

3
Zejeu



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA
INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE,
DEL ESTADO DE MORELOS**

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

ALFONSO GARCIA SESENTO



MEXICO, D. F.

1995

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**COMISION NACIONAL
DEL AGUA**

**LA PRESENTE TESIS SE IMPRIMO CON EL APOYO
DE LA COMISION NACIONAL DEL AGUA.**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIRECCION
60-1-039

SR. ALFONSO GARCIA SESENTO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Alejandro Guzmán Aguirre, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

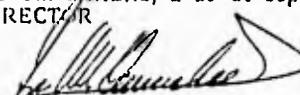
PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION
DE IMAGENES DE SATELITE, DEL ESTADO DE MORELOS

- I GENERALIDADES
- II ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS OBTENIDOS
POR PERCEPCION REMOTA
- III INTERPRETACION DE LA IMAGEN DE SATELITE
- IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFIA
ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 23 de septiembre de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JACOB ECLAIRRE

AGRADECIMIENTOS

A MI MADRE (q.e.p.d.):

A QUIEN SIEMPRE AGRADECERE SU AMOR Y CONFIANZA, SU RECUERDO FUE LO QUE ME IMPULSO A TERMINAR MIS ESTUDIOS.

A MI FAMILIA POR SU APOYO.

A NIEVES POR SU AMOR Y COMPRENSION.

A LUIS ALFONSO Y LUIS ARTURO POR SER LA RAZON DE MI VIDA.

A JOSE EDUARDO POR SU CONTRIBUCION A LA TERMINACION DE MI TESIS.

A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE ME BRINDARON SU AYUDA Y ESTIMULO.

DESEO PATENTIZAR MI AGRADECIMIENTO A:

**ING. MIGUEL VERA OCAMPO
ING. GERMAN ARRIAGA GARCIA
ING. ALEJANDRO GUZMAN AGUIRRE
ING. HECTOR MACIAS GONZALEZ
ING. EMILIANO CAMPOS MADRIGAL**

POR SU ORIENTACION, SUGERENCIAS Y CONSEJOS OTORGADOS.

UN RECONOCIMIENTO ESPECIAL A LOS:

**ING. ARMANDO GASTELUM FRAIJO.
ING. ALBERTO BALANCAN SOBERANIS**

POR SU INAPRECIABLE AYUDA.

**TAMBIEN AL IMTA Y A LA GERENCIA ESTATAL MORELOS DE LA COMISION
NACIONAL DEL AGUA, POR LAS FACILIDADES OTORGADAS PARA LA
ELABORACION DE ESTA TESIS.**

**PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION
DE IMAGENES DE SATELITE, DEL ESTADO DE MORELOS**

C O N T E N I D O

	PAGINA
CAPITULO 1	
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos del estudio	2
1.3 Ubicación del área	3
1.4 Vías de comunicación	3
1.5 Datos generales de población	3
1.6 Fisiografía	3
1.7 Uso del suelo	3
1.8 Climatología	4
1.9 Geología regional	5
1.10 Hidrología superficial	6
1.10.1 Regiones, Cuencas y Subcuencas	7
1.10.2 Régimen y distribución de las corrientes	7
1.11 Hidrología subterránea	8
CAPITULO 2	
ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS OBTENIDOS POR PERCEPCION REMOTA	14
2.1 Principios físicos de la percepción remota	14
2.1.1 Concepto de percepción remota	14
2.1.2 Historia de la percepción remota	14
2.1.3 Espectro electromagnético	16
2.1.4 Interacciones de la energía con la materia	18
2.1.5 Elementos de un sistema de percepción remota	19
2.2 Sistemas sensores y formación de imágenes	20
2.2.1 Concepto de sensor	20
2.2.2 Clasificación de los sistemas sensores	20
2.2.3 Formación de una imagen	20
2.2.4 Principales sistemas sensores	21
2.2.4.1 Sistema LANDSAT	21
2.2.4.2 Sistema SPOT	22
2.3 Comportamiento espectral de los objetos	23
2.3.1 Firma espectral	23
2.3.2 Comportamiento espectral de la vegetación	24

2.3.3 Comportamiento espectral del suelo	24
2.3.4 Comportamiento espectral del agua	24
2.4 Teoría del color y generación de imágenes en falso color	25
2.4.1 Propiedades de la luz	25
2.4.2 Concepto de color	25
2.4.3 Generación de imágenes a color y falso color	25
2.5 Interpretación visual de imágenes de satélite	26
2.5.1 Elementos de análisis de una imagen	25
2.5.2 Fotointerpretación de una banda	26
2.5.3 Fotointerpretación de imágenes y falso color	28
2.6 Análisis e interpretación de datos obtenidos por percepción remota	29
2.6.1 Procedimiento analítico e Interpretativo	30
2.6.2 Análisis de las imágenes	31
2.6.3 Interpretación de las imágenes	31

CAPITULO 3

INTERPRETACION DE LA IMAGEN DE SATELITE	32
3.1. Reconocimiento e Identificación de patrones espaciales	33
3.1.1. Patrones de relieve	33
3.1.2. Patrones de drenaje	33
3.1.3. Patrones de cobertura	35
3.1.4. Análisis de lineamientos	36
3.2. Interpretación geológica	36
3.2.1. Relaciones geomorfológicas	36
3.2.2. Correlaciones estratigráficas	44
3.2.3. Interpretación de lineamientos	44
3.2.4. Asociaciones estructurales	45
3.2.5. Interacciones geodinámicas	47
3.4. Verificación geológica de campo	47
3.5. Interpretación geohidrológica	47
3.6. Revisión y evaluación preliminar	50

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
4.1. Conclusiones	52
4.2. Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFIA	55

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS.

RESUMEN

La prospección geohidrológica mediante el empleo de imágenes de satélite, es una técnica que permite agilizar el análisis e interpretación de los rasgos característicos de los recursos naturales, con los que se determina la presencia o ausencia de los recursos hidráulicos.

El tipo y cantidad de información que puede obtenerse de una imagen está determinada por: el conocimiento, la experiencia, habilidad y motivación del intérprete; la eficiencia de los métodos utilizados y la conciencia de las limitaciones que impone el análisis al sistema de registro de percepción remota.

Para el presente trabajo de interpretación, se utilizó una sección de la imagen de satélite LANDSAT, TM 2647, escala 1:250,000, que cubre al estado de Morelos, en las bandas 2, 3, 4, 7 y combinación de las bandas 2,3,4 y 2,4,7.

Del análisis e interpretación de los parámetros espaciales, se concluye que existe una estrecha relación entre cada uno de los elementos que lo constituyen, una roca genera un tipo de suelo, el cual soporta un tipo de vegetación.

Estos elementos roca-suelo-vegetación son afectados por otro factor, el relieve, su importancia está dada porque determina la presencia de un determinado clima y en función de éste se determina la presencia o ausencia de las aguas superficiales y en su caso de las subterráneas, además de que como se sabe el hombre es el único ser que modifica las condiciones naturales de forma radical y en función del uso que haga de los recursos naturales, determinará las condiciones geohidrológicas.

La metodología utilizada permitió definir los patrones de relieve, drenaje y cobertura, análisis de lineamientos, las relaciones geomorfológicas, correlaciones estratigráficas, la interpretación de lineamientos y las interacciones geodinámicas y en función de lo anterior se elaboró la interpretación geohidrológica en donde se concluye lo siguiente:

Sierra de Chichinautzin y Nevada al norte de Morelos, las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla al sur y las sierras de calizas de la región centro; se consideran como zonas con bajas posibilidades geohidrológicas para establecer aprovechamientos de los recursos hidráulicos tanto superficiales como subterráneos.

Las zonas de lomeríos de la porción centro de la imagen, presentan medianas posibilidades para la instalación de obras de captación.

Las partes bajas de los valles sinclinales en la porción poniente y centro, así como el valle del río Nexapa, debido a la presencia de materiales granulares, son áreas que presentan un alto potencial para la exploración geohidrológica.

Los depósitos de pie de monte presentan condiciones propicias para la descarga de los aguas subterráneas debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad.

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Los numerosos manantiales de aguas freáticas, termales y sulfurosas que se localizan en diversas partes del estado de Morelos, tienen su origen en la proximidad del Eje Neovolcánico, son parte importante de la complejidad geológica de la entidad, resultando interesante su estudio hidrogeológico, especialmente si se definen sus rasgos estructurales regionales que pueden influir en la circulación y almacenamiento del agua subterránea.

Por otra parte, el desarrollo urbano, agropecuario, turístico e industrial que ha mostrado en la última década el estado de Morelos, generó una demanda de agua para cubrir sus necesidades, esto ha motivado que se realicen estudios que conduzcan al conocimiento del comportamiento geohidrológico integral de la entidad, funcionamiento hidráulico y la disponibilidad actual del agua subterránea y así establecer normas y criterios para un manejo racional.

El conocimiento de los recursos naturales que posee una región, es fundamental para su desarrollo, este conocimiento constituye la base de los programas de planeación y de estrategias de crecimiento.

Los recursos naturales tienen una velocidad de cambio muy alta, por lo que tener una cifra exacta de su cuantificación, por medios tradicionales (fotografías aéreas, estudios de campo, etc), resulta económicamente elevado. Esto ha motivado que cuando se requiere determinar la cantidad que existe de algún recurso, se empleen valores estimados a través de diversos métodos. Sin embargo, la confiabilidad del dato estimado, depende de la cercanía en tiempo de la información que alimenta el modelo de estimación.

La cartografía que actualmente se encuentra disponible en México tiene una edad promedio de entre 15 y 20 años, esto hace que para recursos de alta dinámica la información existente y aún la estimada, no se asemeja a la realidad.

Una de las formas tradicionales de cartografiar un recurso natural, es a través de la interpretación de fotografías aéreas, las cuales cubren un área pequeña de la superficie terrestre, su costo es elevado y el avance lento.

La teledetección o percepción remota es la técnica de adquirir y analizar información de los objetos o fenómenos sin tener contacto físico con ellos.

La información puede ser obtenida mediante equipos que registran las manifestaciones o señales de energía que emiten o reflejan los objetos o fenómenos que se estudian. Estos equipos se llaman sensores y cuando son colocados en aeronaves o satélites

espaciales para operar desde grandes distancias se denominan sensores remotos.

Esta tecnología se aprovecha con éxito en la investigación de los recursos naturales de la tierra en forma global o detallada, en tiempo y costo reducido.

Una imagen de satélite es un conjunto de valores ordenados de la intensidad de energía proveniente de la superficie terrestre, tomadas al mismo tiempo pero cuya diferencia es que cada uno de ellos registra la cantidad de luz reflejada por la superficie en un color (banda o ventana del espectro electromagnético) diferente, ordenados en forma de una matriz de N renglones y M columnas, en la que cada elemento corresponde a una celda de la malla y su valor da la evaluación de la función.

Su análisis se realiza a través de computadoras, transportadas al papel y manipulados como una fotografía tradicional.

En México las imágenes de satélite han tenido un uso limitado pues son un producto que requiere de procesos automatizados y su utilidad como una fotografía del terreno ha sido relegada. Por otra parte, la adquisición de los productos de esta tecnología resultan muy costosos y su utilización requiere de equipo y personal especializado. Sin embargo, en Instituciones del gobierno federal, como es la Comisión Nacional del Agua a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en la actualidad lo viene aplicando en estudios relacionados con los usos del suelo, contaminación de cuerpos de agua, prospección y exploración geohidrológica entre otros.

1.2 Objetivos del estudio

- a) Aplicar la metodología que se emplea en la Gerencia de Aguas Subterráneas de la CNA y por el IMTA, para la prospección geohidrológica mediante el empleo de imágenes de satélite.
- b) Divulgar el empleo de las técnicas de percepción remota mediante el empleo de imágenes de satélite, los datos que se reportan son de tipo cualitativo.
- c) Definir los rasgos estructurales regionales que puedan influir en la circulación y almacenamiento del agua subterránea.
- d) Establecer el esquema general de flujo subterráneo.
- e) Recomendar zonas favorables para la explotación de acuíferos.

