es una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aeroespaciales (Verstappen, 1983).

Ante la falta de información geográfica, cartográfica y temática actualizada y las dificultades de obtención por los métodos tradicionales en zonas de gran importancia en lo referente a recursos naturales y medio ambiente, las imágenes de satélite se presentan como una herramienta

* Este término en adelante también será encontrado como PR.



alternativa muy importante para la obtención y actualización de la información básica, dada su amplia cobertura espacial, su carácter multiespectral y su temporalidad. En este sentido, la tecnología satelital puede contribuir de manera significativa en los estudios de carácter integrado de regiones geográficas específicas, como en este caso lo es, la Vertiente Oriental de la Cuenca de México y que, para poder implementar planes y programas de desarrollo es necesario contar con información oportuna, confiable y además actualizada. Es conveniente contar con un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita relacionar información tabular, o de atributo, a información espacial. Un SIG es una importante herramienta que nos ayuda durante la toma de decisiones tendientes al manejo y conservación de los recursos naturales.

Es indispensable el conocimiento básico sobre la localización, cantidad y disponibilidad de los recursos naturales para su planificación racional y el desarrollo sustentable. Sin embargo la carencia de un adecuado control institucional para valorizar y regular el acceso a los bosques, así como la ausencia de mecanismos adecuados de asociación entre propietarios e inversionistas ha contribuido al decaimiento de la actividad forestal (INE, 1996). Lo anterior se ha traducido en cambios sistemáticos de uso del suelo forestal a favor de la agricultura, la ganadería y el desarrollo urbano.

OBJETIVOS

General.

Identificar y evaluar los cambios de uso del suelo en el periodo 1973-1994, en la Vertiente Oriental de la Cuenca de México, a partir de un análisis multitemporal, por medio de técnicas de percepción remota convencional (fotografías aéreas pancromáticas e imágenes de satélite) y alternativa (video y fotografía aérea digital) en el contexto de un sistema de información geográfica.

Particulares

- ◆ Elaborar cartografía de uso del suelo para las tres fechas de análisis (1973,1985 y 1994) en escala 1: 100 000 a partir de imágenes de satélite.
- ◆ Estimar la exactitud, a través de matrices de error, de los mapas de uso del suelo obtenidos a partir de clasificaciones espectrales.
- ◆ Mejorar (incrementar la exactitud) las clasificaciones para obtener los mapas de uso del suelo, utilizando cartografía temática, productos alternativos de PR (videografía y fotografía aérea digital) y verificación de campo.
- ◆ Estimar y evaluar los cambios de uso del suelo basándose en las clasificaciones espectrales supervisadas.

De acuerdo a los objetivos arriba citados, el presente trabajo se divide en tres capítulos. El primero se enfocó básicamente a cuestiones teóricas y algunas aplicaciones de la PR y los SIG. El segundo capítulo está relacionado con los aspectos geográficos de la zona de estudio y finalmente en el capítulo tercero se presentan los resultados y las conclusiones.

0.1. MATERIALES Y METODOS

A continuación se describen los materiales y métodos que se utilizaron para el presente estudio:

0.1.1. Materiales

- ❖ Imágenes de satélite
- ❖ Fotografías aéreas pancromáticas convencionales
- ❖ Cartografía temática de la zona de estudio
- ❖ Video y fotografía digitales

Las imágenes de satélite fueron adquiridas del banco de imágenes del “Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota” (LSIGyPR) del Instituto de Geografía. El tipo de imágenes y sus características son las siguientes (ver Cuadro 0.1.1.1):

Cuadro 0.1.1.1. Características generales de las imágenes de satélite.

SATELITE/SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	ESCENA	FECHA (día/mes/año)	RESOLUCIÓN ESPACIAL
Landsat MSS	4 bandas	26/46	20/04/1973	60 metros
Landsat MSS		26/47	07/02/1973	(remuestreada)
Landsat MSS	4 bandas	26/46	30/10/1985	60 metros
Landsat MSS		26/47	31/01/1985	(remuestreada)
Spot XS	3 bandas		25/09/1994	20 metros

Las escenas 26/46 corresponden a la parte norte de la zona de estudio y las escenas 26/47 a la parte sur.

Las fotografías aéreas pancromáticas (propiedad de la CNA) cuentan con las siguientes características (ver Cuadro 0.1.1.2).

Cuadro 0.1.1.2. Características generales de las fotografías aéreas pancromáticas convencionales

FECHA	No. DE LÍNEAS	ESCALA	FUENTE
Octubre y Noviembre de 1970	13	1:30 000	S.R.H.
Enero, Febrero y Marzo de 1978	6	1:30 000	S.R.H.
Mayo de 1989	11	1:19 000	S.E.C.T.E.
Diciembre y Febrero de 1993	3	1:75 000	I.N.E.G.I.
Febrero de 1994	2	1:75 000	I.N.E.G.I.
Marzo de 1995	9	1:20 200	I.I.G.E.C.E.M.

¹ Imagen proporcionada por el Maestro Miguel Escalona Maurice.

La cartografía temática que se utilizó fue la siguiente: cartas de uso del suelo (ver características en el Cuadro 0.1.1.3) y un mapa geomorfológico del área bajo estudio (Tapia,1999).

Cuadro. 0.1.1.3. Datos generales de las cartas de uso del suelo.

NOMBRE	CLAVE	ESCALA	FUENTE
Tizayuca	E14-B11	1:50 000	SPP 1977
Texcoco	E14-B21	1:50 000	SPP 1973
Chalco	E14-B31	1:50 000	SPP 1970
Amecameca	E14-B41	1:50 000	SPP 1977
Apan	E14-B22	1:50 000	SPP 1977
Mariano Arista	E14-B32	1:50 000	SPP 1978
Cuautitlan	E14-A29	1:50 000	CETENAL 1983
Cd. de México	E14-A39	1:50 000	CETENAL 1977

El mapa geomorfológico, escala.1: 100 000, se obtuvo a partir de la fotointerpretación de 52 fotografías aéreas pancromáticas escala 1:75 000. Las principales unidades morfogenéticas cartografiadas fueron: laderas, lomeríos, piedemonte, planicies (aluvial, lacustre e intermontana) y superficies cumbrales (*idem*).

Dentro del convenio entre la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, a través de la Gerencia del Lago de Texcoco, y el Instituto de Geografía (titulado “Estudio Videográfico de las áreas degradadas en la Cuenca Oriental y la Zona Federal del Ex-lago de Texcoco, estado de México) se obtuvieron imágenes de video y fotografía aérea digital. El levantamiento videográfico se llevó a cabo con una cámara JVC 100X de f=4.5-45 mm. con un sensor CCD de 900 líneas por 800 renglones, resultando imágenes semi-verticales en color de 6 m de resolución. Este material fue una herramienta alternativa previa al trabajo de campo El levantamiento fotográfico se realizó con una cámara digital Nikon DCS-420 con un sensor CCD con resolución de 1524x1012 pixeles y una interfaz de conversión a formato digital Kodak; un lente supergran angular de 13.9 mm marca Nikon. Las imágenes obtenidas cuentan con una resolución espacial de 3 m en promedio y con una resolución espectral dentro del rango visible: 0.4-0.7 μm , en tres bandas espectrales (rojo, verde y azul) de 24 *bits* cada una (3 bandas de 8 *bits*). La fecha de obtención de los materiales antes mencionados es enero de 1997.



0.1.2. Métodos

El trabajo se realizó en ocho etapas principales: *delimitación del área de estudio, selección de las imágenes de satélite, procesamiento digital (previo a las clasificaciones espectrales) de las imágenes, clasificaciones espectrales, integración de la base cartográfica para el mejoramiento de las clasificaciones, trabajo de campo, sobreposición de mapas para obtener el mapa de cambios de uso del suelo y, establecimiento de los parámetros para la elaboración de matrices de error y de cambio.*

0.1.2.1 Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio se realizó sobre una base topográfica escala 1: 50 000 (en formato analógico), tomando en cuenta los parteaguas de las once subcuencas pertenecientes a la zona de estudio y para lo cual fue necesario delinear detalladamente la red hidrológica.

0.1.2.2 Selección de imágenes de satélite

De acuerdo con el objetivo general del presente estudio se seleccionaron imágenes multitemporales, es decir, imágenes de distintas fechas (1973, 1985 y 1994). También cabe aclarar que se trabajó con diferentes imágenes (Landsat y Spot) y sensores (MSS y xs) ya que sólo así se cumplía con el requisito de la temporalidad.

0.1.2.3 Procesamiento digital (previo a las clasificaciones espectrales) de las imágenes de satélite.

El procesamiento digital consistió en una serie de pasos los cuales permitieron el total manejo de la información de las imágenes dentro del SIG utilizado, en este caso ILWIS (*The Integrated Land and Water Information System*).

- a) Las imágenes fueron convertidas a un formato raster de intercambio (*.IMG) para que pudieran ser reconocidas por el SIG.
- b) La georreferenciación se realizó bajo el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) tomando en cuenta las coordenadas extremas, las cuales fueron adquiridas de los encabezados de las imágenes Landsat MSS y Spot xs (ver Cuadro 0.1.2.1).

IMAGEN	FECHA	FILAS	COLUMNAS	COORDENADAS EXTREMAS	
				X	Y
LANDSAT MSS 26/46	20/04/1973	882	999	Max=550170 Min=490190	Max=2198779 Min=2145850
LANDSAT MSS 26/47	07/02/1973	1120	1000	Max=550170 Min=490190	Max=2173926 Min=2106737
LANDSAT MSS 26/46	30/10/1985	882	999	Max=550170 Min=490190	Max=2198779 Min=2145850
LANDSAT MSS 26/47	31/01/1985	1120	1000	Max=550170 Min=490190	Max=2173926 Min=2106737
SPOT	25/09/1994	2407	1750	Max=535000 Min=500000	Max=2183150 Min=2135000

Fuente: LSIgYPR. Instituto de Geografía. UNAM.

- c) Se hizo un mejoramiento de las bandas aplicando un filtro de realce de bordes “*Edge enhancement*” el cual es una matriz de valores ordenados en 3 filas X 3 columnas, los valores de la imagen, de entrada, son multiplicados por 9; el resultado es asignado al *pixel* central del mapa y lo que hace este filtro es crear una “nueva” imagen partiendo de los datos de la imagen original y de esta manera incrementar los contrastes entre los valores de los *pixeles* (Reference Guide ILWIS 2.1, 1997).
- d) Se realizó un análisis de componentes principales con el fin de conocer qué bandas y en qué porcentaje contribuían mejor a la explicación de la varianza de la información digital.
- e) Se calculó el índice de vegetación, el propósito de este índice fue obtener un indicador de la vegetación que no fuera tan afectada por el suelo y el relieve. Existen varias fórmulas para realizar este índice, pero el más aceptado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*), la ecuación es la siguiente:

$$NDVI = \frac{IRC + R}{IRC - R}$$

Donde:

IRC = Infrarrojo Cercano

R = Rojo

0.1.2.4 Clasificaciones espectrales

Se realizaron dos tipos de clasificación espectral:

0.1.2.4.1. Clasificación no supervisada

El proceso de la clasificación no supervisada se realizó por medio de SIG Ilwis y básicamente constó de tres etapas; en la primera (a), se especificaron los parámetros a partir de los cuales se formaron los conglomerados de *pixeles (clusters)*, en la segunda etapa (b), se clasificó la totalidad de los *pixeles* de las imágenes y en la tercera etapa (c) fue la de asignación de las clases espectrales a clases de usos del suelo.

a) Especificación de los parámetros para la obtención de los *clusters*.

Los parámetros que se tomaron en cuenta, en la primera etapa, se describen a continuación:

- ◆ Se definió el número de bandas a considerar. Para el caso de las imágenes Landsat MSS, se trabajó con las cuatro bandas en crudo (bandas azul, verde, roja e infrarroja), es decir, sin ningún proceso de mejoramiento (filtrado). En el caso de la imagen Spot se trabajó con sus tres bandas (verde, roja e infrarroja cercana).
- ◆ Se estableció el número de *clusters* (este es un proceso mediante el cual los datos de la imagen son agrupados dentro de un mismo grupo de igual respuesta espectral;- Palacio, 1996); esto se hizo tomando en cuenta las propiedades espectrales de cada una de las bandas. Se hicieron varios ensayos para finalmente poder decidir el máximo número de *clusters*. El número de clases fue de por lo menos el doble de los tipos de usos del suelo esperadas, esto con el fin de incluir las variaciones espectrales debidas a cambios en las distintas condiciones de iluminación, humedad, topografía, etc.



- ♦ Se realizaron varias pruebas para encontrar la distancia mínima entre los datos (distancia de *Mahalanobis*) al momento de ser clasificados y finalmente se utilizó el valor de 10 como distancia estadística umbral de la clasificación. Otro parámetro que se le indicó fue el de cada cuántas filas y columnas se realizaría la clasificación; en este caso fue 1,1 (1 fila, 1 columna). Este dato es que se le conoce como *skip factor*.

b) Clasificación de los *clusters*

Dentro de la segunda etapa, una vez que se tuvieron los *clusters* necesarios, se ejecutó la clasificación con base en los valores establecidos y utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*). En este algoritmo se da por hecho que los valores de los *pixeles* en cada categoría, a semejanza del resto de la imagen, se distribuyen de forma normal. Esto permite que, dado que se cuenta con la matriz de varianza-covarianza, se pueda calcular la función de densidad de la distribución normal y así obtener una estimación de la probabilidad de pertenencia de un *pixel* a cada una de las clases. Los nombres de las clases en esta primera etapa de clasificación son asignados por el programa y, en este caso, se les llama: *cluster1*, *cluster2*, etc.

c) Asignación de las clases espectrales a clases de usos del suelo (etiquetado).

Con el mapa generado en la etapa anterior lo que se obtuvo fueron únicamente las clases identificadas por sus características espectrales y las cuales no brindaban una información significativa. Para que esta información fuera coherente y entendible se hizo lo siguiente:

Por medio de enunciados booleanos se agruparon los *clusters* que pertenecían al mismo uso del suelo dentro de una sola clase. Asimismo, se eliminó la información que se consideró no significativa y que por medio de un histograma se comprobó que no tenían un porcentaje representativo (menor al 5% por *cluster*) con respecto al resto de la información.

Para la asignación de las etiquetas se utilizaron tres criterios. El primero fue el de la utilización de material cartográfico temático, cartas de uso del suelo (editadas por el INEGI) y fotointerpretación de fotografías aéreas pancromáticas de varias fechas y escalas así como también de fotografías aéreas digitales de 1997, varias escalas. El segundo criterio consistió en la interpretación visual de

compuestos de falso color (432 para las imágenes Landsat MSS y 321 para la Spot) y el tercer criterio fue por reconocimiento de campo y video digital, se etiquetó por medio de interpretación visual. Aclarando que el video digital solo se utilizó para la clasificación de la imagen Spot (1994).

0.1.2.4.2. Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada cuenta básicamente de tres etapas:

- a) Se generaron compuestos de color, que para el caso de las imágenes MSS, se trabajaron con compuestos 432 y 321 y para la imagen Spot se trabajó con un compuesto 321. Sobre los compuestos de color se generaron los campos de entrenamiento.
- b) Se realizó una lista de bandas para comparar las firmas espectrales, esta lista de bandas fue importante en el momento de ir muestreando, ya que por medio de la información gráfica y tabular (desplegada en pantalla) de las bandas, de manera individual, se pudo observar comportamiento espectral de cada uno de los elementos muestreados (ver Figura 0.1.2.2).

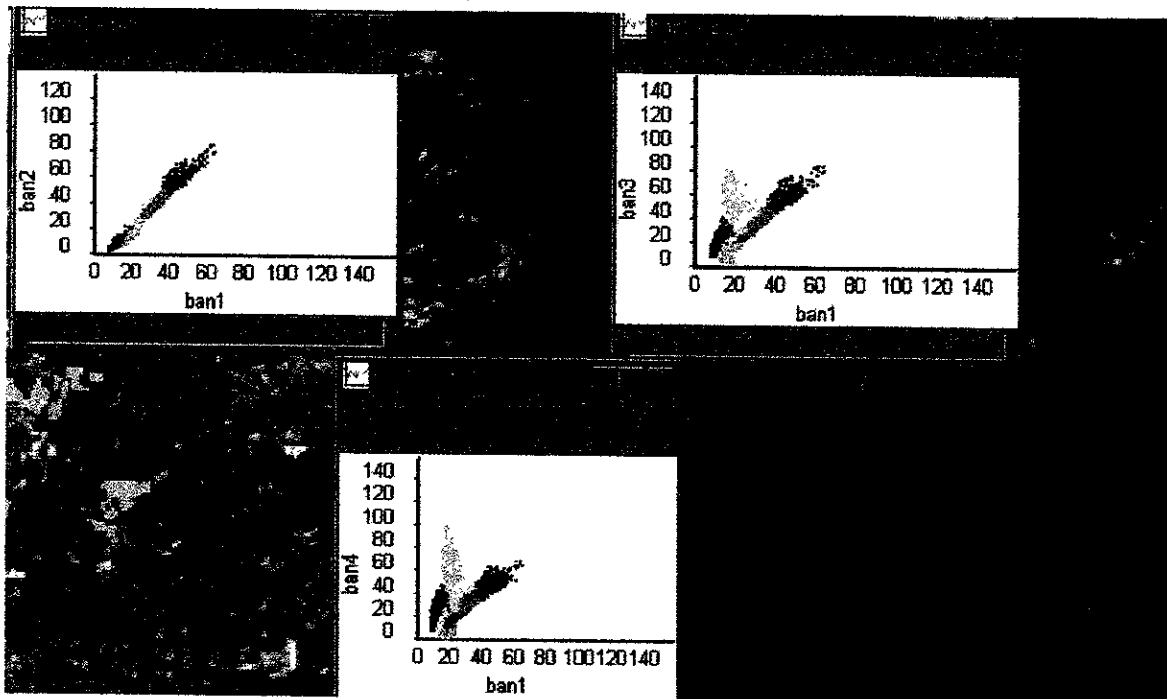


Figura 0.1.2.2. Al momento de definir los campos de entrenamiento se desplegaron las firmas espectrales en cada una de las bandas. En el ejemplo se observa un compuesto de color, los campos de entrenamiento y sus respectivos comportamientos espectrales.



c) Se llevó a cabo el etiquetado de las clases muestreadas

En esta etapa se establecieron las clases que se esperaban encontrar al momento de hacer los campos de entrenamiento, es decir, tomando como base la cartografía de uso del suelo, escala 1: 50 000, la fotointerpretación de las fotografías aéreas pancromáticas y la información de los compuestos de color, se especificaron algunos usos del suelo. Cabe aclarar que no se utilizaron las mismas clases para todas las clasificaciones ya que, de acuerdo con la resolución temporal de cada una de las escenas de las imágenes, no se observarían ni discriminarían los mismos elementos en época de lluvias que en épocas de secas.

Una vez que se tuvieron los campos de entrenamiento se “corrió” la clasificación con base en los campos de entrenamiento y el método de clasificación que se utilizó fue el de máxima verosimilitud para que de esta manera se asuma que los valores espectrales de los *pixeles* de entrenamiento fueran estadísticamente distribuidos de acuerdo a una función normal de probabilidad multivariada. La distancia de los valores espectrales de entrada también fue calculada usando la distancia de *Mahalanobis*.

0.1.2.5 Integración de información geográfica para el mejoramiento de las clasificaciones

Una vez que se tuvieron las clasificaciones (no supervisada y supervisada) lo que se hizo fue el mejoramiento de la información obtenida.

a) Mejoramiento de información espectral utilizando cartografía temática.

Utilizando las cartas temáticas, se reasignaron los *pixeles* erróneos (*pixeles* que espectralmente correspondían a la clase asignada pero no espacialmente) por medio de enunciados *booleanos*. En el caso de los “*pixeles* no clasificados” de las clasificaciones no supervisadas se reasignaron de acuerdo al uso correspondiente. Las unidades geomorfológicas, permitieron realizar mejoramientos más particulares en zonas en donde los *pixeles* clasificados no correspondían a su localización espacial. Este mapa se utilizó por la importancia de la asociación existente entre las unidades geomorfológicas, las unidades de suelo y vegetación y por ende, las unidades geomorfológicas sustentan usos de suelo y coberturas de terreno particulares; por ejemplo en



Para eliminar esta información, que en todos los casos “disparaba” los porcentajes de algún uso del suelo, se utilizaron enunciado booleanos y una de las bandas en crudo. Un ejemplo de estos es el siguiente:

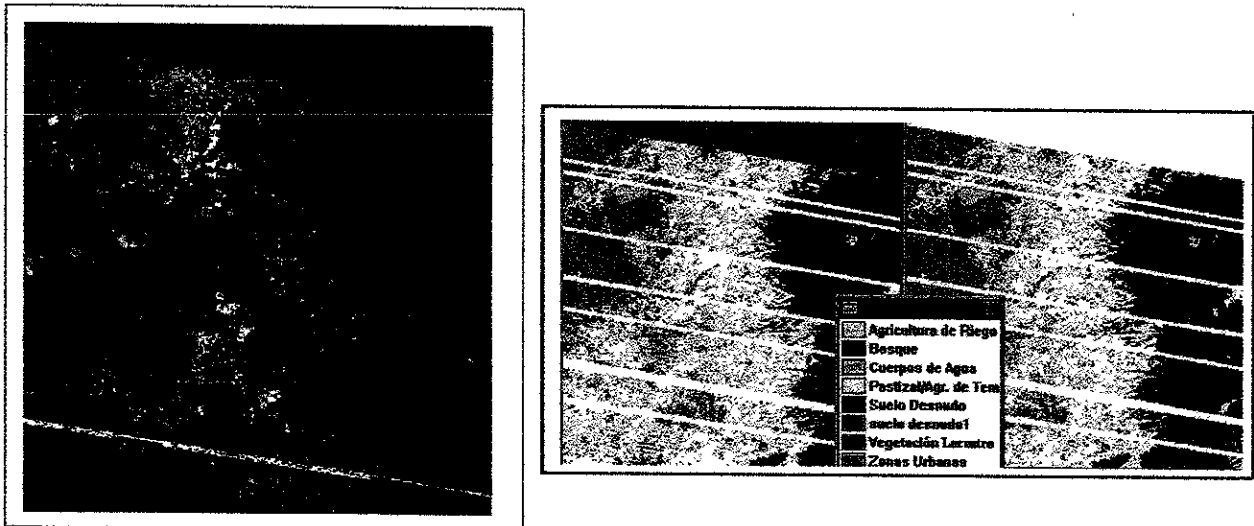
Mapa nuevo: = iff(ban4=0,?,nvaclas3)

Donde:

Ban4: Es el nombre de la banda 4 que, para en este caso, se utilizó para eliminar la información que originalmente valía cero y al momento de clasificar se le asignaba algún uso.

Nvaclas3: Es el nombre del mapa en donde se encuentra la clasificación a mejorar.

En el enunciado se le indica al SIG que en el nuevo mapa la parte negra (valor cero) la deje con un valor indefinido (sin ningún valor) y al resto le asigne la clasificación. El resultado se puede observar en la Figura. 0.1.2.5.



Banda 4 Landsat MSS

Clasificación supervisada de uso del suelo.

Figura. 0.1.2.5. La banda que se encuentra al lado izquierdo es la que se utilizó para eliminar la información con valor cero (zona negra). Los mapas que se encuentran a la derecha son para esquematizar el antes y después del mejoramiento. Como se observa en el primer mapa la zona negra estaba clasificada como suelo desnudo lo cual generaría problemas al momento de cuantificar áreas.

0.1.2.6 Trabajo de campo y fotointerpretación

Se realizaron cuatro salidas a campo (27 de junio, 9 de julio, 23 de julio y el 19 de octubre de 1998), a las subcuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino, así como también al Cerro el

Pino. En el trabajo de campo se verificaron y corroboraron usos del suelo en zonas de confusión espectral.

El material fotográfico obtenido se empleó en el mejoramiento (reasignación de píxeles a sus clases de uso del suelo correspondiente) de las clasificaciones espectrales. Se interpretaron diversas fechas, correspondientes a la temporalidad de cada clasificación. Por ejemplo, para las clasificaciones de 1994, se fotointerpretaron las fotos aéreas digitales de 1997. Dicho análisis se realizó tanto de manera analógica (con estereoscopio), como de manera visual (digital) en pantalla.

Con las salidas a campo, también, se verificó la información obtenida de la fotointerpretación.

0.1.2.7 Sobreposición de mapas para obtener mapas de cambio de uso del suelo

Los mapas de uso del suelo de 1973 y 1985 tenían una resolución espacial de 60 metros en tanto que el de 1994 tenía 20 metros. Para poder realizar la sobreposición de mapas el SIG exige dos parámetros básicos: mismas resoluciones y mismas áreas, ante tal situación los mapas se remuestrearon a una misma resolución (60 metros para las tres fechas) y se cortaron de acuerdo al cubrimiento que proporcionaba la imagen Spot ya que aunque no abarcaba toda la zona, si permitía obtener resultados comparables en las tres fechas a analizar.

Una vez que se tuvieron los mapas de uso del suelo de las tres fechas (1973, 1985 y 1994) se utilizaron enunciados *booleanos* para obtener de cada mapa los usos por separado y de esta manera sobreponerlos, obteniendo así mapas que mostraban las zonas de cambio de uso del suelo. En cuanto a la edición final del mapa de cambios, para 1973 se digitizaron (en pantalla) las zonas de cambios para que de esta manera se “sobrepusiera” al mapa de 1994.

0.1.2.8. Parámetros para la elaboración de matrices de error y de cambio.

Las matrices de error se elaboraron con el fin de evaluar la exactitud de la clasificación. Con respecto a las matrices de cambio, como su nombre lo indica, se realizaron para conocer los usos de suelo que tuvieron mayores cambios y a qué uso cambiaron.

0.1.2.8.1 Matriz de error

La matriz de error es una tabla en la cual, normalmente, los renglones corresponden a los datos obtenidos de la clasificación y las columnas corresponden a los datos de referencia o verdad de campo. En este caso los datos de referencia se obtuvieron de la cartografía existente, de la fotointerpretación y del trabajo de campo.

➤ Obtención de los datos de referencia.

- ◆ En el mapa de uso del suelo digitizado, dentro del SIG, se trazó una malla a cada dos kilómetros tanto en el eje de las “X” como en el eje de las “Y” para de esta manera obtener los usos en las intersecciones. Estos datos se almacenaron en una hoja de cálculo *Excel* (ver Tabla 0.1.2.8.1.1).

Tabla 0.1.2.8.1.1 Ejemplo de los datos obtenidos de la malla trazada en la carta de uso del suelo, hoja Texcoco.

TEXCOCO E14B21			
Carta de Uso del Suelo y Vegetación Esc. 1: 50 000			
No.	X	Y	Uso del Suelo
1	502 000	2 158 000	Dv= Areas sin Vegetación Aparente
2	504 000		Ph= Pastizal Halófilo
3	506 000		RAS= Agricultura de riego cultivos anuales semipermanentes
4	508 000		RAS= Agricultura de riego cultivos anuales semipermanentes
5	510 000		RAS= Agricultura de riego cultivos anuales semipermanentes
6	512 000		RAS= Agricultura de riego cultivos anuales semipermanentes

➤ Obtención de los datos de la clasificación.

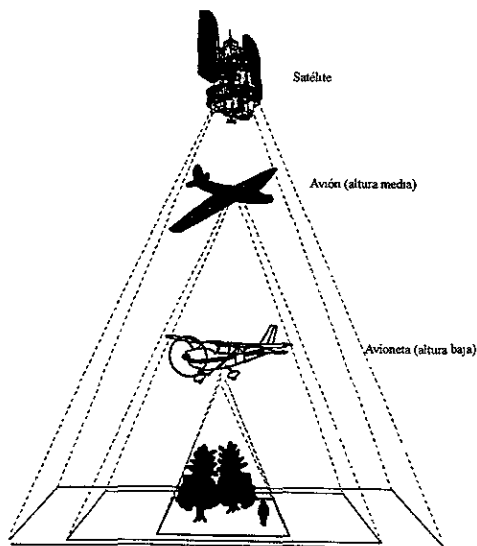
Se generó un archivo de puntos con coordenadas “X y “Y” (ver Tabla 0.1.2.8.1.2) el cual se importó en Ilwis para obtener un mapa de puntos. El mapa de puntos se cruzó con las clasificaciones, obteniendo así un mapa en donde cada punto indicaba el uso exacto según la clasificación espectral. El arreglo de la información obtenida se estructuró en tablas (ver Tabla 0.1.2.8.1.3) para que de esta manera se identificara rápidamente el uso del suelo y en que coordenadas se localizaba.

1.0. Fundamentos de la percepción remota

La **percepción remota** es un conjunto de herramientas y técnicas que permiten la obtención de información de objetos sin necesidad de establecer contacto físico con ellos (Sabins, 1987; Aronoff, 1989). Para Lillesand y Kiefer (1994) la PR es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, un área o un fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos a cierta distancia sin tener contacto con el objeto, el área o fenómeno bajo estudio. En ambas definiciones se comparte la idea de obtener información desde alguna plataforma, es decir, sin tener contacto con los elementos de la superficie terrestre.

1.0.1 Sensores remotos

Un sensor remoto es, en términos generales, un instrumento para la colección e interpretación de información con relación a un objeto desde un punto de vista remoto. La plataforma puede estar en cualquier lugar justo por encima de la superficie del objeto a cientos de miles de metros de distancia (Robinson, *et al*; 1987, Verbyla, 1995) ver Figura 1.0.1.1.



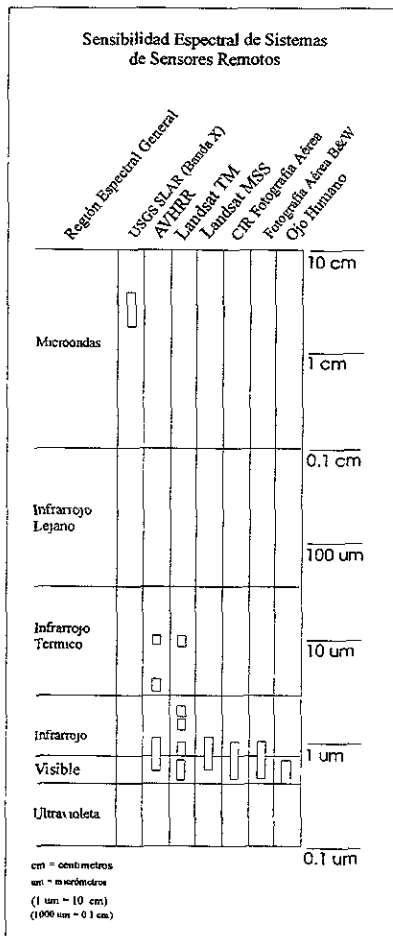
Fuente: United States Department of Agriculture, 1995.

Figura. 1.0.1.1 Dependiendo de la calidad del sensor y su altitud se obtendrán imágenes a diferentes escalas y resoluciones.



Cabe destacar que la adquisición de los datos en PR se subscribe no sólo a los sensores sino también a las plataformas en que estos se encuentran, por ejemplo: globos, helicópteros, aviones, cohetes sonda, y vehículos espaciales o satélites, estos últimos con avances constantes en cuanto a las resoluciones de las imágenes y algunos otros con capacidad estereoscópica.

En cuanto a la cuestión económica, los costos de los productos obtenidos por medio de la PR tienden a ser cada vez más razonables tomando en cuenta la gran cantidad de información que se puede obtener de éstas. En la actualidad el precio por kilómetro cuadrado de una imagen multiespectral, del Landsat por ejemplo, resulta inferior al de la fotografía aérea convencional (López, 1995). La información que es captada por los sensores pertenece a una parte o a todo el espectro electromagnético (ver Figura 1.0.1.2).



Fuente: U.S. Department of the Interior, 1995.

Figura. 1.0.1.2. Aunque el ojo humano, es también considerado como un sensor, no tiene la capacidad de captar toda la energía que proporciona el espectro electromagnético; en este dibujo se ejemplifican las sensibilidades espectrales de los sensores más conocidos.



Según Chuvieco (1990) las bandas espectrales que más frecuentemente se utilizan en la PR son las siguientes:

- *Espectro Visible:* (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales que se denominan:

Banda Azul: (0.4 - 0.5 μm)

Banda Verde: (0.5 - 0.6 μm)

Banda Roja: (0.6 - 0.7 μm)

- *Infrarrojo cercano:* (0.7 a 1.3 μm). Se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de películas dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- *Infrarrojo medio:* (1.3 a 8 μm). En donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- *Infrarrojo térmico:* (3 a 14 μm). Después de los 3 μm la radiación infrarroja emitida por la superficie se capta en forma de calor, por lo que la cantidad y longitud de onda de la radiación depende de la temperatura de la fuente. La mayor parte de esa radiación es absorbida por la atmósfera, pero existe un espacio de transmisión entre los 8 y 14 μm , que es en donde los sensores de los satélites pueden captar esa emisión.
- *Microondas:* (a partir de 1 mm.). Es un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

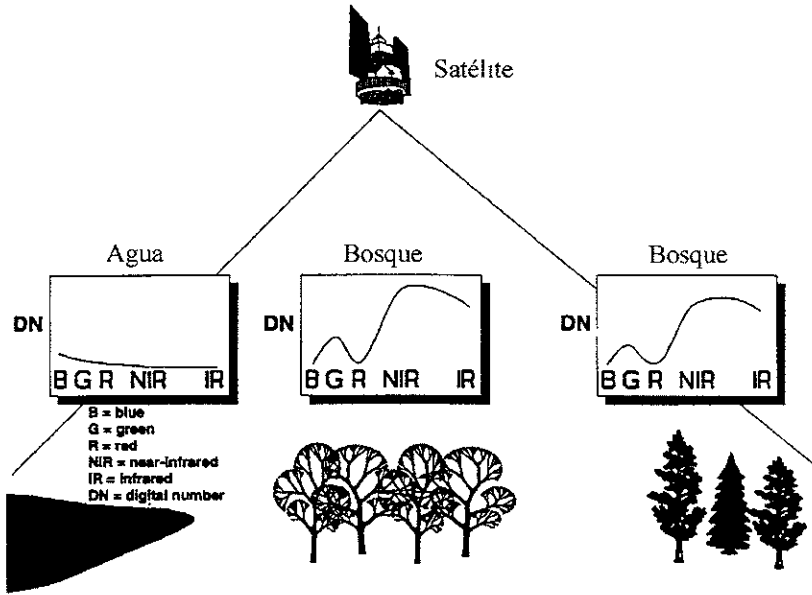


- **Radar:** La región de las microondas comienza en las longitudes de onda milimétricas, en donde la atmósfera no hace ya ninguna interferencia. Los sensores que reciben este tipo de radiación, mejor conocidos como radares, se dividen en activos y pasivos. Los primeros son los que emiten su propio flujo de energía para después recibir la reflexión del mismo que hagan las diferentes cubiertas de la superficie. Y los pasivos, que se limitan a recoger la energía procedente, para lo cual la mayoría de las cubiertas de la superficie tienen muy poca emitancia a esas longitudes de onda (aunque se utilizan para cartografiar capas de hielo y nieve; Chuvieco, 1990).