1.3 Ubicación del área

La imagen de satélite Landsat TM 2647, objeto del estudio, cubre en su totalidad al estado de Morelos, parte sur del Distrito Federal, oriente y sur del estado de Puebla, sur del estado de Guerrero y Este de estado de México, cubriendo una superficie aproximada de 9,900 km² escala 1:250,000



ESTADO DE MORELOS

MUNICIPIOS

 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		 FACULTAD DE INGENIERÍA	
DIRECCIÓN GEOMORFOLÓGICA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS			
DIVISION POLITICA DE MORELOS			
TESIS PROFESIONAL			
Alfonso García Sesento			
1996		FIGURA 1.1	

La prospección geohidrológica, objeto del presente trabajo, es del estado de Morelos, la distribución tan irregular de los límites estatales en la imagen de satélite, obliga a que se utilizará el doble de la superficie estatal. Aclarando que el enfoque es a la parte correspondiente a Morelos.

El estado de Morelos se ubica en la porción central de la República Mexicana. Por su extensión territorial, es una de las entidades más pequeñas del país. Se encuentra localizado en las coordenadas geográficas: 18° 22' 30" y 19° 07' 10" de latitud norte y los 98° 42' 22" y 99° 24' 13" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, limitando al norte con el Distrito Federal y el estado de México; al este y sureste con el estado de Puebla, al sur y suroeste con el estado de Guerrero y al oeste con el estado de México.

Limita al norte con las sierras de Zempoala, Chichinautzin y Nevada, en esta última con el Volcán Popocatepetl, al sur con los ríos Amacuzac y Tepalcingo, al poniente con las sierras de Ocultán y Chalma, al oriente con la sierra de Puebla y el río Nexapa. Ocupa una superficie de 4,941 km² que representa el 0.25 % del territorio nacional y cuenta con 33 municipios, Figura 1.1.

1.4 Vías de comunicación

El área estudiada se encuentra bien comunicada a través de autopistas de cuota, carreteras federales y estatales, vías ferroviarias, aeropuerto de mediano alcance y algunas aeropistas para aviones monomotores.

1.5 Datos generales de población

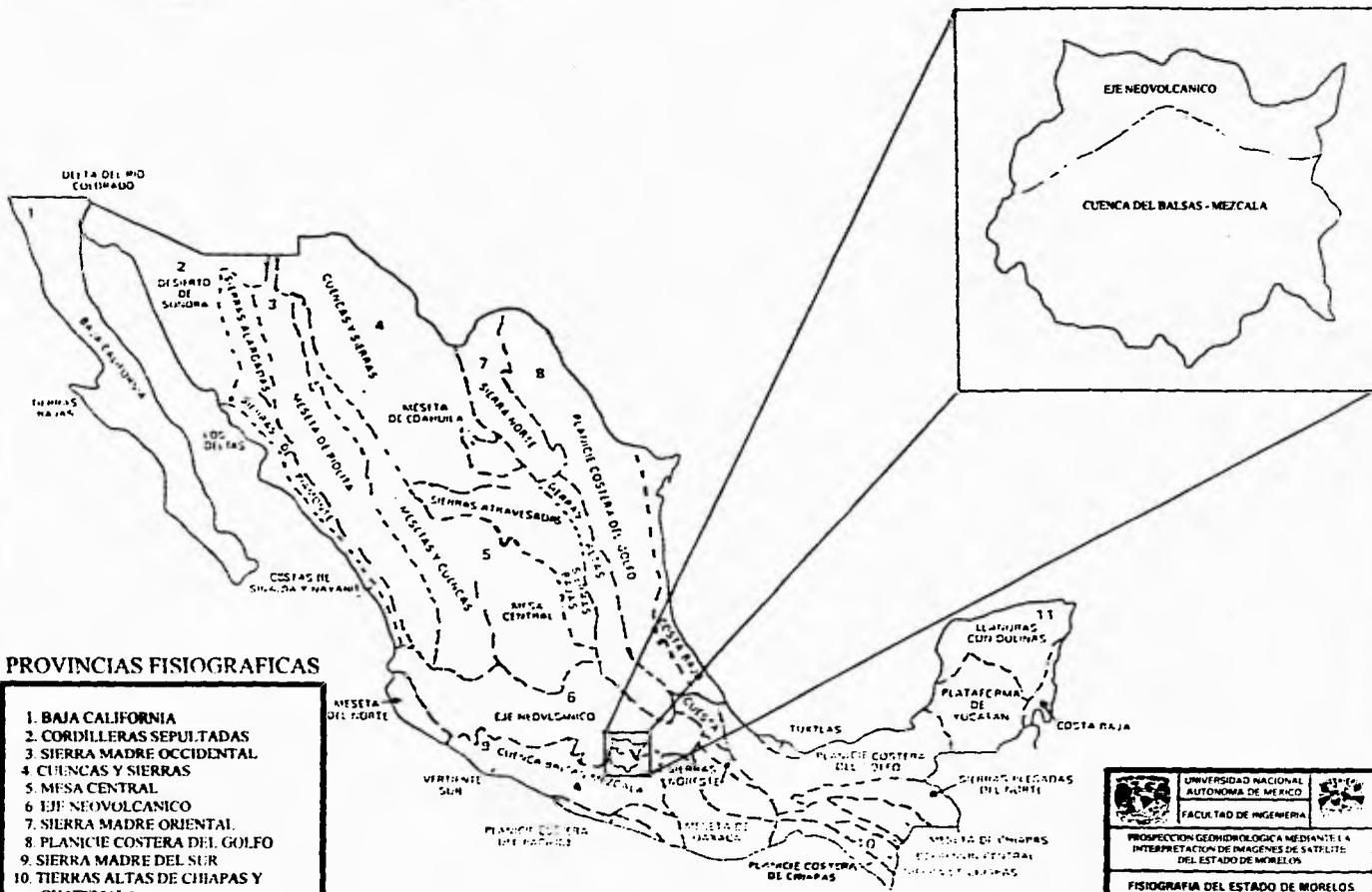
El estado de Morelos tiene una población de 1,195,059 habitantes (datos del XI Censo de Población y Vivienda 1990), se encuentra dividido en 33 municipios con 721 localidades; de las cuales 76 corresponden a zonas urbanas con una población de 1,023,228 habitantes, representando al 85.6% de la población total, el 14.4% la complementa la población rural con 645 comunidades y 171,831 habitantes.

1.6 Fisigrafía

Morelos se localiza en la parte meridional de la zona central de la República Mexicana, en las provincias fisiográficas denominadas: Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Específicamente en la porción sur del Eje Neovolcánico y el borde septentrional de la subprovincia de la Cuenca del Balsas Mexcala, de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (Raisz, 1964) Figura 1.2.

1.7 Uso del suelo

El estado de Morelos ocupa una superficie de 4,941.0 Km² de las cuales: 1,880.41 Km² se dedican para uso agrícola; de estos 561.25 Km² son de riego y los restantes 1,319.16 Km² son de temporal. El área que se destina a pastizales es de 715.52 Km² se localizan principalmente en lomeríos, sierras pronunciadas y cerros abruptos.



NOTA: ESTA FIGURA SE REALIZO CON BASE EN LA DIVISION FISIOGRAFICA DE RAISZ E 1964

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROYECCION GEOMORFOLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
FISIOGRAFIA DEL ESTADO DE MORELOS		
TESIS PROFESIONAL		
Alfonso García Sescoto		
1995	FIGURA 1.3	

El uso silvícola está constituido principalmente por bosques que se encuentran en la parte norte del Estado y selva baja caducifolia que se localiza en las porciones sur, centro y oeste del Estado. La superficie que se destina a este uso es 1,789.86 Km²

La superficie ocupada por cuerpos de agua es de 9.22 Km²; entre los que destacan por su importancia para uso agrícola: las presas de El Rodeo, Los Carros, Cayehuacán y Coahuixtla.

Para uso recreativo destaca el Lago de Tequesquitengo y en menor grado la Laguna de Coatetelco. Las áreas urbanas, caminos y carreteras ocupan una superficie de 545.99 Km², las cuales se encuentran en todo el Estado.

1.8 Climatología

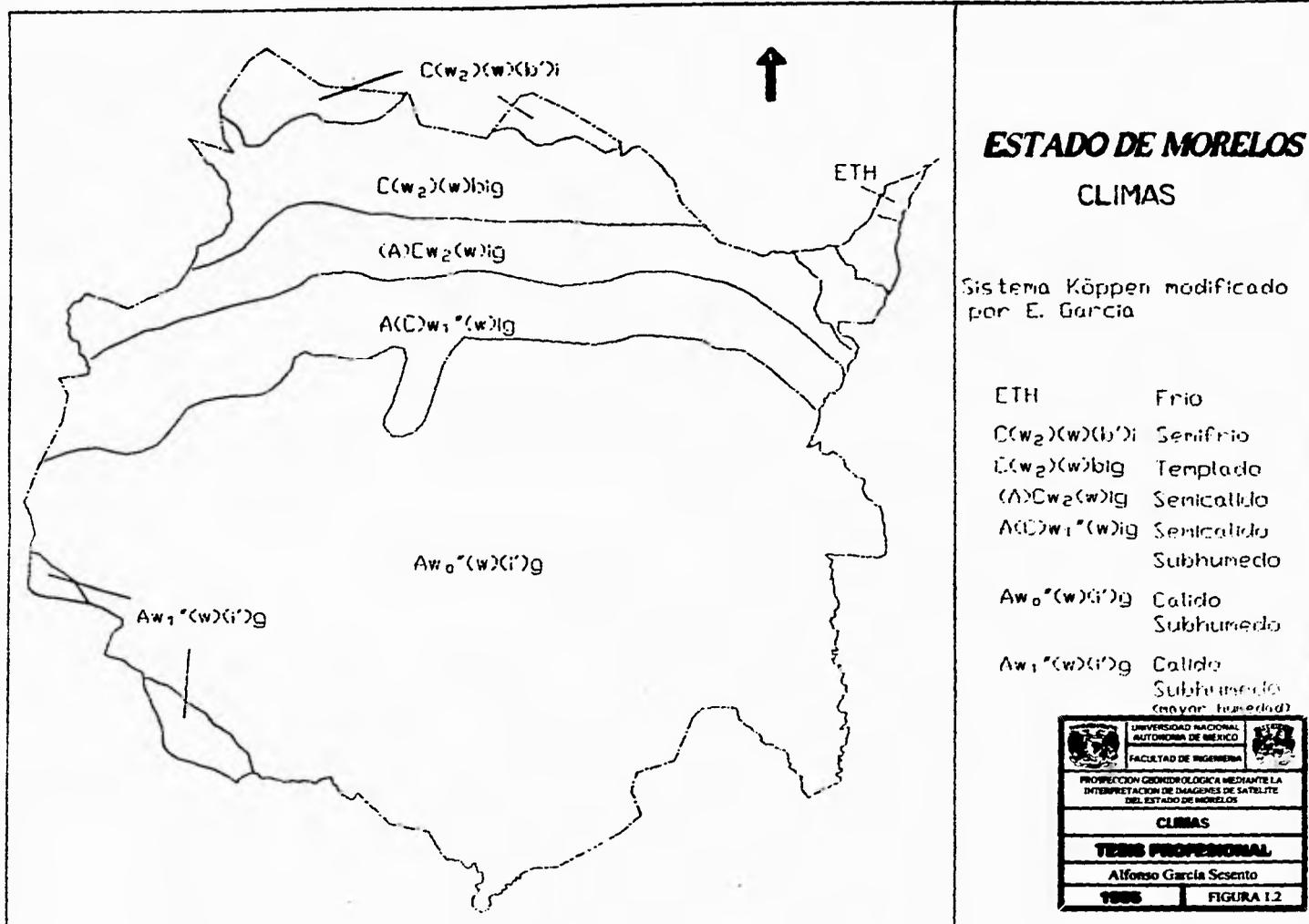
Varios tipos de clima se encuentran en el estado de Morelos, determinados por factores geográficos, como son: La altitud del Eje Neovolcánico y la influencia de la Sierra Madre del Sur, la primera constituye una barrera orográfica que bloquea el paso de los vientos húmedos del Océano Pacífico y la segunda da lugar a la presencia de pequeños valles intermontanos. Atendiendo a sus características climáticas, el clima cálido subhúmedo predomina en el estado de Morelos, rige sobre todo en las partes bajas de los ríos Amacuzac y Nexapa.

Según la clasificación de Köppen, modificado por García E. (1964), para las condiciones particulares de la república mexicana; en Morelos se tienen los siguientes climas: 1).- Cálido subhúmedo, 2).- Semicálido subhúmedo, 3).- Templado subhúmedo y 4).- Semifrío, Figura 1.3.