1.0.2. Firmas Espectrales

La cantidad de energía disponible no es la misma en todas las longitudes de onda. Debido a la absorción selectiva de energía electromagnética por las sustancias existentes en la atmósfera, como el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono, ciertas longitudes de ondas específicas quedan interferidas de modo más efectivo que otras (Robinson *et al*, 1987). Este bloqueo selectivo afecta a los niveles de energía electromagnética que pueden registrarse en la superficie de la Tierra. Otros cambios se producen cuando la energía es reflejada o emitida otra vez desde la Tierra a través de la atmósfera hasta un sistema de Percepción Remota.

A continuación se explica el comportamiento espectral teórico para el caso de los tres elementos naturales del paisaje: **suelo, vegetación y agua**. Cada objeto en la superficie de la Tierra refleja longitudes de onda específicas denominadas **firmas espectrales** las cuales son captadas por los sensores que se encuentran en los satélites (ver Figura. 1.0.2.1).



Fuente: United States Department of Agriculture, 1995.

Figura. 1.0.2.1 Curvas de reflectancia espectral de coberturas vegetales y cuerpos de agua.

Vegetación.

Una de las tareas más interesantes en la Percepción Remota es, sin duda, la caracterización espectral de la cobertura vegetal, sin embargo, existen factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. Cuando se analizan las respuestas espectrales de las coberturas vegetales se tienen que tomar aspectos morfológicos de la planta, tales como: altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., asimismo también la situación geográfica (pendiente, orientación, asociación con otras especies y geometría de la vegetación; Chuvieco, 1990). El comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro. En el caso del IRC presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el IRM. La elevada reflectividad en el IRC parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. La importancia de esta banda radica en que resulta idónea para hacer discriminaciones entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.



Suelo.

El comportamiento espectral de los suelos desnudos es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral bastante plana y de carácter ascendente (Chuvienco, 1990). Los factores que se tienen que tomar en cuenta son, entre otros, la composición química del suelo, textura, estructura y contenido de humedad.

La composición química es la causa del color dominante con el que percibimos el suelo. Los de origen calcáreo tienden al color blanco, indicando una alta reflectividad en todas las bandas visible. Por su parte, los suelos arcillosos ofrecen una mayor reflectividad en el rojo, como consecuencia de su alto contenido en óxido de hierro. Un suelo de textura gruesa puede presentar una reflectividad menor que los finos cuando el contenido de humedad es bajo (Mulders, 1987, *op cit*; Chuvienco, 1990).

Agua.

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su mayor cantidad de energía absorbida cuanto mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde ya es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera *tierra - agua* es muy nítida en esta banda. La variabilidad del agua es mejor detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde; Chuvienco, 1990).

De lo anterior se puede afirmar lo siguiente: las longitudes de onda verde y azul son recomendadas para hacer estudios (en aguas claras) de batimetría y mapeo de fitoplancton. Las bandas verde y roja son las mejores para detectar sedimentos inorgánicos.

1.1. Resoluciones utilizadas en percepción remota

La resolución de un sensor es la habilidad para registrar y discriminar la información a detalle, es decir, la resolución depende del efecto combinado de sus distintos componentes (Chuvienco, 1990).



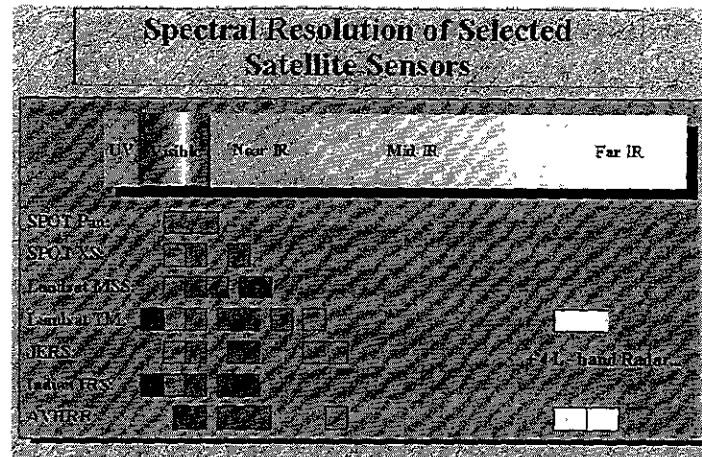
El concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones: **Espacial, Espectral, Radiométrica y Temporal.**

1.1.1 Resolución Espacial.

Este concepto se utiliza para designar el objeto más pequeño que puede ser registrado por el sensor. En una imagen de satélite corresponde al tamaño del pixel (*picture element*) el cual es considerado como el objeto mínimo dentro de la imagen (United States Department of Agriculture, 1995). La resolución espacial de un sensor óptico-electrónico depende de varios factores, tales como la altura de la órbita, velocidad de exploración y número de detectores (Chuvienco, 1990). La resolución espacial está muy relacionada con la escala de trabajo ya que mientras menor sea el

1.1.2 Resolución Espectral

Indica el número y el ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor (ver Figura. 1.1.1.1). Conviene que estas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (Chuvienco, 1990; United States Department of Agriculture, 1995) Entre los sensores remotos, la menor resolución espectral corresponde al radar y a los sistemas fotográficos. El primero trabaja en un solo canal, en tanto que la fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo b/n, color natural o infrarrojo color. Los sensores óptico electrónicos ofrecen un amplio rango de bandas.



Fuente: United States Department of Agriculture, 1995.

Figura. 1.1.1.1 Resolución espectral de los sensores más usados en la evaluación de recursos naturales.

1.1.3. Resolución Radiométrica

Es la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido en la película. Para los sistemas óptico-electrónicos la imagen generalmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite (Verbyla, 1995; Chuvieco, 1990; Lillesand, 1979). Las imágenes Landsat TM tiene una resolución radiométrica de 256 y las Landsat MSS tienen resolución radiométrica de 128, por lo anterior se afirma que las TM pueden identificar 256 diferentes niveles de reflectancia en cada banda, mientras que la MSS discrimina 128 niveles.

1.1.4 Resolución Temporal

Este concepto se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura (United States Department of Agriculture, 1995).

La resolución temporal depende del tipo de sensor; por ejemplo los satélites meteorológicos tienen que proporcionar información en periodos muy cortos. De ahí que la red de satélites



geoestacionarios (tipo Meteosat) proporcione una imagen cada 30 minutos, por el contrario, los

1.2. Principales satélites utilizados en el manejo de recursos naturales.

Los siguientes sensores satelitales son, los más usados, para mapeo de vegetación y características de la cobertura del suelo

- *Landsat Multispectral Scanner (MSS)*
- *Landsat Thematic Mapper (TM)*
- *Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT)*
 - Multispectral (SPOT xs)*
 - Pancromático (SPOT pan)*

1.2.1. Landsat

Hoy en día muchos países planean mediante sistemas de sensores remotos específicamente diseñados para la observación de los recursos naturales incluyendo bosques, cuerpos de agua, uso del suelo y minerales.

Landsat utiliza dos sistemas de sensores: *Landsat Multispectral Scanner (MSS)* y *Landsat Thematic Mapper (TM)*. Los datos de Landsat MSS están disponibles desde 1972 en una órbita cíclica de cada 16 o 18 días. Los datos de Landsat TM están disponibles desde 1982 en una órbita cíclica de cada 16 días. El primer satélite en operación de la serie Landsat fue el Landsat-1 en 1972. El Landsat-5 está en operación y funciona tanto para MSS como para TM. (Verbyla, 1995). En diciembre de 1998 se puso en órbita el satélite Landsat – 7, sus sensores son Multispectral (6 canales con resolución de 30 metros y 1 de 60 metros) y Pancromático con una resolución de 15 metros (Navarrete, 1998).



La información proporcionada por Landsat MSS tiene menor resolución espacial con relación a Landsat TM; sin embargo, MSS tiene dos ventajas sobre TM, estas ventajas son:

1. El aspecto histórico (desde 1972) por lo que es muy utilizada en estudios de detección de cambios, tales como cambio de uso del suelo u ocurrencia de incendios.
2. Son mucho más baratas y requieren menos espacio para su almacenamiento digital.

En el Cuadro 1.2.1.1 se muestran las características de Landsat (MSS y TM) donde se observa que a pesar de ser de la misma serie, tienen diferencias en sus resoluciones.

Cuadro 1.2.1.1 Diferentes resoluciones de Landsat (MSS y TM).

Características	Landsat MSS	Landsat TM
Resolución Espacial	82 metros	30 metros
Resolución Espectral	4 bandas. 2 en el visible (verde y roja) y dos en el Infrarrojo cercano (IRC)	7 bandas. 3 en el visible y 3 en el rango del infrarrojo. La banda 6 es la banda del infrarrojo térmico con una resolución espacial de 120 metros.
Resolución Temporal	16 días	16 días
Cobertura	185 Km.	185 Km.

1.2.2. SPOT

El satélite Spot tiene dos sensores de alta resolución en el visible (*HVR "High visible resolution"*) Los sensores *HVR* pueden operar en dos modos: Pancromático y multiespectral. Una fotografía pancromática es en "blanco y negro" generalmente producida por una película la cual es sensible en el rango de las longitudes de onda en el visible del espectro. La información pancromática, con 10 metros de resolución, tiene alta resolución espacial pero baja resolución espectral. La información multiespectral proviene de tres bandas (verde, roja e infrarrojo cercano; Verbyla, 1995). Estas imágenes tienen relativamente alta resolución espacial, 20 metros por pixel. En el Cuadro 1.2.1.2 se presentan las principales características de los sensores Spot. Según Chuvieco (1990) la resolución radiométrica por pixel se cifra en 8 bits en multiespectral y 6 en pancromático.



Otra característica importante del sensor Spot es su capacidad para variar el ángulo de observación, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico. Esto le permite observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes (de 26 días a 2 o 3 días según las latitudes). Esa misma aptitud permiten al Spot adquirir imágenes estereoscópicas, lo que añade a su potencial temático una clara capacidad topográfica.

Cuadro 1.2.1.2 Resoluciones del satélite Spot en sus dos modalidades (multiespectral y pancromático).

	SPOT MULTIESPECTRAL (SPOT xs)	SPOT PANCRÓMATICO (SPOT pan)
Resolución Espacial	20 metros	10
Resolución Espectral	Tres bandas, verde, roja e IRC	Sus rangos van del visible al IRC y el resultado es una imagen pancromática (blanco y negro)
Resolución Temporal	De 1 a 26 días, dependiendo de la latitud de la zona de estudio	De 1 a 26 días, dependiendo de la latitud de la zona de estudio
Cubrimiento	60 Km.	60 Km.

Fuente: United States Department of Agriculture. 1995.

1.3 Productos obtenidos de la percepción remota y sus aplicaciones.

Entre los diferentes productos derivados de los Sensores Remotos utilizados comúnmente en la evaluación de los recursos naturales y culturales se encuentra, en primer lugar, la fotografía aérea, ampliamente difundida y utilizada desde hace más de un siglo, y en segundo, las imágenes de satélite.

Teniendo como base los conceptos y fundamentos básicos de la PR, en este apartado se hace una descripción de los productos obtenidos tanto de la PR convencional como de la PR alternativa, esta última debida básicamente a los avances, acelerados, de la tecnología satelital.



1.3.1 Percepción Remota Convencional (PRC)

a) Fotografía aérea

Las cámaras fotográficas aún siguen siendo el medio más utilizado de percepción remota, especialmente desde plataformas aéreas. Basan su funcionamiento en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. Dentro de esta configuración básica, pueden establecerse numerosas variantes (Chuvienco, 1990).

El tipo de película más empleado en fotografía aérea es el film pancromático (B/N), en el cual se recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión. En la película en color, se mezclan distintas capas foto-químicas, cada una de las cuales es sensible a una banda del espectro visible por lo que la discriminación de los objetos resulta más acertada. (Chuvienco, 1990).

Las películas fotográficas pueden registrar el doble del rango espectral que el ojo humano. Dependiendo del tipo de cámara, película y parámetros del vuelo se puede llegar a registrar detalles que a simple vista el ojo humano no podría discriminar. (Lillesand y Kiefer, 1979).

En el caso de estudios sobre uso del suelo, además de la cartografía temática en formato analógico o digital, las fotografías aéreas pancromáticas son una primera fuente de información acerca de la cobertura y uso del suelo. Esta información es proporcionada desde una perspectiva similar a la de un satélite tomando en cuenta la diferencia de resoluciones (temporal, espacial y espectral) y sobre todo las escalas. Una característica importante de las fotografías aéreas es su calidad estereoscópica y por su gran detalle tienen una gran utilidad de fotointerpretación.

b) Imágenes de satélite

Una imagen de satélite consiste de una malla de números y cada celda de la malla es llamada un *pixel* (*picture element*). Los valores dentro de cada pixel representan cantidades tales como elevación, grado de pendiente, o valores espectrales (Verbyla, 1996).



En los siguientes cuadros se resumen algunas de las principales aplicaciones de los diferentes tipos de imágenes

Landsat Thematic Mapper (TM). Resolución espacial de 30 metros.

Banda	Longitud de Onda	Aplicaciones
1	0.45 - 0.52	Mapeo de zonas costeras, útil para mapeo de batimetría de aguas poco profundas, diferenciación de suelo/vegetación e identificación de cultivos
2	0.52 - 0.60	Reflectancia verde para detectar vegetación saludable, evaluación del vigor e identificación de características de cultivos. Importante para discriminación de tipos de vegetación
3	0.63 - 0.69	Identificación de plantas con diferente absorción de clorofila
4	0.76 - 0.90	Examinación de biomasa, delimitación de agua, tipos de vegetación, vigor y humedad del suelo
5	1.55 - 1.75	Medición de la humedad de la vegetación, diferenciación entre nieve y nubes y medición de la humedad del suelo.
6	10.4 - 12.5	Análisis de <i>stress</i> de vegetación, discriminación de suelos húmedos y mapeo con aplicaciones termales
7	2.08 - 2.35	Mapeo hidrotermal, mineral y tipos de rocas. Contenido de humedad en la vegetación

Fuente: United States Department of Agriculture. 1995.

Satellite Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT).

Resolución 20 metros.

Banda Multiespectral	Longitud de Onda	Aplicaciones
1	0.50 - 0.59	Banda Verde: Discriminación de vegetación y evaluación del vigor de la misma
2	0.61 - 0.68	Banda Roja: Identificación de regiones de absorción de clorofila en especies e identificación de cultivos
3	0.79 - 0.89	Infrarrojo cercano: tipos de vegetación, vigor y contenido de biomasa, delimitación de cuerpos de agua y humedad en los suelos.

Resolución 10 metros.

Banda Pancromática	Longitud de Onda	Aplicaciones
1	0.51 - 0.73	Actualización de características en mapas, ortofotomapas. Mapas de monitoreo y detección de cambios, actualización de cobertura de suelo e inventarios forestales

Fuente: United States Department of Agriculture. 1995.



Las desventajas relativas de las imágenes de satélite son las siguientes:

- Resolución temporal: La obtención de las imágenes está en función de la periodicidad de los satélites por lo que si se tratara de realizar estudios en tiempo real del fenómeno resulta claro que las imágenes de satélite no son funcionales; además también hay que tomar en cuenta no solo el tiempo de obtención de las imágenes sino también todo el proceso digital que se tiene que hacer a la imagen para ser utilizada.
- Resolución espacial: Si se requiere de un estudio a gran detalle las imágenes de satélite resultan inadecuadas ya que solo se obtendría un estudio general de la zona de estudio tomando en cuenta las resoluciones que maneja.
- Y tal vez la desventaja más importante, sobre todo para países como México, es el costo ya que según López (1995) los productos satelitarios digitales tradicionales fluctúan entre los 3300 y 4400 USD por escena, en cambio la fotografía multispectral satelital digitizada está entre los 1900 y 2400 USD

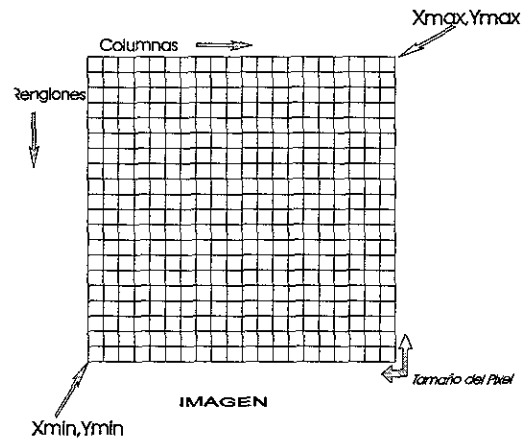
1.3.1.1 Métodos de georreferenciación

Para el manejo de las imágenes de satélite dentro del SIG es necesario que éstas estén georreferenciadas a un sistema específico de coordenadas.

Los métodos de georreferenciación se utilizan con el fin de establecer la relación entre filas, columnas y un sistema de coordenadas; así como también establecer una relación entre el SIG y la imagen de satélite.

a) Georreferenciación utilizando coordenadas extremas

Cuando se tienen las coordenadas X y Y de las esquinas de la imagen raster (coordenadas extremas) y el tamaño del pixel, es posible establecer la relación entre el número de columnas, renglones y las coordenadas (ver Figura. 1.3.1.1). El arreglo original de los pixeles permanece intacto y no es remuestreado.



Fuente: User's Guide ILWIS 2.1 for Windows

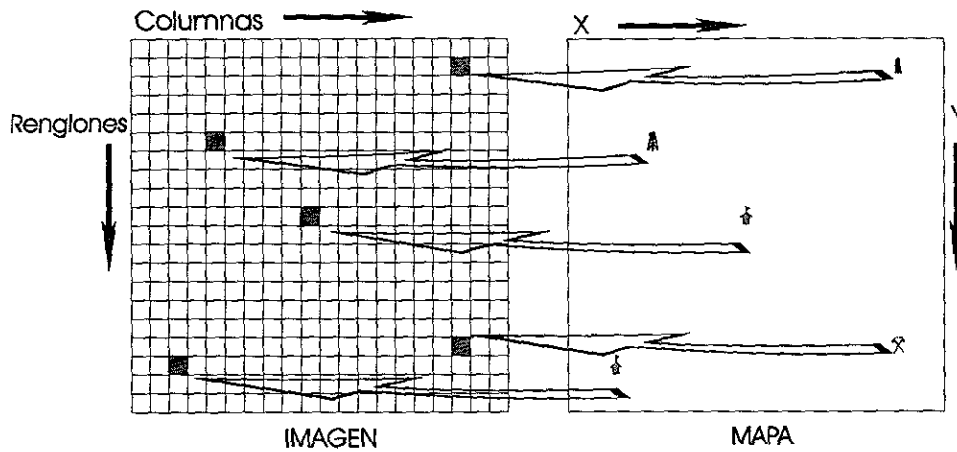
Figura: 1.3.1.1 Esquema de los parámetros que se toman en cuenta para la georreferenciación de coordenadas extremas de las imágenes de satélite.

b) Georreferenciación utilizando puntos de control

Cuando no se conocen las coordenadas extremas de la imagen lo que se hace es utilizar puntos de control. Estos puntos de control generalmente son tomados de la cartografía existente de la imagen a georreferenciar, en este caso se utilizaron las cartas topográficas escala 1: 50 000 del INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) y de la SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto). Los puntos que se toman en cuenta son puntos identificables tanto en la imagen como en la cartografía, de esta manera, las coordenadas de la carta topográfica serán utilizadas para georreferenciar los que encuentran en la imagen. Algunos puntos de referencia que resultan bastante prácticos por su exactitud son: intersección de carreteras, de ríos, vías de tren, caminos, etc. Cuando se trata de áreas urbanas es, de alguna manera, más fácil encontrar puntos de referencia, en tanto que en zonas boscosas es un poco complicado; en este caso los cauces, brechas y terracerías son de gran utilidad. Los puntos de control, de preferencia, deben, en lo posible, estar distribuidos en toda la imagen (ver Figura 1.3.1.2) con el objetivo de tener un mejor control sobre la imagen y también para tratar de tener el menor error. Otra manera de obtener las coordenadas exactas de los puntos de control se realiza por medio del GPS (Global Positioning System, por sus siglas en inglés). Realizando recorridos de campo de puntos identificables en la imagen digital es posible obtener sus coordenadas geográficas.



Al igual que con el otro método de georreferenciación (de coordenadas extremas) el arreglo original de los píxeles permanece intacto y no es remuestreado.



Fuente: Ilwis, Reference guide, 1997

Figura. 1.3.1.2. La cartografía existente de la zona de estudio, que se vaya analizar, es indispensable para la georreferenciación por puntos de referencia.

1.3.1.2. Clasificaciones Espectrales de Imágenes de Satélite

La clasificación digital de imágenes es el proceso de asignación de *píxeles* a determinadas clases. Usualmente cada *pixel* es tratado como una unidad individual compuesta de valores espectrales en diversas bandas (Lillesand; Kiefer, 1994). La clasificación de píxeles puede generarse por medio de métodos de clasificaciones no supervisadas y supervisadas.

a) Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada puede ser definida como la identificación natural de grupos o estructuras que contienen información multispectral (Lillesand; Kiefer, 1994). De manera general se define como un proceso de agrupamiento de *píxeles*, los cuales tienen valores espectrales similares. Cada grupo similar de *píxeles* es generalmente llamado "clase espectral". A cada clase espectral corresponde un clase de información, definida posteriormente con ayuda de fotos, mapas y trabajo de campo.



b) Clasificación supervisada

La estrategia básica en la clasificación supervisada es hacer un muestreo en las áreas de tipos de cobertura conocidos para determinar sus valores espectrales representativos. Estas áreas de muestreo son generalmente referidos como **campos de entrenamiento**¹ y los valores espectrales representativos de estos campos de entrenamiento son llamados **clases espectrales**. La exactitud de una clasificación supervisada depende de qué tan representativos sean estos campos y su tamaño, considerando su comportamiento estadístico en las diferentes bandas espectrales y del grado de variación de las suposiciones en que se basa la técnica de clasificación (Mather, 1987). Los métodos de clasificación dentro de las clasificaciones supervisadas son los siguientes: *Box classifier*, *Minimum distance*, *Minimum Mahalanobis distance*, *Maximum Likelihood* (máxima verosimilitud), (Ilwis reference guide, 1997)

- ◆ *Box Classifier*: opera utilizando un factor de multiplicación.
- ◆ *Minimum Distance*: utiliza un umbral de distancia basado en las distancias euclidianas.
- ◆ *Minimum Mahalanobis distance*: utiliza un umbral de distancia.
- ◆ *Maximum Likelihood* (máxima verosimilitud): utiliza un umbral de distancia.

i. *Box Classifier*

En el caso de *box classifier* el factor de multiplicación (usualmente > 1) es definido por el usuario. Este factor es multiplicado por la desviación estándar de las clases para hacer las cajas alrededor de las clases y el pixel puede ser asignado de una manera más fácil a su clase correspondiente.

ii. *Minimum Distance*

Este método de clasificación utiliza el valor central de los datos espectrales. Estos se toman como un medio de asignación de pixeles para las categorías de las clases de datos. Los valores espectrales en las distintas bandas determinan la posición de cada *pixel* dentro de las clases que se forman por cada categoría. Cada clase de datos puede ser representado por un centroide el cual es definido por su

¹ Un campo de entrenamiento es un "área muestra" para estimaciones estadísticas espectrales representativas de un cierto tipo de cobertura. (Verbyla. 1995). De esta manera dependiendo del tipo de cobertura que se tenga que clasificar va a ser la muestra que se tomará tratando de tomar áreas homogéneas de los tipos de cobertura.



valor medio (Lillesand y Kiefer, 1994). La gran ventaja de este método es que es más fácil y rápido clasificar. Sin embargo, su desventaja es que sólo se utilizan datos espectrales y no se utiliza información acerca la variabilidad espectral del tipo de cobertura de las clases (Verbyla, 1995).

iii. *Minimum Mahalanobis distance*

La distancia de *Mahalanobis* depende de las distancias estadísticas hacia las clases medias y de la matriz de covarianza de cada clase (Ilwis Reference guide, 1997).

iv. *Maximum Likelihood (máxima verosimilitud)*

Este clasificador toma en cuenta la media y la covarianza de cada clase para la estimación de la verosimilitud de una clase en cualquier valor digital. Esto es análogo para la generación de contornos de igual verosimilitud para cada clase y entonces comparar cada pixel candidato con la verosimilitud de cada clase (Verbyla, 1995). En otras palabras, se puede decir que este método de clasificación asume los valores espectrales de los pixeles que se encuentran en los campos de entrenamiento para que a partir de estos los datos sean estadísticamente distribuidos de acuerdo a la “función de probabilidad normal multivariada”.

1.3.2 *Percepción remota alternativa*

Ante las necesidades, cada vez mayores, de los estudiosos de los recursos naturales, resulta de gran interés los productos generados por la percepción remota alternativa. La percepción Remota alternativa se presenta en la actualidad como una tecnología opcional en la obtención de información a distancia, esta información se obtiene en formato digital tanto en video como en fotografía.

1.3.2.1. *Videoteledetección (Video digital)*

En la actualidad lo que está teniendo un auge en los estudios geográficos, ecológicos, biológicos, entre otros, es la *Videoteledetección*, considerada como una tecnología que tiene como objetivos principales la adquisición de imágenes de video desde alguna plataforma.



Los trabajos realizados en los últimos diez años con videografía permiten conocer grupos bastante bien identificados que han marcado la pauta en el desarrollo de sistemas y aplicaciones diversas. Entre estos grupos destaca el del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA-ARS*) en la Ciudad de Weslaco Texas. Su línea de trabajo ha sido desde el desarrollo de sistemas de video multiespectral y visible hasta la aplicación de los mismos en un sinnúmero de casos, en su gran mayoría relacionados con la evaluación de la cubierta vegetal y agrícola. Todo esto encabezado por el investigador J.H. Everitt junto con D.E. Escobar y un grupo de colaboradores. Un dato importante de mencionar es que en 1985 de un total de once trabajos presentados en la *10th Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Planta Sciences and Related Fields Michigan*, mayo 21-24, solamente cuatro trabajos eran relacionados a la videografía. Para 1995 en Terre Haute, Indiana, mayo 2-3, de un total de treinta y nueve trabajos treinta y cinco eran de videografía, por lo que se puede ver el desarrollo tan grande que ha tenido esta herramienta de trabajo y el impacto que ha tenido en diferentes ramas de la investigación (Palacio, 1996).

Con la videografía se han realizados estudios tales como: detección de áreas quemadas, suelos fertilizados, especies de plantas y niveles de biomasa, “*stress*” de la vegetación, detección de hierba dañina para las zonas de cultivo, en general los estudios han sido para conocer las condiciones del suelo y los campos de cultivo (Everitt, 1988; Richardson, 1988). También se han hecho mapeos de unidades de suelo, para lo cual se utilizan imágenes de video en color y multiespectral (blanco y negro) (Gerberman *et al*, 1988). Estudios de Erosión utilizando imágenes de video para cuantificar el avance de las superficies y longitudes máximas de pérdidas de suelo por erosión acelerada en las cabeceras de las cárcavas, la resolución espacial lograda fue de 1 a 5 cm por pixel (López y Palacio, 1995).

En México (concretamente en el Laboratorio de videografía y fotografía aérea digital, en el Instituto de Geografía UNAM) los levantamientos de video digital se han realizado con una cámara JVC 100X $f=4.5-45$ mm, con un sensor CCD de 900 líneas por 800 renglones. Las imágenes se obtienen en color con una resolución espacial de 6 metros aproximadamente. Las ventajas del video digital en relación con el video convencional son significativas ya que si bien



anteriormente se podían procesar las imágenes dentro de un SIG o dentro de programas de cómputo especializados en procesamiento de imágenes digitales (ya sean fotográfica o de video) en la actualidad este procesamiento ofrece resultados más contundentes en cuanto a la calidad de la información, tomando en cuenta sus características espectrales y espaciales.

1.3.2.2. Fotografía aérea digital (FAD)

Las fotografías aéreas digitales utilizan el mismo principio de la fotografía aérea convencional pero la diferencia es que las fotografías digitales son capturadas por un sensor bidimensional conocido como CCD (*Charge Coupled Device*). El CCD es un “chip” microelectrónico de silicón en estado sólido que detecta la energía electromagnética. El CCD fue diseñado para utilizarse como sensor remoto y con la capacidad de diferenciar, en gran parte, un amplio rango espectral (Lillesand y Kiefer, 1994). La sensibilidad máxima se encuentra en el infrarrojo cercano entre los 700 y 800 μm .

La imagen digital obtenida de dicho sensor es un arreglo de pixeles (mejor conocido como formato “*raster*”) y cada pixel tiene un nivel digital representativo. El hecho de ser fotografías digitales, proporciona grandes facilidades en su procesamiento, pueden ser manipuladas y almacenadas en cualquier computadora PC, lo cual representa una ventaja significativa ya que éstas fotografías permiten ser procesadas en el mismo instante en que son tomadas (tiempo real).

Las cámaras de fotografía digital cuentan con un CCD, cuyo tamaño va de 9 mm por 7 mm a 35 mm por 35 mm, conteniendo fotosensores que tienen un tamaño de aproximadamente 7 μm a 16 μm . Los fotosensores convierten la radiación electromagnética que los toca en impulsos o señales eléctricas, las cuales son almacenadas directamente en formato digital (Navarrete, 1999).

En el caso específico del desarrollo de la fotografía aérea digital en México todos los levantamientos se han realizado con una cámara fotográfica digital DCS-420 color con un CCD de resolución de 1524 por 1012 pixeles y una interfaz de conversión a formato digital Kodak, una lente supergran angular de 13.91 mm marca Nikon, la resolución espectral que maneja son del visible (azul, verde y rojo) y la resolución espacial es de 3 metros. La cámara pertenece al IGg de la UNAM.



Los primeros productos obtenidos, con esta cámara, fueron fotografías digitales para la CNA (en 1996) dentro de un convenio con el Instituto de Geografía, UNAM. El total del área aerofotografiada fue de aproximadamente 220 000 hectáreas (Cuenca Tributaria Oriental del Ex-Lago de Texcoco y Zona Federal). Se obtuvieron más de 500 fotografías digitales. Los usos de estas fotografías digitales fueron diversos como por ejemplo; la evaluación de las tareas de conservación de suelo, agua y vegetación en la cuenca tributaria oriental y la zona federal del Ex-lago de Texcoco

Entre las aplicaciones de la fotografía aérea digital en México destacan las realizadas en la zona que aquí se estudia:

- Procesamiento de fotografías digitales de alta resolución dentro de un SIG para clasificación de tipos y rasgos de erosión en la vertiente oriental de la cuenca de México (Garrido *et. al*, 1998). En este trabajo se tomó como base un mosaico elaborado con fotografías digitales y dentro del SIG (Ilwis) lo que se hizo fue separar la información por bandas y de esta manera poder realizar compuestos de color que permitirían hacer clasificaciones espectrales. Los resultados que se obtuvieron fueron magníficos ya que se pudieron identificar claramente los diferentes usos del suelo dentro de dicha zona así como algunos rasgos de erosión.
- Actualización cartográfica de la zona Federal del Ex-Lago de Texcoco, en donde se elaboraron mosaicos con las fotografías digitales. Para lo cual se desarrollaron y aplicaron herramientas alternativas de PR (Navarrete, 1999)
- Inventario de Erosión acelerada de las Cuencas de los Ríos Chapingo y San Bernardino, en la Vertiente Oriental de la Cuenca de México. (Garrido, 1998) dentro de este se elaboró un mapa de uso del suelo basándose en la fotointerpretación de fotografías digitales (en formato analógico). Se emplearon y evaluaron las técnicas de la fotografía aérea digital y SIG junto con los métodos geomorfológicos para los estudios de erosión.
- Corrección fotogramétrica de fotografías digitales para la actualización de la cartografía urbana del municipio de Texcoco (Romero, 1999).



A lo largo de cuatro años, aproximadamente; el Laboratorio de videografía y fotografía aérea digital del Instituto de Geografía ha, realizado otros aerolevantamientos en diferentes partes de la República Mexicana y en la misma ciudad del México. Estos vuelos han tenido diversas aplicaciones. Por ejemplo en las costas de Oaxaca y Chiapas con el fin de detectar predios que se encontraban invadiendo la zona federal costera. En la región de los Tuxtlas, Chiapas se realizó otro vuelo para conocer el estado actual de la reserva al igual que se hizo con Chamela, Jalisco en donde se encuentra otra reserva natural propiedad de la UNAM. En Chiapas y Guerrero se realizaron vuelos posteriores al paso de huracanes para conocer de manera inmediata los daños causados por dichos eventos En Mérida, Yucatán para conocer el uso actual del suelo (1999). En el centro histórico de la Ciudad de México para la redistribución de comercio informal. En general se puede observar que todos los productos digitales (fotografía y video) obtenidos de los aerolevantamientos tienen aplicaciones diversas y que hay que considerar a la Percepción Remota alternativa como una técnica opcional que en la actualidad está teniendo gran auge y que en tanto la ciencia y la tecnología sigan avanzando de igual manera lo hará esta técnica, no olvidando la creatividad el talento e inquietud de los expertos en la materia por encontrar caminos más cortos en la solución de problemas que se presentan no sólo con los recursos naturales sino también en los aspectos socioeconómicos aunados a estos, los desastres.