1).- El clima cálido subhúmedo tiene una amplia distribución en la entidad, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de la lluvia anual; temperatura media anual mayor de 22 °C, precipitación media anual de 700 a 900 mm. cubre un área de 347,991 Ha. representando el 70 % de la superficie estatal. Se localiza en los municipios de Axochiapan, Cuautla, Jonacatepec, Tepalcingo, Tlaltizapán, Tlaquiltenango, Jojutla, Puente de Ixtla, Amacuzac, Xochitepec, Tetecala, Miacatlán, Mazatepec, Temixco y Emiliano Zapata.

2).- El clima de tipo semicálido subhúmedo, se localiza en una franja que va de este a oeste situada en la región norte, en la zona de transición entre la sierra de Chichinautzin y los valles. Se caracteriza por ser intermedio en cuanto a humedad con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor al 5%. la temperatura media anual varía entre 18 y 22 °C, la precipitación media anual es de 900 a 1,200 mm. cubre un superficie de 90,713 Ha. equivalente al 18 % del área estatal. Este clima se localiza en los municipios de Zacualpan, Ocuilco, Yecapixtla, Tlayacapan, Yautepec y Cuernavaca.

3).- El clima templado subhúmedo se distribuye en la zona norte de los valles de Cuernavaca, Yautepec y Cuautla, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia



invernal mayor al 5% de la lluvia anual. La temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C y la precipitación media anual de 1,200 a 1,600 mm. cubre un superficie de 30,102 Ha. equivalente al 7 % del área estatal. Se localiza en los municipios de Huitzilac, Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan y Tetela del Volcán.

4).- Los climas semifríos se reducen a pequeñas áreas en el extremo norte, concentrándose en las partes altas de la sierra de Chichinautzin, en alturas comprendidas entre 2,800 y 4,000 m, su precipitación es de 1500 mm. y temperatura de 12 °C, cubre una área de 25,294 Ha., corresponde al 5% del total estatal. En la sierra Nevada (porción alta del volcán Popocatepetl), se localizan climas fríos y muy fríos.

1.9 Geología regional

La geología regional está expresada principalmente por grandes áreas cubiertas por rocas ígneas de composición básica y ácida, propias del Eje Neovolcánico, así como por la presencia en la porción centro y sur del estado de Morelos de rocas sedimentarias marinas y continentales mesozoicas y terciarias que constituyen la Sierra Madre del Sur.

Destacan las rocas ígneas del Eje Neovolcánico, emitidas por un importante número de aparatos volcánicos, algunos de los cuales constituyen las principales alturas del país.

Se presentan emisiones de materiales volcánicos de naturaleza andesítica y riolítica, cubriendo amplias extensiones en las porciones noroeste, sur y sureste y suroeste. Estos materiales se encuentran constituyendo las siguientes geoformas: sierra de Zempoala y sierra Nevada en la parte norte y sierras de Huautla y Buenavista de Cuéllar al sur.

La provincia de la Sierra Madre del Sur, está representada por rocas sedimentarias marinas y continentales, las cuales presentan geoformas de poca elevación, alargadas y redondeadas, con un desarrollo mucho mayor en sentido longitudinal que en sentido transversal.

La historia geológica del área de estudio, está determinada por rocas de composición y edad muy variadas, que fueron producto de una serie de eventos geológicos iniciados a principios del Cretácico, hace unos 110 millones de años.

Las rocas más antiguas datan del Cretácico Inferior, están expuestas en la porción noroeste del estado de Morelos: son una sucesión de capas de calizas de espesor delgado a medio, de color gris, con nódulos y pequeñas capas de pedernal intercaladas, que afloran en las inmediaciones de la zona arqueológica de Xochicalco.

Rocas de origen marino del Cretácico Inferior y Superior, constituidas por: calizas y dolomías interestratificadas con anhidritas presentes localmente en la parte inferior; calizas masivas de color gris claro a oscuro, con nódulos y lentes de pedernal, con abundantes fósiles silicificados. Lutitas, areniscas y calizas arcillosas cubren parcialmente a las rocas antes descritas, cuyos afloramientos se encuentran en la parte central de la imagen, en estructuras sinclinales y anticlinales.

Cubriendo parcialmente a la secuencia antes descrita, se encuentran rocas originadas durante los períodos Terciario y Cuaternario: conglomerados calizos de edad Terciaria (50 m.a.), localizados principalmente en la porción media y al sur de la entidad. Tobas riolíticas que datan del Oligoceno al Mioceno (40-10 m.a.); arcillas y depósitos evaporíticos aflorando en la porción suroeste de Morelos, de edad Mioceno, andesitas y piroclastos asociados de edad Plioceno (10 m.a.), expuestas en la zona de Zempoala; conglomerados volcánicos, areniscas, yesos, travertino y depósitos lacustres, del Plio-Pleistoceno, basaltos y piroclásticos del Cuaternario (menos de 1 m.a.), localizados principalmente en la sierra de Chichinautzin y Nevada y en pequeñas áreas en las partes bajas de los valles y por último materiales aluviales cuaternarios, gravas, arenas, limos y arcillas que forman la parte superior de la superficie de los valles.

Las estructuras geológicas son producto de una serie de eventos que modelaron la corteza terrestre, entre los que destacan: la intensa actividad tectónica acaecida durante la Revolución Laramide, desde fines del Cretácico Superior hasta principios del Terciario, generada por los esfuerzos compresivos que plegaron y dislocaron a las rocas sedimentarias marinas, dando lugar a la formación de cadenas montañosas. Un nuevo episodio tectónico, de carácter distensivo, generó un sistema de fracturas y fallas, el cual está caracterizado por una intensa actividad volcánica, durante el Terciario (Oligoceno-Plioceno), periodo en que fueron formadas las rocas ígneas que configuraron los rasgos estructurales típicos del Eje Neovolcánico.

El Eje Neovolcánico constituye una amplia franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente a la República Mexicana a la altura del paralelo 20°.

Su origen se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos, debajo de la Placa Americana, que a nivel de la astenósfera sufre fusión parcial y origina los magmas del eje.

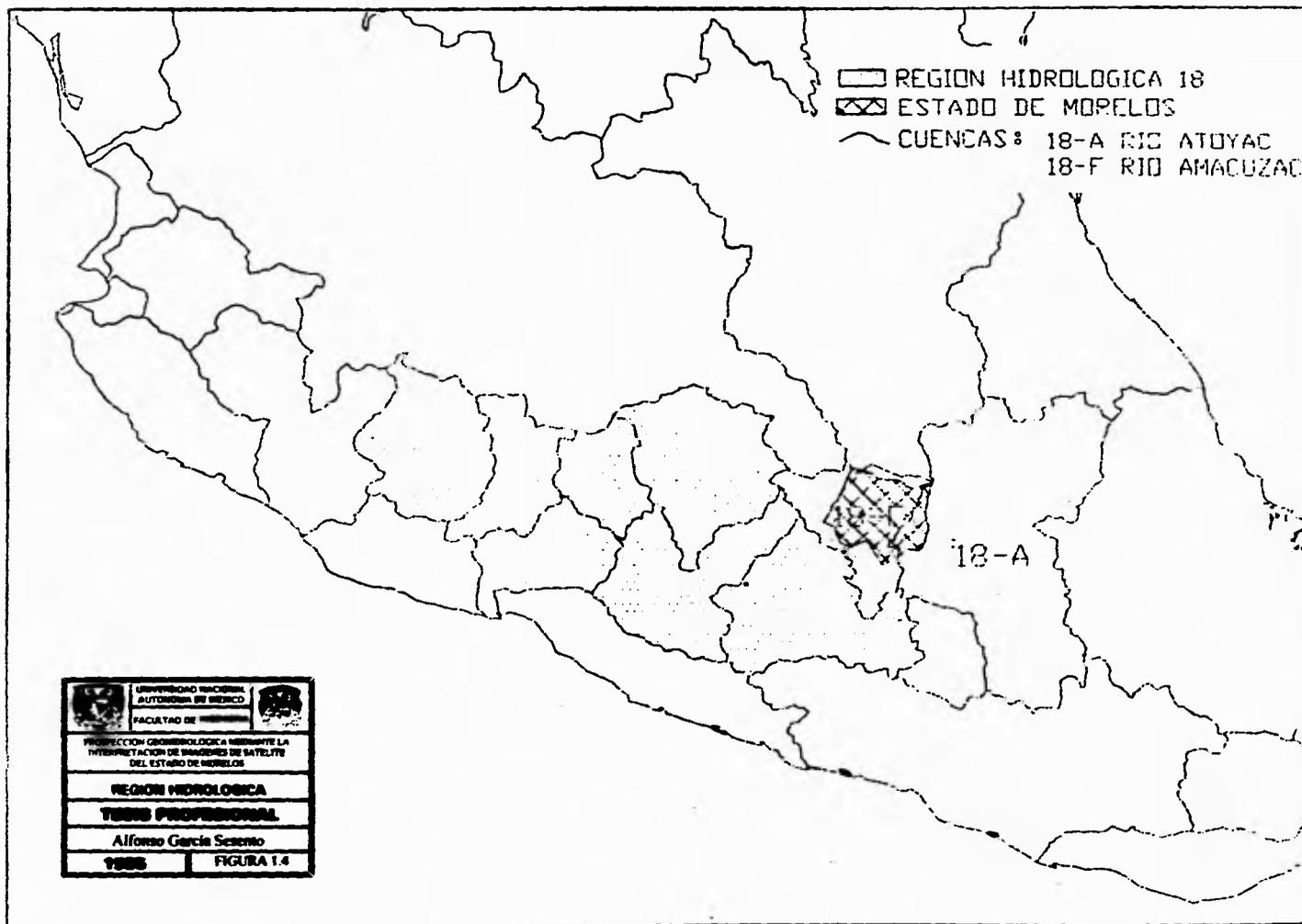
Estratigrafía.

La columna estratigráfica de rocas presente en el estado de Morelos, está representada por 16 unidades, abarcan un lapso desde el Cretácico Inferior hasta el Reciente. Se encuentran expuestas rocas ígneas intrusivas y extrusivas, rocas sedimentarias marinas y continentales y pequeños afloramientos de rocas metamórficas.

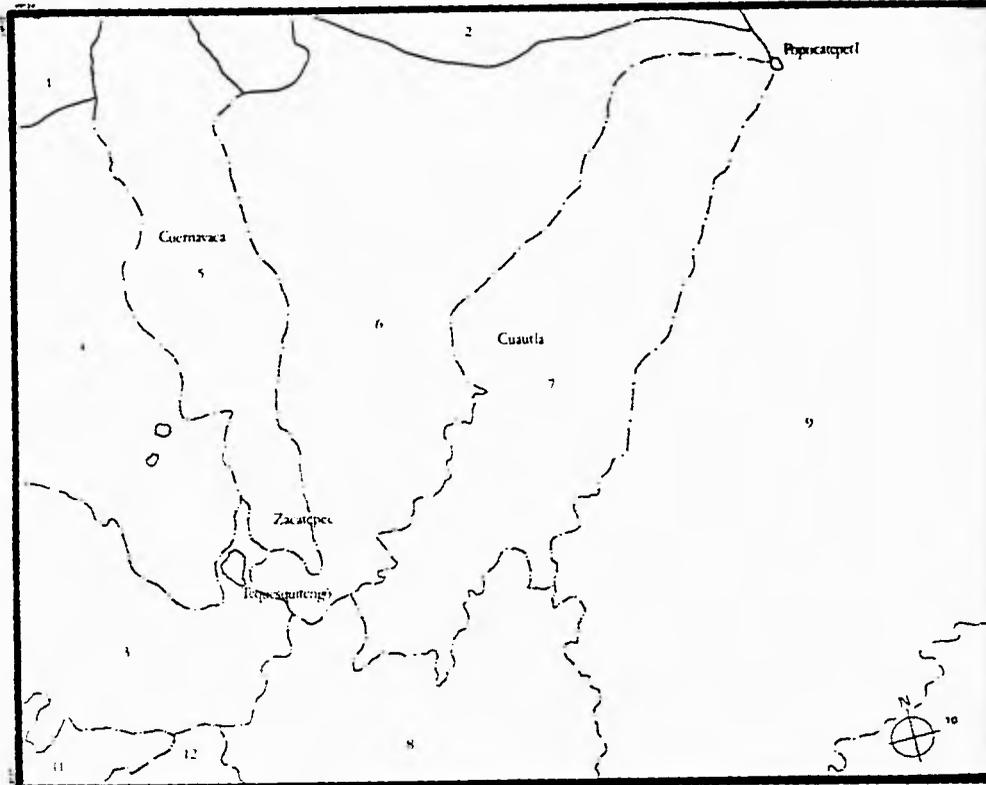
A continuación se presentan las unidades de roca en el orden acostumbrado: Formación Xochicalco, Formación Morelos, Formación Cuautla, Formación Mexcala, Grupo Balsas, Riolita Tlzapotla, Formación Tlayca, Formación Tepoztlán, Andesita Zempoala, Grupo Ixtlilco y No-Diferenciado, Formación Cuayuca, Troncos Ígneos de Chalcatzingo, Granito Colotepec, Formación Tlayecac, Formación Cuernavaca, Formación Chichinautzin, Depósitos Clásticos Continentales y Aluvión.