A manera de ejemplos, de lo antes expuesto, a continuación se presenta un esquema (Figura:1.3.2.1.) para visualizar diferentes imágenes de percepción remota pertenecientes a la zona de estudio. Las imágenes que se muestran son compuestas de color en: Landsat MSS(432), Landsat TM(432), Spot(321) y Fotografía aérea digital (color original RGB). En este caso el elemento espacial que se destacó (con color verde) es una zona agrícola llamada “La Siberia”, al oeste de Texcoco, la razón por la cual se eligió, fue porque se trata de un rasgo representativo en cada una de las imágenes. Como se ha estado mencionando a lo largo del capítulo, el tipo de imágenes y las resoluciones (espaciales, temporales, espectrales, etc.) que se utilicen van a depender mucho del objetivo general del estudio a realizar ya que como se puede apreciar, en cada una de las imágenes, los elementos no son los mismos debido en este caso a la resolución espacial. Mientras que en la imagen MSS “La Siberia” difícilmente se nota, en la fotografía digital se pueden observar las divisiones entre las parcelas sembradas, en este caso, con diferentes especies de árboles.



Figura. 1.3.2.1 Imágenes de Percepción Remota con diferentes resoluciones.

1.4. Sistemas de información geográfica (SIG)

1.4.1. Conceptos básicos sobre Sistemas de Información Geográfica.

El avance computacional de las últimas décadas y la generación, el desarrollo y la aplicación de la tecnología conocida como sistemas de información geográfica (SIG, o GIS por sus siglas en inglés) han permitido su utilización en los estudios de los recursos naturales y del medio ambiente, principalmente a partir de los años setenta, y en México al final de los años ochenta. Esto ha provocado que se consideren cada vez más los conceptos teóricos y las metodologías geográficas hasta ahora utilizadas. El empleo de esta tecnología permite integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial (o geográfica) y no espacial (o de atributos), que



hasta hace poco tiempo era muy difícil hacerlo de manera manual o mediante interpretación visual (López, 1998).

Resulta difícil dar una sola definición de SIG ya que revisando la bibliografía, al respecto, se encuentran tantas definiciones como aplicaciones se le den. Sin embargo de manera concreta se define a un SIG como una herramienta para almacenar, manipular, analizar y desplegar información espacial (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos; Aronoff, 1989; Bocco *et. al.* 1991; *United States Department of Agriculture*, 1995)

Los SIG permiten la captura, organización, manipulación, análisis, modelado y presentación de información espacial, donde la referencia geográfica es una de las características más importantes para su análisis (Aronoff, 1989). La referencia geográfica puede ser del orden de aspectos tanto físicos como sociales.

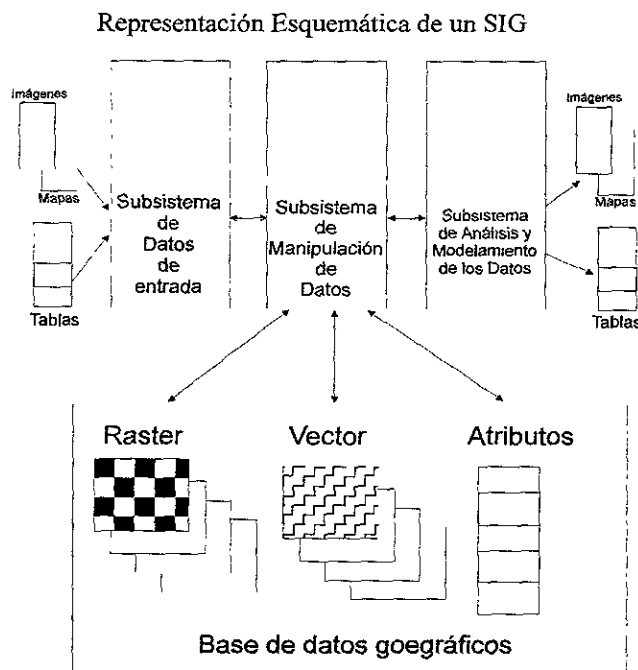
Desde hace mucho tiempo los geógrafos y otros científicos de la Tierra están acostumbrados a estructurar la información en mapas temáticos, según sean los aspectos del espacio que nos interese estudiar. De la misma forma un SIG divide la realidad en distintos temas, es decir, en distintas capas o estratos de la zona que se desea estudiar: el relieve, la litología, los suelos, los ríos, los asentamientos, las carreteras, los límites administrativos, etc. (Gutiérrez y Gould, 1994). La ventaja de los SIG es que esta información puede ser manejada de diversas formas, es decir se pueden hacer tantas combinaciones de información como sea necesario, estas pueden ir desde lo más sencillo hasta lo más complejo. Cabe recordar que un SIG no es simplemente un programa de cómputo que se utiliza para dibujar mapas, aunque es una de las partes que lo conforman; éste va más allá y permite realizar análisis espaciales que posteriormente permitirá tomar decisiones con relación a lo que se analice. En cualquier campo de aplicación las características cualitativas y cuantitativas de la realidad se registran y manipulan en forma de mapas (Burrough, 1991). Los SIG se distinguen más por su capacidad analítica que por su capacidad de diseño de cartografía. Los SIG son capaces de definir “escenarios”, es decir, de crear modelos que permitan suponer y predecir el comportamiento de una o más variables que se expresan en el espacio geográfico con base en el análisis previo de la información, llevada a cabo dentro del mismo SIG. Los sistemas de cartografía automatizada, se limitan al diseño de mapas y carecen de poder analítico (salvo algunos



sistemas, tradicionalmente de diseño, que han comenzado a incorporar técnicas de SIG); se restringen, en el mejor de los casos, a aportar datos de superficie y longitudes (Palacio, 1996).

1.4.1.1. Componentes de un SIG.

Los Sistemas de Información de Geográfica consisten de cuatro componentes básicos: recopilación de información de entrada, base de datos geográficos, análisis y modelamiento de la información y visualización y finalmente la representación de la información (Belward y Valenzuela, 1990). Estos componentes se esquematizan en la figura 1.4.1.1.



Fuente: Belward y Valenzuela, 1990

Figura. 1.4.1.1. Componentes de un SIG.

Las formas de representación y manejo de información espacial dentro del SIG son los llamados “*formatos vector y raster*”.

a) Formato Vectorial

Un vector es una línea limitada por dos puntos. El formato vector es la forma en la que generalmente se almacenan los *puntos, líneas y polígonos*. La forma de manejar la información es por medio de pares de coordenadas y con esto se puede conocer posición, localización, distancias y



dimensiones de los datos espaciales. La precisión va a estar en función de la capacidad del SIG y de la escala de trabajo. Este formato ocupa poco espacio en memoria ya que almacena sólo las coordenadas, las relaciones entre los diferentes elementos y sus códigos respectivos.

Los **puntos** requieren para su definición de un par de coordenadas (X y Y). Además otra información puede acompañar a la ubicación en la base de datos como por ejemplo, nombre del punto, símbolo y fechas (Palacio, 1996).

Las **líneas** son sucesiones de líneas rectas constituidas de dos o más pares de coordenada. En el caso de líneas curvas (arcos) se requiere de un mayor número de coordenadas que en caso de líneas rectas. (Palacio, 1996).

Los **polígonos** son elementos bidimensionales que generalmente representan un área. Compuestos por líneas y nodos.

b) Formato *Raster*

En el formato Raster se divide al mapa en una matriz de celdas del mismo tamaño, cada una de estas celdas es conocida como “*pixel*”. Los pixeles son elementos de dos dimensiones que representan la parte más pequeña e indivisible de una imagen. Cada una de ellos define su posición en renglones, columnas y al tipo de atributo que represente por medio de un valor numérico.

Este formato implica el manejo de áreas referido a una matriz de puntos (*pixeles*) de forma comúnmente cuadrada o rectangular (Palacio, 1996) ver Figura 1.4.1.2.

Según Palacio (1996) la información contenida en formato raster puede ser igualmente almacenada de diferentes maneras:

- Celdas o capas (*layers*) referenciados. En este caso, cada atributo está referido a una celda del mapa raster, en una relación uno a uno. Esto implica contar con un mapa para cada rasgo o atributo, lo cual exige importante espacio para el almacenamiento.



- Unidades de mapeo referenciadas. En este caso, el mapa raster ha sido clasificado con el fin de contar con áreas homogéneas, en donde diferentes celdas tienen valores o atributos semejantes. Los valores de atributos son almacenados en tablas y no en formato raster, posteriormente los valores de la tabla son vertidos en el mapa. Este enfoque tiene la ventaja de ser poco exigente en cuanto al espacio necesario para el almacenamiento de la información.

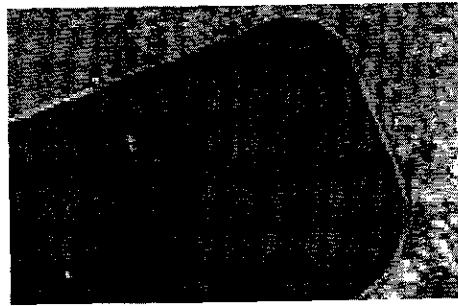


Figura 1.4.1.2. Corte de una imagen de satélite Landsat TM, cada pixel tiene un valor de 25 X 25 metros.
Formato Raster

El formato raster permite representar no sólo elementos del mundo real, sino también variables que presentan una variación continua sobre el espacio, es decir, superficies. El ejemplo más típico es el del mapa de altitudes. Se le asigna a cada celda un valor, de forma que se pueda conocer fielmente como varía la altitud por toda el área que cubre el mapa.

1.4.2. Creación de escenarios dentro del SIG.

Una de las aplicaciones más importantes dentro de un SIG es la creación de modelos o escenarios, para predecir los resultados de lo que se proponga con base al SIG. Entre más factores se tomen en cuenta para el modelado, éste se hará más complejo y más difícil de trabajar para lo cual **la lógica booleana** se presenta como una alternativa en el manejo de información dentro del SIG. El álgebra booleana utiliza cuatro operadores para definir condiciones de falso y verdadero (*AND*, *OR*, *XOR*, *NOT*). Ver tabla 3.4.2.1. Los resultados esquemáticos se aprecian en la Figura 3.4.5. A diferencia de las operaciones aritméticas los operadores booleanos no mantienen la propiedad conmutativa. El resultado de $A \text{ AND } B \text{ OR } C$ depende de la prioridad de *AND* respecto de *OR*. Dicha prioridad se establece a partir del uso de paréntesis (Palacio, 1996), como se puede apreciar en la figura antes mencionada.



1.4.3 Calidad de la base de datos y fuentes de error

La calidad de la base de datos va a depender mucho del grado de rigor que se necesite, es decir, entre más riguroso (en cuanto a exactitud) sea el contenido de los datos que se encuentran en la base de datos, los resultados van a tener un mayor grado de exactitud, sin embargo no siempre se puede tener el 100% de seguridad. La importancia de cada factor de calidad y el nivel de detalle requerido varía dependiendo del contexto en el que se utilice el SIG. Según Palacio (1996) existen fuentes de error como las que se mencionan a continuación.

1. **Edad de la información:** En muchos casos los datos existentes no poseen la misma antigüedad sino que fueron recopilados en diferentes épocas, lo cual tiene varias implicaciones. Por un lado, es posible que los datos sobre algún tema en particular hayan sido recabados en temporadas del año diferentes y ello implique variaciones en el parámetro estudiado. Los formatos también son importantes porque se dan casos en que la información se encuentra almacenada en dispositivos que no se pueda tener acceso a ellos. Otro aspecto importante es que si se requiere de un estudio actual la información con que se cuenta no reúne las características de actualidad y esta información no resulta muy confiable porque se dieron cambios y en esa información no están registrados, esto sucede muy a menudo con la información topográfica.
2. **Cubrimiento:** Este punto se refiere a la falta de información en la totalidad de la zona de interés, sea porque nunca fue recabada o bien por su antigüedad.
3. **Escalas:** Es importante que la escala de los mapas satisfaga los requerimientos del problema estudiado. Por ejemplo, escalas pequeñas aplicadas en estudios urbanos o en estudios de precisión conllevan errores cualitativos y cuantitativos; escalas grandes en estudios generales implican, además de redundancia, gastos injustificados de manejo de información.
4. **Precisión de la ubicación:** La información contenida en mapas topográficos en escalas diversas posee en general un alto grado de precisión. Los modernos instrumentos fotogramétricos permiten niveles de precisión del orden del decímetro y más. En algunos temas, los límites imprecisos y graduales son considerados como bien definidos, y en algunos casos, fuera de la ubicación correcta.



5. **Precisión del contenido de la información:** La información contenida en los mapas puede ser, simplemente, equivocada debido a que se asignan nombre y características de determinado elemento a otro que no le corresponde.
6. **Precisión de la digitización:** La digitización manual conlleva implícitamente un error. Dicho de otra manera, es difícil reproducir en formato digital un modelo analógico con 100% de exactitud. En algunos casos, los errores en la ubicación pueden derivarse de fallas en el material capturado.
7. **Errores asociados a la sobreposición de mapas:** Si se acepta el punto anterior, resulta evidente que la sobreposición de mapas resulta en una edición de errores.

1.4.4. Áreas de aplicación de los SIG

Según Belward y Valenzuela (1990), las principales áreas de aplicación de los SIG son las siguientes: Cartografía automatizada, Trazado de parcelas y calles, Mapeo catastral, Mapas de autopistas, Mapas geodésicos, Cartografía de eventos (accidentes, incendios, robos, crímenes), Cartografía de censos y estadísticas relacionadas, Datos asociados a registros de pozos de extracción (agua, petróleo, gas, etc.), Planeación y manejo del uso del suelo, Estudios de impacto ambiental, Mapeo de recursos naturales (inventarios), Tenencia de la Tierra, Estudios de Mercado, Rutas para vehículos en tránsito, Planeación urbana y regional, Selección de trazos de carreteras, etc., Obras de ingeniería, Explotación mineral.

Los SIG son una herramienta muy importante para el modelamiento y análisis de diversos problemas (físicos y sociales). Existen muchas referencias bibliográficas en donde la aplicación de los SIG es cada vez mayor. Los SIG se presentan como estrategias para el ordenamiento territorial (Júnior *et. al*, 1995; Galeano *et al.*, 1995; Meredith, 1995). En estudios catastrales los SIG son indispensables ya que permiten manejar grandes volúmenes de información recolectada durante trabajo de campo (Rincón, 1995). Bocco *et. al.* (1995) realizó un estudio (multitemporal) para cuantificar el crecimiento de la mancha urbana usando PR y SIG, el SIG fue utilizado para el modelamiento cartográfico y para el manejo de bases de datos tabulares así como realizar operaciones de tipo relacional. Otro estudio interesante fue el realizado por Molina (1995) “Focalización del plan de acción y recursos para Santa Fe de Bogotá 1995-1998”, en donde el SIG se utilizó para garantizar la óptima localización geográfica y social de la inversión con la máxima



cobertura posible, como identificar claramente la localización de la población más vulnerable socialmente y calcular el monto total de los recursos necesarios para llevar a cabo programas sociales de inversión.

Cuando se aplica adecuadamente, la tecnología de los SIG forma parte de un conjunto de herramientas útiles en los procesos de análisis espacial de objetos y fenómenos de diversa índole. El uso de un SIG no asegura por sí mismo que los resultados obtenidos y su interpretación sean correctos. Para definir esto se tiene que considerar primero si es realmente necesaria la aplicación de esta tecnología, si los modelos a emplear en el análisis son teóricamente consistentes, si la información de las variables usadas es homogénea, tanto en calidad como en nivel de detalle espacial y temporal, y finalmente si los tipos y las magnitudes de los errores sistemáticos involucrados son permisibles y no afectan en alto porcentaje a los resultados obtenidos (López, 1998).

CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LA VERTIENTE ORIENTAL DE LA CUENCA DE MÉXICO

2.1. Localización

La zona de estudio se localiza específicamente en la vertiente oriental de la Cuenca de México (Figura. 2.1), dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico (Quiñones, 1987), en donde existen once subcuencas las cuales pertenecen a los ríos: *San Juan Teotihuacan, Papalotla, Xalapango, Coaxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec, San Francisco y la Compañía.*

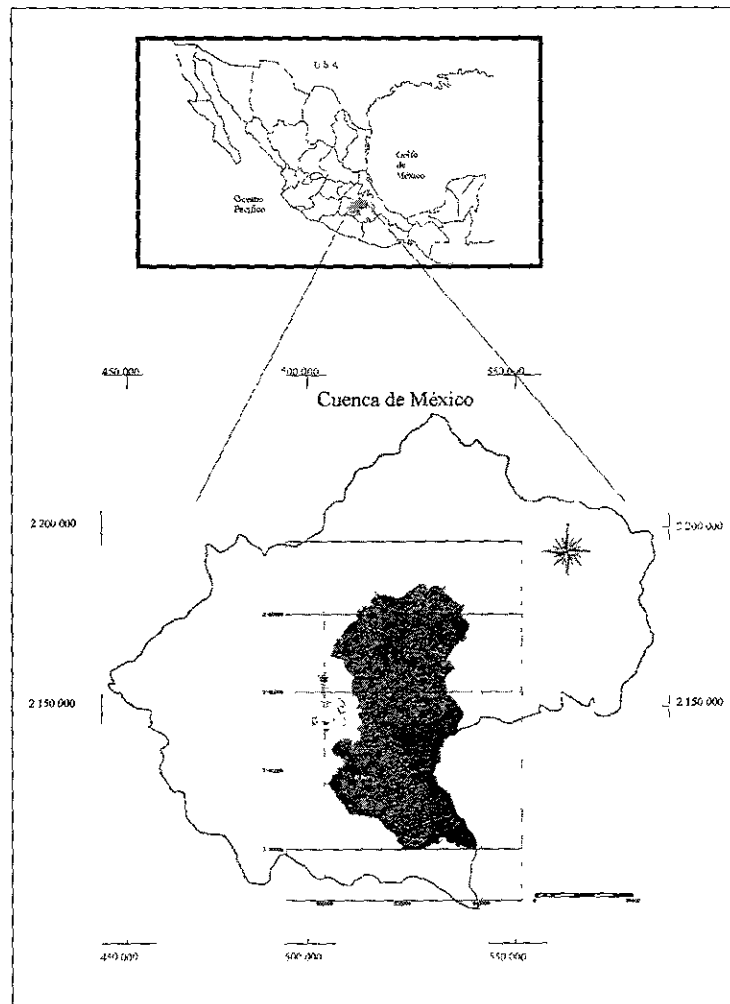


Figura. 2.1. Mapa de localización de la zona de estudio dentro de la Cuenca de México.



De común acuerdo con la CNA, para el caso del presente estudio, los límites se establecieron tomando en cuenta los parteaguas de las subcuencas extremas (San Juan Teotihuacan y La Compañía), quedando de la siguiente manera: al norte con la población de San Luis Tecuautitlán, el Cerro Gordo, Santo Domingo Aztecaameca pasando por Tetepantla, Nopaltepec y Yecuautitlán; al sur con las poblaciones de Cocotitlán, Tlalmanalco de Velázquez y la Sierra Nevada; al este con los límites de los estados de Tlaxcala y Puebla y al oeste con la zona Federal del Ex-Lago de Texcoco.

2.2. Geología y Fisiografía

Según Mooser (1957) la Cuenca de México está situada en el extremo sur de la Mesa Central quedando comprendida en el centro del Cinturón Volcánico Mexicano y localizada en un sitio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde el principio del Terciario.

Dentro de la Cuenca de México se conocen siete periodos de actividad geológica, de los cuales los últimos cuatro han sido los más importantes (para el caso de la zona de estudio). De acuerdo a Mooser (1987) durante el cuarto periodo, en el Mioceno Tardío, surgen las Sierras de Guadalupe, Tepotzotlán y Tepozán. Durante el quinto, en el Plioceno, surgen las Sierras de las Cruces, Nevada y gran parte de Río Frío. De esta manera se formaron, básicamente, los límites de la actual Cuenca de México. Durante el sexto periodo, del Plioceno tardío y el Pleistoceno temprano, surgieron los cerros de la Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y Gordo. En el séptimo periodo pleistocénico, perteneciente al Holoceno, se presenta el acontecimiento geológico que cerraría por completo la Cuenca de México; se trata de la parte sur en donde una secuencia de andesitas a basaltos constituyen la Sierra del Chichinautzin.

La geología de la Cuenca de México es principalmente ígnea, caracterizándose por la presencia de rocas tales como: tobas, brechas, andesitas, riolitas, ceniza volcánica y depósitos clásticos.



La altitud promedio del relieve es de 3,000 msnm. Teniendo como alturas principales los volcanes: Popocatepetl (5465msnm), Iztaccíhuatl (5230 msnm), Tláloc (4120 msnm), Telapón (4100 msnm) y Ajusco (3930 msnm).

En la zona de estudio se localiza la Sierra Nevada como principal rasgo topográfico con una altitud promedio de 3,000 msnm, la Sierra de Quetzaltepec 2,800-3,000 msnm con dirección Norte-Noroeste principalmente. La Sierra de Petlachique que tiene una altitud de 2,600-2,800 msnm que divide las cuencas de Texcoco y Teotihuacán con dirección Oeste-Este. Al norte el Cerro Gordo 3,000 msnm, al oeste el Cerro de Chiconautla con una altitud de 2,600 msnm. El desnivel más bajo se ubica en el Ex-Lago de Texcoco con 2,237 msnm.

2.3 Clima

La variación de la altitud propicia diferencias climáticas en la zona, en las partes bajas de la cuenca (vaso del lago de Texcoco con altitud de 2,237 msnm), el clima es templado semiseco, con una temperatura media anual de 15°C y una precipitación de 660 mm; mientras que en las partes altas, como la cima de Río Frío (con más de 3,990 msnm aproximadamente) se presenta un clima templado subhúmedo con una temperatura media anual de 5 °C y precipitación anual de más de 1,200 mm. (Cruickshank, 1995).

La influencia particular de la orografía sobre la temperatura, precipitación y circulación del aire es muy marcada, lo que explica la diversidad de climas que se encuentran en la zona (Cuadro. 2.3).

Cuadro. 2.3 Climas dentro de la Zona de Estudio.

Clima	Características
C(Wo)(w)b(i')g	Clima templado, subhúmedo (el de menor precipitación de los templados, verano largo), con porcentaje de lluvia invernal menor a 5, con poca fluctuación térmica y la temperatura más elevada acontece antes del solsticio de verano. Se observa en diferentes puntos, tanto al norte como al oriente.
BS1kw(w)(i')g	Clima seco estepario, semiárido-templado (el menos seco de los secos), lluvia inferior al 5%, con reducida oscilación térmica y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano. Ocupa una región importante hacia el noreste del Distrito Federal.
C(w1)(w)b(i')g	Clima templado, subhúmedo (humedad moderada), de verano largo, con precipitación de invierno inferior al 5% anual con poca oscilación térmica y la temperatura más alta ocurre antes del solsticio de verano. Se localiza en la parte oriental y en y norte del estado y en una franja casi vertical, al norte del Distrito Federal.
C(w2)(w)b(i)g	Clima templado, subhúmedo, con verano largo, lluvia invernal inferior a 5%, es isotermal y la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano. Abarca la mayor parte de los climas del estado y se localiza en lo que corresponde al Valle de Toluca y las Sierras Nevada y Río Frío.

Fuente: Atlas General del Estado de México, 1993. Vol. II Mapa de Climas



2.4 Hidrología.

La cuenca del Lago de Texcoco abarca dos de las zonas hidrológicas del Valle de México la zona VI, denominada “Teotihuacán” cuya área es de 930 Km² y la VII, denominada “Texcoco”, con una extensión de 1,146 Km² lo que significa una superficie total de 2,076 Km² incluyendo las 10,000 has. de la Zona Federal (Cruickshank, 1995).

La zona de estudio pertenece a la zona hidrológica Pánuco-Chapala-Santiago. El paisaje de esta región es importante en la historia de México, ya que propició el origen y florecimiento de los primeros pobladores prehispánicos, gracias a la presencia de abundantes recursos, entre ellos el agua de los lagos de Texcoco y Chalco. Al oriente localizamos obras de ingeniería, como el canal La Compañía, que sirve como desagüe para los escurrimientos de la Sierra Nevada, y da origen en su curso a pequeños cuerpos de agua, como la Cola de Pato, la Regalada y el Tesorito. Al norte, a través del Canal de las Sales, su recorrido desemboca en el caracol de Sosa Texcoco; de ahí transcurre por el Gran Canal, que es el colector de las aguas residuales del Distrito Federal (SFP, 1993).

Hidrológicamente, la zona de estudio tiene once corrientes principales, cuatro en la parte noreste, cinco en la parte oriente y dos en la parte sureste (SARH, 1992). Dichas cuencas son las siguientes:

Zona Noreste:	Zona Oriente:	Zona Sureste:
San Juan Teotihuacán (491 km ²)	Texcoco (31 km ²)	San Francisco (152 km ²)
Papalotla (210 km ²)	Chapingo (21 km ²)	La Compañía (294 km ²)
Xalapango (59 km ²)	San Bernardino (17 km ²)	
Coxcacoaco (62 km ²)	Santa Mónica (56 km ²)	
	Coatepec (50 km ²)	

La zona de influencia del Ex-Lago de Texcoco es una de las zonas hidrológicas más importantes en la Cuenca de México, ya que el 8.2% de los recursos hidráulicos superficiales y el 8.9 % de los recursos hidráulicos subterráneos de la cuenca provienen de esta zona, representando el 11.9% del área de la cuenca (SARH, 1990).



Puede indicarse que la mayor parte de las corrientes son de escurrimiento intermitente, ya que sólo tienen caudales importantes después de las fuertes precipitaciones y, en los días comprendidos entre éstas, dichos caudales disminuyen notablemente, llegando en muchas ocasiones a reducirse casi a cero. Todos los ríos y arroyos tienen la mayor parte de sus escurrimientos en verano y se produce en forma de avenidas, las cuales en muchos casos son peligrosas y llegan a causar trastornos y pérdidas. Las características de las corrientes están supeditadas a una serie de factores cuya influencia resulta sumamente compleja; sin embargo, de todos ellos dos son los que destacan sobre los demás: la precipitación y la permeabilidad del suelo (SEMARNAP, 1996).

En cuanto a escurrimiento se refiere, específicamente para el área de estudio, Adame (1997), llevó a cabo una evaluación de tipo hidrológico (estadística) para conocer el impacto de las obras de conservación del suelo y agua en la vertiente oriental del ex Lago de Texcoco. Se utilizó la cuenca del río Texcoco como área “piloto” de dicho estudio.

Las principales conclusiones encontradas fueron que los escurrimientos superficiales disminuyeron un 68% después de haberse realizado obras de conservación de suelo y agua tales como, el terraceo, subsoleo, reforestación, construcción de presas de control azolve, entre las más importantes. Un resultado de no menor importancia fue que se redujeron a un 83% la producción de azolves y los escurrimientos (gasto máximo) instantáneos se redujeron en un 100%.

Según dicho autor, el costo total para 1996 representó alrededor de 5.4 millones de pesos y el beneficio total se cuantificó en 8.1 millones de pesos, por lo que se concluye que las obras realizadas en esta zona son ambiental y socialmente rentables.

2.5 Suelos.

Debido a las diferencias climáticas y a los diferentes tipos de materiales geológicos y litológicos los suelos que se encuentran en la zona de estudio son de varios tipos.



De acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO (INEGI, 1982, , *op cit* Cruickshank, 1995) las unidades de suelos en las tres diferentes zonas son las siguientes.

Zona Norte: En esta zona, los principales suelos son los Vertisoles y Feozem (suelos cafés), localizados hasta el área próxima a los suelos salados del vaso. Estas unidades de suelos ocupan un 50% de la zona. En la parte media y alta se encuentran Litosoles y Cambisoles en un 40% y 10% de Feozem (*ídem*).

Zona Oriente: Las unidades predominantes son los Vertisoles en la parte baja con un 20% del área. En la parte media, los Litosoles y Feozem con un 40%, y en la parte alta los Litosoles, Regosoles, Cambisoles y Andosoles, que ocupan el 40% de la zona.

Zona Sureste: En la parte baja de la zona, hacia el ex Lago de Texcoco, así como en la parte media, se encuentran Feozem Háplicos y Regosoles en un 30% del área, mientras que en la parte alta de montaña Litosoles y Cambisoles en un 50 y 65%, respectivamente.

Los principales suelos identificados, de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO utilizada por INEGI, son Solonchak gléyico, Vertisol pélico y Phaeozem háplico en las partes bajas de la cuenca; Litosoles, Cambisoles húmicos, eútricos y dístricos, en la parte media; y andosoles húmicos y mólicos y las diferentes variaciones de cambisoles en las partes altas. Obviamente, existen muchas asociaciones, la más común en las zonas reforestadas es la de Litosol con Feozem.

En la zona clasificada como litosoles se tiene una heterogeneidad de capas endurecidas conocidas localmente como *Tepetate*, sobresaliendo la presencia de brechas volcánicas y tobas de diferente coloración y composición. Estas últimas han sido clasificadas por color como tepetate gris, rojo y amarillo (Rey, 1979); sin embargo, debido a similitudes entre las propiedades de los tepetates rojo y amarillo, en este caso se les identificó como tepetate rojo. De acuerdo con Werner (1988) los tepetates grises corresponden a erupciones volcánicas más recientes (menos de 12 000 años), mientras que los tepetates rojos tienen una edad mínima de 35 000 años.



2.6 Vegetación.

La vegetación de la zona es variable en función de la altitud, el relieve, tipos de suelo y el clima. En las partes bajas se tienen, principalmente, pastizales de especies tales como: Distichlis spicata, Eragrostis obtusifolia y Saueda difusa. En la parte media, se tiene vegetación herbácea del tipo gramíneas, leguminosas, cactáceas, liliáceas, y compuestas. En cuanto a la vegetación inducida que se ha realizado mediante obras de reforestación en sitios donde la erosión o el riesgo de erosión se ha presentado en forma severa se tienen las siguientes especies: Pinus sp., Cupressus sp., Eucalyptus sp., Casuarina, Acacia sp., Abies sp., Cassias sp. Finalmente, en la parte alta se tienen pastizales de altura, principalmente (Muhlenbergia macroura), y Vegetación Forestal compuesta por (Pinus hartweggi, Garryra laurifolia, y Juniperus depeana) en las partes abiertas, y Abies Religiosa y Quercus spp. en las barrancas o partes más húmedas (Pedraza, 1987). Dentro de la zona de estudio también se encuentra Pastizal Halófilo cuya distribución está asociada a regiones con alto grado de salinidad; se localiza en Zumpango, Tecámac y el Ex-Lago de Texcoco, con la especie dominante de Distichlis spicata (zacate salado), acompañada de Atriplex muricata (romerillo) y Suadanigra (romerito); en áreas donde la salinidad no es tan severa, se asocian con comunidades de Eragrostis obtusiflora (zacahuistle) y varias especies del género Suaeda (romerito), además plantas arbustivas como Baccharis glutinosa (jarilla), Buddleia cordata (tepozán) y anuales como Amaranthus hybridus (quelite).

2.7 Uso del suelo.

Para SEMARNAP (1996) y SPP (1973) los usos del suelo más importantes dentro de la zona de estudio son los siguientes: Zonas agrícolas, Zonas erosionadas, Zonas nopaleras y Zonas urbanas

2.7.1 Zonas agrícolas.

Las zonas agrícolas de la zona de estudio se dividieron en dos tipos: agricultura de riego y de temporal.



2.7.1.1 Agricultura de Riego.

Se localiza fundamentalmente en las partes bajas (planicie aluvial y lacustre) y en donde se siembra principalmente los siguientes cultivos: maíz, trigo, cebada, avena, alfalfa, frijol, haba, hortalizas (calabaza, col, tomate, y otros).

De acuerdo con los datos del VII Censo Agropecuario (INEGI, 1994), en el área de estudio se localizan 3,600 has. netas con cultivo de alfalfa, las cuales corresponden al 39% de la superficie total en el Estado de México, con este cultivo. La estimación neta de superficie sembrada con alfalfa dentro del área de estudio es del 33%, este cultivo se lleva a cabo únicamente bajo condiciones de riego y los municipios en donde se siembra de manera más importante son: Texcoco, Chalco, Acolman, Ixtapaluca, Atenco y Teotihuacán. La avena ocupa el 33%, La cebada el 16%, el frijol el 15% el maíz el 5% y el trigo el 19% de la superficie total dentro del área de estudio.

2.7.1.2 Agricultura de Temporal

Se practica principalmente en las partes altas y medias, en donde se observan los siguientes cultivos: maíz, trigo, cebada, avena, alfalfa, frijol, haba, hortalizas (calabaza, col, tomate, y otros), maguey, nopal y frutales (tejocote, durazno, pera, manzano, etc.).

2.7.2. Zonas erosionadas.

Estas áreas se caracterizan por la ausencia de cobertura vegetal sobre la superficie del suelo. De hecho, en el área de estudio, se presentan áreas con rasgos de erosión muy marcados, pues ya no tienen ni relictos de horizontes de suelo. También existen áreas agrícolas las cuales presentan algún tipo de erosión hídrica muy severa; tales procesos pueden presenciarse en las parcelas de la parte central del área de estudio.

Algunas áreas sin vegetación están asociadas a sitios con altos contenidos de sales, como sucede en la zona federal del Ex-Lago, las cuales pueden ser apreciadas en los periodos de secas; estas zonas representan las superficies más problemáticas, tanto para su manejo como para su recuperación.



Ante tales situaciones en 1973 por decreto presidencial se creó la Comisión del Lago de Texcoco, actualmente Proyecto Lago de Texcoco, dependiente de la Comisión Nacional del Agua. Las metas de este proyecto federal fueron: a) Creación de lagos artificiales y b) Control de las tolveneras generadas en esta área (SARH, 1992).

La mayor parte de la zona reforestada corresponde a la zona oriente, de ahí el interés del Proyecto en esta área. La zona oriente de la Cuenca de México cubre las cuencas de los ríos Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec. Las especies más utilizadas en la reforestación fueron: *Pinus radiata*, *Pinus montezumae*, *Casuarina sp.*, *Eucalyptus sp.* y *Cupressus sp.*

2.7.3. Zonas Nopaleras

Son comunidades vegetales que se desarrollan en áreas recuperadas o en la etapa final de la recuperación, presentan un patrón de crecimiento muy irregular, también crecen en forma individual en las orillas de los canales. La comunidad esta constituida por el género *Opuntia* (nopal cardón). Se establece en parcelas experimentales y se utiliza como fruto comestible y forraje (SEMARNAP, 1996).

2.7.4. Zonas Urbanas.

Las zonas urbanas corresponden a 23 municipios (Figura. 2.7.4) del estado de México, parte del Distrito Federal y del estado de Tlaxcala. En el cuadro 2.7.4 se mencionan los nombres de los municipios así como su superficie, destacando que solo se tomó en cuenta la superficie que ocupan dentro de la zona de estudio.

En la Figura 2.0.3 se observa la distribución espacial de las localidades urbanas y rurales que forman parte de los municipios dentro de la zona de estudio.



Cuadro 2.7.4. Municipios del estado de México y superficie dentro de la zona de estudio.

Municipio	Superficie dentro del área de estudio (has.)	Municipio	Superficie dentro del área de estudio (has.)
Acolman	8195	Papalotla	326
Atenco	6933	San Martín de las Pirámides	6504
Axapusco	10426	Tecamac	693
Chalco	16996	Temascalapa	200
Chiautla	2576	Teotihuacán	8236
Chicoloapan	6201	Tepetlaoxtoc	16373
Chiconcuac	659	Texcoco	36343
Chimalhuacán	4377	Tezoyuca	1266
Ecatepec	256	Tlalmanalco	11400
Ixtapaluca	21427	Valle de Chalco	2692
Nezahualcoyotl	430	Distrito Federal	1617
Nopaltepec	948	Tlaxcala	571
Otumba	12969		

Fuente: SEMARNAP,

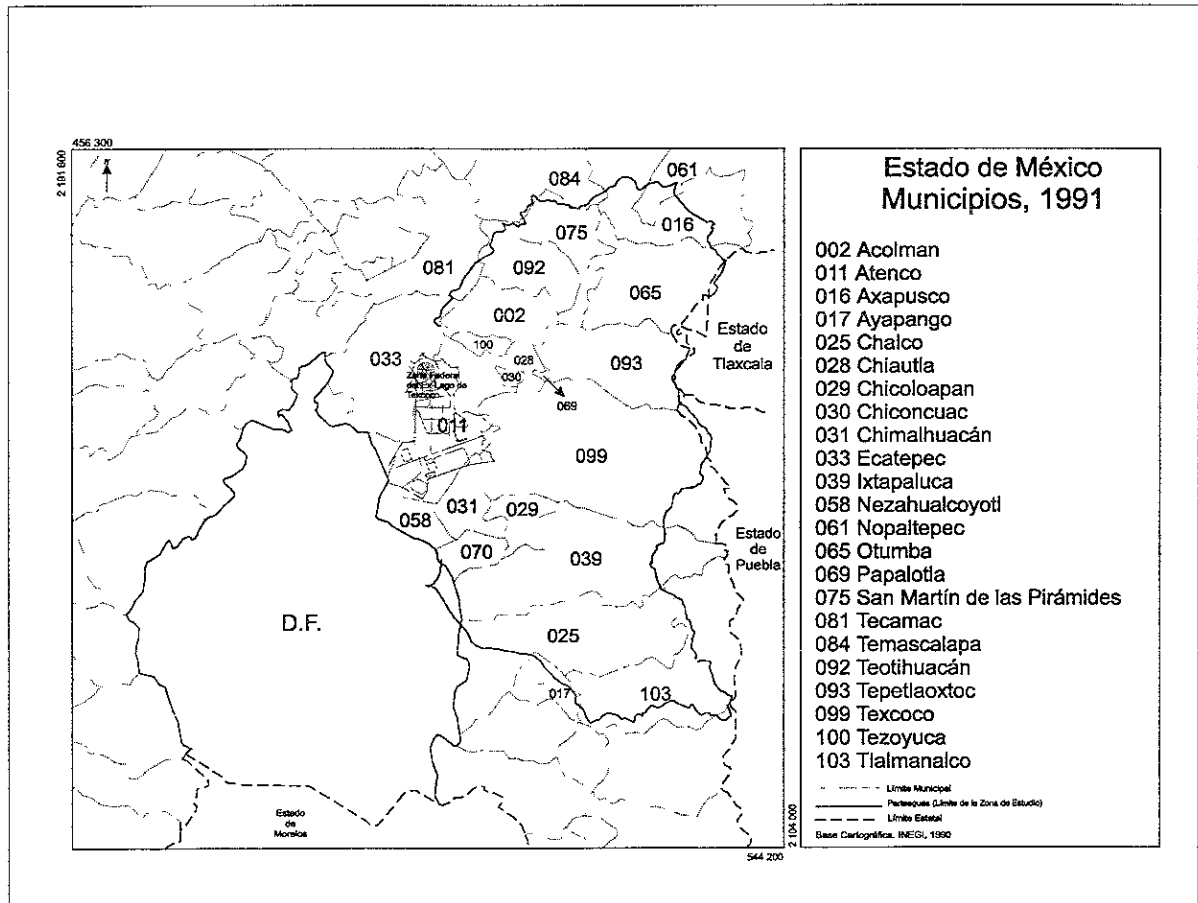


Figura. 2.7.4. Ubicación de los municipios del estado de México que se encuentran dentro de la zona de estudio.

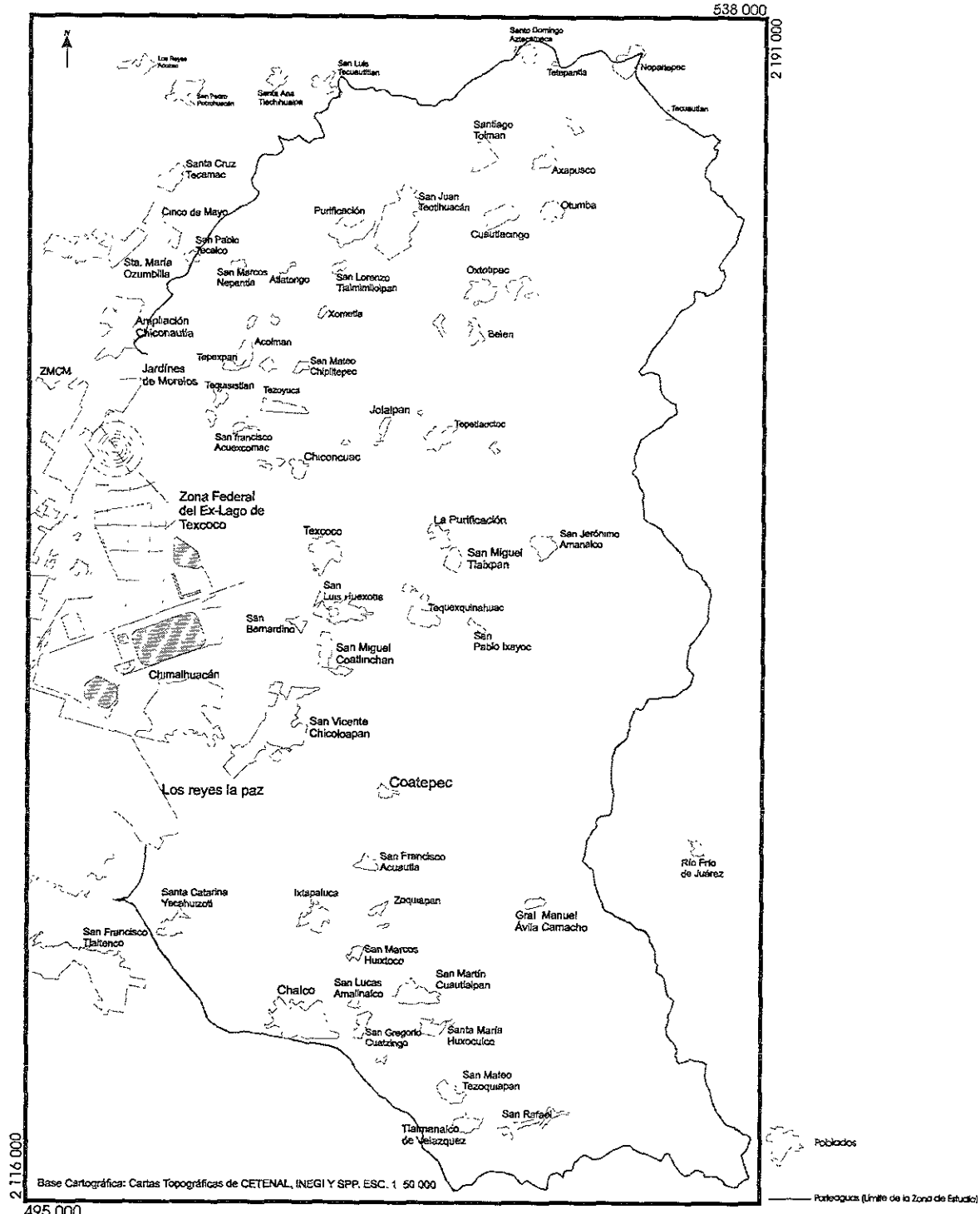


Figura. 2.0.3 Ubicación geográfica de las localidades dentro de la zona de estudio



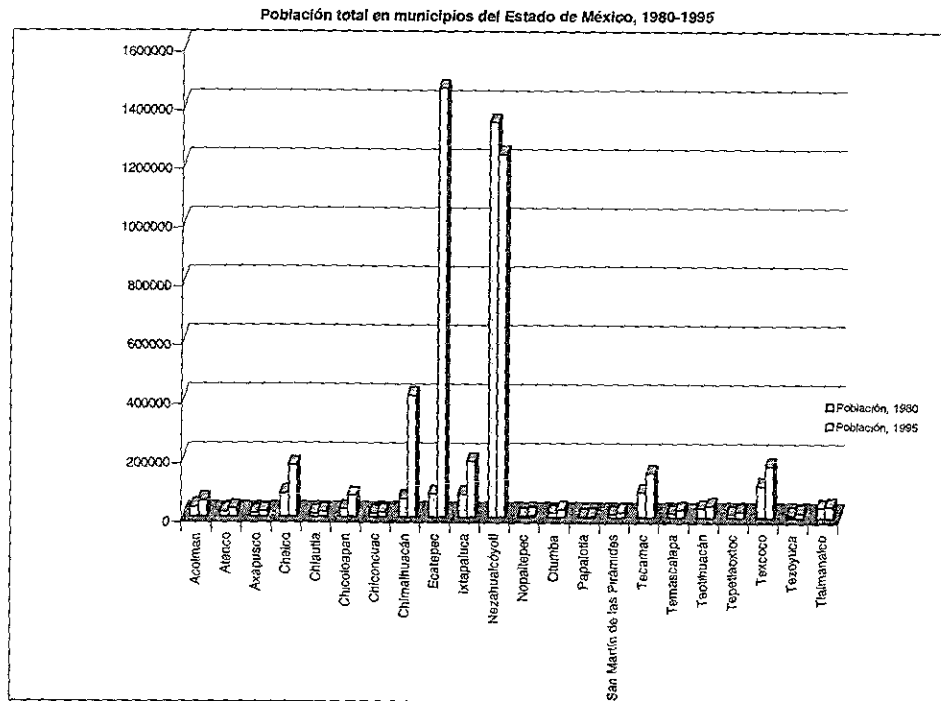
2.8 Población

En el Cuadro 2.1.1 se especifica la población absoluta de cada uno de los municipios que forman parte de la zona de estudio. Ecatepec y Nezahualcóyotl son los municipios con la mayor cantidad de población en tanto que el de menor es Nopaltepec. Aunque también hay que destacar a Chalco, Chimalhuacán y Texcoco como municipios que presentan valores altos de población (ver Figura. 2.1.1).

Cuadro. 2.1.1. Población Total por municipio en 1995.

Población Total, 1995					
Municipio	Población, 1980	Población, 1995	Municipio	Población, 1980	Población, 1995
Acolman	32 316	54 468	Nopaltepec	3 929	6 492
Atenco	16 418	27 988	Otumba	14 509	25 415
Axapusco	12 207	17 848	Papalotla	1 769	2 998
Chalco	78 393	175 521	San Martín de las Pirámides	10 610	16 881
Chiautla	10 618	16 602	Tecamac	84 129	148 432
Chicoloapan	27 354	71 351	Temascalapa	12 698	24 440
Chiconcuac	11 371	15 448	Teotihuacán	30 140	39 183
Chimalhuacán	61 816	412 014	Tepetlaoxtoc	10 019	19 380
Ecatepec	784 507	1 457 124	Texcoco	105 851	173 106
Ixtapaluca	77 862	187 690	Tezoyuca	7 567	16 338
Nezahualcóyotl	1 341 230	1 233 868	Tlalnahuacán	34 071	38 396

Fuente: X Censo General de Población y Vivienda 1980, XI 1990 y Censo de Población y Vivienda 1995 (INEGI)

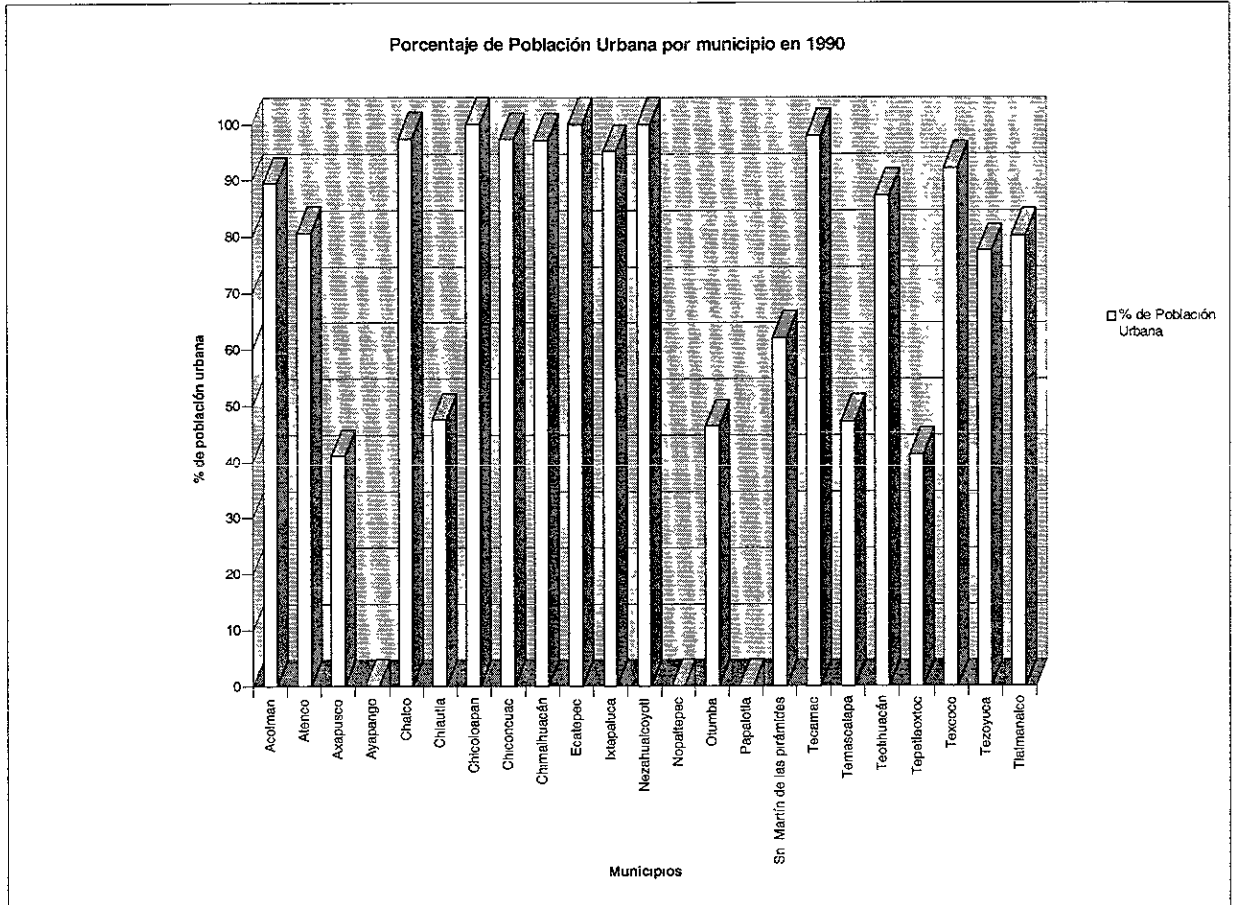


Fuente: XI Censo General de Población y Vivienda 1990, y Censo de Población y Vivienda 1995 (INEGI)

Figura. 2.1.1. Representación gráfica del porcentaje de población en municipios del estado de México.



Los municipios que tienen el mayor porcentaje de población urbana son: Chicoloapan (100%), Ecatepec (100%), Nezahualcóyotl (99%), Tecamac (98%), Chalco (97%) y Texcoco (92%). Los municipios de Ayapango, Nopaltepec y Papalotla son los que tienen el 100 % de población rural (ver Figura 2.1.2).



Fuente: XI Censo General de Población y Vivienda 1990, y Síntesis de resultados, 1990 (INEGI)
 Figura. 2.1.2. Municipios del estado de México con población urbana, 1990. En esta gráfica además de estar representada la población urbana se puede inferir la población rural.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Este capítulo se compone de varios apartados dentro de los cuales, primeramente, se encuentran los resultados del análisis de componentes principales. Por medio de matrices de error se darán a conocer los resultados de exactitud obtenidos de las clasificaciones espectrales (supervisada y no supervisada), estos resultados se analizarán antes y después del mejoramiento por medio del SIG. Por otra parte mediante representaciones gráficas, en este caso sólo para las clasificaciones supervisadas se analizaron los cambios de uso del suelo que se han dado durante el periodo a analizar.

Cabe resaltar que los mapas finales de uso del suelo solo abarcan la zona de estudio comparable en las tres fechas.

3.0 RESULTADOS

3.0.1 Componentes Principales

El análisis de componentes principales es una técnica utilizada para remover o reducir redundancias de información multiespectral. En este caso el análisis se hizo con el fin de conocer qué bandas y en qué porcentaje contribuían mejor a la explicación de la varianza espectral.

De los resultados que se obtuvieron durante el análisis digital de las imágenes de satélite, específicamente en el análisis de los componentes principales, se tiene que para la escena norte de 1973 (Tabla 3.0.1) el primer componente principal presenta un alto contenido de información espectral en la banda 1 (0.46) y en la banda 4 (0.35), en el segundo componente principal la banda uno presenta un valor alto (0.52); sin embargo, el valor más alto se encuentra en la banda 2 (0.76) siendo también el máximo valor de todos los componentes. En el tercer componente los valores altos (0.52) se presentan en las bandas uno y tres, en el cuarto componente el valor más alto se presenta en la banda 1 (0.49). Con base en los *eigenvalores*, las bandas seleccionadas para realizar las clasificaciones multiespectrales fueron, por lo tanto, las cuatro bandas mencionadas ya que aunque la mayor cantidad de información espectral se encuentra en las tres primeras bandas no se



descartó la cuarta (Infrarrojo cercano) porque también proporciona información importante para clasificar algunos elementos, tales como la vegetación.

Tabla 3.0.1 *Eigenvalores* correspondientes a los cuatro componentes principales de la escena norte, 1973

Parte norte 1973	ban173	ban273	ban373	ban473
comprinc1	0.46	0.09	-0.81	0.35
comprinc2	0.52	0.76	0.26	-0.29
comprinc3	0.52	-0.31	0.52	0.6
comprinc4	0.49	-0.57	-0.07	-0.66
Varianza por banda	98.46	1.28	0.17	0.08

En la escena sur de 1973 (Tabla 3.0.2) el primer componente principal presenta el valor más alto en la banda uno (0.49), el segundo componente la banda dos presenta el valor más alto (0.82) este es el máximo valor, en el tercer componente las bandas uno y cuatro presentan el mismo valor (0.56) en tanto que banda tres presenta un valor de 0.59, para el caso del cuarto componente el valor más alto se encuentra en la banda cuatro (0.72) y la banda uno presenta un valor de 0.44. Las bandas con las que se trabajaron fueron la dos, tres y cuatro.

Tabla 3.0.2 *Eigenvalores* correspondientes a los cuatro componentes principales de la escena sur, 1973

Parte sur 1973	ban173	ban273	ban373	ban473
comprinc1	0.49	0.19	-0.8	0.3
comprinc2	0.5	0.82	0	0.28
comprinc3	0.56	-0.15	0.59	0.56
comprinc4	0.44	-0.52	0.13	0.72
Varianza por banda	94.46	4.83	0.45	0.26

En la escena norte de 1985 (Tabla 3.0.3) el primer componente principal presenta un alto contenido de información espectral en la banda cuatro (0.84) así como también en la banda tres (0.37), en el segundo componente la banda uno presenta el valor más alto (0.59), el tercer componente principal presenta dos valores altos en la banda tres (0.69) y en la banda uno (0.46), por último en el cuarto componente principal las bandas uno y dos presentan valores altos iguales (0.56). Para este caso se trabajó también con las cuatro bandas.

Tabla 3.0.3 *Eigenvalores* correspondientes a los cuatro componentes principales de la escena norte de 1985

Parte norte 1985	ban185	ban285	ban385	ban485
comprinc1	0.36	-0.17	0.37	0.84
comprinc2	0.59	0.72	-0.2	-0.31
comprinc3	0.46	0.37	0.69	-0.42
comprinc4	0.56	0.56	-0.59	0.13
Varianza por banda	95.77	3.86	0.21	0.17

Para la escena de la parte sur de 1985 (Tabla 3.0.4) el primer componente principal presenta el valor más alto en la banda uno (0.49), en el segundo componente la banda dos presenta el valor más representativo de todos los valores (0.82), en el tercer componente las bandas uno y cuatro presentan valores similares (0.56) y la banda tres presenta un valor más alto (0.59). En el caso del cuarto componente la banda cuatro presenta el valor más alto (0.72) y la banda uno presenta el valor de 0.44. Por lo tanto se usaron las bandas 4,3, y 2.

Tabla 3.0.4 *Eigenvalores* correspondientes a los cuatro componentes principales de la escena sur, 1985

Parte sur 1973	ban173	ban273	ban373	ban473
comprinc1	0.49	0.19	-0.8	0.3
comprinc2	0.5	0.82	0	0.28
comprinc3	0.56	0.15	0.59	0.56
comprinc4	0.44	-0.52	0.13	0.72
Varianza por banda	94.46	4.83	0.45	0.26

Los componentes principales de la imagen Spot (Tabla 3.0.5) presentan las siguientes características: en el primer componente la banda dos presenta el valor de 0.65 y la banda uno 0.63; en el segundo componente los valores altos se encuentran en las bandas uno (0.26) y dos (0.34); en lo que respecta al tercer componente la banda dos (0.68) es la que presenta el valor más alto y el más representativo de todos los valores. Por lo tanto se usaron las bandas 3,2 y 1.

Tabla 3.0.5 *Eigenvalores* correspondientes a los cuatro componentes principales de la escena Spot, 1994

	ban194	ban294	ban394
comprinc1	0.63	0.65	0.43
comprinc2	0.26	0.34	-0.9
comprinc3	-0.73	0.68	0.04
Varianza por banda	67.87	31.62	0.51



3.0.2. Exactitud de las clasificaciones espectrales.

A fin de determinar la exactitud de cada clasificación la selección de píxeles se hizo con base en información de gabinete para compararlos con los resultados de la clasificación mediante matrices de error. Estos píxeles pertenecen a un grupo de información diferente al que se utilizó para definir los campos de entrenamiento. Cabe aclarar que las matrices de error se realizaron por escena de imagen, es decir, en parte norte y parte sur; esto debido a que las fechas de las imágenes no coinciden y por lo tanto los resultados no pueden ser comparables. En la matriz de error también es posible conocer los errores por inclusión (errores por comisión) y los errores por exclusión (errores por omisión). El error por comisión (exactitud del usuario) es la probabilidad de que un píxel representado en el mapa a evaluar pertenezca al uso real en el terreno. El error por omisión es la probabilidad de que un sitio existente de referencia sea correctamente clasificado (United States Department of Agriculture, 1995). Los materiales de referencia fueron mapas temáticos, fotografías aéreas convencionales y digitales, video y fotografías de campo.

3.0.2.1. Matrices de error de las clasificaciones no supervisadas sin mejoramiento

a) Clasificaciones no supervisadas, 1973.

En el proceso de las clasificaciones no supervisadas para 1973 (parte norte y sur) se generaron 30 clases para cada una, considerando como clase el valor cero (píxeles no clasificados). Una vez reagrupados, el número de clases finales fue de cuatro para la parte norte y seis para la parte sur (Tabla 3.0.2.1)

Tabla 3.0.2.1 Resultados generales de las clasificaciones no supervisadas. Partes Norte y Sur, 1973

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Agricultura	64.67	Agricultura	35.73
Matorral/Pastizal	16.88	Bosque de Pino Encino	18.01
Bosque	08.38	Bosque de Pino	09.32
Píxeles no clasificados	10.07	Pastizal Inducido	24.94
		Pastizal Halófilo	02.21
		Píxeles no clasificados	09.79
Total	100		100

Con el fin de evaluar la exactitud de las clasificaciones se generaron las matrices de error, en este caso para 1973 (figuras 3.0.2.1 y 3.0.2.2) se presentan tanto los mapas de dichas clasificaciones como sus respectivas matrices.

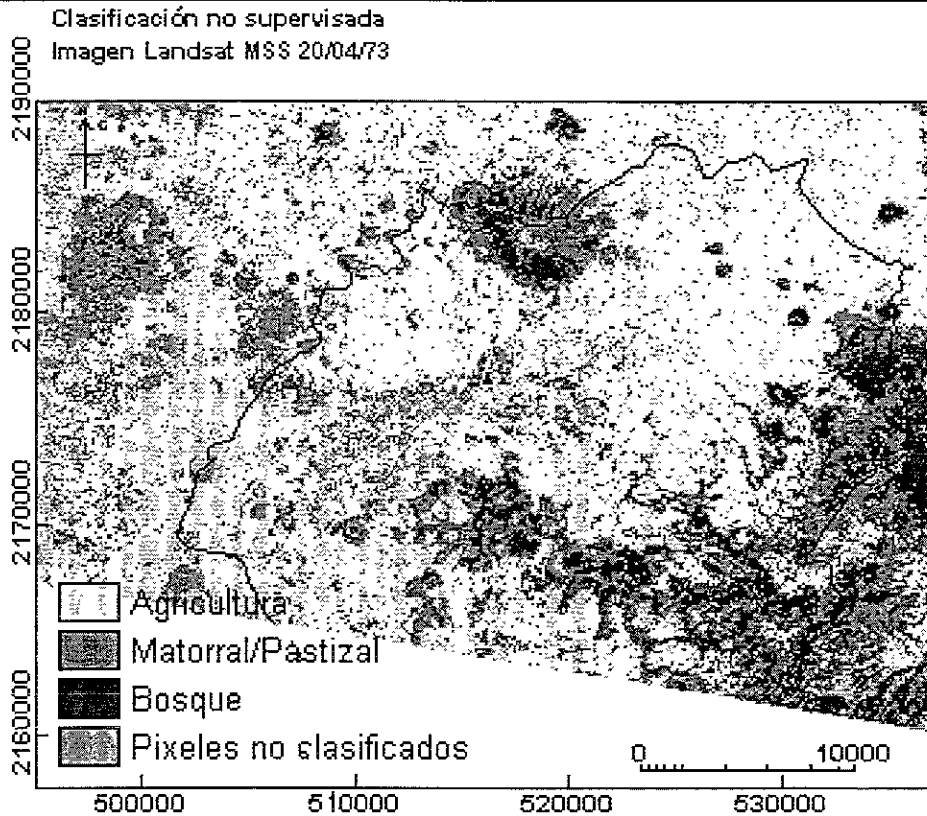


Figura. 3.0.2.1. Clasificación no supervisada, Norte 1973.

MATRIZ DE ERROR				
USO INEGI				
USO EN CLASIFICACIÓN	BOSQUE	MATORRAL	AGRICULTURA	TOTAL
BOSQUE	16	4	2	26
MATORRAL/PASTIZAL	7	15	23	55
AGRICULTURA	5	2	153	180
TOTAL	28	21	178	261

Exactitud: 70%	
Errores por omisión:	Errores por comisión:
Bosque: 57%	Bosque: 62%
Matorral: 72%	Matorral: 23%
Agricultura: 86%	Agricultura: 85%

De un total de 261 sitios de corroboración, los resultados de exactitud global obtenidos refieren a un **70%**. El mayor porcentaje de exactitud se obtuvo en la agricultura con un **86%**. En lo referente al bosque (57% de exactitud) tuvo un 43% de confusión tendiente al matorral.

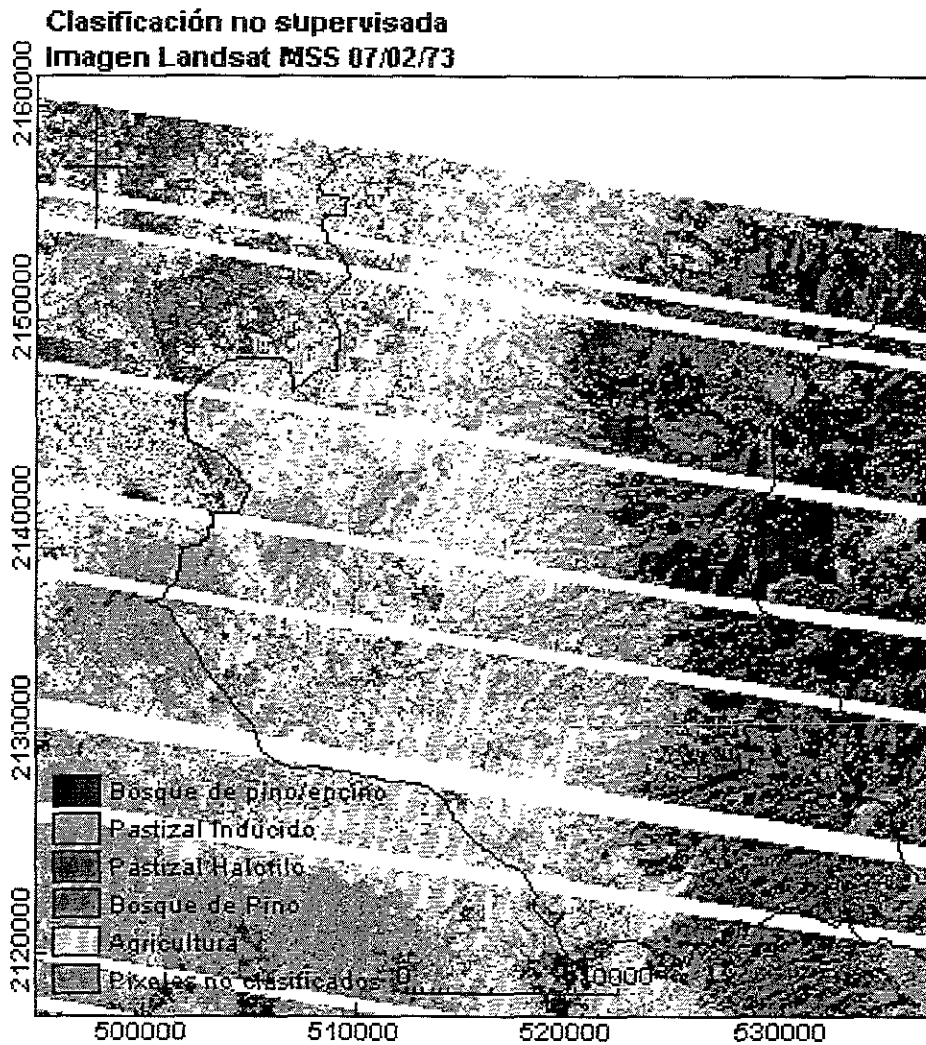


Figura. 3.0.2.2. Clasificación no supervisada, Sur 1973

USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI									TOTAL
	AGR. DE TEMP	AGR DE RIEGO	TULAR	PASTIZAL	ZONA URBANA	ÁREAS S/VEG	PAS. HALÓFILO	SUELO DESNUDO	BOSQUE	
PAST/AGR DE TEMP	131	12	5	34	2	1	11	0	5	201
BOSQUE	5	0	0	5	0	0	0	0	84	94
TOTAL	136	12	5	39	2	1	11	0	89	295
Exactitud: 73%										
Errores por omisión:					Errores por comisión:					
PAST/AGR DE TEMP = 96%					PAST/AGR DE TEMP = 65%					
BOSQUE = 94%					BOSQUE = 89%					

En este caso (porción sur 1973) el total de sitios de corroboración fue de 295 con una exactitud general de 73%. Para elaborar la matriz se reagruparon las clases de pastizales y bosques; sin embargo en el mapa se decidió manejarlas por separado. La clase de pastizal/agricultura de temporal presenta una exactitud del 96% lo cual indica que la confusión espectral fue baja. En lo referente a los bosques (pino y pino/encino) la exactitud fue bastante aceptable (94%).



b) Clasificaciones no supervisadas, 1985.

Para 1985 (parte norte y sur) en las clasificaciones no supervisadas se generaron 25 clases para cada una, considerando como clase el valor cero (píxeles no clasificados). Una vez reagrupados, el número de clases finales fue de cuatro para la parte norte y cinco para la parte sur (Tabla 3.0.2.2)

Tabla 3.0.2.2 Resultados generales de las clasificaciones no supervisadas. Partes Norte y Sur, 1985

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Pastizal/Agricultura de Temporal	62.27	Pastizal/Agricultura de Temporal	34.10
Agricultura de Riego	16.21	Suelo Desnudo	2.68
Bosque	12.06	Bosque	32.63
Píxeles no clasificados	9.46	Agricultura de Riego	18.84
		Píxeles no clasificados	11.75
Total	100		100

En la matriz de error de la clasificación no supervisada norte (Figura 3.0.2.3) de un total de 337 sitios de corroboración se obtuvo una exactitud del **85%**. La respuesta espectral del bosque es bastante admisible ya que tuvo una exactitud del **95%**. En el caso de la agricultura de riego (**75%**) y de temporal (**87%**) se obtuvieron exactitudes muy similares lo cual es debido a que las respuestas espectrales de ambas clases, por la resolución temporal (época de lluvias), es semejante.

Para el caso de la parte sur (Figura. 3.0.2.4) debido a se trata de una imagen en época de secas (enero), se diferenciaron los cultivos de riego y temporal; sin embargo existió una marcada confusión espectral entre estas clases por lo que se decidió omitir la clase de agricultura de riego y solo se tomó en cuenta la clase de pastizal/agricultura de temporal, la cual tuvo una exactitud del **63%**. Por otra parte el bosque se identificó de una manera muy aceptable y tuvo una exactitud del **98%** al igual que los suelos desnudos, con un porcentaje del **74%**. De manera global se obtuvo una exactitud del **69%** de un total de 306 puntos de corroboración.