1.10 Hidrología superficial

El estado de Morelos dispone de abundantes recursos hidráulicos, sin embargo, su



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE GEOGRAFIA		
PROYECCION GEOINFORMATICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE BANDAS DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
REGION HIDROLOGICA		
TRABAJO PROFESIONAL		
Alfonso García Seoane		
1998	FIGURA 1.4	



LEYENDA

REGIONES HIDROLOGICAS

- R. N. N° 12 LERMA-SANTIAGO
CUENCA RIO LERMA
- 1.- RIO ALMOLOYA-ATZOLOTEPEC
R. N. N° 28 PANUCCO
CUENCA RIO MOCTEZUMA
- 2.- LAGO DE TEXCOCO Y ZUMPANGO
R. N. N° 18 BALSAS
CUENCA RIO GRANDE DE AMACUZAC
- 3.- RIO ALTO AMACUZAC
- 4.- RIO COATLAN
- 5.- RIO APATLACO
- 6.- RIO VAUTEPEC
- 7.- RIO CUAUTLA
- 8.- RIO BAJO AMACUZAC
CUENCA RIO ATOYAC
- 9.- RIO XEXAPA
- 10.- RIO ATOYAC-TEHUACIZINGO
CUENCA BALSAS-MEZCALA
- 11.- RIO TEPECUAUILCO
- 12.- RIO IGUALA

FUENTE: IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM/MS, BANDAS 2A, 4, 5, 7, 10, 11, 12, MEXICO
Escala: 1:250,000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
REGIONES HIDROLOGICAS		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESENTO		
1995	MAPA 10	

distribución no responde a las necesidades de los diferentes sectores económicos, la parte alta cuenta con la mayor precipitación, pero carece de la infraestructura necesaria para retener los volúmenes precipitados; la infraestructura existente en la porción media carece de mantenimiento preventivo. La zona baja tiene disponibilidad, pero no dispone de sitios técnicamente adecuados para el emplazamiento de obras hidráulicas, además presenta problemas de mantenimiento preventivo y correctivo.

1.10.1 Regiones, cuencas y subcuencas

Morelos se ubica en la Región Hidrológica Número 18, río Balsas, parcial (cuenca del río Grande de Amacuzac). Colinda al norte con la Región Hidrológica No. 26, río Moctezuma, en la zona que corresponde a la cuenca del lago de Texcoco y Zumpango, por el noreste colinda con la Región Hidrológica No. 12, río Lerma Santiago y por la parte sureste y sur, está rodeada por las cuencas de los ríos Iguala y Tepecoacuilco. Hacia el oriente y sureste se localiza la cuenca del río Atoyac, en la subcuenca del río Nexapa Figura 1.4, Mapa 10.

El área de estudio se encuentra comprendida en la cuenca del río Amacuzac; la cual esta formada por dos subcuencas, la del río Amacuzac y la del río Nexapa. La subcuenca del río Amacuzac cubre una superficie de 4,392 km², sus principales afluentes son los ríos: Amacuzac, Cuautla, Yautepec, Apallaco y otros de menor importancia. La subcuenca del río Nexapa ocupa una superficie de 549 km² y la corriente principal es el río Nexapa, teniendo como afluentes el río Tepalcingo y las barranca del Amatzinac y de los Santos, Figura 1.5.

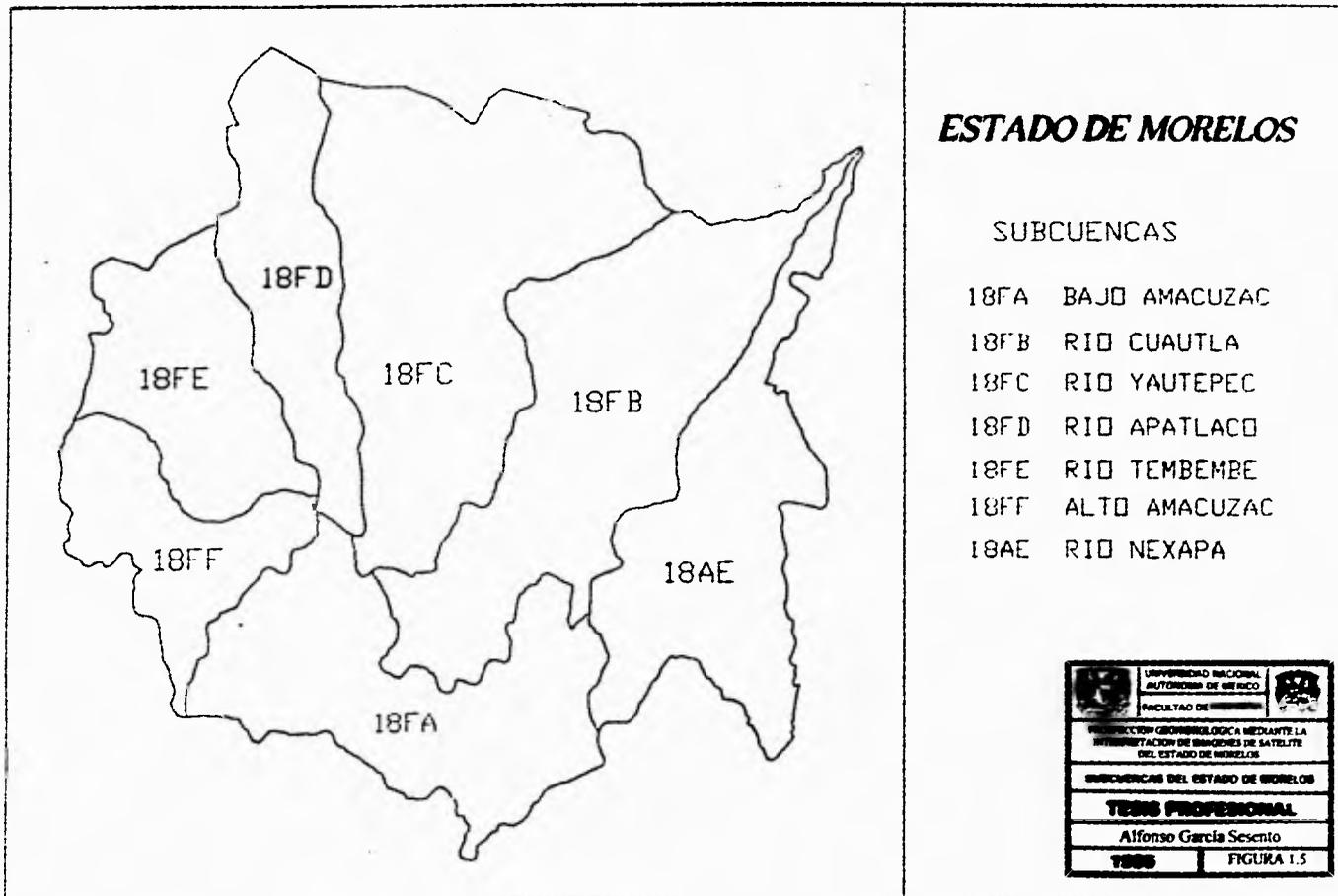
1.10.2 Régimen y distribución de las corrientes

La lluvia en Morelos, es un factor del clima bastante uniforme, el temporal dura 5 meses, en los cuales se registra una precipitación media de 950 mm en la subcuenca del río Amacuzac, lo que genera un escurrimiento medio anual del orden de 1751.3 millones de m³ y en la subcuenca del río Nexapa la precipitación media anual es de 900 mm, lo que da un escurrimiento de 50 millones de m³.

El volumen que se genera en la cuenca del río Amacuzac es de 4,629 millones de m³ y 494.0 millones de m³ se generan en la cuenca del río Nexapa. El volumen total llovido en el estado es de 5,325.0 millones de m³, de los que 1,801.3 millones de m³ escurren libremente, 914.6 millones de m³ se infiltran y el resto se evapora (CNA, Gerencia Estatal Morelos, 1995, en preparación).

Uso del agua superficial.

Los escurrimientos superficiales existentes, básicamente son aprovechados como almacenamientos estacionales para riego, asimismo son utilizados como cuerpos receptores de descargas de aguas residuales municipales de las poblaciones aledañas, así como de las industrias.



ESTADO DE MORELOS

SUBCUENCAS

- 18FA BAJO AMACUZAC
- 18FB RIO CUAUTLA
- 18FC RIO YAUTEPEC
- 18FD RIO APATLACO
- 18FE RIO TEMBEMBE
- 18FF ALTO AMACUZAC
- 18AE RIO NEXAPA

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA		
DIRECCIÓN GEOGRÁFICA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
SUBCUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS		
TESIS PROFESIONAL		
Alfonso García Sesento		
1988	FIGURA 1.5	

Para el manejo y aprovechamiento de las aguas superficiales, existe una infraestructura hidráulica constituida por: 10 presas de almacenamiento con capacidad de 47.0 millones de m³, 63 presas derivadoras y 55 plantas de bombeo, se dispone además de 150 bordos pecuarios con una capacidad útil de 300 mil m³.

Los almacenamientos más importantes son las presas de: "Cayehuacan", "Los Carros", "El Rodeo", "Emiliano Zapata", "Coahuixtla", "Chinameca", "Plan de Ayala", "Quilamula", "Cruz Pintada" y "La Parota", las primeras dos emplazadas en la Subcuenca del río Nexapa y las restantes en la Subcuenca del río Amacuzac.

El volumen extraído de los aprovechamientos superficiales es de 858.0 millones de m³.

Para uso agropecuario se aprovechan 835.1 millones de m³ en la agricultura se aprovechan 834.8 millones de m³ por año, volumen destinado al riego de 56.125 Km² a través del Distrito de Riego No. 16 y unidades de riego del Distrito de Desarrollo Rural No. 1. La superficie de riego no esta compacta, se localiza a lo largo de los ríos o corrientes principales como son: Chalma, Tembembe, Tetzama, Apatlaco, Yautepec y Cuautla, abastecidas a través de 63 presas derivadoras, además se dispone de 29 manantiales.

Para uso pecuario se dispone de 150 abrevaderos, clasificados como pequeños almacenamientos, estimándose una extracción anual de 300 mil m³.

El sector industrial consume un volumen de 6.4 millones de m³.

Adicionalmente, se utilizan en la agricultura alrededor de 14.8 millones de m³ de aguas residuales, descargadas por plantas de tratamiento de los principales centros urbanos y desarrollos industriales de la entidad.

La acuicultura en Morelos constituye otra de las actividades del sector primario, que se ha venido practicando en forma intensiva, la infraestructura está formada por 28 unidades piscícolas, con 609 estanques, los que se abastecen de 9 pozos, 5 manantiales y 14 sistemas de agua potable, con una extracción de 1.5 millones de m³ anuales, de éstos 500 mil m³ provienen de fuentes superficiales.

En la ciudad de Cuernavaca existe una gran cantidad de albercas, con un promedio de 50 m³ cada una, lo cual implica un incremento considerable en la dotación de agua a dicha ciudad.

1.11 Hidrología subterránea

El aprovechamiento de las aguas subterráneas en Morelos, ha tenido un desarrollo acelerado en las últimas décadas, tanto porque cumple casi siempre con normas de calidad para cualquier uso, como por el avance en las técnicas de perforación de pozos profundos que han facilitado su explotación.

Este acelerado desarrollo, ha creado contrastes muy grandes en la situación de los aprovechamientos de las aguas subterráneas o acuíferos en la entidad; en aquellas regiones donde existía una gran escasez, producida por el aumento en la demanda por crecimiento de actividades económicas y la falta de fuentes de aguas superficiales, los acuíferos han sido explotados, con consecuencias graves, como es la zona de Tepalcingo Axochiapan, considerado como sobreexplotado. En otras regiones, existe potencialidad aún no aprovechada que podría propiciar el desarrollo económico, tal es el caso de la zona de Jojutla y Zacatepec.