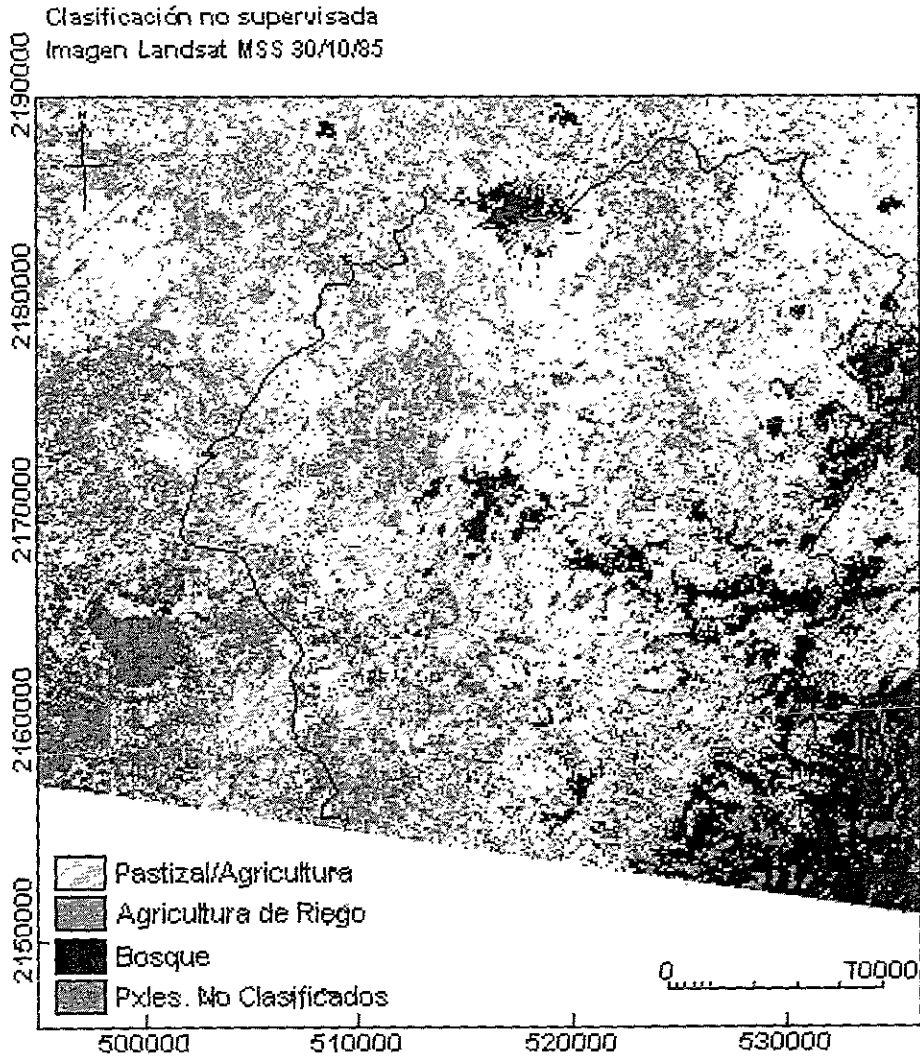


Figura. 3.0.2.3. Clasificación no supervisada, Norte 1985

MATRIZ DE ERROR						
USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989						
USO EN CLASIFICACIÓN	BOSQUE	PAS. AGR. DE TEMP.	AGR. RIEGO	ZONAS URBANAS	SUELO DESNUDO	TOTAL
BOSQUE	42	2	0	0	0	44
PAS. AGR. DE TEMP.	2	234	4	5	2	247
RIEGO	0	33	12	1	0	46
TOTAL	44	269	16	6	2	337
Exactitud: 85%						
Errores por omisión			Errores por comisión			
BOSQUE= 95%			BOSQUE= 95%			
PAS. AGR. DE TEMP.= 87%			PAS. AGR. DE TEMP.= 95%			
RIEGO=75%			RIEGO=26%			



Clasificación no supervisada
Imagen Landsat MSS 31/01/85

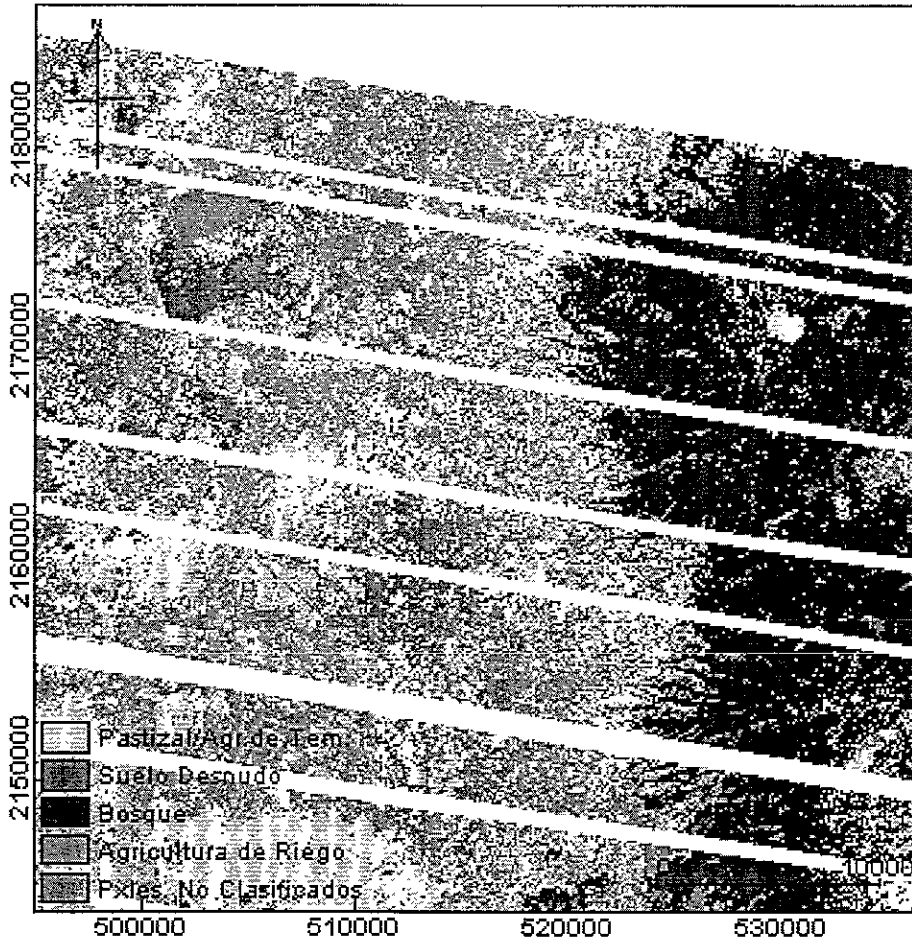


Figura. 3.0.2.4. Clasificación no supervisada, Sur 1985

MATRIZ DE ERROR					
USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989					
USO EN CLASIFICACIÓN	SUELO DESNUDO	ZONAS URBANAS	PAS. AGR. DE TEMP.	BOSQUE	TOTAL
SUELO DESNUDO	20	2	5	0	27
RIEGO	3	2	51	0	56
PAS. AGR. DE TEMP.	4	21	100	2	127
BOSQUE	0	0	4	92	96
TOTAL	27	25	160	94	306
Exactitud: 69%					
Errores por omisión:		Errores por comisión:			
SUELO DESNUDO= 74%		SUELO DESNUDO= 74%			
PAS. AGR. DE TEMP.=63%		PAS. AGR. DE TEMP.=79%			
BOSQUE= 98%		BOSQUE= 96%			



3.0.2.2. Matrices de error de las clasificaciones no supervisadas mejoradas

a) Clasificaciones no supervisadas mejoradas, 1973.

El proceso de mejoramiento por medio del SIG permitió incrementar las exactitudes globales de las clasificaciones, tanto para 1973 como para 1985. Este proceso se implementó para las clasificaciones no supervisadas y supervisadas. Con base en información de campo (solo de algunas subcuencas que forman parte de la zona de estudio), información videográfica y fotográfica digital de fecha reciente y en información referente al comportamiento de las cubiertas, se establecieron criterios para clasificar pixeles no clasificados y reclasificar los mal clasificados.

En el caso de las clasificaciones no supervisadas mejoradas de las partes norte y sur (Tabla 3.0.2.3) las clases se reagruparon pues tomando en cuenta sus porcentajes dentro de la clasificación, se observó que no eran representativos. Esto sucedió con el uso de suelo bosque, en donde no se pretendía conocer de qué tipo de bosque se trataba.

Tabla 3.0.2.3 Resultados generales de las clasificaciones no supervisadas mejoradas. Partes Norte y Sur, 1973

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Matorral/Pastizal	12.74	Pastizal	24.80
Bosque	09.66	Pastizal Halófilo	03.90
Agricultura	77.60	Bosque	28.48
		Agricultura	42.82
Total	100		100

El mejoramiento de las clasificaciones se realizó con enunciados *booleanos*, para mayor detalle ver apartado de métodos.



Clasificación no supervisada (mejorada)
 Imagen Landsat MSS 20/04/73

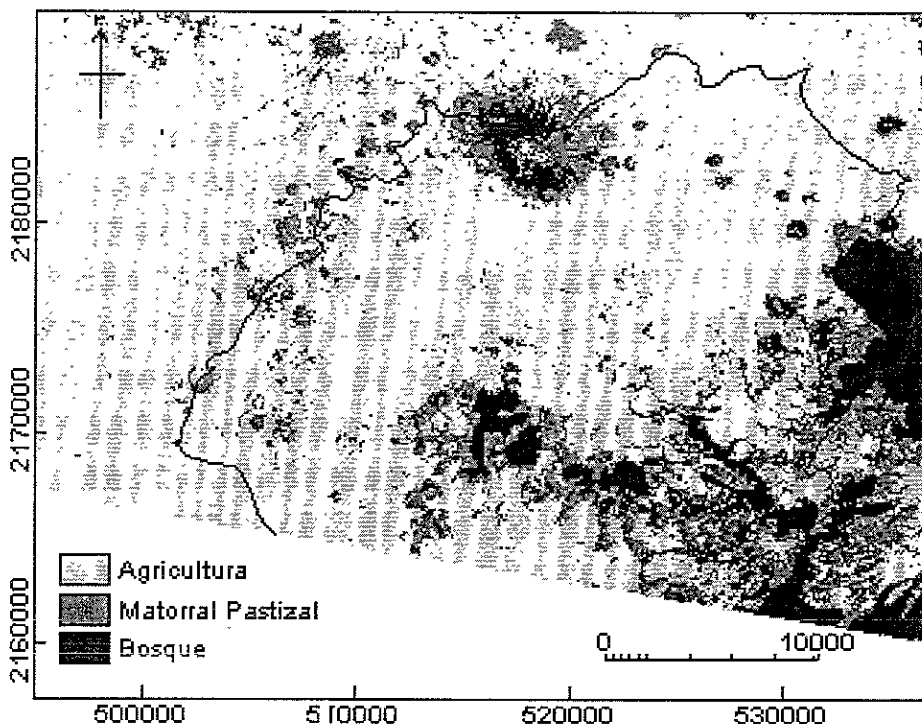


Figura 3.0.2.5. Clasificación no supervisada mejorada, Norte 1973

MATRIZ DE ERROR					
USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI				TOTAL
	AGRICULTURA	MATORRAL	BOSQUE	TULAR	
AGRICULTURA	193	26	6	2	227
MATORRAL/PASTIZAL	7	15	6	0	28
BOSQUE	3	5	20	0	28
TOTAL	203	46	32	2	283
Exactitud: 81%					
Errores por omisión		Errores por comisión			
AGRICULTURA =95%		AGRICULTURA =85%			
MATORRAL/PASTIZAL = 33%		MATORRAL/PASTIZAL =54%			
BOSQUE =63%		BOSQUE =71%			

De un total de 283 sitios de corroboración (Figura. 3.0.2.5) se obtuvo una exactitud general del 81%. La clase espectral que menor confusión espectral presentó fue la agricultura con 95% de exactitud, y la de mayor confusión fue el matorral/pastizal con 33% de exactitud.

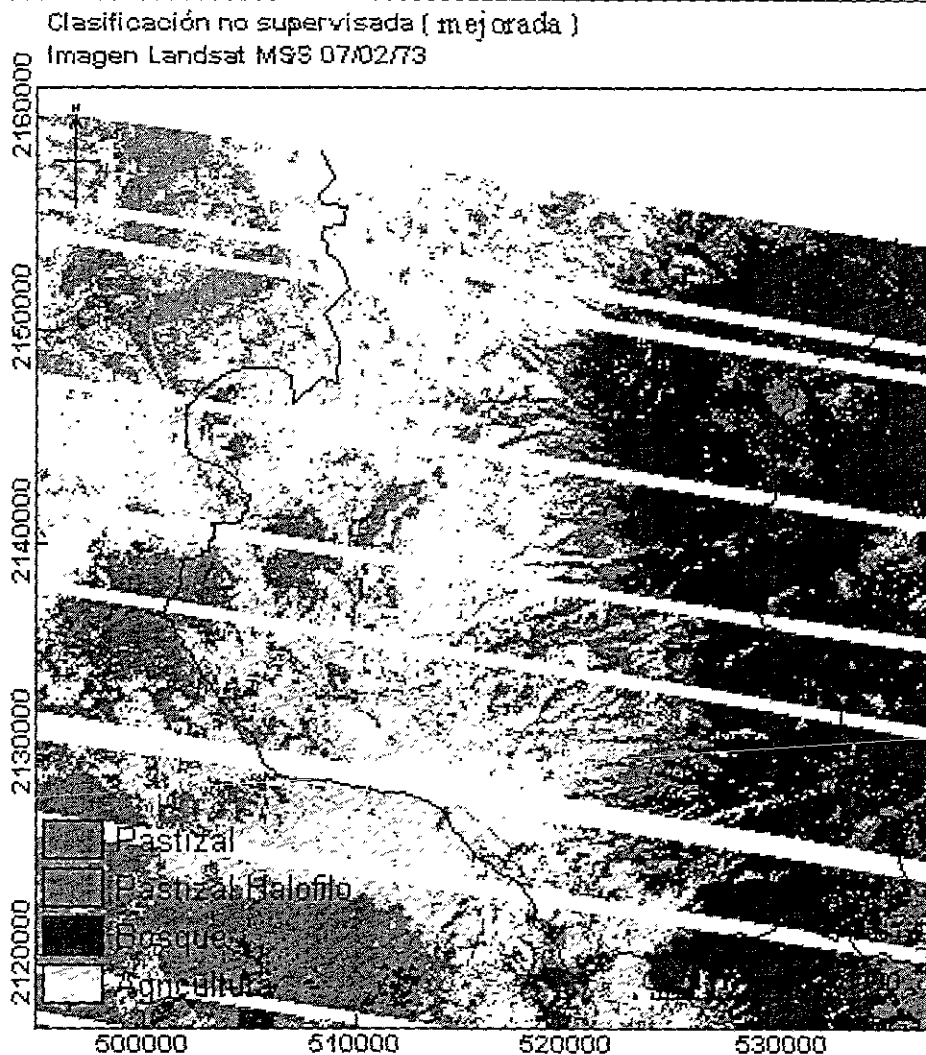


Figura 3.0.2.6. Clasificación no supervisada mejorada, Sur 1973

MATRIZ DE ERROR							
USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI						TOTAL
	PASTIZAL	PAST. HALÓFILO	BOSQUE	AGRICULTURA	ZONA URBANA	SUELO DESNUDO	
PASTIZAL	40	0	4	13	0	1	58
PAST HALÓFILO	0	12	0	5	0	3	20
BOSQUE	4	0	89	4	0	0	97
AGRICULTURA	6	10	2	160	1	0	179
TOTAL	50	22	95	182	1	4	354

Exactitud: 85%	
Errores por omisión	Errores por comisión
PASTIZAL=80%	PASTIZAL=69%
PAST HALÓFILO = 55%	PAST HALÓFILO = 60%
BOSQUE = 94%	BOSQUE = 92%
AGRICULTURA =88%	AGRICULTURA =89%

La exactitud global que se obtuvo al mejorar esta clasificación (sur 1973;Figura 3.0.2.6) fue de **85%**, esto de un total de 354 puntos de corroboración. El bosque (94%), la agricultura (88%) y el pastizal (80%) tuvieron exactitudes aceptables, en tanto que el pastizal Halófilo (55%) presentó confusiones con el suelo desnudo y la agricultura.



b) Clasificaciones no supervisadas mejoradas, 1985.

Una vez mejoradas las clasificaciones, el número de clases finales fueron de cuatro para la parte norte y cinco para la parte sur (Tabla 3.0.2.4).

Tabla 3.0.2.4 Resultados generales de las clasificaciones no supervisadas. Partes Norte y Sur, 1985

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Zonas Urbanas	2.79	Zonas Urbanas	4.18
Suelo desnudo	1.41	Suelo desnudo	62.41
Pastizal/Agricultura	82.84	Pastizal/Agricultura	6.87
Bosque	12.96	Bosque	25.86
		Cuerpos de Agua	0.68
Total	100		100

De la clasificación no supervisada mejorada norte (Figura 3.0.2.7) se obtuvo una exactitud global del **89%** considerando un total de 374 sitios de corroboración. La clase de pastizal/agricultura (98%) es la que presentó la mayor exactitud, aunque cabe mencionar que presentó cierta confusión con el suelo desnudo, cuya exactitud fue de un 24%. El bosque presentó una exactitud del 79%.

De un total de 313 sitios de corroboración para la parte sur (Figura 3.0.2.8) se obtuvo una exactitud de **85%**. El bosque presentó una exactitud de 95%, el pastizal/agricultura 89%, las zonas urbanas 60% y finalmente el suelo desnudo 28%

En el caso específico de la parte sur de la zona de estudio, además de tomar en cuenta variables ambientales, también se utilizaron mapas topográficos de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco para que de esta manera se eliminara información que no había sido clasificada.

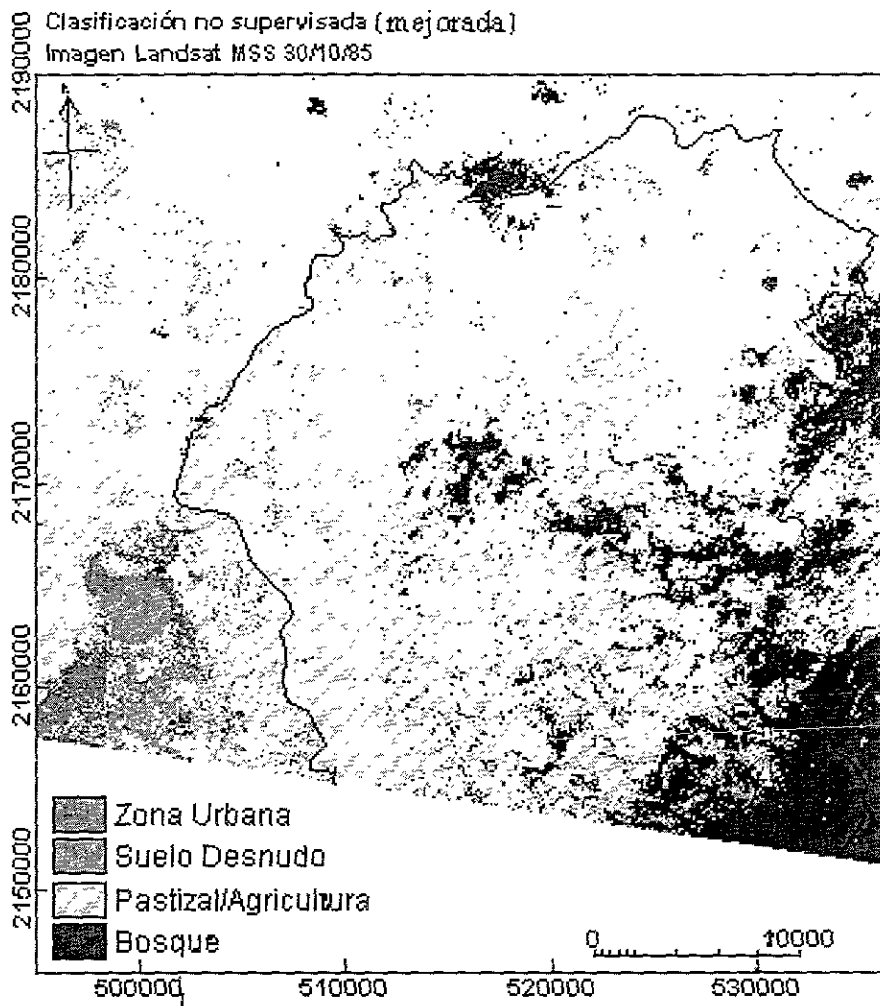


Figura. 3.0.2.7. Clasificación no supervisada mejorada, Norte 1985

MATRIZ DE ERROR					
USO EN FOTOGRAFÍA AÉREA 1989					
USO EN CLASIFICACIÓN	ZONA URBANA	SUELO DESNUDO	AGRICULTURA	BOSQUE	TOTALES
ZONA URBANA	0	0	0	0	0
SUELO DESNUDO	0	8	0	0	8
PASTIZAL/AGRICULTURA	3	25	286	10	324
BOSQUE	0	1	4	37	42
TOTAL	3	34	290	47	374
Exactitud: 89%					
Errores por omisión		Errores por comisión			
SUELO DESNUDO=24%		SUELO DESNUDO=100%			
PASTIZAL/AGRICULTURA=98%		PASTIZAL/AGRICULTURA=88%			
BOSQUE= 79%		BOSQUE= 88%			



Clasificación no supervisada (modificada)
Imagen Landsat MSS 31/01/85

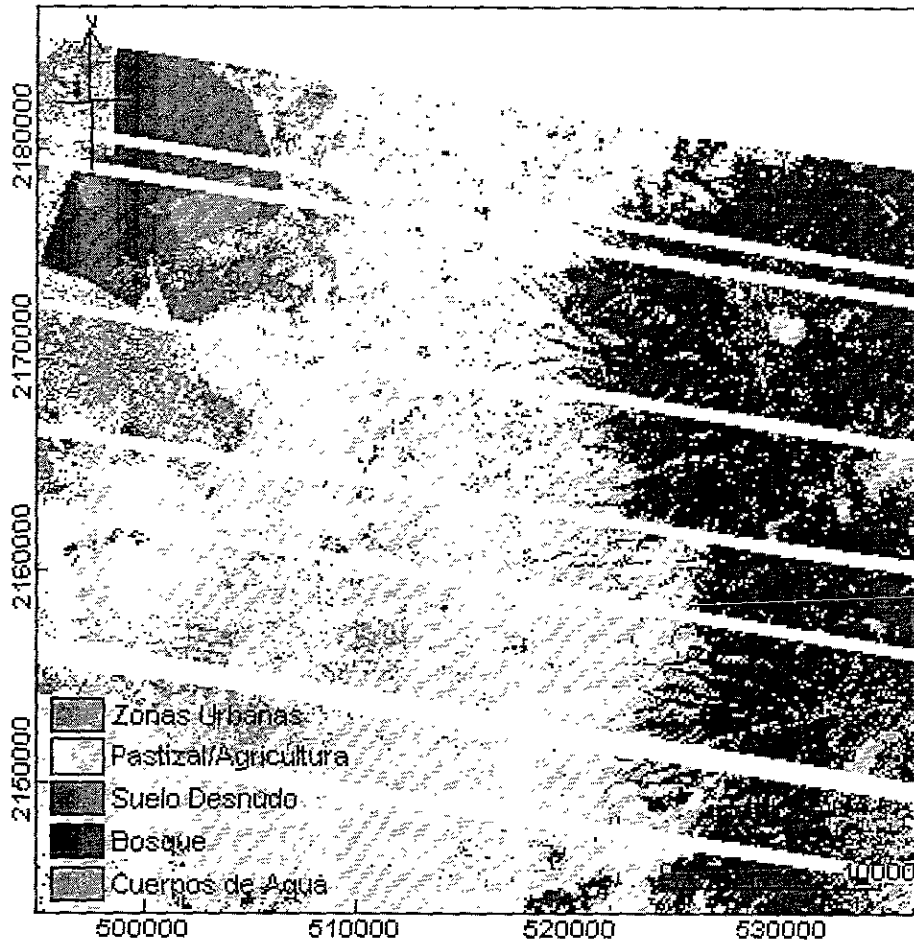


Figura. 3.0.2.8 Clasificación no supervisada mejorada, Sur 1985

MATRIZ DE ERROR					
USO EN CLASIFICACIÓN	USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989				
	ZONAS URBANAS	AGRICULTURA	SUELO DESNUDO	BOSQUE	TOTAL
ZONAS URBANAS	12	2	6	0	20
PAST/AGRICULTURA	6	146	9	5	166
SUELO DESNUDO	2	6	7	0	15
BOSQUE	0	9	3	100	112
TOTAL	20	163	25	105	313

Exactitud: 85%

Errores por omisión		Errores por comisión	
ZONAS URBANAS = 60%	PAST/AGRICULTURA = 89%	ZONAS URBANAS = 60%	PAST/AGRICULTURA = 88%
SUELO DESNUDO = 28%	BOSQUE = 95%	SUELO DESNUDO = 47%	BOSQUE = 89%



3.0.2.3. Matrices de error de las clasificaciones supervisadas sin mejoramiento

a) Clasificaciones supervisadas, 1973.

En el proceso de las clasificaciones supervisadas para 1973 (parte norte y sur) se generaron 15 clases para cada una. Una vez reagrupados, el número de clases finales fue de seis para la parte norte y seis para la parte sur (Tabla 3.0.2.5)

Tabla 3.0.2.5 Resultados generales de las clasificaciones supervisadas. Partes Norte y Sur, 1973

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Agricultura de riego	3.93	Agricultura de Riego	2.39
Bosque	5.19	Bosque	26.80
Matorral	9.54	Pastizal	17.86
Pas. Ind./Agr. de Temporal	62.92	Pas./Agr. de Temporal	42.18
Vegetación Acuática	0.04	Suelo Desnudo	5.46
Zona Urbana/Suelo Desnudo	18.38	Zonas Urbanas	5.31
Total	100		100

ESTE TEXTO NO DEBE
 SER USADO SIN LA
 AUTORIZACIÓN DE LA
 INSTITUCIÓN

Debido a que se tiene un mayor control sobre las clases a identificar, se pudieron discriminar un mayor número de clases con relación a las clasificaciones no supervisadas. Para la zona norte (Figura 3.0.2.9) de un total de 276 sitios de corroboración (en la matriz de error) se obtuvo una exactitud global de **75%**. En este caso se identificó la clase de vegetación acuática (100%) pero la cual no es significativa ya que es muy poca la extensión que ocupa; sin embargo para esta fecha se identificó este uso del suelo. La exactitud de la agricultura fue de 93% en este caso se agrupó la agricultura de riego y de temporal, aunque en el mapa se manejaron por separado. Las zonas urbanas (54%). El matorral (59%) presentó cierta confusión con el bosque el cual tuvo una exactitud de 22%. En el caso de la zona Sur (Figura 3.0.2.10) se logró una exactitud de global de **71%** derivado de una un total de 355 puntos de corroboración. El muestreo de las zonas urbanas (100%) y de la agricultura de temporal (91%) se considera bastante aceptable ya que su porcentaje de exactitud lo demuestra. El suelo desnudo (89%) y el bosque (88%) también presentan poca confusión espectral como se puede apreciar en sus porcentajes de exactitud.

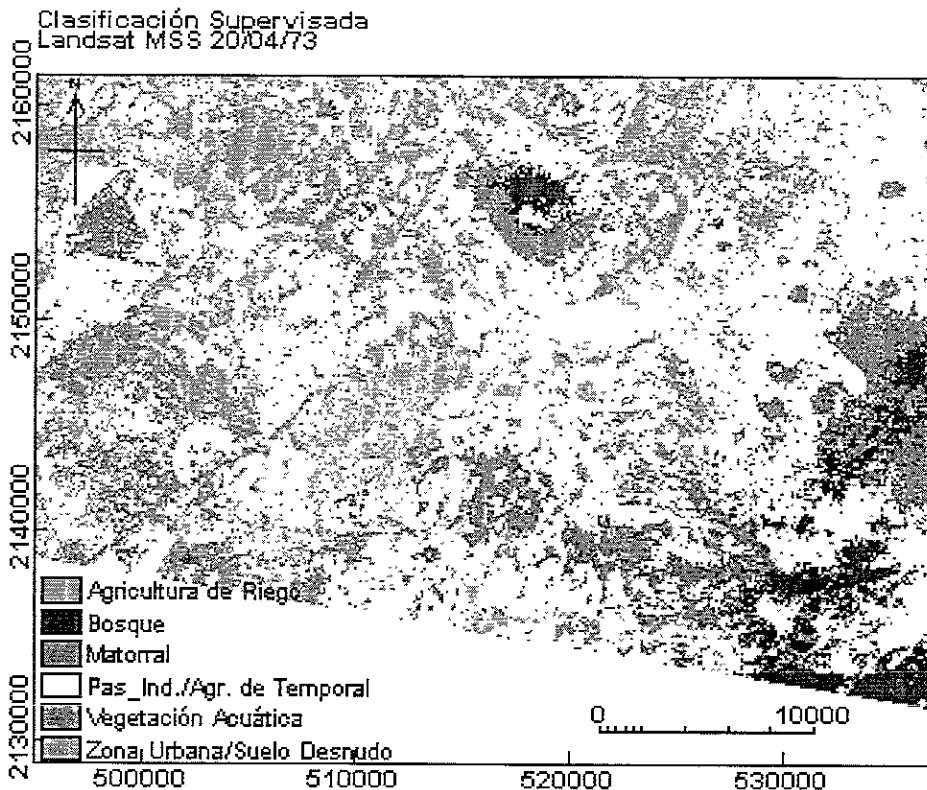


Figura. 3.0.2.9. Clasificación supervisada, Norte 1973

MATRIZ DE ERROR						
USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI					TOTAL
	BOSQUE	VEG. ACUÁTICA	MATORRAL	AGRICULTURA	PASTIZAL	
BOSQUE	7	0	0	3	5	15
VEG. ACUÁTICA	0	1	0	0	0	1
MATORRAL	13	0	10	2	4	29
AGRICULTURA	9	0	7	150	23	189
Z.URBANAS	2	0	0	6	38	46
TOTAL	31	1	17	161	70	276

Exactitud: 75%	
Errores por omisión	Errores por comisión
BOSQUE =22%	BOSQUE =47%
Veg. Acuática =100%	Veg. Acuática =100%
MATORRAL =59%	MATORRAL =34%
AGRICULTURA = 93%	AGRICULTURA = 79%
Z.URBANAS = 54%	Z.URBANAS = 83%

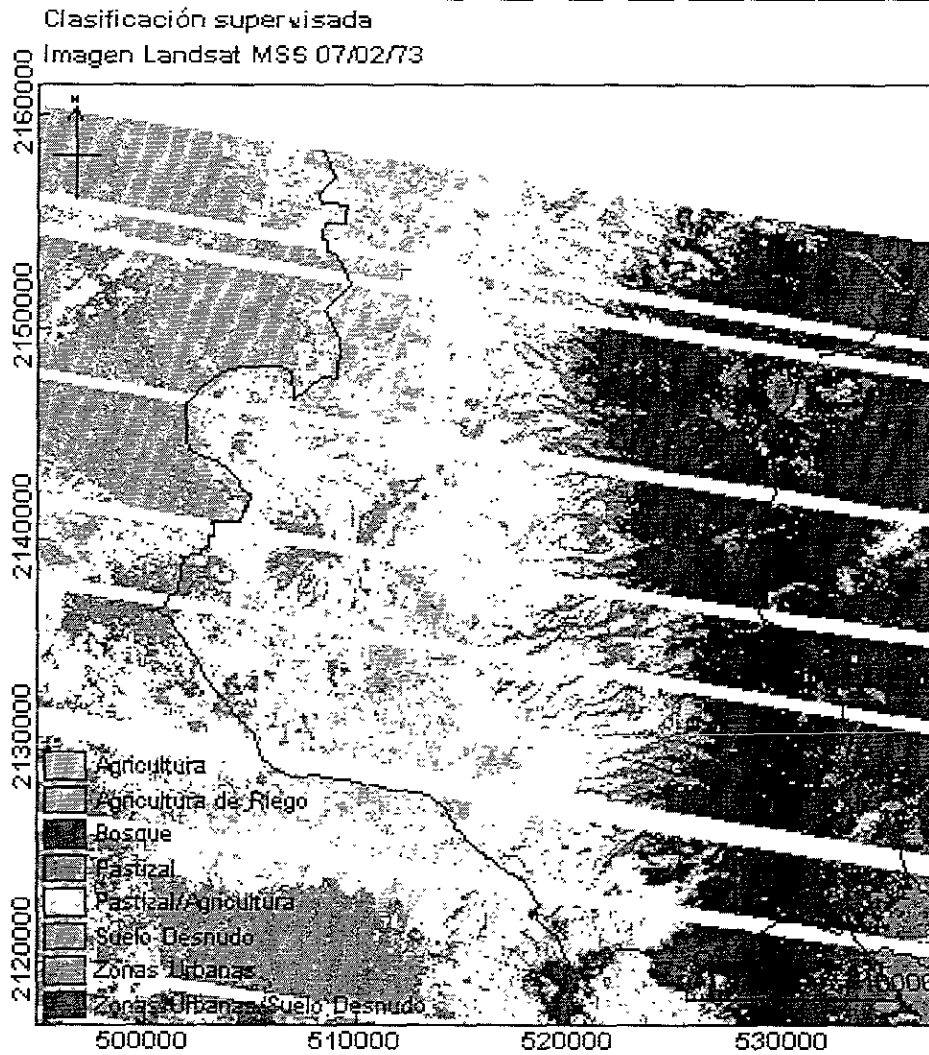


Figura. 3.0.2.10. Clasificación supervisada, Sur 1973

MATRIZ DE ERROR									
USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI								TOTAL
	ZONAS URBANAS	AGR. DE TEMPORAL	AGR. DE RIEGO	TULAR	PASTIZAL	PAST HALÓFILO	SLO DESNUDO	BOSQUE	
ZONAS URBANAS	15	2	1	0	8	5	1	0	32
AGR. DE TEMPORAL	0	135	12	2	33	4	0	11	197
AGR. DE RIEGO	0	6	9	9	0	0	0	0	24
SLO DESNUDO	0	3	0	0	0	7	8	0	18
BOSQUE	0	2	0	0	5	0	0	84	91
TOTAL	15	148	22	11	46	16	9	95	355

Exactitud: 71%	
Errores por omisión	Errores por comisión
ZONAS URBANAS=100%	ZONAS URBANAS=47%
AGR. DE TEMPORAL=91%	AGR. DE TEMPORAL=68%
AGR. DE RIEGO=41%	AGR. DE RIEGO=38%
SLO DESNUDO=89%	SLO DESNUDO=44%
BOSQUE=88%	BOSQUE=92%



b) Clasificaciones supervisadas, 1985.

En las clasificaciones supervisadas (norte y sur) de 1985 se generaron originalmente 10 clases para cada parte; sin embargo, se reagruparon algunas clases y quedaron seis para la parte norte y seis para la parte sur (Tabla 3.0.2.6). En ambos casos la agricultura de temporal/pastizal fue la que presentó mayor cantidad de información a clasificar.

Tabla 3.0.2.6 Resultados generales de las clasificaciones supervisadas. Partes Norte y Sur, 1985

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Agricultura de riego	9.68	Agr. de Riego	6.78
Bosque	11.35	Bosque	32.66
Cuerpos de agua	0.10	Cuerpos de Agua	00.66
Pastizal Agr. De Temporal	69.57	Agr. de Temporal/Pastizal	42.36
Suelo Desnudo	4.80	Suelo Desnudo	4.17
Vegetación Acuática	0.30	Zonas Urbanas	13.37
Zonas Urbanas	4.20		
Total	100		100

En la clasificación supervisada parte norte (Figura. 3.0.2.11) de un total de 336 puntos de corroboración se obtuvo una exactitud global de **94%**, la cual es más que aceptable ya que en este caso se pudieron identificar los diferente elementos con muy poca confusión, esto se puede comprobar observando los porcentajes de exactitud de cada clase.

Para el caso de la clasificación supervisada de la zona sur 1985 (Figura. 3.0.2.12) de 277 registros se obtuvo una exactitud del **91%**. Este caso las confusiones espectrales fueron casi nulas y solo se presentaron confusiones entre las zonas urbanas y las zonas de pastizal; así como entre el suelo desnudo y el pastizal.



Clasificación supervisada
Imagen Landsat MSS 30/10/85

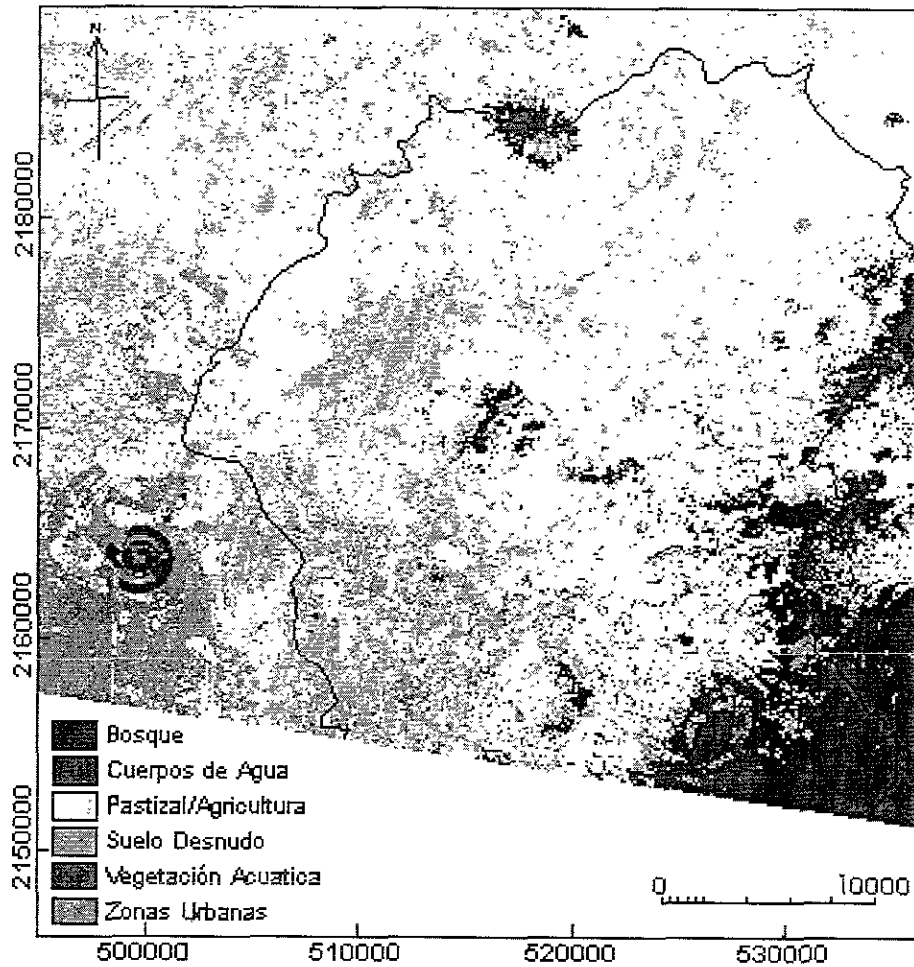


Figura. 3.0.2.11. Clasificación supervisada, Norte 1985

MATRIZ DE ERROR						
USO EN CLASIFICACIÓN	USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989					
	BOSQUE	ZONAS URBANAS	PAS. AGR. DE TEMP.	RIEGO	SUELO DESNUDO	TOTAL
BOSQUE	42	0	9	0	0	51
ZONAS URBANAS		6	2	0	0	8
PAS. AGR. DE TEMP.	1	0	248	0	0	249
RIEGO		0	2	17	0	19
SUELO DESNUDO	1	0	6	0	2	9
TOTAL	44	6	267	17	2	336

Exactitud: 94%	
Errores por omisión	Errores por comisión
BOSQUE=95%	BOSQUE=82%
ZONAS URBANAS=100%	ZONAS URBANAS=75%
PAS. AGR. DE TEMP.=93%	PAS. AGR. DE TEMP.=99%
RIEGO= 100%	RIEGO= 89%
SUELO DESNUDO= 100%	SUELO DESNUDO= 22%



Clasificación supervisada
 Imagen Landsat MSS 31/01/85

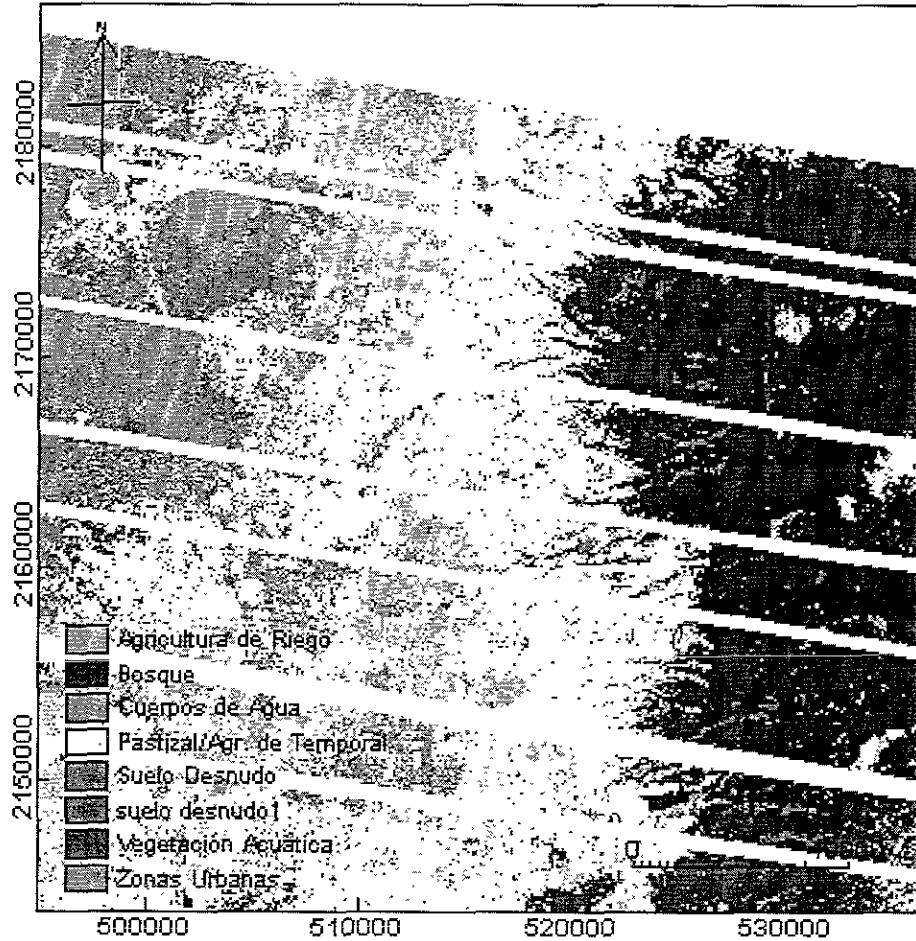


Figura. 3.0.2.12. Clasificación supervisada, Sur 1985

MATRIZ DE ERROR						
USO EN CLASIFICACIÓN	USO FOTOGRAFIA AÉREA 1989					
	ZONAS URBANAS	SUELO DESNUDO	PAS. AGR. DE TEMP.	BOSQUE	RIEGO	TOTAL
ZONAS URBANAS	23	2	8	0	0	33
SUELO DESNUDO	1	4	5	0	0	10
PAS. AGR. DE TEMP.	0	4	131	1	0	136
BOSQUE	0	0	2	93	0	95
RIEGO	0	0	2	0	1	3
TOTAL	24	10	148	94	1	277

Exactitud: 91%	
Errores por omisión:	Errores por comisión
ZONAS URBANAS= 92%	ZONAS URBANAS= 70%
SUELO DESNUDO=40%	SUELO DESNUDO=40%
PAS. AGR. DE TEMP.=88%	PAS AGR. DE TEMP =96%
BOSQUE= 99%	BOSQUE= 98%
RIEGO=100%	RIEGO=33%



c) Clasificaciones supervisadas, 1994.

Para el caso de la clasificación supervisada de 1994 solo se trabajó con un corte de imagen (Spot), es decir, la información no está dividida en norte y sur. De igual forma cabe especificar que a pesar de haber realizado las dos clasificaciones (no supervisada y supervisada) solo se realizó el cálculo de la matriz de confusión para la clasificación supervisada.

De un total de diez clases que se utilizaron al momento de tomar las muestras se reagruparon y finalmente se manejaron siete (Tabla 3.0.2.6). El suelo desnudo es el que ocupó el mayor porcentaje, 45.24% del 100%.

Tabla 3.0.2.6 Resultados generales de la clasificación supervisada, 1994

Escena completa	Porcentaje
Agr. De Temporal	27.8
Bancos de Material	1.4
Bosque	13.29
Cuerpos de Agua	0.56
Pastizal	5.70
Suelo Desnudo	45.24
Zonas Urbanas	6.01
Total	100

La matriz de error tuvo un porcentaje muy bajo de exactitud (65%); sin embargo es aceptable ya que el material de gabinete (fotografías aéreas, información detallada ver apartado de materiales) con el cual se comparó la información de la clasificación no permitió hacer una clasificación más fina debido a la diferencia de escalas entre las fotos y la imagen de satélite. Por lo anterior la exactitud de las clases también es baja la cual va desde 33% (bancos de material) hasta el máximo que fue el 81% (suelo desnudo). En esta clasificación la confusión fue muy amplia ya que en el compuesto de color (321) sobre el cual se muestreó había nubes las cuales si se tomaba muestra de suelo desnudo o de algunas minas estas (nubes) cuando se clasificaba toda la imagen tenían esta



confusión, esto se puede apreciar en el mapa. Entre las zonas boscosas (partes altas) aparecían minas.

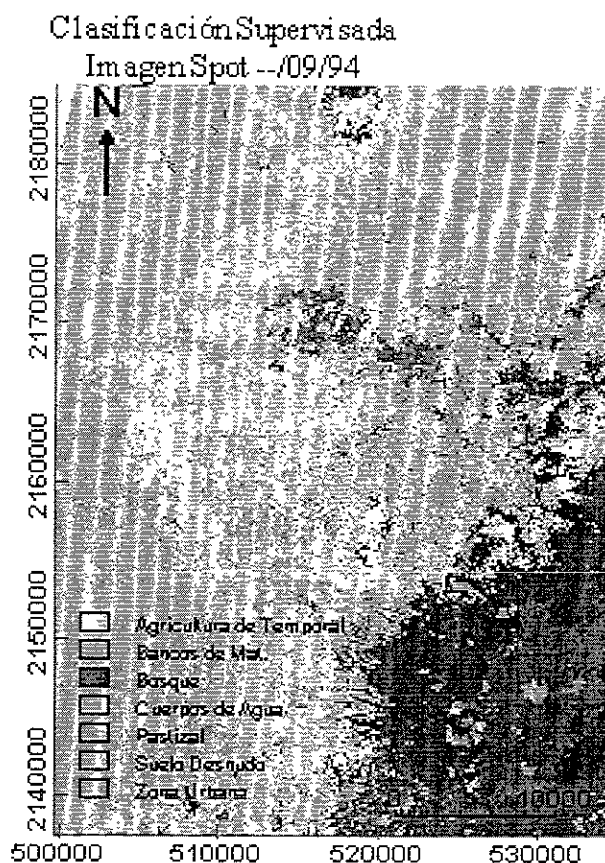


Figura. 3.0.2.13. Clasificación supervisada, 1994

MATRIZ DE ERROR								
USO EN FOTOGRAFÍAS								
USO EN CLASIFICACIÓN	AGRICULTURA	BANCOS DE MAT	BOSQUE	CPOS DE AGUA	PASTIZAL	SLO DESNUDO	ZONA URBANA	TOTAL
AGRICULTURA	95	1	1	0	0	2	2	101
BANCOS DE MAT	0	1	0	1	0	2	1	5
BOSQUE	8	0	50	0	0	3	4	65
CPOS DE AGUA	0	0	0	2	0	0	3	7
PASTIZAL	2	0	0	0	0	0	5	7
SLO DESNUDO	44	1	7	0	0	47	20	119
ZONA URBANA	6	0	0	1	0	4	25	36
TOTAL	155	3	58	4	0	58	62	340

Exactitud: 65%	
Errores por omisión	Errores por comisión
AGRICULTURA = 61%	AGRICULTURA = 94%
BANCOS DE MAT = 33%	BANCOS DE MAT = 20%
BOSQUE = 86%	BOSQUE = 77%
CPOS DE AGUA = 50%	CPOS DE AGUA = 29%
SLO DESNUDO = 81%	SLO DESNUDO = 40%
ZONA URBANA = 40%	ZONA URBANA = 69%



3.0.2.4. Matrices de error de las clasificaciones supervisadas mejoradas

a) Clasificaciones supervisadas mejoradas, 1973.

El mejoramiento por integración de información geográfica suplementaria (para más detalle, ver apartado correspondiente) permitió incrementar significativamente la exactitud de las clasificaciones espectrales. En algunos casos cuando algún pixel estaba clasificado diferente a agricultura y se encontraba dentro de un área perteneciente a un suelo sedimentario, el pixel se le reclasificó como agricultura ya que estos suelos son dedicados totalmente a la agricultura. Otro caso se dio con los pixeles clasificados como agricultura de riego, pero si se localizaban en una pendiente superior a 4°; estos pixeles fueron reclasificados como agricultura de temporal, esto debido a que teóricamente la agricultura de riego no puede desarrollarse en pendientes tan abruptas.

De acuerdo con lo antes descrito algunas clases se reagruparon, otras se eliminaron o en algunos casos se crearon nuevas clases. En la Tabla 3.0.2.7. se esquematizan los usos finales que se manejaron en las clasificaciones supervisadas del año indicado. Los usos de suelo identificados fueron muy parecidos entre ambas partes.

Tabla 3.0.2.7 Resultados generales de las clasificaciones supervisadas mejoradas. Partes Norte y Sur, 1973

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Bosque	26.96	Bosque	27.69
Pastizal	17.73	Cuerpos de Agua	0.61
Pastizal/Agricultura	44.2	Pastizal/Agricultura	50.76
Suelo Desnudo	6.01	Suelo Desnudo	11.98
Zonas Urbanas	5.1	Zonas Urbanas	8.96
Total	100		100

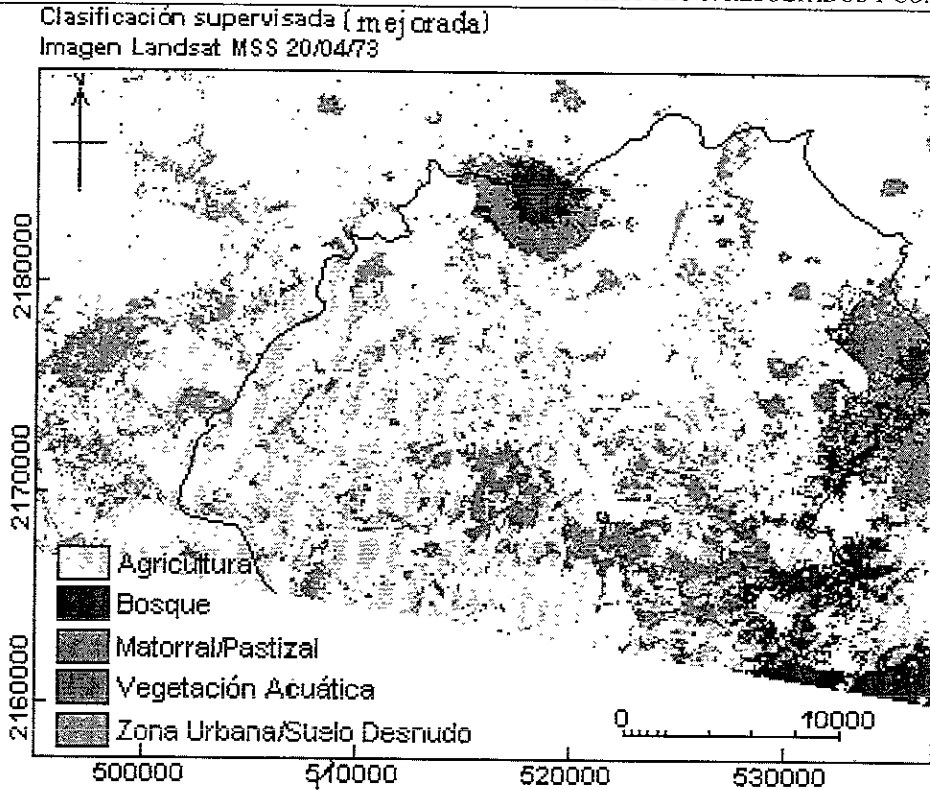


Figura. 3.0.2.14. Clasificación supervisada mejorada, Norte 1973

MATRIZ DE ERROR					
USO EN CLASIFICACIÓN	USO INEGI				TOTAL
	AGRICULTURA	BOSQUE	MATORRAL/PAST.	ZON. URB./SLO. DES.	
AGRICULTURA	210	0	8	4	222
BOSQUE	8	15	4	0	27
MAT/PASTIZAL	2	0	14	1	17
TOTAL	220	15	26	5	266
Exactitud: 86%					
Errores por omisión		Errores por comisión			
AGRICULTURA = 95%		AGRICULTURA = 94%			
BOSQUE = 100%		BOSQUE = 55%			
MAT/PASTIZAL = 54%		MAT/PASTIZAL = 82%			

En el caso de la clasificación supervisada mejorada de la parte norte de 1973 (Figura 3.0.2.14), se decidió reagrupar las clases de zonas urbanas y suelo desnudo en una sola. El porcentaje de exactitud global fue del 86% de un total de 266 sitios de corroboración. Las zonas de bosques contaron con una confusión nula (100% de exactitud). En el caso de la agricultura también tuvo una mejoría en su exactitud (95%).

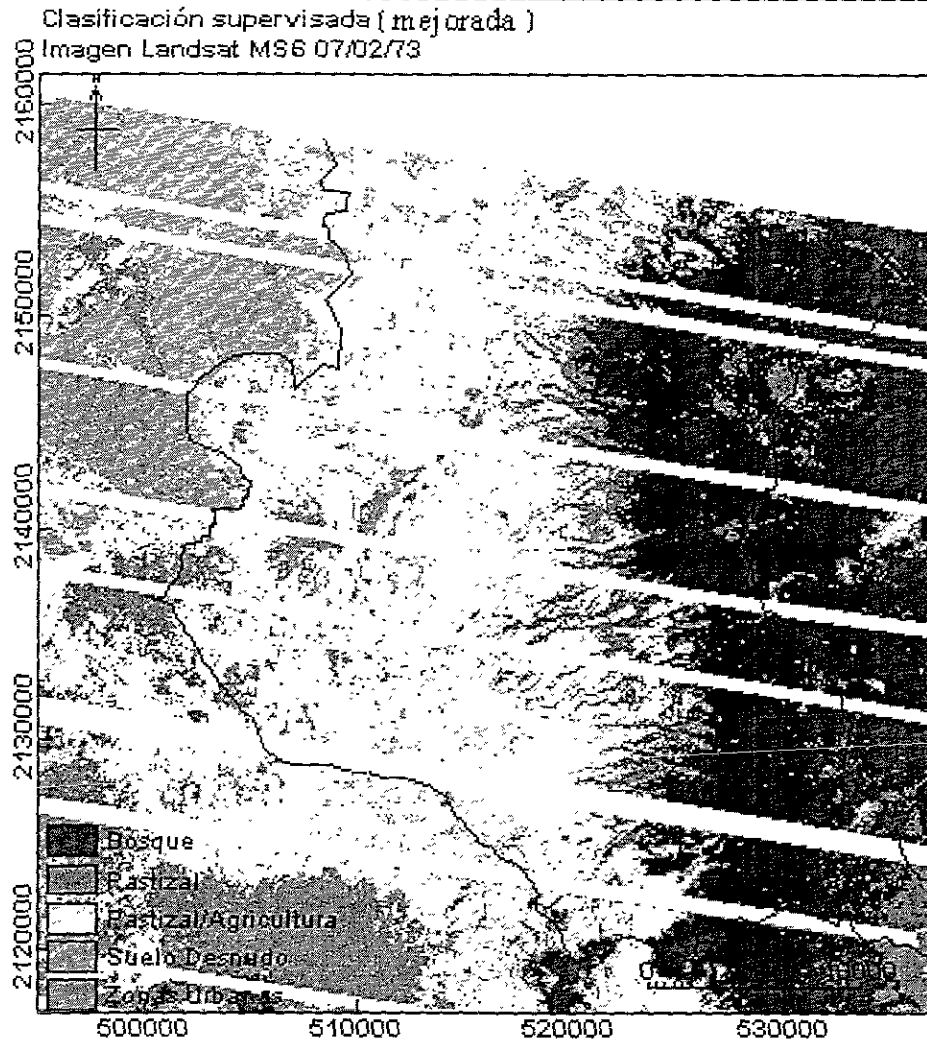


Figura. 3.0.2.15. Clasificación supervisada mejorada y matriz de confusión, Sur 1973

MATRIZ DE ERROR							
USO INEGI							
USO EN CLASIFICACIÓN	BOSQUE	PASTIZAL	AGRICULTURA	SUELO DESNUDO	ZONAS URBANAS	PAST. HALOFILO	TOTAL
BOSQUE	95						95
PASTIZAL	5	47		1			58
PAST/AGR.	2	10	153			3	168
SUELO DESNUDO			3	13	1	5	22
ZONAS URBANAS		8	3	1		3	15
TOTAL	102	65	164	15	1	11	358

Exactitud: 89%	
Errores por omisión	Errores por comisión
BOSQUE =93 %	BOSQUE =100 %
PASTIZAL =72%	PASTIZAL =81%
PAST/AGR. =93%	PAST/AGR. =91%
SUELO DESNUDO =87%	SUELO DESNUDO =59%

En la zona sur (1973), algunas clases se reagruparon y otras se eliminaron (Figura. 3.0.2.15). Con el mapa topográfico de la Zona Federal del Ex -Lago de Texcoco se eliminaron pixeles que habían



sido clasificados como zonas urbanas pero, por reconocimiento de campo se comprobó que no era así; ante esta situación estos pixeles fueron clasificados como suelo desnudo. En lo que se refiere a la matriz de error se obtuvo un porcentaje global de 86%.

b) Clasificaciones supervisadas mejoradas, 1985.

Con las clasificaciones mejoradas, el número de clases finales fue de cinco para la parte norte y cinco para la parte sur (Tabla 3.0.2.8).

Tabla 3.0.2.8 Resultados generales de las clasificaciones supervisadas mejoradas. Partes Norte y Sur, 1985

Parte Norte	Porcentaje	Parte Sur	Porcentaje
Bosque	10.23	Bosque	27.69
Cuerpos de agua	0.1	Cuerpos de Agua	0.61
Pastizal/Agricultura	80.36	Pastizal/Agricultura	50.76
Suelo Desnudo	5.2	Suelo Desnudo	11.98
Vegetación Lacustre	4.11	Zonas Urbanas	8.96
Total	100		100

En la parte norte (Figura 3.0.2.16) se obtuvo una exactitud global del 92% de un total de 374 registros para determinar la confusión espectral. La clase de pastizal/agricultura de temporal presentó una exactitud de 94%, bosque 90% y suelo desnudo 66%.

En el caso de parte sur (Figura 3.0.2.17) se obtuvo una exactitud global del 90% de un total de 320 sitios de control. En este caso el pastizal/agricultura con un 96% fue el que presentó la menor confusión espectral, el suelo desnudo fue la clase que presentó la mayor confusión y su exactitud fue de 62%.

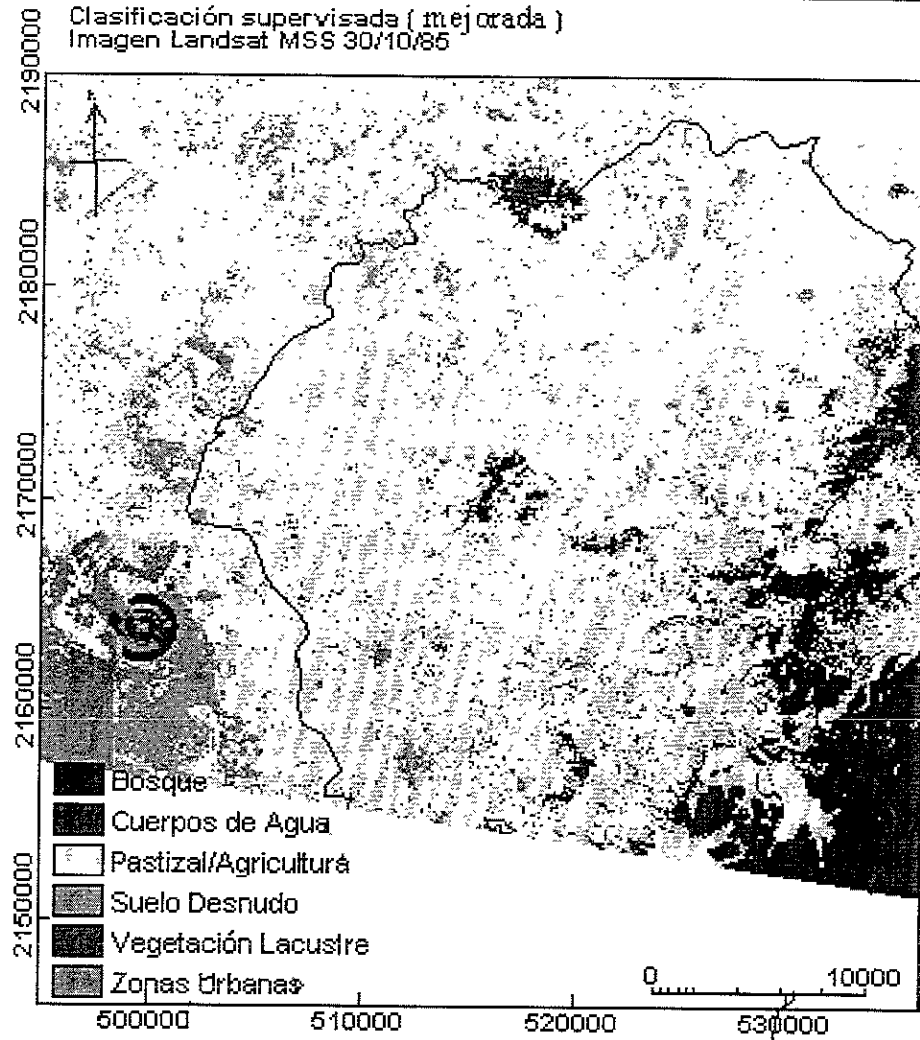


Figura. 3.0.2.16. Clasificación supervisada mejorada, Norte 1985

MATRIZ DE ERROR						
USO CLASIFICACIÓN	USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989					
	BOSQUE	AGRICULTURA	SLO. DESNUDO	VEG. ACUÁTICA	ZONAS URBANAS	TOTAL
BOSQUE	35	6	0	0	0	41
PAS. AGR. DE TEMP.	4	292	2	1	0	299
SLO. DESNUDO	0	8	10	0	0	18
VEG. ACUÁTICA	0	0	0	0	0	0
ZONAS URBANAS	0	6	3	0	7	16
TOTAL	39	312	15	1	7	374
Exactitud: 92%						
Errores por omisión			Errores por comisión			
BOSQUE=90%			BOSQUE=85%			
PAS. AGR. DE TEMP=94%			PAS. AGR. DE TEMP=98%			
SUELO DESNUDO =67%			SUELO DESNUDO =55%			



Clasificación supervisada (modificada)
Imagen Landsat MSS 31/01/85

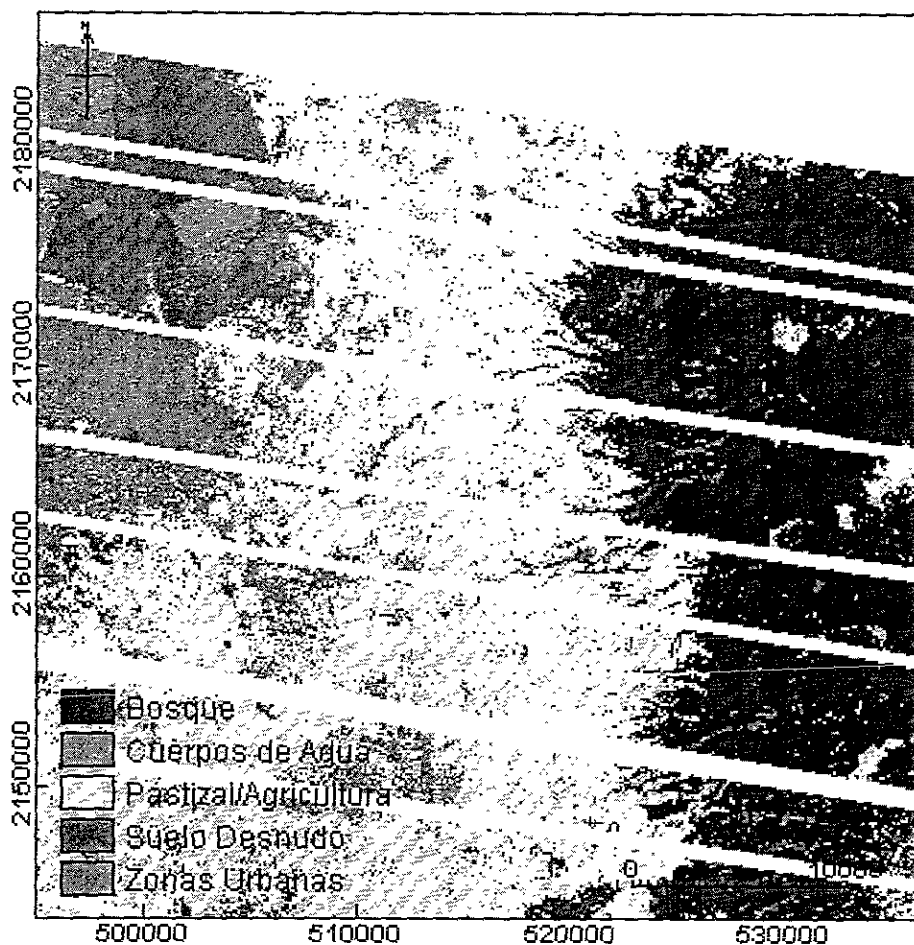


Figura. 3.0.2.17. Clasificación supervisada mejorada, Sur 1985

MATRIZ DE ERROR					
USO FOTOGRAFÍA AÉREA 1989					
USO EN CLASIFICACIÓN	BOSQUE	AGRICULTURA	SUELO DESNUDO	ZONAS URBANAS	TOTAL
BOSQUE	90	0	0	0	90
PAST/AGRICULTURA	8	172	6	5	191
SUELO DESNUDO	2	7	10	3	22
ZONAS URBANAS	0	0	0	17	17
TOTAL	100	179	16	25	320

Exactitud: 85%

Errores por omisión		Errores por comisión	
BOSQUE =90%	PAST/AGRICULTURA =96%	BOSQUE =100%	PAST/AGRICULTURA =90%
SUELO DESNUDO =62%	ZONAS URBANAS = 68%	SUELO DESNUDO =45%	ZONAS URBANAS = 100%



c) Clasificación supervisada mejorada, 1994.

Para el caso de la clasificación supervisada mejorada de 1994 (Tabla 3.0.2.9) las clases que se manejaron fueron siete. El mejoramiento fue necesario ya que se tenían pixeles clasificados incorrectamente, como es el caso de las minas (bancos de material), suelo desnudo y algunas zonas urbanas.

Tabla 3.0.2.9 Resultados generales de la clasificación supervisada mejorada, 1994

Clases	Porcentaje
Agricultura	24.59
Bancos de Material	0.34
Bosque	20.52
Cuerpos de Agua	0.56
Pastizal	1.45
Suelo Desnudo	46.54
Zona Urbana	6.0
Total	100

◆ Mejoramiento de la clasificación supervisada mediante verificación en campo

Además de haber mejorado la clasificación supervisada con el mapa geomorfológico, se realizaron recorridos de campo para comprobar los resultados obtenidos en gabinete. Se verificaron cada una de las clases de uso de suelo en distintos puntos; las zonas visitadas fueron sitios en donde probablemente se tenía cierta confusión, por ejemplo, en áreas de transición de áreas reforestadas con áreas de bosque.

Para la clase de uso del suelo *agricultura* se visitaron parcelas tanto en época de “secas” (en descanso) como en época de lluvias. También se verificaron algunos sitios con agricultura de riego (ver Figura 3.0.2.18).



Figura 3.0.2.18 Parcelas agrícolas de temporal con sembradíos de avena, en la porción central del área de estudio.