Para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en el estado de Morelos, se han definido cuatro acuíferos, los cuales se dan a conocer como valles, estos son: valle de Cuernavaca, valle de Zacatepec, valle de Cuautla-Yautepec, emplazados en las subcuencas de los ríos Apallaco los dos primeros y Cuautla Yautepec respectivamente por último el valle de Tepalcingo Axochiapan localizado en la subcuenca del río Nexapa, al oriente de la imagen. Estos acuíferos abastecen a los desarrollos urbanos, agrícolas e industriales del estado de Morelos.

Recarga de los acuíferos.

El potencial hidráulico del estado que se genera por lluvias es de 5,123 millones de m³ al año, lo que permite que infiltren 914.6 millones de m³ para alimentar a los acuíferos. La permeabilidad de los suelos que existen a lo largo del estado es muy variable, sin embargo la mayor recarga se produce por la precipitación pluvial que incide sobre las rocas basálticas fracturadas ampliamente expuestas en la sierra de Chichinautzin, Zempoala y Nevada.

Existe además, una transferencia de agua subterránea que se genera en el estado de México y D.F. del orden de los 664.1 millones de m³ al año y que entra a los acuíferos de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec.

Los escurrimientos superficiales que se infiltran, tanto en el pie de monte como en los cauces, son otra fuente de recarga natural que alimenta a los acuíferos. Sin embargo, parte de los escurrimientos superficiales se generan del agua residual de núcleos de población, instalaciones industriales y por las fugas en las redes hidráulicas subterráneas de estos desarrollos, lo que contribuye a la renovación de los mantos acuíferos a costa del deterioro de su calidad.

Una parte del agua que se utiliza para riego agrícola retorna a los acuíferos por infiltración. El desarrollo agrícola ha generado un incremento en la recarga por infiltración en vasos, canales y terrenos de cultivo.

En el transcurso de las últimas cuatro o cinco décadas, la recarga de los acuíferos ha sido modificada a causa de la creciente influencia de las obras y actividades humanas. La construcción de presas y bordos ha alterado el escurrimiento natural de las corrientes superficiales, y en consecuencia, la infiltración a lo largo de los cauces.

La extracción de agua subterránea mediante pozos también ha favorecido a la recarga, al abatir los niveles freáticos e inducir con ello al incremento de la infiltración originada en los depósitos y cursos de agua superficial.

Descarga de los acuíferos.

La descarga de los acuíferos se realiza de dos formas: la primera por descarga natural a través de manantiales y la segunda a través de la construcción de obras de alumbramiento.

El afloramiento de las aguas subterráneas a través de manantiales se localiza principalmente en la zona de transición entre las sierras y los valles. Los manantiales que destacan por los volúmenes que aportan son: El Túnel, Chapultepec, Las Fuentes, Oaxtepec, Itzamatilán, Michate, Ahuilican, Las Estacas, El Almeal, Agua Hedionda, Las Tazas. La descarga natural a través de 188 manantiales localizados en la entidad es de 855.5 millones de m³, de los cuales 855 millones de m³ afloran en la cuenca del río Amacuzac y 0.5 millones de m³ afloran en tres manantiales en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan en la cuenca del río Nexapa.

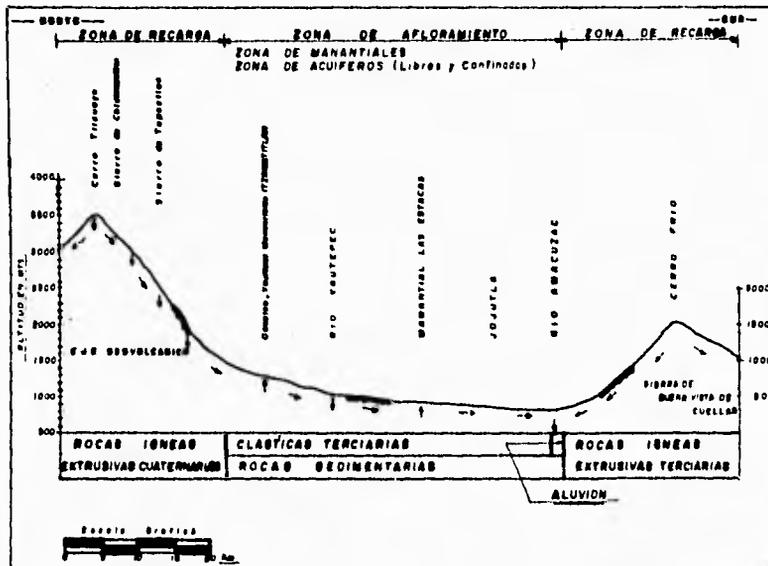
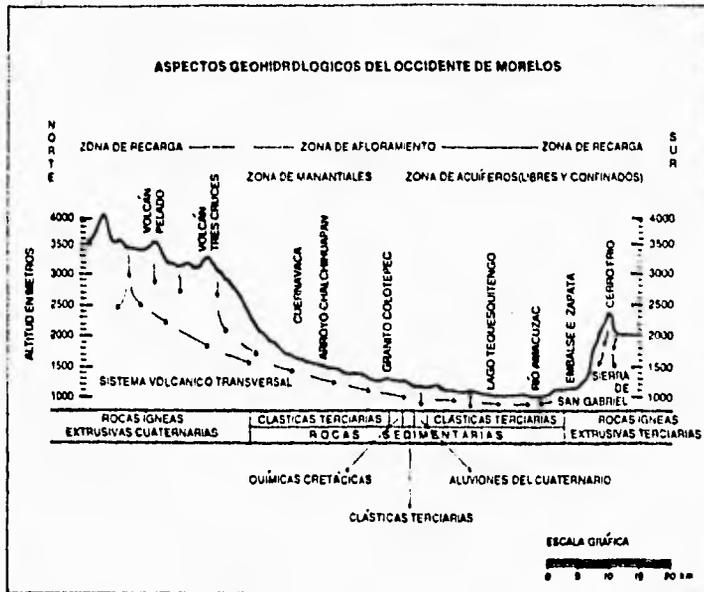
En el acuífero del valle de Cuernavaca se descarga naturalmente un volumen de 231.2 millones de m³ a través de 61 manantiales. En el acuífero del valle de Cuautla-Yautepec se descargan 334.6 millones de m³ en 98 manantiales y el acuífero del valle de Zacatepec se descargan 289.2 millones de m³ a través de 26 manantiales.

A fines de la década de los 30's, los acuíferos se explotaban naturalmente por medio de la captación de manantiales. Las condiciones de descarga permanecieron casi inalteradas hasta mediados de los 40's, época en la que se inició la explotación intensiva de los acuíferos estatales; a partir de entonces, la creciente extracción de agua del subsuelo provocó el abatimiento de los niveles freáticos, con la consiguiente disminución de la descarga natural en las áreas de bombeo, numerosos manantiales de bajo gasto se agotaron.

La construcción de pozos que inició en la década de los 40's y alcanzó su mayor intensidad en los 80's y continúa con ritmo creciente a la fecha.

Actualmente, los aprovechamientos hidráulicos localizados en el estado bombean un volumen de 316 millones de m³, de los cuales 265.8 millones de m³ se descargan en la cuenca del río Amacuzac y 50.5 millones de m³ se descargan en el acuífero del valle de Tepalcingo-Axochiapan.

En el acuífero del valle de Cuernavaca se extraen 119.6 millones de m³ de agua al año, en el acuífero del valle de Cuautla-Yautepec se extraen 89.8 millones de m³ y en el acuífero del valle de Zacatepec se extraen 56.1 millones de m³ al año.



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA		
PROSPECCIÓN GEOMORFOLÓGICA MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITES DEL ESTADO DE MORELOS		
ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS		
TESIS PROFESIONAL		
Alfonso García Sesento		
1995	FIGURA 1.6	

De los volúmenes que se extraen a través de aprovechamientos artificiales, los pozos representan el 99.1% del volumen total, el resto se extrae a través de norias. Los volúmenes extraídos a través de aprovechamientos subterráneos en el estado de Morelos se observan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Aprovechamientos subterráneos por acuífero y volumen anual (millones de m³) del estado de Morelos.

ACUÍFERO	TIPO DE APROVECHAMIENTO						TOTAL	
	POZOS		NORIAS		MANANTIALES		No. APROV	VOL. EXTRAC Mm ³ /año
	No. APROV	VOL. EXTRAC m ³ /año	No. APROV	VOL. EXTRAC Mm ³ /año	No. APROV	VOL. EXTRAC Mm ³ /año		
CUERNAVACA	469	118.5	316	1.1	61	231.2	840	350.8
CUAUTLA-YAUTEPEC	416	88.7	845	1.1	98	334.6	1351	424.4
ZACATEPEC	219	55.6	355	0.5	26	289.2	600	345.3
TEPALCINGO-AXOCHIAPAN	155	50.5	27	0.03	3	0.5	185	51.03
TOTAL	1259	313.3	1543	2.73	188	855.5	2990	1171.63

Movimiento de las aguas subterráneas.

En las cuencas hidrográficas en su estado natural, el agua circula de las áreas de recarga a las áreas de descarga, controlada por la estructura geológica, por la distribución espacial de la recarga y por la posición de los niveles base de descarga. En el subsuelo de las zonas geohidrológicas, el agua fluye de las sierras y lomeríos hacia las partes bajas, donde una fracción del volumen de agua ingresa a los acuíferos, otra parte circula a lo largo de los cauces o sale por evapotranspiración, mientras el resto continúa su curso subterráneo hacia aguas abajo a lo largo de los valles.

Poco a poco, la explotación de los acuíferos fue modificando las características del flujo subterráneo. Al abatirse los niveles del agua en las áreas de bombeo fue aumentando el caudal que migraba hacia ellas, a costa del que originalmente se dirigía hacia los vertedores naturales; así se fueron desarrollando depresiones piezométricas en la zona de Tepalcingo-Axochiapan, dando como resultado que ahora en esa zona, se presenten abatimientos de los niveles piezométricos año con año (2 metros por año) Figura 1.6.

Aprovechamiento de las aguas subterráneas.

En el estado de Morelos, se tienen actualmente 2,990 captaciones, con las que se aprovecha un volumen medio anual de 1,171.03 millones de m³, de estos, 1,259 son pozos profundos, 1,543 son norias y 188 manantiales.

Para abastecer de agua potable a las ciudades y comunidades del estado (uso público urbano) existe un total de 692 pozos profundos, 30 norias y 72 manantiales, el volumen medio anual es de 205.3 millones de m³.

Para uso doméstico se tienen 1,476 norias, con un volumen de 0.9 millones de m³/año. Para uso de servicios a escuelas, hospitales, balnearios, restaurantes y hoteles existen 86 pozos, 6 norias y 22 manantiales con los cuales se utiliza un volumen de 35.7 millones de m³/año.

La actividad industrial emplea 56 pozos y 6 norias el volumen anual extraído es de 26.8 millones de m³.

Para uso agrícola existen un total de 400 pozos profundos, 16 norias y 94 manantiales con los cuales se utiliza un volumen medio anual de 900.6 millones de m³ año. Con fines pecuarios existen 25 pozos profundos y 9 norias de los que se extrae un volumen medio anual de 3.3 millones de m³.

La mayor concentración de pozos profundos se concentra en los municipios de Cuernavaca, Temixco, Jiutepec, Tepoztlán, Yautepec, Cuautla, Tepalcingo y Axochiapan.

La profundidad de perforación de los pozos varía entre unas decenas de metros a cerca de 250 m. Los pozos más someros son los operados con fines domésticos, recreativos y de abrevadero y se localizan en toda la entidad. Los pozos de uso agrícola, municipal e industrial se encuentran a profundidades de 100 a 250 m y se localizan en las inmediaciones de las poblaciones, áreas agrícolas y zonas industriales.

El caudal de extracción de los pozos es de 2 a 100 l.p.s., con promedio 50 l.p.s.; su rendimiento depende de las características locales del acuífero.

La explotación de aguas subterráneas por acuífero es: de 350 millones de m³ en el acuífero Cuernavaca, de 424.5 millones de m³ en el acuífero Cuautla-Yautepec, de 345 millones de m³ en el acuífero Zacatepec y 51 millones de m³ en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan. La tabla 1.2 muestra los consumos de agua subterránea por acuífero y tipo de uso.

Tabla 1.2 Consumo de agua subterránea por uso y acuífero.