Para la clasificación del uso del suelo *bancos de material*, se visitaron cinco minas diferentes, las cuales se dedican a la explotación de tobas volcánicas para la obtención de materiales para la construcción. Dichos bancos son de propiedad privada y en algunos casos comunales.

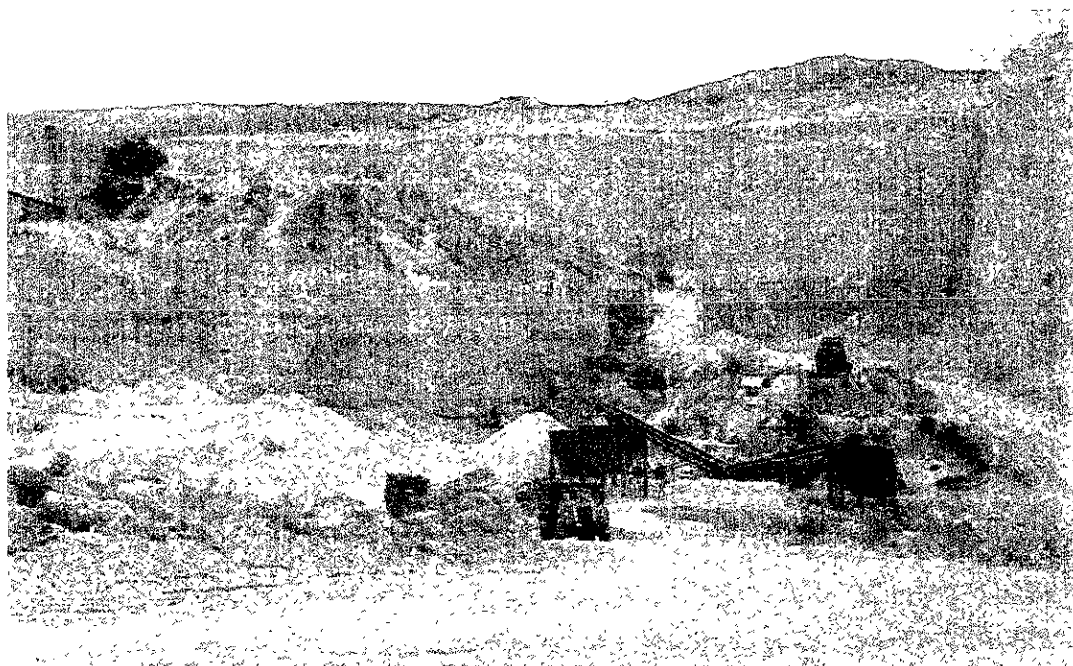


Figura 3.0.2.19 Bancos de materiales en el área de estudio (minas).



Las áreas boscosas (clase de uso de suelo *bosque*) fueron identificadas y verificadas a lo largo del área de estudio por medio de Fotografías Aéreas Digitales como ya se mencionó antes, aunque también se verificó dicha clase en campo. Los bosques se localizan, como se puede observar en el mapa de uso de suelo que se encuentra al final de este trabajo, en las porciones altas de las áreas con relieve de la zona (véase Figura 3.0.2.20).



Figura 3.0.2.20 Bosque natural de pino y de oyamel en el área de estudio. Esta zona en particular (centro-oriente del área de estudio) fue afectada por incendios en octubre de 1998.

De la clase de uso del suelo *pastizal* se verificaron algunas áreas con pastos naturales e inducidos, aunque estos últimos se integraron a la clase de agricultura (ver Figura 3.0.2.21).

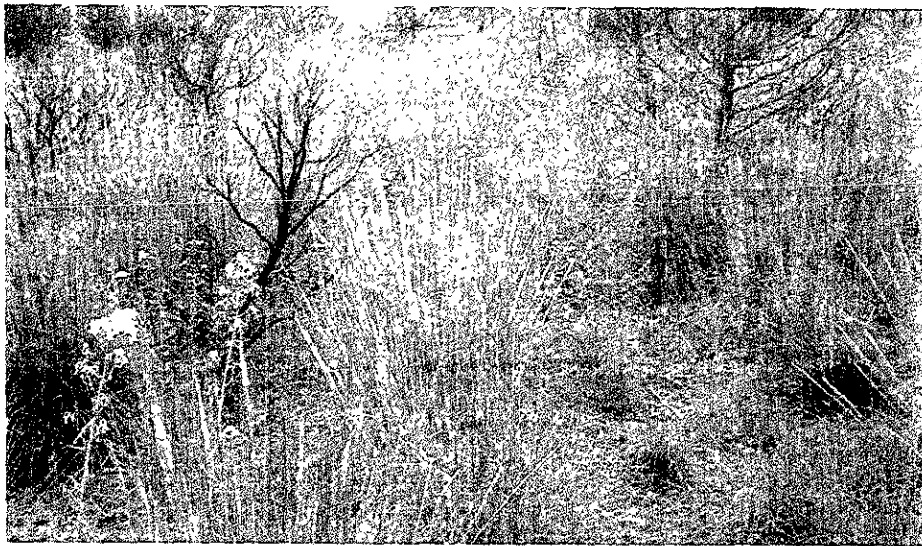


Figura 3.0.2.21 Pastizales al pie de las laderas montañosas del área de estudio. Cabe comentar que estas áreas son también, claramente identificables con las FAD a color.



De la clase *suelo desnudo* se identificaron básicamente en dos áreas. La primera en el área lacustre del Ex-Lago de Texcoco, en la porción altimétrica más baja de la zona, y la segunda, en la parte media (altiméricamente) del área de estudio (piedemontes). En la primera parte, los suelos se encuentran desnudos, es decir, sin cobertura vegetal, debido a la gran cantidad de sales contenidas en éstos, por lo que ha sido difícil su forestación (Figura 3.0.2.22). En la segunda zona, en las áreas pertenecientes a los piedemontes del área de estudio, los suelos y algunos materiales subyacentes a éstos, han sido severamente afectados por procesos de erosión hídrica, por lo que se encuentran también sin cobertura vegetal alguna (Figura 3.0.2.23).



Figura 3.0.2.22 Suelos desnudos en el área de estudio. La fotografía hace referencia a la porción lacustre de la zona federal del Ex lago de Texcoco.



Figura 3.0.2.23. Fotografía tomada en la cuenca del río Texcoco, una de las cuencas con mayores problemas de erosión hídrica.



Dentro de la clase de uso de suelo *zona urbana*, además de corroborar y mejorar la clasificación supervisada de 1994 con la FAD a color, se hicieron algunos recorridos a las áreas más dinámicas en cuanto a su crecimiento espacial. De dichas visitas se observó que, además de que muchas de las viviendas se encuentran ubicadas en áreas muy inestables y por ende, en alto peligro o riesgo (Figura 3.0.2.24), son áreas que crecen de manera muy rápida, pues en el análisis de las fotografías aéreas de 1994 a 1997, se observaron cambios muy marcados.



Figura 3.0.2.24 Areas urbanas establecidas en laderas de barrancos en la periferia del cerro el Pino. Estas áreas como muchas otras, están sometidas a presiones demográficas muy fuertes que se reflejan en el rápido crecimiento urbano de la ZMCM.

Una vez realizado la verificación de campo se calculó la matriz de error (figura 3.0.2.25) donde muestra una exactitud global del **68%**. El suelo desnudo presentó un alto porcentaje de exactitud (91%), las zonas urbanas con un porcentaje de (44%) se considera una exactitud aceptable sobre todo tomando en cuenta la gran confusión espectral que presentan estas zonas, lo cual es por la gran cantidad de objetos dentro de estas áreas y sus diferentes reflectancias.

Si se observa el mapa (Figura 3.0.2.25) se aprecia que los pixeles clasificados como bancos de material en las partes altas desaparecieron, lo cual se hizo mediante enunciados *booleanos* y utilizando el mapa geomorfológico de la zona de estudio.



Clasificación supervisada (mejorada)
 Imagen Spot --/09/94

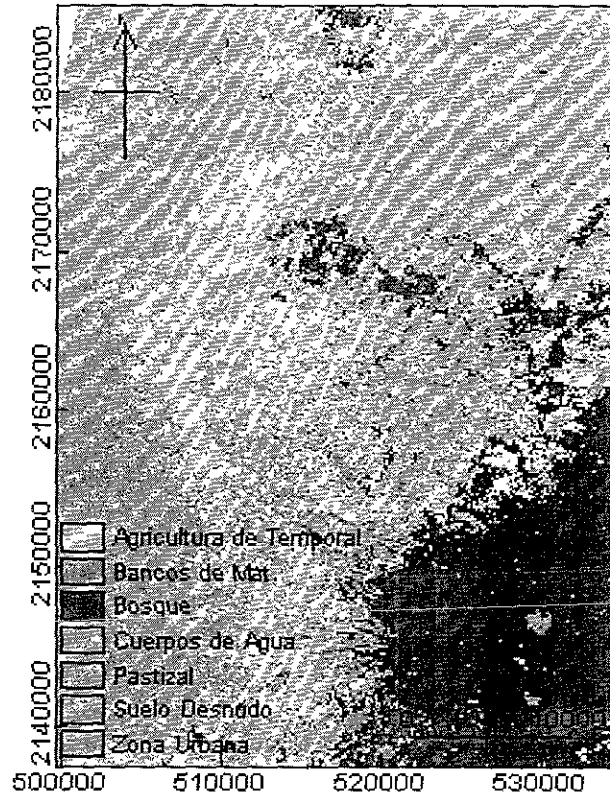


Figura. 3.0.2.25. Clasificación supervisada mejorada, 1994

USO EN CLASIFICACIÓN	MATRIZ DE ERROR							TOTAL
	USO EN FOTOGRAFÍAS							
	AGRICULTURA	BANCOS DE MAT	BOSQUE	CPOS DE AGUA	PASTIZAL	SLO DESNUDO	ZONA URBANA	
AGRICULTURA	96	0	0	0	0	2	2	100
BANCOS DE MAT	0	2	0	1	0	0	0	3
BOSQUE	8	0	51	0	0	0	4	63
CPOS DE AGUA	0	0	0	2	0	0	5	7
PASTIZAL	2	0	0	0	0	0	5	7
SLO DESNUDO	44	1	6	0	0	52	19	122
ZONA URBANA	5	0	0	1	0	3	28	37
TOTAL	155	3	57	4	0	57	63	339

Exactitud: 68%	
Errores por omisión	Errores por comisión
AGRICULTURA = 62%	AGRICULTURA = 96%
BANCOS DE MAT = 67%	BANCOS DE MAT = 66%
BOSQUE = 51/57 = 89%	BOSQUE = 51/57 = 81%
CPOS DE AGUA = 50%	CPOS DE AGUA = 29%
SLO DESNUDO = 91%	SLO DESNUDO = 43%
ZONA URBANA = 44%	ZONA URBANA = 76%



3.0.2.5 Comparación de la exactitud entre las clasificaciones (no supervisadas y supervisadas) con mejoramiento y sin mejoramiento por medio del SIG.

Se compararon las matrices de error antes y después del mejoramiento. Los resultados son los siguientes (Tabla 3.0.2.10).

Tabla 3.0.2.10 Exactitud Global de las clasificaciones espectrales (1973, 1985 y 1994).

Imágenes clasificadas	Clasificación no supervisada. Sin mejoramiento	Clasificación no supervisada. Con mejoramiento	Clasificación supervisada. Sin mejoramiento	Clasificación Supervisada. Con mejoramiento
Norte, 1973	70%	81%	75%	86%
Sur, 1973	73%	85%	71%	86%
Norte, 1985	85%	89%	94%	92%
Sur, 1985	69%	85%	91%	90%
Norte y Sur 1994			65%	68%

Los resultados referidos en la tabla anterior permiten apreciar que en la mayoría de los casos las clasificaciones mejoradas presentaron un mayor porcentaje de exactitud. Las excepciones se presentaron en las clasificaciones supervisadas de 1985 ya que el porcentaje de exactitud fue inverso a los demás casos; en la parte norte de **94%** bajó a **92%** y en la parte sur de **91%** bajó a **90%**, sin embargo, se consideran exactitudes aceptables además de considerar que se elaboraron clases mucho más homogéneas que en las demás clasificaciones.

De acuerdo a los porcentajes presentados por las clasificaciones supervisadas mejoradas (desde **68%** hasta **92%**) se tomó la decisión de evaluar el cambio de uso del suelo con estas clasificaciones. También es importante aclarar que los resultados presentados se refieren a todo el corte (parte norte y parte sur) y para el análisis sólo se tomó en cuenta el área de estudio por lo que las clasificaciones se cortaron de acuerdo al límite de la zona bajo estudio.



3.0.3. Usos del suelo multitemporales (1973, 1985 y 1994)

a) Uso del Suelo, 1973

En 1973 los usos del suelo que se identificaron, mediante la clasificación supervisada, fueron los que se muestran en la Figura 3.0.3.1; donde se aprecia que el uso con mayor extensión lo ocupó la agricultura (110000 has), por otra parte el bosque (31946 has) no pudo ser evaluado (cuantificado) en su totalidad ya que no se tuvo el cubrimiento total en los cortes de las imágenes de satélite. En el mapa (ver Figura 3.0.3.2) se observa claramente la zona en donde no se tuvo información y en la cual, las áreas boscosas no se pudieron evaluar. En las laderas montañosas bajas y altas, así como en los piedemontes bajos, se localiza el matorral/pastizal (17882 has); sin embargo, cabe aclarar que en los piedemontes este matorral más concretamente corresponde a zonas deforestadas y erosionadas.

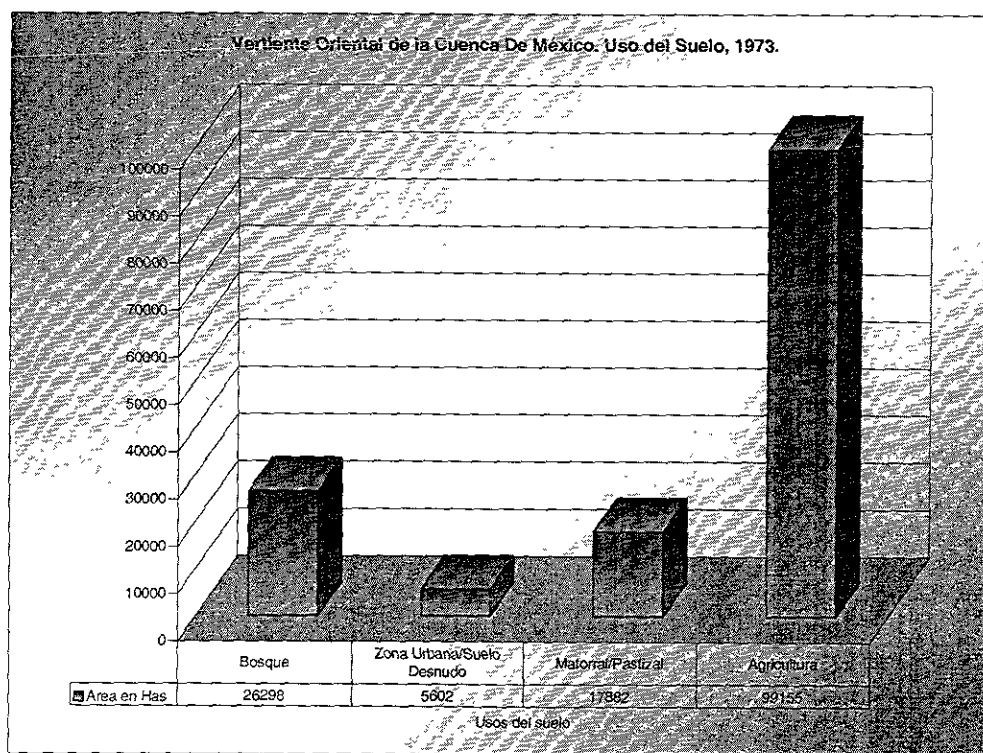


Figura 3.0.3.1. Uso del suelo en has. de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México, 1973

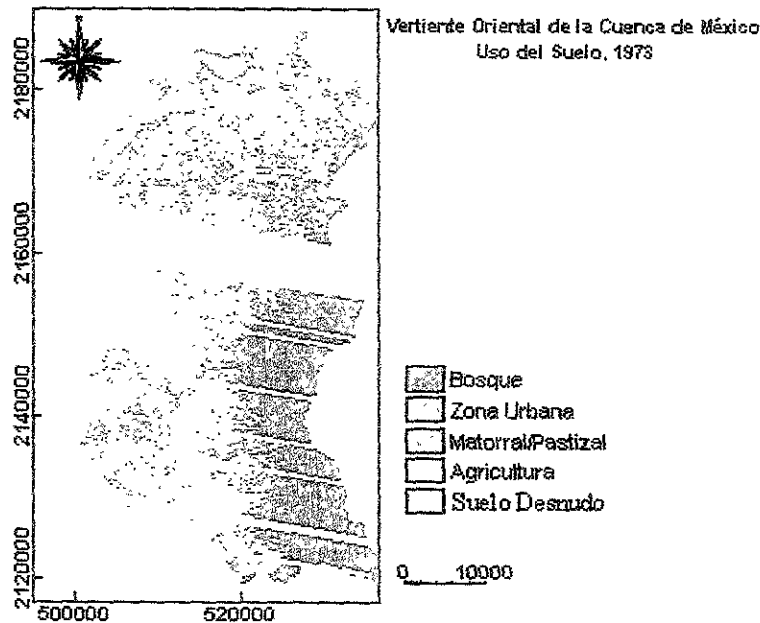


Figura 3.0.3.2 Mapa de uso del suelo, 1973

a) Uso del Suelo, 1985

Para 1985 el Bosque (31946 has.) y el Pastizal/Agricultura (110000 has.) son los usos con mayor extensión (Ver Figura 3.0.3.3) en este último uso se decidió agrupar los pastizales con la agricultura porque aunque en la parte sur se diferenciaban perfectamente estos dos usos en la parte norte no fue así, lo cual se debe básicamente a la resolución temporal de cada corte. En el caso del bosque no se trata de un crecimiento natural de éste sino más bien obedece a dos razones, por una parte, dicho crecimiento se debe a los programas de reforestación realizados por la CNA y por otra, a que en este caso si se evaluó toda el área de estudio. En el mapa (ver Figura 3.0.3.4) se observa la distribución espacial de cada uno de los usos del suelo presentados en la gráfica mencionada. En el recuadro marcado dentro del mapa se encuentran algunas de las zonas en donde las obras de reforestación han sido de gran ayuda en el desarrollo de suelo para controlar los procesos erosivos e incrementar la infiltración en el suelo.

En lo referente a las zonas urbanas (3760 has.) son de especial interés las áreas correspondientes a los municipios de Chimalhuacán, Chalco y Nezahualcoyotl ya que, a través de los últimos veinte años, son las áreas que más han sido modificadas por el crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de México. La tendencia de crecimiento de estos municipio se ha



dato básicamente hacia la porción oriente de la Cuenca de México (gran parte de la zona de estudio).

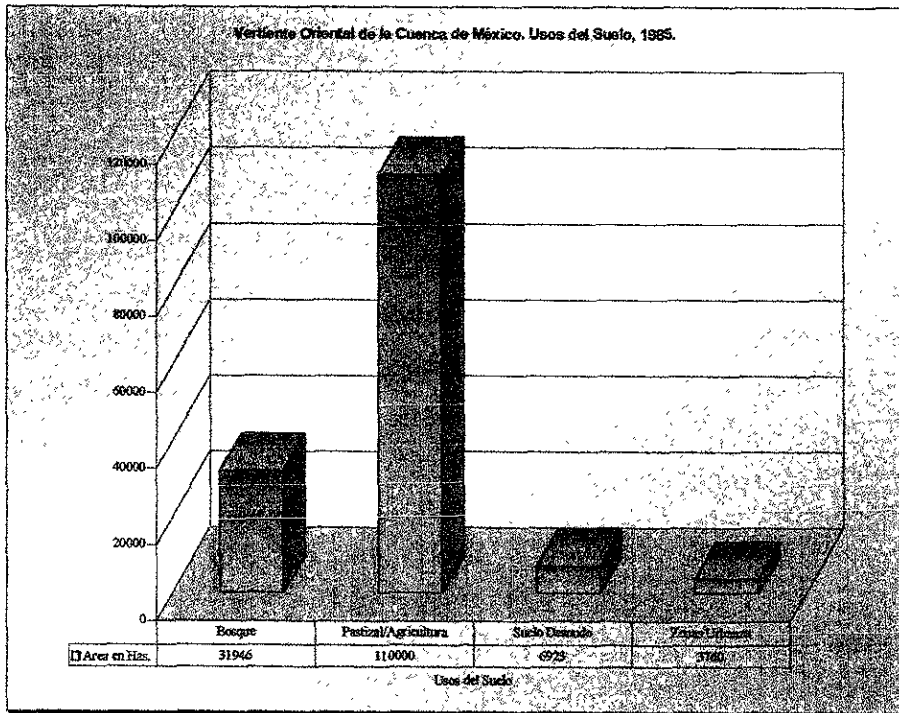


Figura. 3.0.3.3. Uso del suelo en has. de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México, 1985

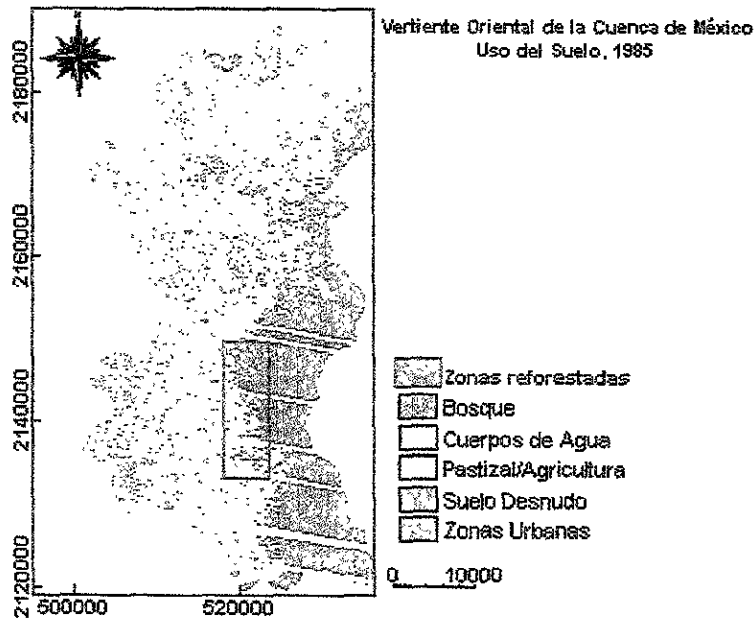


Figura 3.0.3.4 Mapa de uso del suelo, 1985



c) Uso del Suelo, 1994

En 1994 se identificaron y discriminaron más usos del suelo (Ver Figura 3.0.3.5) en comparación con las fechas anteriores, esto debido a la resolución espacial, temporal y el cubrimiento de la imagen Spot con la cual se clasificó este periodo. Las áreas agrícolas localizadas en la planicie aluvial ocupan una extensión de 33835 has, los bancos de material (484 has.) se localizan en los piedemontes los cuales según Tapia (1999), se distinguen por estar formados de depósitos glaciofluviales y tobas, grava, arena y aluvión de origen volcanoclástico; pómez del volcán Popocatepetl y capas de loess. Estos depósitos explican la existencia de las minas y bancos de materiales del área de estudio.

El uso de suelo bosque solo presenta un área de 24022 has. lo cual se debe básicamente a que no se tuvo el cubrimiento total del área de estudio (Ver Figura 3.0.3.6).

La mayor cantidad del suelo desnudo (56125 has.) se concentra en la planicie aluvial al noreste del Cerro Gordo y corresponde a zonas de cultivo en descanso.

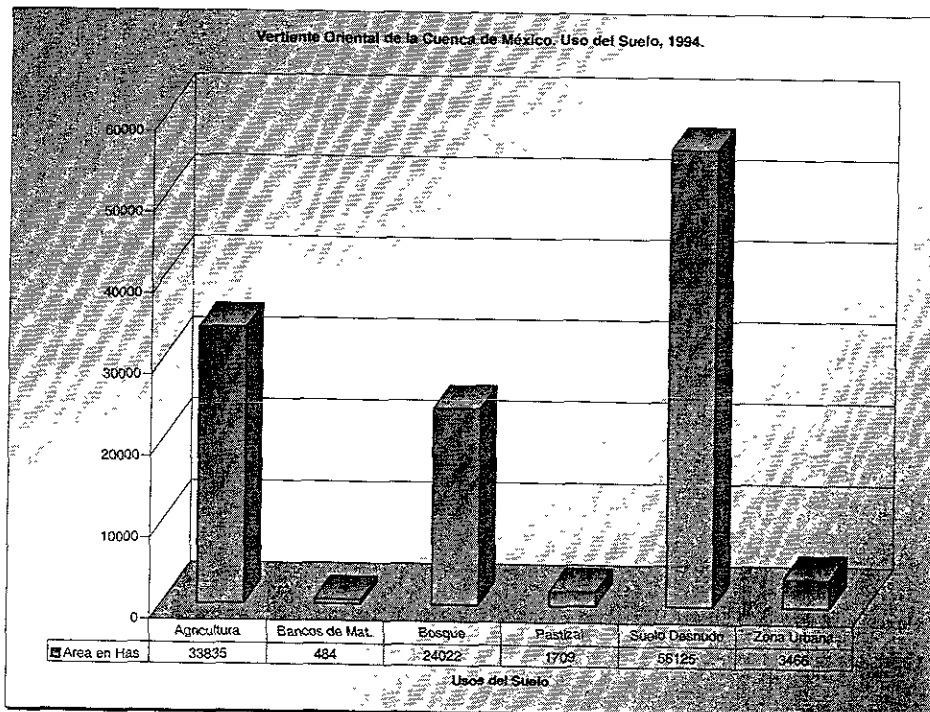


Figura 3.0.3.5. Uso del suelo en has. de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México, 1994

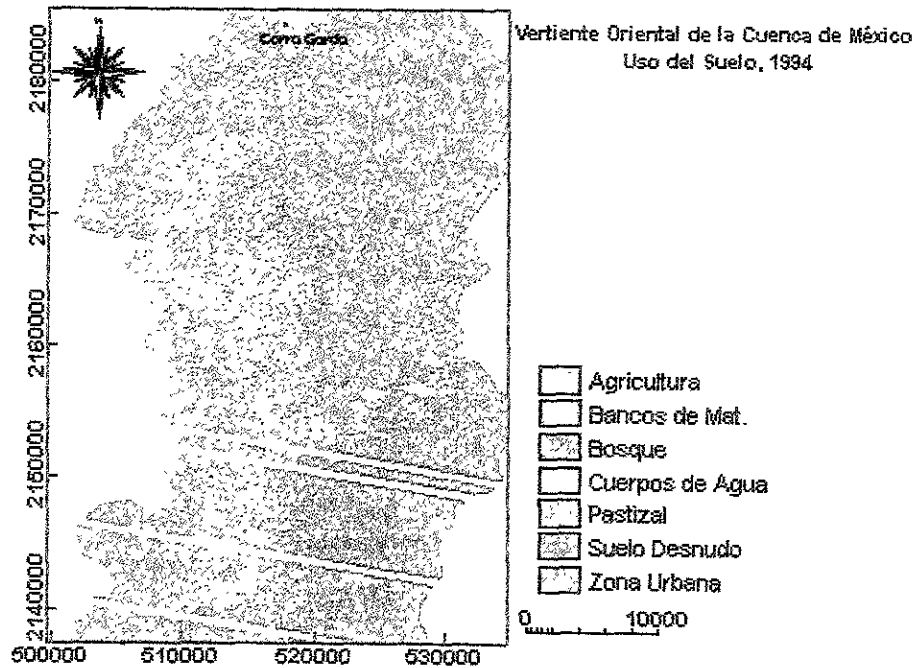


Figura 3.0.3.6 Mapa de uso del suelo, 1994

3.0.4. Cambios de uso del Suelo 1973, 1985 y 1994

Los cambios de uso del suelo se evaluaron tomando en cuenta solo las áreas comparables entre las tres fechas, es decir, con el límite del uso del suelo de 1994 (ver Figura 3.0.4.1), ya que éste presentó la menor cobertura en relación con los otros dos mapas.

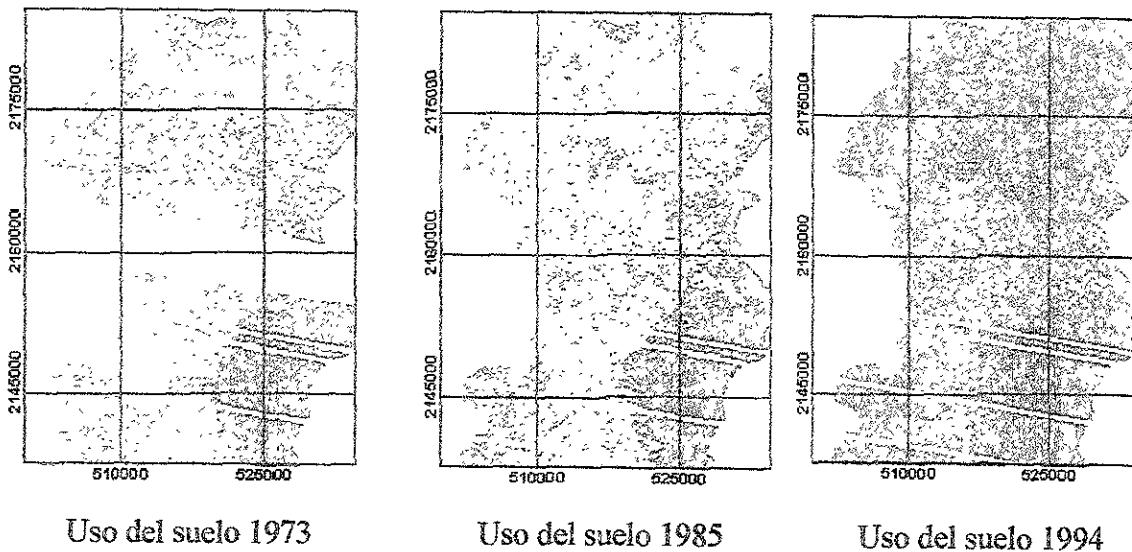


Figura 3.0.4.1. Áreas comparables de cambio de uso del suelo



El análisis de los cambios de uso del suelo se realizó por medio de gráficos. Los resultados serán, primeramente, analizados de manera general a) y después se particularizará en cada uno de los cambios b).

a) Evaluación general del cambio de uso del suelo.

Para la evaluación general se tomaron en cuenta los siguientes usos del suelo: bosque, zonas urbanas, suelo desnudo y pastizal/agricultura (ver Figura 3.0.4.2). En el caso de 1973 para tener áreas reales comparables se realizaron estimaciones de la zona sin información.

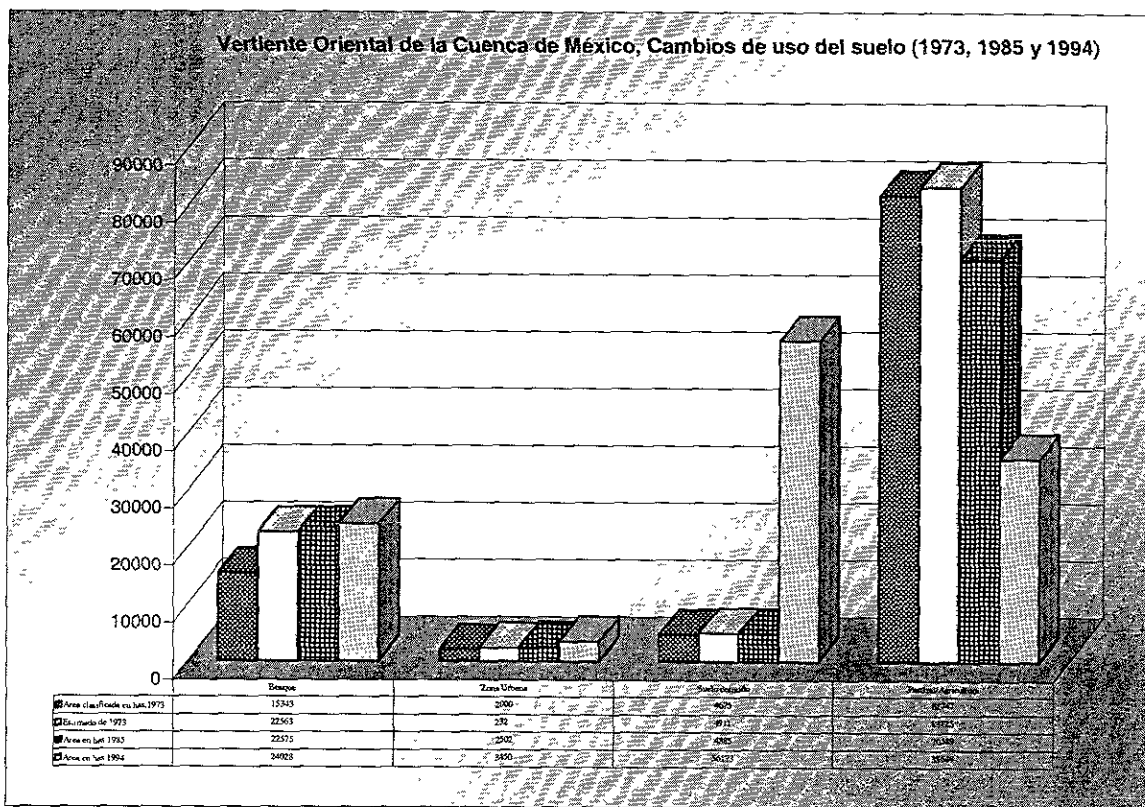


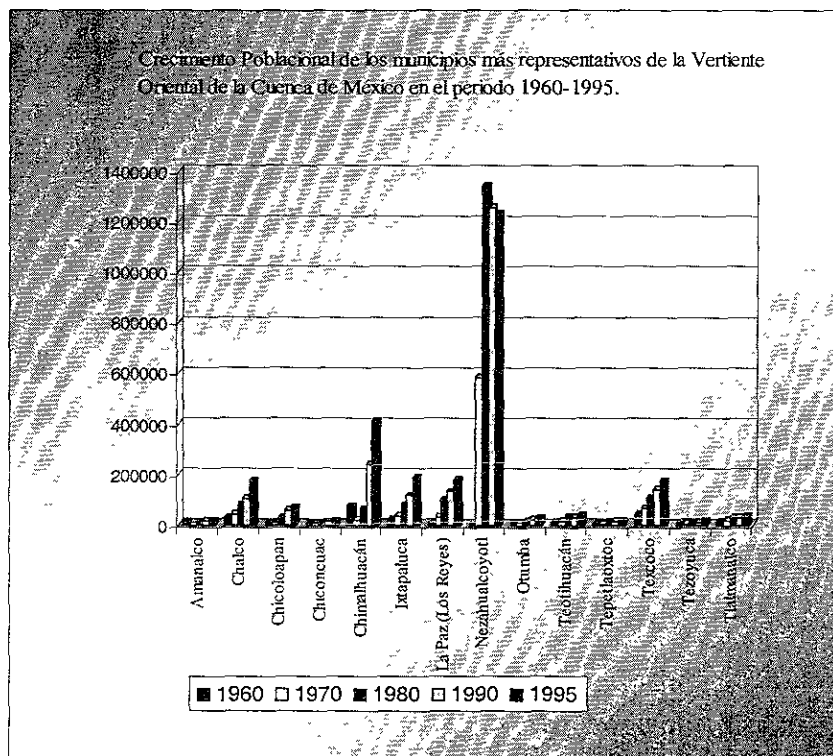
Figura 3.0.4.2. Cambios de uso del suelo 1973, 1985 y 1994.