ACUIFERO	USO DEL AGUA										TOTALES	
	AGRICOLA		DOMESTICO		PUB.URB/SEIV		INDUSTRIAL		OTROS		No.	VOL.
	No.	VOL.	No.	VOL.	No.	VOL.	No.	VOL.	No.	VOL.		
CUERNAVACA	76	210.1	301	0.1	426	120.6	37	19.1	6	0.6	846	350.6
CUAUTLA-YAUTEPEC	218	348.9	605	0.5	298	69.9	16	3.7	22	1.6	1359	424.6
ZACATEPEC	89	295.4	345	0.2	153	45.5	7	3.9	6	0.3	600	345.3
TEPALCINGO-AXOCHIAPAN	127	48.2	25	0.02	31	4.8	2	0.01	-	-	185	51.03
TOTAL	510	900.6	1470	0.92	908	241.0	62	26.71	34	2.4	2990	1171.03

CAPITULO 2 ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS OBTENIDOS POR PERCEPCION REMOTA.

2.1 Principios físicos de la percepción remota

2.1.1 Concepto de percepción remota

La percepción remota aparece con las primeras misiones espaciales de sondas no tripuladas. A bordo de las sondas se instalaron cámaras de televisión que permitieron capturar y enviar a la tierra imágenes de regiones previamente seleccionadas de la superficie de otros planetas.

Se define como "la técnica de captar y coleccionar información de un objeto a través de medidas hechas a distancia, sin estar en contacto físico con él". Actualmente el concepto está restringido a los métodos que emplean la energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto (Purdue University, 1976; Sabin, 1978).

Taranik y Trautwein (1977), definieron geología por percepción remota como "El estudio de la tierra utilizando radiación electromagnética, la cual es reflejada o emitida desde la superficie de la tierra en una longitud de onda que varia de 0.3 μm (Ultravioleta) hasta 3.0 μm (Microondas)".

De tal manera que percepción remota es "el conjunto de actividades, que buscan la caracterización de las propiedades de los cuerpos naturales, a través de la detección, registro y análisis del flujo de energía radiante, por ellos reflejado o emitido" (Steffen, et al 1981).

2.1.2 Historia de la percepción remota

Los primeros telescopios datan de 1600, inventados para extender la capacidad de observación del hombre.

A mediados del siglo XIX, con el auxilio de un globo, se empiezan a tomar fotografías aéreas, mismas que se utilizan en la elaboración de cartas topográficas.

A principios del siglo XX, se logra romper la barrera de los 1000 metros de altura, con la introducción de vuelos no tripulados de globos.

Hacia 1925, aparece la fotografía a color, para entonces la fotografía aérea tiene grandes aplicaciones en la elaboración de mapas y recolección de datos de relevancia en la planificación.

Años después, la fotografía aérea alcanzó niveles altos de tecnificación. Se logró disminuir el efecto de fenómenos atmosféricos de altura en la plataforma de vuelo y de las lentes utilizadas.

El empleo de los radares en el área de la cartografía se desarrolló con éxito a mediados del presente siglo, a pesar de la desventaja de requerir una gran energía para emitir la señal que después es captada por el sensor.

Muchas de las primeras técnicas usadas en percepción remota son desarrolladas para reconocimientos militares durante la primera y segunda guerra mundial.

De 1950 a principios de los 60's, los avances en las computadoras digitales y las pruebas en los procesos de modelación asociados con la inteligencia humana, se combinan para acelerar el desarrollo de una tecnología de análisis de datos llamada reconocimiento de patrones.

Durante el mismo período, un desarrollo importante se dio con diseño de sistemas sensores, particularmente para medir la energía de longitud de onda infrarroja.

En el año de 1957 la Unión Soviética da inicio a la era espacial con el lanzamiento del Sputnik I, con ello se abren posibilidades de alturas mayores y periodicidad en la ubicación de la plataforma de vuelo.

En 1961 el satélite Mercurio de los Estados Unidos, obtiene fotografías a color y con algunas de ellas, se hace un estudio geológico del desierto del Sahara.

Las restricciones impuestas por la fotografía convencional: recuperación de la película, interpretación no automática y la sensibilidad restringida a una porción del espectro electromagnético, hicieron necesaria la creación de una nueva tecnología.

A partir de 1972 se inicia el programa ERTS (Satélite Tecnológico de Recursos Terrestres), posteriormente denominado LANDSAT (LAND SATELITE), destinada exclusivamente al estudio y detección de los recursos terrestres. La primera generación constó de 3 satélites: Landsat 1 (ERTS-1), enviado en 1972; Landsat 2, en 1975 y Landsat 3, en 1978 (fuera de operación los tres). La segunda generación Landsat 4 y 5, puestos en órbita en 1982 y 1983 respectivamente, se encuentran activos actualmente.

En Febrero de 1978 el gobierno francés pone en marcha el programa de observación de la tierra Spot (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra), con el objetivo principal: de explorar y actualizar el inventario de los recursos naturales; observar y manejar la evolución de los procesos ecológicos naturales o modificados por el hombre; detectar y prever la evolución de los fenómenos oceanográficos, climatológicos, erosión del suelo, contaminación, detección; y estudio de fenómenos naturales como inundaciones, sequías, etc.

La mayor originalidad del programa Spot reside en que presenta un sistema de teledetección operacional y comercial; asegurando de tal forma la obtención de la información para el desarrollo de estudios específicos. La máxima resolución en el terreno de los satélites Spot es de 10 x 10 m.

El Spot 1 fue lanzado en febrero de 1986 y a partir de mayo del mismo año, comienza a transmitir información. El Spot 2 fue puesto en órbita en febrero de 1990, el Spot 3 está previsto a ser lanzado en 1995.

2.1.3 Espectro electromagnético

Se define como toda energía que se mueve a la velocidad de la luz en un patrón de ondas armónicas, cuyas longitudes de onda van desde los kilómetros hasta los nanómetros. Esta energía viaja a una velocidad de 3×10^8 m/s y es capaz de propagarse en el vacío. La energía electromagnética incluye luz, calor y ondas de radio.

El comportamiento de la energía electromagnética se manifiesta de dos maneras: a) Como modelo ondulatorio que es adecuado para longitudes de onda larga y el análisis de la propagación de la energía y b) Como modelo corpuscular adecuado para longitudes de onda corta y proceso de absorción y emisión.

En el espectro electromagnético a pesar de no existir fronteras bien definidas, se distinguen las siguientes regiones:

- **Rayos gamma:** Son los más penetrantes de las emisiones de sustancias radioactivas. No existe en principio un límite superior para las radiaciones gamma, a pesar de haberse encontrado una región superior de frecuencias conocida como rayos cósmicos.

- **Rayos X:** son radiaciones en la región 0.03 a 3 nm, están constituidas de fotones de alta energía y son fuertemente penetrantes, siendo una poderosa herramienta para investigaciones sobre la estructura de la materia.

Esta radiación al llegar a la tierra es completamente absorbida por la atmósfera, no se emplea en percepción remota.

- **Ultravioleta:** La radiación ultravioleta engloba una extensa región del espectro electromagnético que varía de 3 nm a 0.4 μm . Es importante notar que las películas fotográficas son más sensibles a la radiación ultravioleta que a la luz visible. A pesar de que esta región del espectro muestra un relativo potencial de aplicaciones en percepción remota tales como: detección y contaminación de minerales por luminiscencia, contaminación marina, etc; una fuerte atenuación atmosférica en esta región se presenta como un gran obstáculo para su utilización.

La radiación que llega en longitudes de onda mayores de 0.3 μm es absorbida completamente por el ozono en la parte superior de la atmósfera. La radiación que va de 0.3 a 0.4 μm se transmite a través de la atmósfera y puede detectarse por emulsiones fotográficas y fotodetectores, sin embargo la dispersión atmosférica es severa.

- **Visible:** Se define como aquella que es capaz de producir la sensación de visión para el ojo humano normal. Esta radiación que va desde el violeta hasta el rojo, tiene solamente

una pequeña variación de longitud de onda que va desde 0.4 a 0.7 μm . Este tipo de radiación puede ser producido por: luminiscencia o por cuerpos muy calientes.

Esta región es muy importante para la percepción remota, pues las imágenes obtenidas en ella, generalmente presentan excelente correlación con la experiencia visual del intérprete.

Se detecta con emulsiones y fotodetectores, incluye la máxima reflectancia de la superficie terrestre alrededor de 0.5 μm .

- Infrarrojo: Esta radiación tiene gran importancia para la percepción remota, engloba radiaciones con longitudes de onda de 0.7 a 300 μm . Una de las características de la radiación infrarroja es su fácil absorción por la mayoría de las sustancias produciendo en ellas un efecto de calentamiento. Se debe notar que la energía emitida por los cuerpos calientes se sitúa principalmente en esta región.

La interacción de esta radiación con la materia varía dependiendo de la longitud de onda. Las ventanas de transmisión atmosférica son separadas por bandas de absorción, La región de 0.7 a 3 μm comprende principalmente la radiación solar reflejada por los cuerpos y no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales, por lo que se le llama infrarrojo reflectivo. La radiación desde 0.7 a 0.9 es detectada con emulsiones por lo que se le nombra radiación infrarroja.

La porción térmica del infrarrojo posee dos ventanas principales que son: 0.3 a 5 μm y de 8 a 14 μm . Las imágenes en estas longitudes de onda son adquiridas a través del uso de barredores ópticos, no por películas.

- Microondas: Se sitúan en la región de 0.3 a 300 μm en esta porción se puede construir dispositivos capaces de producir haces de radiación electromagnética altamente concentrados llamados radares. Los radares pueden ser para sondeo, de manera semejante al uso de un sonar en el agua. La radiación electromagnética en esta región ha sido ampliamente utilizada en percepción remota, pues su poca atenuación por la atmósfera o por las nubes, propicia el uso de sensores de microondas en cualquier condición de tiempo.

- Ondas de radio: Estas ondas tienen frecuencias relativamente bajas y consecuentemente, grandes longitudes de onda que van desde los centímetros a algunas centenas de metros. Las ondas electromagnéticas de ésta región son utilizadas para comunicación a larga distancia, pues, además de ser poco atenuadas por la atmósfera son reflejadas por la ionósfera, propiciando una propagación de largo alcance.

La región espectral que se extiende de 0.3 a 15 μm es la más usada en percepción remota. Esta franja es conocida como espectro óptico, pues en ella los componentes ópticos de reflexión y refracción, tales como: lentes, espejos, prismas, etc.; pueden ser usados para concentrar o reorientar la radiación.

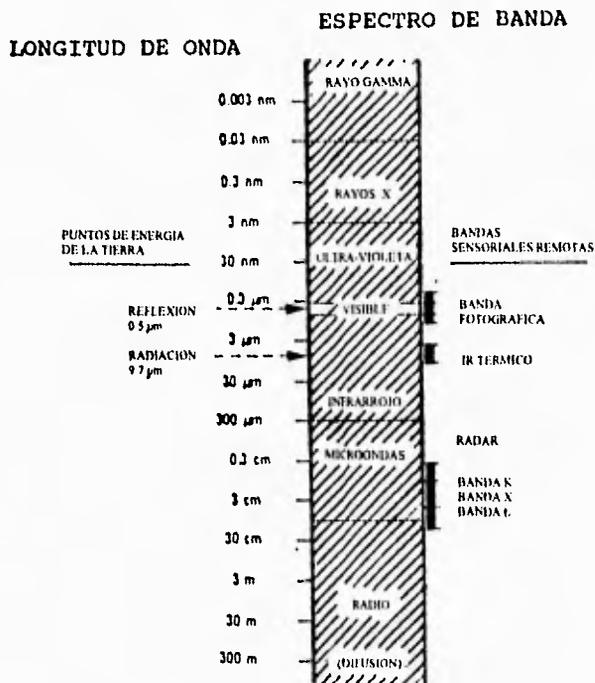


Figura 2.1 Espectro electromagnético mostrando las bandas empleadas en percepción remota (tomado de Sabin, 1978).

En la figura 2.1 se distinguen las regiones del espectro electromagnético mostrando las bandas empleadas en percepción remota.

2.1.4 Interacciones de la energía con la materia

Diferentes interacciones son posibles cuando la energía electromagnética encuentra materia en su camino, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso. En la figura 2.2 se muestran las diferentes interacciones de la energía con la materia.

Las interacciones que tienen lugar en la superficie de una sustancia son llamadas fenómenos superficiales y cuando la radiación electromagnética penetra a través de la superficie resultan interacciones llamadas fenómenos de volumen.

Durante la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, tanto la masa como la energía son conservados de acuerdo a los principios básicos de la física. Las interacciones posibles entre los cuerpos y la energía son las siguientes:

- La radiación puede ser transmitida, esto es, pasada a través de una sustancia (figura 2.2a). La velocidad de la radiación electromagnética cambia cuando ésta se transmite del aire o el vacío dentro de otras sustancias.

- La radiación electromagnética puede ser absorbida por una sustancia y sufrir como consecuencia de esto un incremento en su temperatura (figura 2.2b).

Esta radiación, al propagarse por la atmósfera es absorbida selectivamente por sus componentes, tales como: vapor de agua, ozono, monóxido de carbono, etc. Dentro del espectro visible el ozono es el máximo atenuador por absorción, sin embargo, en muchos casos prácticos esta absorción es despreciada por ser muy pequeña.

En la figura 2.3 muestra el espectro de radiación solar en la parte alta de la atmósfera y el existente al nivel del mar. En esta figura, también están indicadas las porciones donde existe absorción por los diversos constituyentes de la atmósfera y aquellas regiones por donde se transmite sin sufrir alta atenuación.

- La radiación puede ser emitida por una sustancia como una función de su estructura y su temperatura. Toda materia a temperatura arriba del cero absoluto emite energía (0 °K) figura (2.2c).

Un modelo teórico óptimo que permite calcular la energía emitida es el llamado "cuerpo negro". Un cuerpo negro es aquel que es capaz de absorber toda la energía radiante que sobre él incide y emitirla nuevamente a la atmósfera para mantenerse en equilibrio.

La figura 2.4 presenta la exitancia espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas. En ella se observa que al aumentar la temperatura, radiaciones con longitudes de onda cada vez más cortas van siendo incluidas en la energía emitida y el punto correspondiente a la máxima exitancia espectral se desplaza en esta dirección también.

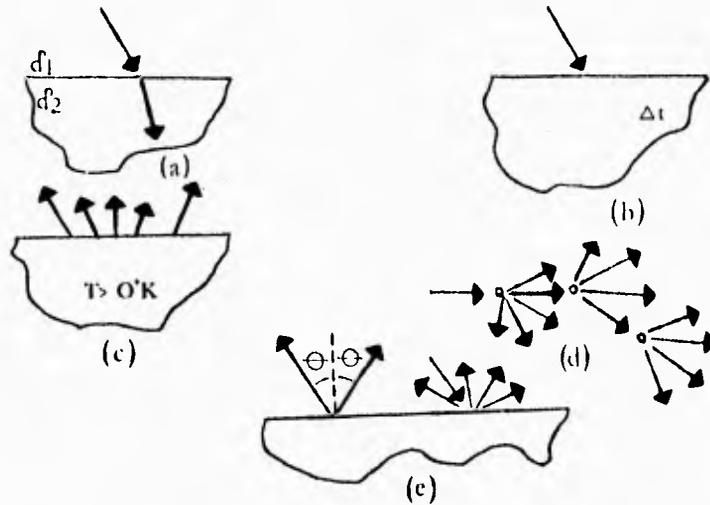


Figura 2.2 Interacciones de la energía con la materia. a) transmisión, b) absorción, c) emisión, d) dispersión y e) reflexión.

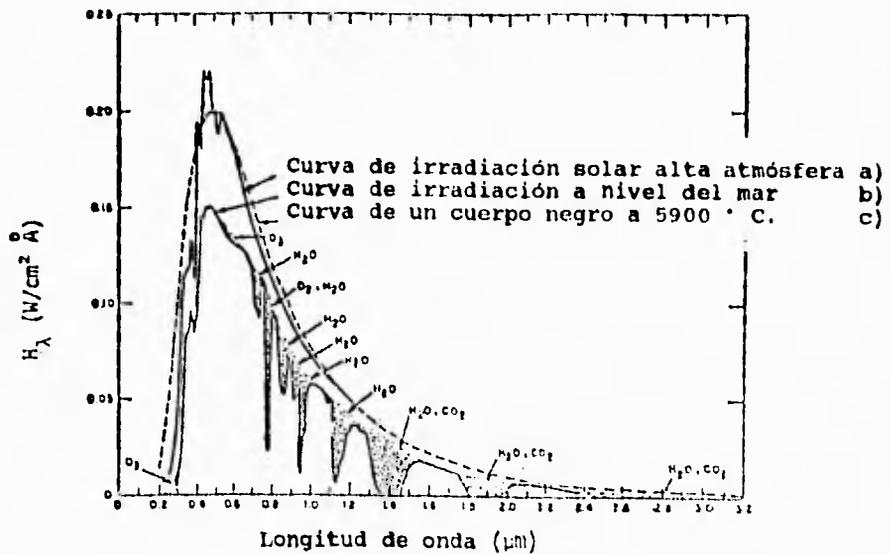


Figura 2.3. Espectros de irradiación. a) irradiación solar en la parte alta de la atmósfera, b) irradiación solar a nivel del mar, c) irradiación de un cuerpo negro a 5900 °C (tomada de Steffen, et al 1981).

A lo largo de todo el espectro electromagnético existen regiones donde la absorción atmosférica es relativamente pequeña, llamadas ventanas atmosféricas, las cuales se caracterizan por una buena transmisión de la radiación electromagnética. Tabla 2.1.

El sol con una temperatura superficial de casi 6,000 °K, irradia grandes cantidades de energía en todas las longitudes de onda con la máxima concentración de energía ocurriendo en la porción del verde brillante (0.5 μm).

La radiación puede ser dispersada, esto es, desviada en todas las direcciones y perdida finalmente por absorción o fuerte dispersión (figura 2.3d). Así también la radiación puede ser reflejada por los objetos o sea, retornada desde la superficie (figura 2.3e).

Dependiendo del tamaño de los elementos de dispersión y de la longitud de onda de la radiación, se pueden distinguir dos tipos de dispersores como son: selectivo y no selectivo (Sabin, 1978).

La dispersión selectiva, incluye a su vez 2 tipos que son: Molecular o Rayleigh y Mie. La dispersión Rayleigh es producida esencialmente por las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera. La dispersión Mie, es causada por partículas de humo, vapor y bruma.

La dispersión no selectiva, es provocada por polvo, niebla y nubes. En la tabla 2.2 se muestran los procesos de dispersión atmosférica.

2.1.5 Elementos de un sistema de percepción remota

El modelo más simple de adquisición de datos en percepción remota consta de 4 elementos básicos: La fuente de iluminación, la trayectoria y medio de propagación, la escena u objeto a ser caracterizado y finalmente el sistema sensor (fig. 2.5).

- Fuente de iluminación: es todo cuerpo que irradia energía electromagnética sobre un objeto y lo ilumina. Esta fuente puede ser de dos tipos externa o natural y creada por el hombre.

- Trayectoria y medio de propagación; es el camino que sigue la energía electromagnética desde la fuente de iluminación del objeto y el sistema sensor. El medio de propagación es la materia o ausencia de ella por la cual se transmite la radiación electromagnética desde la fuente hasta el sistema sensor.

- Escena u objeto; es todo aquello, de lo cual se necesita recabar información, que interacciona con la radiación electromagnética desde la fuente hasta el sistema sensor. El objeto puede ser cualquier cuerpo o rasgo presente en la superficie terrestre tales como ríos, colinas, vegetación, rocas, etc.

Ultravioleta y visible.	0.30 a 0.75 μm . 0.77 a 0.91
Infrarrojo próximo.	1.00 - 1.12 μm . 1.19 - 1.34 1.55 - 1.75 2.05 - 2.40
Infrarrojo medio.	3.50 - 4.16 μm . 4.50 - 5.00
Infrarrojo termal.	8.00 - 9.20 μm . 10.20 - 12.40 17.00 - 22.00
Microondas.	2.06 - 2.22 mm. 3.00 - 3.75 7.50 - 11.50 20.00 en adelante.

Tabla 2.1 Ventanas atmosféricas de transmisión de la radiación electromagnética.

Proceso de difusión.	Dependencia de la longitud de onda τ .	Tamaño aproximado de las partículas en τ .	Tipo de partículas.
Selectivo Rayleigh	τ^{-4}	$\ll 0.1$	moléculas de gases.
Mie	τ^0 a τ^{-1}	0.1 a 10	Humo, vapor, bruma.
No selectivo	τ^0	> 10	Polvo, niebla, nubes.

Tabla 2.2 Procesos de dispersión atmosférica (tomado de Sabin, 1978).

TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION

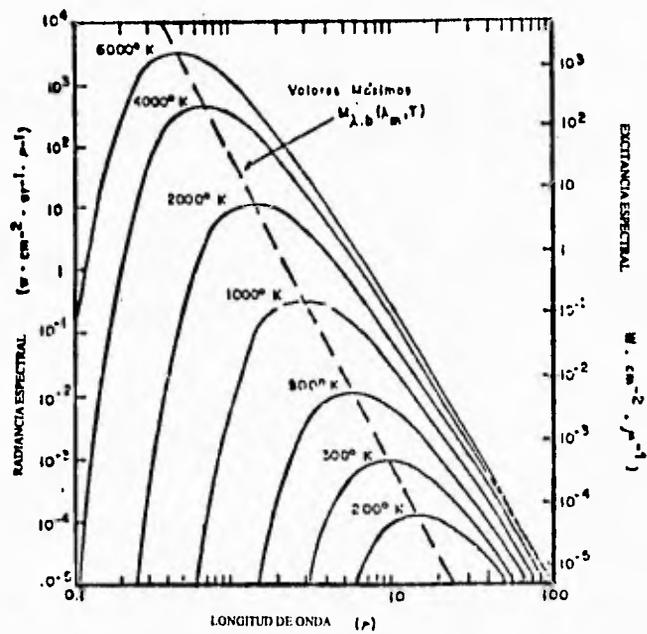


Figura 2.4 Exitancia espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas (tomado de Steffen, et al 1981).

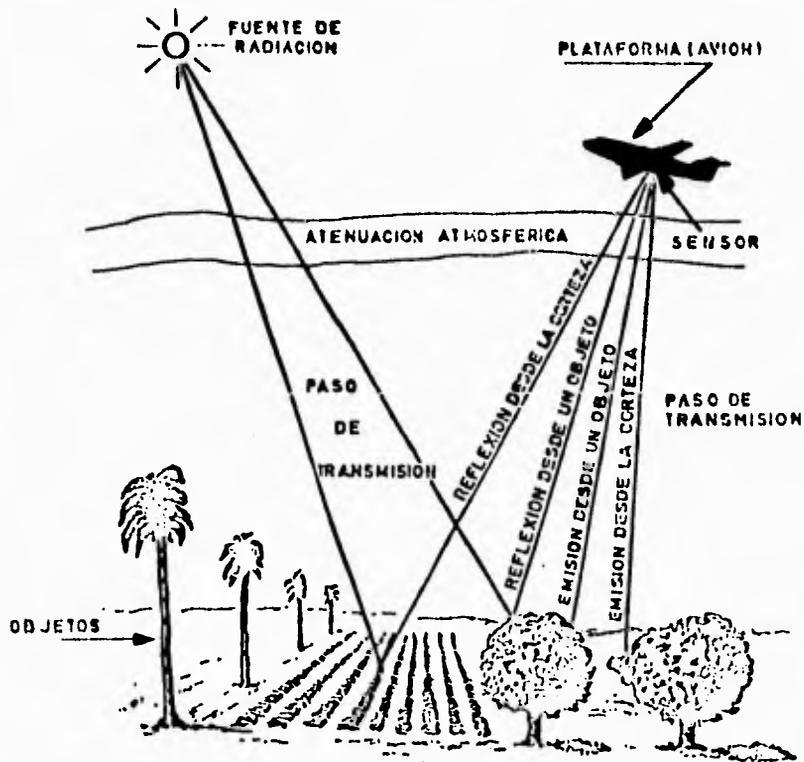


Figura 2.5 Elementos necesarios para que se produzca la percepción remota.

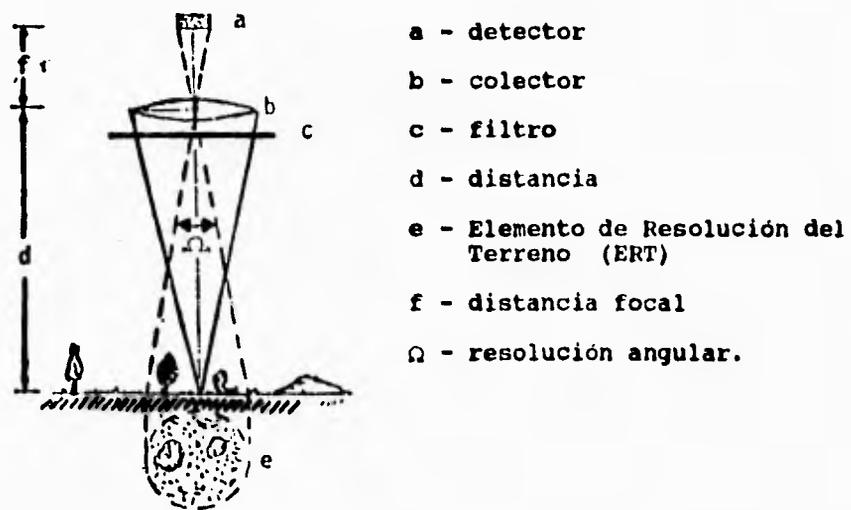


Figura 2.6 Elementos formadores de la resolución de un sistema sensor (tomado de Steffen, et al 1981)

- Sistema sensor: es el instrumento que captura la radiación electromagnética (REM), emitida o reflejada por una escena y la convierte en una señal eléctrica que es grabada en forma de un dato numérico en una imagen.

2.2 Sistemas sensores y formación de imágenes

2.2.1 Concepto de sensor

El sensor es un dispositivo que mide la energía que llega desde un área de la escena, la promedia y la asigna en forma puntual al centro de dicha zona.

Un sistema sensor en su versión más simple, consta de uno o más sensores y un dispositivo de registro para la ERT (Elemento de resolución del terreno) recibida.

Los vehículos que transportan al sistema y lo colocan a una altura determinada se les da el nombre de plataforma. Las plataformas más usadas en percepción remota son los aviones y los satélites, Figura 2.7.

Los sistemas sensores más usados son las cámaras fotográficas y barredores multiespectrales.

2.2.2 Clasificación de los sistemas sensores

Los sistemas sensores pueden ser clasificados según: Modo de operación, tipo de registro y proceso de captación de energía (figura 2.8).

2.2.3 Formación de una imagen

Una imagen, es en término general, cualquier representación pictórica, sin importar la longitud de onda o el dispositivo usado para producirla. Sin embargo, en percepción remota es comúnmente restringida a escenas que son detectadas, por medio de un sistema barredor. La mayoría de las imágenes son desplegadas en una impresión fotográfica después de haber sido registradas.

Para un sistema barredor, la formación de la imagen y el registro de la misma se hace por medios fotográficos, a través de la discretización del objeto en ERT (Elementos de resolución del terreno). El principal tipo de barredor que existe actualmente es un radiómetro formador de imágenes (figura 2.9) que en el camino óptico hacia el sensor tiene instalado un espejo, el cual gira u oscila en la dirección perpendicular al desplazamiento de la plataforma (avión, satélite, etc.), desplazando el CIV (Campo instantáneo de visión) y generando una línea de barrido.

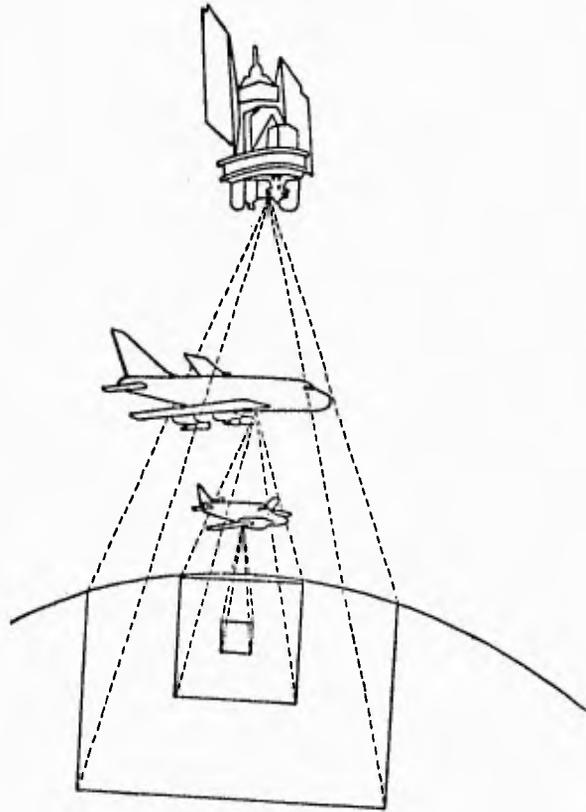


Figura 2.7 Plataformas de percepción remota

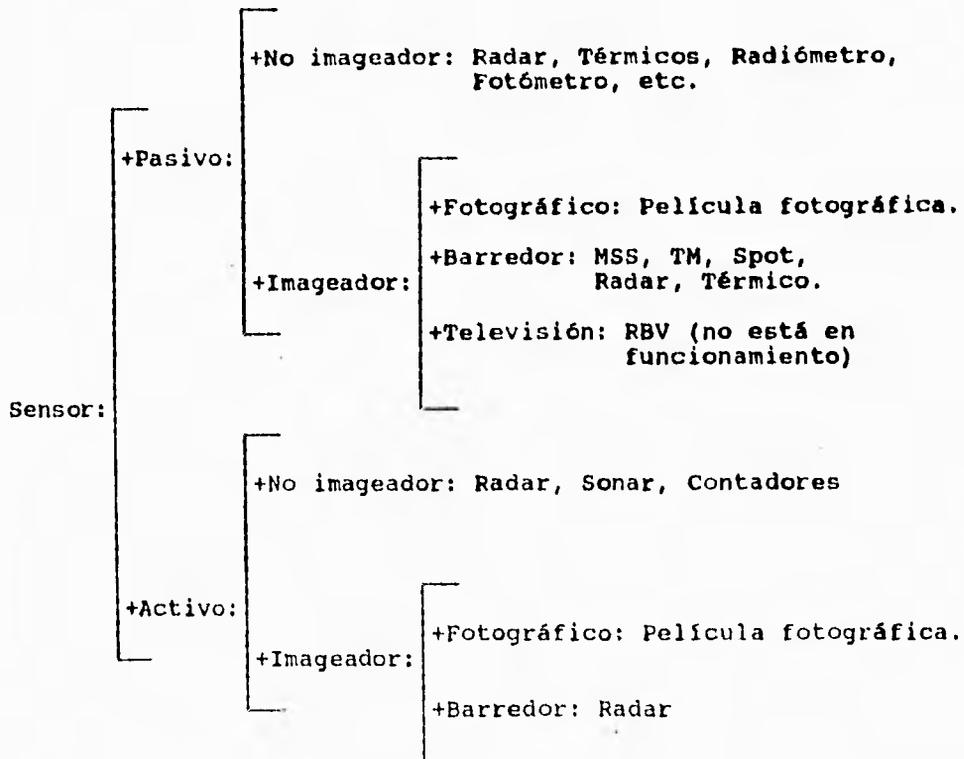


Figura 2.8 Clasificación de un sistema sensor, según modo de operación, tipo de registro y proceso de captación de energía.

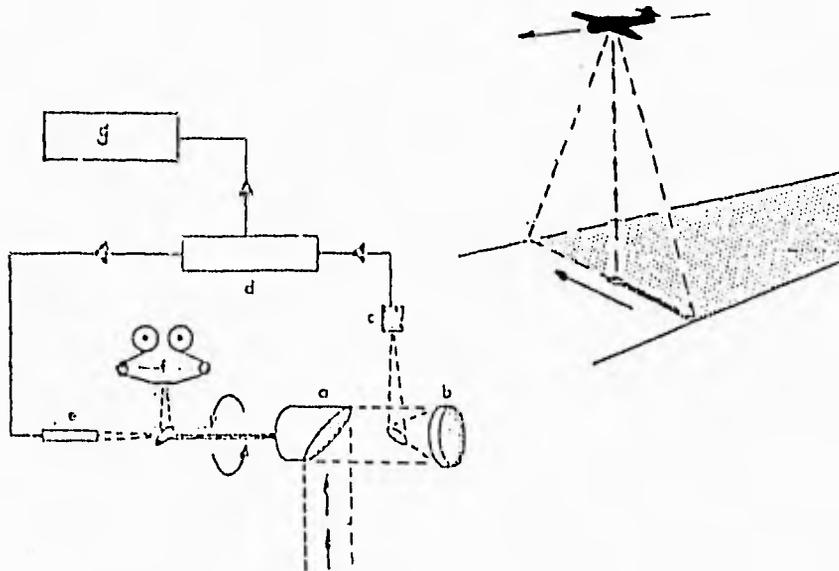


Figura 2.9 Radiómetro formador de imágenes. a) espejo giratorio, b) espejo parabólico, c) sensor, d) módulo de procesamiento electrónico, e) lámpara, f) película y g) grabador de cintas magnéticas.



Figura 2.10 Escala de grises.

Para tener una representación visual de la energía proveniente de un ERT, el valor registrado es asignado a un tono de escala de grises.

Una escala de grises, es una secuencia de tonos en la cual se corre en forma discreta el continuo que va desde el negro o ausencia de luz hasta el blanco o luz más intensa (figura 2.10).

El término tono es usado para referirse a la medida de la cantidad relativa de luz o energía electromagnética registrada en la imagen, distinguible desde el negro hasta el blanco. Por ejemplo, el ojo humano sólo puede distinguir 16 tonos de grises.

Otras características de una imagen son:

A) La detectabilidad, que es la habilidad de un sistema formador de imágenes para registrar la presencia o ausencia de un objeto, aunque la identificación del mismo puede ser desconocida;

B) La identificación, es la habilidad para identificar un objeto en una imagen;

C) Firma, es la expresión de un objeto en una imagen que capacita al objeto para ser identificado.

2.2.4 Principales sistemas sensores

Las imágenes obtenidas por sensores remotos, desde el espacio exterior permiten hacer investigaciones en grandes áreas de la superficie terrestre. En la actualidad existen varios satélites que proporcionan imágenes que tienen utilidades diversas, como la que ha servido para el desarrollo del presente trabajo. A continuación se mencionan las características generales de los satélites Landsat y Spot, que en la actualidad se encuentran en órbita, existen también los satélites Soyus pero no se dispone de información.

2.2.4.1 Sistema LANDSAT

Los satélites Landsat, se desplazan de Norte a Sur en una órbita geocéntrica, circular, quasi-polar y heliosíncrona, que permite a los Landsat, obtener datos de una misma región de la tierra cada 16 días. Los datos que se obtienen son transmitidos vía microondas a las estaciones terrestres de recepción, donde son grabados y procesados. Los datos son ofrecidos como imágenes multiespectrales en formato de fotografías o en cintas magnéticas para computadora (CCT), Figuras 2.11, 2.12, 2.14. Tabla 2.3

El barredor multiespectral (MSS), es un sistema formador de imágenes cuyo barrido es perpendicular a la trayectoria y se obtiene a través de un espejo oscilante, (figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16) con un campo de visada (ángulo de visada) de 11.6°.

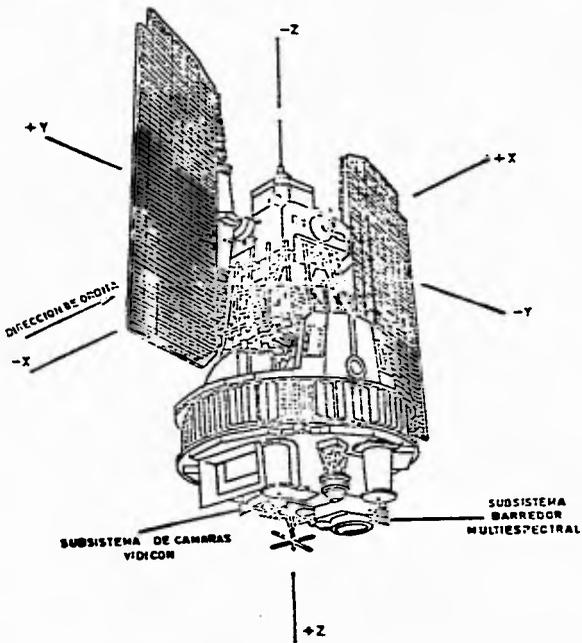


Figura 2.11 Satélite LANDSAT y sus principales sensores.

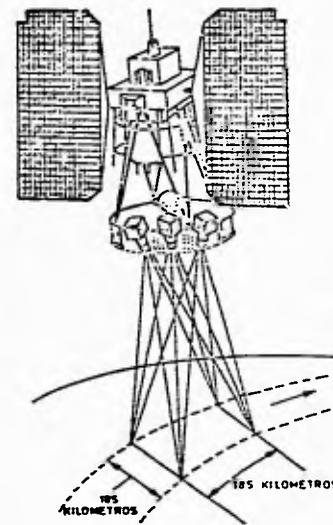