Bosque: Para 1973 este uso presenta 15343 has, lo cual se debe, por una parte, a que en estas fechas las áreas deforestadas ocupaban grandes extensiones y por otra a que existe un faltante de información (ver Figura 3.0.4.1.) resultado del material con el cual se clasificó. Sin embargo el área de bosque estimada fue de 22563 has. En 1985 las obras de reforestación, llevadas a cabo por la CNA, dan como resultado un ligero incremento (22575 has.) en este uso, (véase Figura



3.0.4.1). El aumento en 1994 (24028) se atribuye concretamente a las obras de reforestación; sin embargo, cabe recalcar que existieron pérdidas de bosques en algunas zonas, como en el caso concreto de Cerro Gordo al norte de la zona de estudio.

Zonas urbanas: La expansión de las zonas urbanas se ha generado a partir de la ZMCM hacia la parte oriente (zona de estudio), dando como resultado un establecimiento y desarrollo de estas zonas sobre la planicie lacustre. Para 1973 se tenían (2321 has. valor estimado), para 1985 (2502 has.) y para 1994 (3450 has). De acuerdo con lo anterior se realizó un cálculo de la tasa de crecimiento poblacional de la ZMCM y se obtuvo que esta tasa es del 3.7%, lo que representa la incorporación anual de 670 mil personas, de las cuales, 400 mil son por migración (INEGI, 1995). Dentro del periodo 1990-1995 los municipios de Chalco, Chimalhuacán, Los Reyes y Nezahualcoyotl e Ixtapaluca presentan una tasa de crecimiento poblacional que van en el orden del 8.4 y 12.2%. Por otra parte los datos censales (Figura 3.0.4.3) demuestran que el incremento poblacional que se ha dado hacia la parte oriente de la Cuenca de México se ha generado de manera constante, es decir, que cada 10 años la población se incrementa considerablemente.



Fuente: Censo General de Población y Vivienda. Estado de México, INEGI, 1960-1995

Figura 3.0.4.3. Datos de población de algunos municipios de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México



Suelo desnudo: Como se aprecia en la gráfica (figura 3.0.4.2) este uso presentó en 1973 4911 has. estimadas y en 1994 56173 has. La explicación a tan súbito crecimiento se debe a que la mayor parte de este uso en 1994 corresponde a áreas de cultivo y que para esta fecha se encontraban en descanso; es decir, que en realidad no se trata de suelo desnudo, como tal, sino más bien se debe a cuestiones de temporalidad de la información. La situación real de este uso se aprecia entre 1973 (4911 has.) y 1985 (4885 has.), en donde existe una disminución debido a que parte de estos suelos desnudos corresponden a las áreas reforestadas.

Pastizal /agricultura: La disminución (aparente) observada entre 1973 (83125 has. estimadas) y 1994(35549 has.) se debe precisamente a lo antes expuesto (temporalidad de la información). Sin embargo, si existe pérdida de áreas dedicadas a la agricultura, esto se observa en la gráfica (Figura 3.0.4.2.), en donde para 1973 existían 83125 has. y para 1985 existían 70589 has. El comportamiento general de este uso es el de una disminución casi uniforme entre cada uno de los periodos.

b) Evaluaciones particulares del cambio de uso del suelo.

En este caso solo se tomaron en cuenta las áreas de los usos que presentaron cambios y la evaluación también se realizó mediante el análisis de gráficos. Cabe mencionar que el dato de 1973 para todos los gráficos, contiene el total de has. correspondiente a dicho uso.

◆ Cambios del bosque a otros usos.

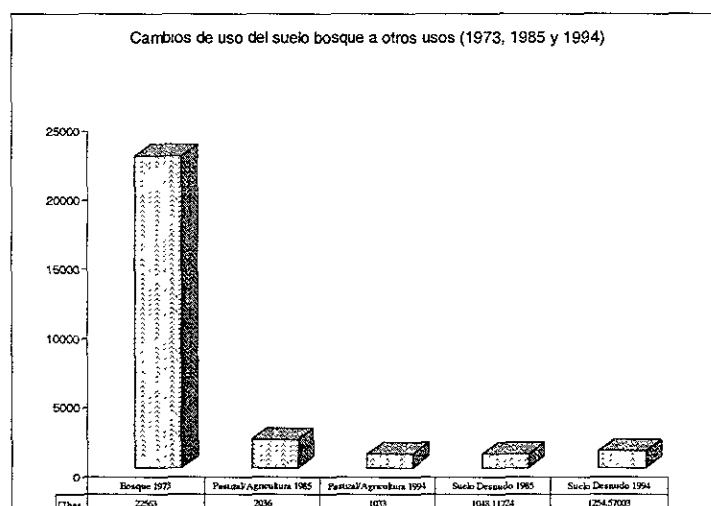


Figura 3.0.4.4. Cambio de uso del suelo bosque de 1973 a 1985 y 1994.



En la gráfica anterior (Figura 3.0.4.4) se encuentran representadas las tendencias de cambio de uso del suelo bosque. En este caso se trata de un uso que se ve afectado por cuestiones antrópicas ya que, por un lado, existe una gran demanda de áreas para la agricultura y por otro, existe la tala de árboles para satisfacer algunas de las necesidades básicas de las poblaciones aledañas a las áreas de bosques naturales, propiciando así zonas de suelo desnudo.

◆ Cambios del suelo desnudo a otros usos

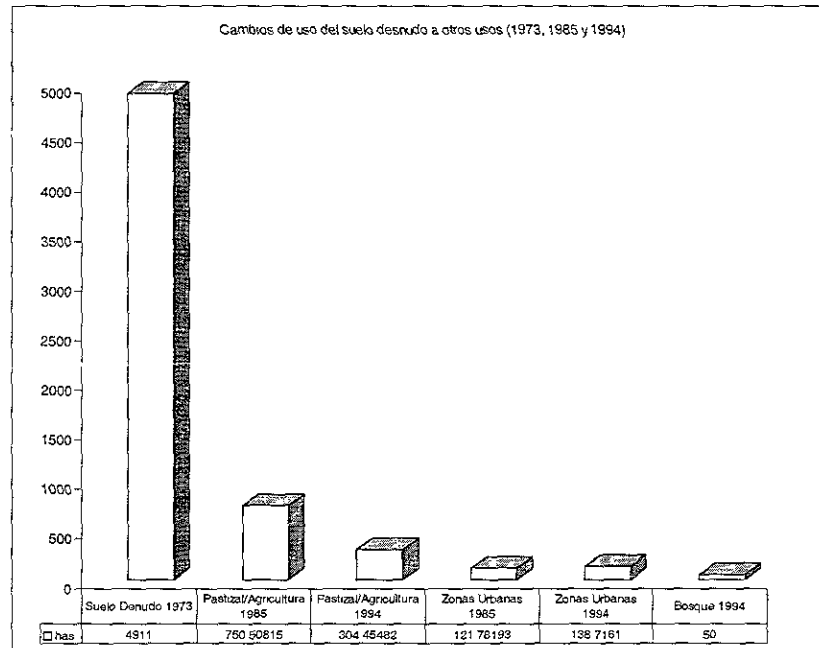


Figura 3.0.4.5. Cambio de uso del suelo desnudo de 1973 a 1985 y 1994.

El uso del suelo desnudo presentó cambios a otros usos tales como: pastizal/agricultura, zonas urbanas y bosque (ver Figura 3.0.4.5).

El cambio de uso del suelo desnudo a pastizal/agricultura se debe básicamente a cuestiones de temporalidad ya que aunque en 1973 se tenga suelo desnudo en 1985 y 1994 se tiene pastizal/agricultura lo cual indica que se trataba de suelos en descanso, pero que su verdadera utilización es la agricultura.

Las áreas de suelo desnudo también han sido aprovechadas para el establecimiento de zonas urbanas y de 1985 a 1994 se observa un notable crecimiento.



En cuanto al cambio de suelo desnudo a bosque se debe principalmente a las obras de reforestación llevadas a cabo en la zona de estudio desde 1973.

◆ Cambios de pastizal/agricultura a otros usos

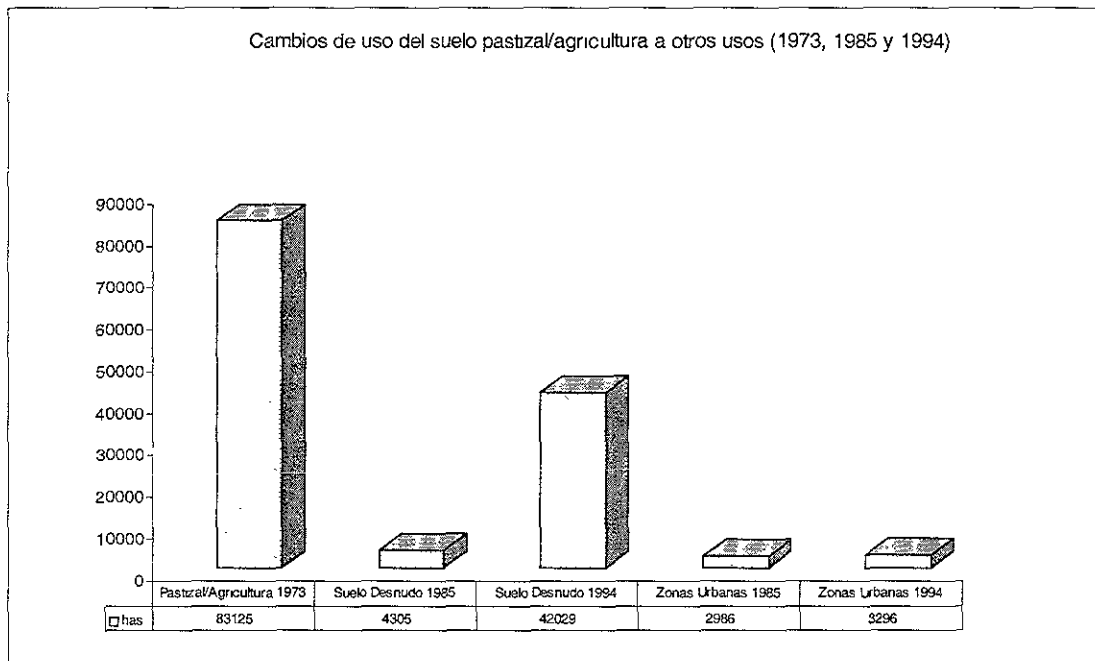


Figura 3.0.4.5. Cambio de uso del suelo pastizal/agricultura (1973 a 1985 y 1994)

El cambio de pastizal/agricultura a suelo desnudo en 1994 no es tan abrupto como se observa gráficamente (Figura 3.0.4.5), sino más bien corresponde a suelos agrícolas en descanso; sin embargo, no se descarta la transformación de áreas agrícolas a suelos desnudos, tal es el caso de 1985 en donde este cambio si fue cuantificado en su totalidad.

En la zona de estudio la demanda de espacios para el establecimiento de zonas urbanas es cada vez mayor, por lo que los suelos dedicados a actividades agrícolas se han visto, en algunos casos, reducidos o modificados para satisfacer estas demandas. El cambio del uso pastizal/agricultura ha ido en aumento como se aprecia en la gráfica (Figura 3.0.4.5).



El mapa de cambios (ver mapa final) para su análisis, se dividió en dos partes: A y B

- A) Datos 1973, 1985 y 1994 (se trata del total del área que abarca la imagen Spot antes referida)
- B) Datos 1973 y 1985 (extremo sur de la zona de estudio)

El motivo por el cual se tomó esta decisión fue porque la información no era comparable entre las tres fechas (incompatibilidad en cuanto a cubrimiento) para toda la zona de estudio.

Las tendencias de cambio de uso del suelo son las siguientes:

- A) En esta parte del área de estudio los cambios, principalmente, se centraron en el Cerro Gordo (ver Figura 3.0.4.6) en donde, en 1973, de ser un uso del suelo predominantemente de bosque y matorral, cambió para 1994, a zonas agrícolas y de pastizales. En cuanto al resto de la zona las superficies agrícolas se transformaron en zonas urbanas y en zonas de suelos desnudos. La mancha urbana es la que generó la mayor cantidad de cambios. El ejemplo más representativo de este cambio se concentra sobre todo en las superficies inundables del antiguo Lago de Texcoco, en donde el crecimiento proviene de la zona del Cerro de Chimalhuacán y de Nezahualcoyotl, municipios del Estado de México.

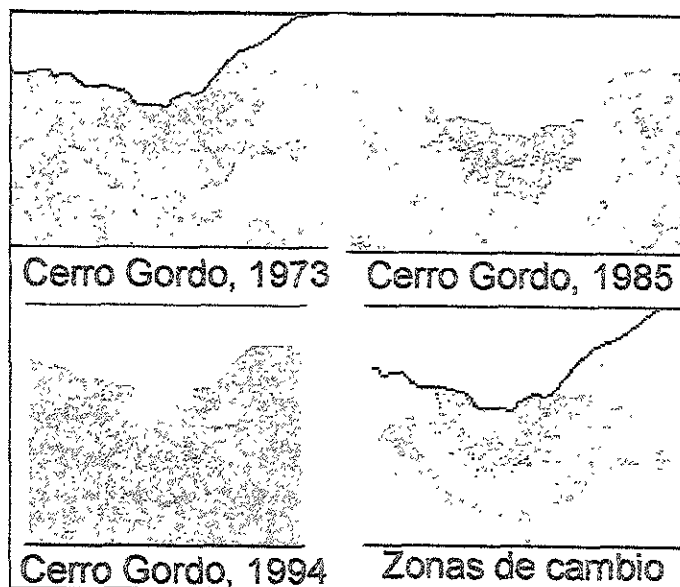


Figura 3.0.4.6. Cambios de uso del suelo en el Cerro Gordo de 1973 a 1985 y 1994.



B) En esta zona se trabajó con datos de 1973 y 1985. Los cambios más significativos se presentaron en los pastizales que cambiaron a suelo desnudo lo cual es de llamar la atención ya que este fenómeno puede ser un indicador determinante en la degradación y fragmentación de bosques y matorrales. En los piedemontes los bosques (en algunos casos) cambiaron a zonas agrícolas y a pastizales orientados en su mayoría a la ganadería extensiva.

En la matriz de cambios (Figura 3.0.4.8) se presentan los principales usos que presentaron variaciones, estos usos fueron los bosques, el pastizal/agricultura y el suelo desnudo. Los cambios se cuantificaron en hectáreas.

1994		Matriz de cambio				
1973	Bosque	Pastizal/Agricultura	Suelo desnudo	Zonas Urbanas	Otros Usos	Total, 1973
Bosque	20028	1033	1255	2	245	22563 has.
Pastizal/Agricultura		18619	42029	3296	19181	83125 has.
Suelo desnudo	50	304	4373	139	45	4911 has.

Figura. 3.0.4.8. Matriz de cambios de uso del suelo.

3.1 CONCLUSIONES

El análisis multitemporal del cambio de uso del suelo ha permitido entender la relación que guardan el crecimiento demográfico incontrolado y los cambios en la utilización del suelo. Dichos cambios se han reflejado por ejemplo, en la aparición de usos del suelo diferentes a los naturales, tal es el caso de los pastizales y zonas agrícolas que se han dispersado en superficies de bosques, y los usos urbanos que han avanzado hacia las superficies agrícolas.

Como era de esperarse, el crecimiento desmedido de la ZMCM ha transformado el uso del suelo en las zonas cercanas a la zona de estudio (planicie lacustre). Los suelos desnudos y los pastizales han cambiado a zonas urbanas e industriales. Los problemas de migración se ven reflejados en algunas de estas zonas ya que, parte de la población proveniente del resto de la República Mexicana se establece en estas áreas las cuales no son adecuadas para el establecimiento de asentamientos humanos (suelos salinos).



Por otra parte, las áreas de los piedemontes de la zona se han visto beneficiados por los programas de reforestación y obras de conservación del suelo y agua, por lo que, los cambios de uso del suelo desnudo a bosques se consideran como un cambio con impacto positivo.

Para analizar los cambios de uso del suelo se generaron los mapas correspondientes (1973, 1985 y 1994) y se trabajó con clasificaciones no supervisadas y supervisadas. En estas últimas se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood*), pues éste asume los valores espectrales de los píxeles que se encuentran en los campos de entrenamiento para que a partir de estos los datos sean distribuidos estadísticamente. Con este algoritmo se aseguró obtener un mejor resultado de clasificación de píxeles. Lo anterior se comprobó con los resultados de las matrices de error (Cuadro 4.1), en donde la mayor exactitud se tuvo en las clasificaciones supervisadas con relación a las no supervisadas, aunque la utilidad de éstas radicó en que proporcionan información general del comportamiento espectral de los diferentes elementos del terreno.

Imágenes clasificadas	Clasificación no supervisada.	Clasificación supervisada.
	(Sin mejoramiento)	(Sin mejoramiento)
Norte, 1973	70%	75%
Sur, 1973	71%	73%
Norte, 1985	85%	94%
Sur, 1985	69%	91%
Norte y Sur 1994		65%

Tabla 3.1. Exactitud Global de las clasificaciones no supervisada y supervisada

La clasificación supervisada tiene ventajas potenciales sobre la clasificación no supervisada. En la clasificación no supervisada el usuario selecciona parámetros subjetivos tales como número de clases espectrales, *skip* factor, y criterio de agrupamiento. Sin embargo no decide qué tipo de cobertura corresponde a cada clase espectral.

Algunas de las desventajas de la clasificación no supervisada comparada con la supervisada son las siguientes:

- Primero el usuario genera campos de entrenamiento para cada tipo de cobertura en la imagen.



espectral de los elementos del terreno no es la misma en diferentes estaciones del año. Para evitar un tanto estas confusiones espectrales se trabajó por separado y posteriormente ambas partes se unieron para que de esta manera se pudiera corregir por medio del SIG y reagrupar algunas clases.

El motivo principal por el cual se decidió trabajar con imágenes de satélite fue por cuestiones prácticas ya que al tratarse de un área tan extensa (170 000 has) hubiera resultado complicado utilizar cualquier otro material de percepción remota convencional y/o alternativa.

En lo que respecta a las fechas del material cartográfico que se utilizó para 1973 no se tuvieron problemas ya que la cartografía de INEGI de uso del suelo correspondía al mismo periodo. Sin embargo para 1985 se utilizaron fotografías aéreas pancromáticas, en diferentes escalas, lo cual provocó algunos problemas en la ubicación de los sitios de corroboración para elaborar las matrices de error. El problema que se tuvo con el material obtenido de la Percepción Remota Alternativa fue la resolución espacial ya que no eran comparables del todo con las resoluciones de las imágenes de satélite, ante tal situación este material alternativo se utilizó solo en zonas muy específicas (caso Cerro Gordo al norte de la zona de estudio).

Una vez que se tuvieron las clasificaciones espectrales se realizó un mejoramiento de la información para que de esta manera se eliminaran píxeles no clasificados y se corrigieran los mal clasificados. Con el SIG, mapas temáticos, trabajo de campo y fotointerpretación se pudo lograr que las exactitudes de las clasificaciones se incrementaran (mejoraran) en gran medida.

El mapa Geomorfológico correspondiente al área de estudio fue de gran utilidad porque se utilizó para reclasificar algunos usos, entablando así relaciones entre uso del suelo y geomorfología. De acuerdo a las características del tipo de relieve, materiales y pendientes de las unidades del terreno se pudieron mejorar algunas de los usos del suelo. Al contar con esta información se decidieron usos del suelo que por simple reflectancia espectral no se logró.

Los SIG demostraron ser una poderosa herramienta en la descripción y análisis detallado de la distribución de los usos del suelo ya que mediante la incorporación de técnicas de procesamiento de imágenes de satélite permitió generar información más confiable y acercada a la realidad. El mejoramiento por integración de información geográfica suplementaria permitió incrementar



significativamente la exactitud de las clasificaciones espectrales. También ayudó a resolver los problemas de resoluciones espaciales entre las imágenes de satélite.

Por lo tanto, se concluye de manera general que la utilización de SIG, material cartográfico adicional, materiales derivados de la PR Convencional (fotografías aéreas pancromáticas), y todos los productos derivados de la PR Alternativa son de gran utilidad en la generación de cartografía de uso del suelo basada en el análisis y procesamiento de imágenes de satélite.

Cabe resaltar la importancia que tuvieron los materiales y la PR Alternativa ya que, por sus características de resolución espectral y por su temporalidad, funcionaron como una “verdad de campo” idónea para incrementar la exactitud de la matriz de error de la clasificación supervisada de 1994.

Los materiales de la PR Alternativa presentan grandes ventajas sobre otros, sobre todo cuando las áreas de estudio son muy extensas y son muy dinámicas en cuanto a su configuración espacial, tal es el caso de la zona de estudio de este trabajo.

Por lo anterior la interacción entre las herramientas y los métodos utilizados en este trabajo, han probado ser muy eficaces para abordar los estudios de uso del suelo y de recursos naturales en general.

En cuanto a la problemática del área en particular, se recomienda realizar estudios de usos del suelo a mayor detalle de cada una de las subcuencas que conforman esta zona, con esto se garantizarían mejor los resultados de las obras de reforestación ya que se sabría con exactitud las necesidades de cada una de las subcuencas.

El mapa final (mapa de cambio de uso del suelo 1973-1994) es una contribución al desarrollo conceptual de integración tecnológica, aplicada a problemas específicos como el monitoreo del cambio de uso del suelo.

- Adame, S.** (1998). *Evaluación ex – post del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del río Texcoco*. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Estado de México, México pp. 187.
- Aguilar, A. G.** (1993). *La ciudad de México y las nuevas dimensiones de la reestructuración metropolitana, en Espacio Urbano, Cambio Social y Geografía Aplicada*, Luis Felipe Cabrales (Compilador). Universidad de Guadalajara, 21-51 p.
- Aronoff, Stan.** (1989) *Geographic Information System: A Manual Perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada.
- Belward A. S. and Valenzuela R. C.** (1990). *Remote Sensing and Geographical Information System for Resource Management in Developing Countries*. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities. Netherlands, pp. 506.
- Bocco G., Palacio J.L., Valenzuela R.** (1991) *Integración de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica*. En Ciencia y Desarrollo, marzo – abril, Vol. XVII, No. 97. México 79-89 p.
- Bocco G., Sánchez R.** (1995). *Cuantificación del crecimiento de la mancha urbana usando percepción remota y sistemas de información geográfica. El caso de la Ciudad de Tijuana (BC). 1973-1993*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 789-795 p.
- Bocco G., Mendoza M.E., Velázquez A. Y Torres A.** (1999). *La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo*. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM, México. 7-22 p.
- Burrough, P.A.** (1991). *Principles of Geographical Information System for Land Resources Assessment*, Claredon Press, Oxford, pp. 194.
- Campbell B. J.** (1996). *Introduction to Remote Sensing*. Second Edition. United States of America, pp. 622.
- Cruickshank G.** (1995). *Proyecto Lago de Texcoco. Rescate Hidroecológico*. Proyecto para mejorar las condiciones ambientales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México, Comisión Nacional del Agua, pp. 111.
- Chuvieco, E.** (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*, De. Rialp, España, pp. 453.
- Delgado, J.** (1991). Las nuevas periferias de la Ciudad de México, en Daniel Hiernaux y Francois Tomas (Coords): *Cambios económicos y periferia de las grandes ciudades: El caso de la Ciudad de México*, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Escalona Maurice M.J.** (1998). *Análisis del avance urbano sobre la agricultura periurbana y el cambio de uso del suelo en la subregión de Texcoco*. Tesis de Maestría en Geografía. División de Posgrado. F.F. y L. UNAM. México D.F. pp. 394



- Espinosa, P. G.** (1996). *El embrujo del Lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Históricas. Instituto de Investigaciones Antropológicas. Primera Edición México, pp. 432.
- Falcón, O.** (1990). *Los límites de la expansión urbana*. En Democracia y Desarrollo Urbano en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Tomo I Expansión de la Mancha Urbana. Ed. Antártica S.A de C.V. México. 24-31 p.
- Galeano, P. Rafael y Hernández B. Astrid. Z.** (1995). *Sistemas de Información Geográfica: Un elemento estratégico para el ordenamiento territorial*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 187-196 p
- Garrido A., López-Blanco J., Palacio J.L.** (1998). *Procesamiento de Fotografías Digitales de Alta Resolución dentro del un SIG para clasificación de tipos y rasgos de erosión en la Vertiente Oriental de la Cuenca de México*. En libro de resúmenes de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 12 p.
- Garrido A.** (1999) *Inventario de erosión acelerada de las Cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino. En la Vertiente Oriental de la Cuenca de México*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Colegio de Geografía. F.F. y L. UNAM. México D.F. pp. 143.
- Gilruth, P. T and Hutchinson, C. F.** (1990). *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 56 (10) 1375-1382 p.
- ILWIS.** (1997). *Reference Guide. Ilwis 2.1 for Windows*. Ilwis Department, ITC, Enschede. The Neterlands, pp. 616.
- INEGI** (1990). *XI Censo General de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Estado de México.
- INEGI** (1994). *VII Censo Agropecuario (Resultados Definitivos)*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- Instituto Nacional de Ecología,** (1996). *Transformación de los Sistemas Naturales en México*. Gaceta Ecológica INE-SEMARNAP. No. 40, México. 17-21 pp.
- INEGI** (1995). *Conteo de Población y Vivienda 1995. Perfil Sociodemográfico*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Estado de México, pp. 101.
- Júnior, Romeu, S; Ferreira P. S; Filho, V. M y Júnior Novaes, R. A.** (1995). *Actualización de la Carta de uso del suelo y cobertura vegetal del Municipio de Ubatuba (SP), Utilizando Percepción Remota y SIG*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 173 - 179 p.

- Lillesand T. y Kiefer R. (1979). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Jhon Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 612.
- Lillesand T. y Kiefer R. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Jhon Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 750.
- López, B J (1998). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): conceptos, definiciones y contexto metodológico que involucra su uso*. En Quivera. Año 1, Número 0. Toluca Estado de México, México. 77-100 p.
- López, B. J. (1995). *Imágenes Digitales de Video en Evaluación de Terreno*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 146-154 p.
- López, B. J. y Palacio P J.L. (1995). *Cuantificación del crecimiento de las áreas Erosionadas en Cabeceras de Cárcavas Procesando imágenes de video*. En Boletín de Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México, 27-38 p.
- Mather, M. P. (1987). *Computer Processing of Remotely – Sensed Images. An Introduction. Premiere Version*. ITC. Holand, pp. 346.
- Meredith, C. Tomas. (1995). *Geographic Information and Community – Based Environmental Decisions*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 2003-215 p.
- Molina L. J. E. (1995). *Focalización del Plan de Acción y Recursos para Santafé de Bogotá 1995-1998*. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 229-234 p.
- Mooser, F. (1957). *Los ciclos del vulcanismo que formaron la Cuenca de México*. Internat. Geol. Cong. 20 th, México, D.F. Tomo 2 de vulcanología del Cenozoico, Secc. 1. 337-348 p.
- Myers, N. (1993). *Tropical Forest. The Main Deforestation Fronts*. *Environmental Conservation*, 20(1). 9-16p.
- Navarrete, P J.A. (1999). *El uso de fotografías aéreas digitales y SIG en la actualización cartográfica de la Zona Federal del Ex – Lago de Texcoco*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Colegio de Geografía. F.F y L. UNAM. México D.F. 79 pp.
- Palacio, P.J.L. (1996). *Apuntes sobre Percepción Remota y Videografía*. Escrito para la materia del Laboratorio de Cartografía 2. Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía. UNAM, México, pp. 20.



- Pedraza, C. L. (1987).** *Síntesis del Proceso de establecimiento y construcción de los trabajos de conservación de suelos, agua y reforestación en áreas erosionadas de la cuenca oriental del Ex Lago de Texcoco.* En Ruiz F. J. F. *Uso y manejo de tepetates para el desarrollo rural.* Departamento de Suelos, Universidad Nacional Autónoma de Chapingo, México. 128-140 p.
- Pérez M. (1975)** *Población y Sociedad. Cuatro comunidades de Acolhuacan.* Centro de Investigaciones Superiores del INAH, México pp. 227.
- Quiñones, H (1987).** *El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía.* Revista de Geografía, INEGI, vol. 2, 13-20 p.
- Rey, C. J. A. (1979).** *Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la Cuenca del Río Texcoco basándose en el factor K.* Tesis Maestría Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados Chapingo, México.
- Richardson, J. Arthur. (1988).** *Video Remote Sensing for Field Crop and Soil Applications.* First Workshop on Videography. 19 – 20 May. Terre Haute, Indiana. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Rincón, M. Luz E. (1995).** *Sistema de Información Catastral. Caso de Estudio: Municipio de Anapoima – Cundinamarca.* Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta, 5-10 de noviembre, Instituto de Geografía UNAM, México 216-223 p.
- Robinson, Arthur H; Randali D. S; Morrison Joel L. (1987).** *Elementos de Cartografía.* Ediciones Omega S. A. Barcelona, pp. 543.
- Rojas B. A. y Martínez L.V. (1992).** *Diagnóstico y pronóstico en los cambios de uso del suelo en la región centro de México.* Instituto de Geografía. UNAM, México. p.p. 151
- Romero H. D. (1999).** *Utilización de fotografías digitales como tecnología alternativa para la actualización de la cartografía urbana del municipio de Texcoco. Estado de México, en el periodo 1970-1997,* Tesis de Licenciatura en Geografía, F.F. y L. UNAM, México, 132 pp.
- Sabins, F. F. 1987.** *Remote Sensing Principles and Interpretations.* W. H. Freeman and Company, New York.
- Sader, S.A; T.A. Stone y .A T. Joyce. (1990).** *Remote Sensing of Tropical Forest: An Overview of Research and Applications Using Non – Phothographic Sensors.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (56) 10: 1843 – 1351 p.
- Sader, S.A.; T. Sever, J. C. Smoot y Richards. (1994).** *Forest Changes Estimates for the Northern Petén Region of Guatemala.* Human Ecology (22) 3: 317-332 p.
- SARH, CNA. (1992).** *Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco.* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión Nacional del Agua. Instituto de estudios, Investigaciones y Servicios de Agricultura y Reforestación de Chapingo. S. C. México, pp. 72



- SARH, CNA.** (1990). *Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Comisión Nacional del Agua. Instituto de estudios, Investigaciones y Servicios de Agricultura y Reforestación de Chapingo. México, pp. 94.
- SEMARNAP.** (1996). *Estudio de uso actual del suelo en la Cuenca Tributaria Oriental del Ex-Lago de Texcoco*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca Gerencia de Aguas del Valle de México y Gerencia del Lago de Texcoco. Consultoría en Planeación y Desarrollo Agropecuario, S.A. de C.V. México, D.F. pp. 142.
- SFP (1993). Secretaría de Finanzas y Planeación.** *Atlas General del Estado de México*. Instituto de Informática e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral. Gobierno del Estado de México. Vol. II Toluca – México. 235 pp.
- Skole, D y Tucker, C.** (1993). *Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Extinction Threats*. BioScience, 44(9): 592 – 604 p.
- Tapia Varela G.** (1999). *Geomorfología Morfogenética de la Vertiente Tributaria Oriental del Ex – Lago de Texcoco*. Tesis de Licenciatura en Geografía, Colegio de Geografía. F.F. y L. UNAM, México, 211 pp.
- U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.** (1995). *Aerial Photographs and Satellite Images*. USA, pp. 20.
- United States Department of Agriculture.** (1995). *Guidelines for the Use of Digital Imagery for Vegetation Mapping*. Prepared for The Forest Service Remote Sensing Steering Committee. Salt Lake City, Utah, pp. 125.
- Valdez M. I** (1996). *Evaluación del cambio de uso del suelo en el área de la Sierra de Quetzaltepec, Texcoco, estado de México, utilizando un sistema de información geográfica*, Tesis de Licenciatura. Colegio de Geografía. F.F. y L. UNAM, México, pp. 93.
- Verbyla, L. D.** (1995). *Satelite Remote Sensing of Natural Resources*. Lybrary of Congress Cataloging – Publications Data. Printed in the United States of America, pp. 198.
- Verstappen TH. H.** (1983). *Applied Geomorphology*. Geomorphological Surveys for Environmental Deevlopment Publ. Eelssevieer Publ. Comp. Amsterdam. pp. 473.
- Werner, G.** (1988). *Los suelos en el estado de Tlaxcala*. Gobierno del Estado de Tlaxcala y Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlax, Tlax, pp. 198.



REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

- SPP. (1970).** Secretaria de Programación y Presupuesto. *Uso del Suelo. Chalco* E14B31. Escala 1: 50 000
- SPP. (1973).** Secretaria de Programación y Presupuesto. *Uso del Suelo. Texcoco* E14B21. Escala 1: 50 000
- SPP. (1977).** Secretaria de Programación y Presupuesto. *Uso del Suelo. Amecameca* E14B41, *Apan* E14B22, *Tizayuca* E14B11. Escala 1: 50 000
- SPP. (1978).** Secretaria de Programación y Presupuesto. *Uso del Suelo. Mariano Arista* E14B32.
- CETENAL. (1983).** Comisión de Estudios del Territorio Nacional. *Uso del Suelo. Cuautitlán* E14A29. Escala 1: 50 000
- SIGSA. (1997).** Sistemas de Información Geográfica S. A. de C. V. *Cambio de uso del Suelo en la Cuenca de México 1950 – 1990.* Escala 1: 100 000.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA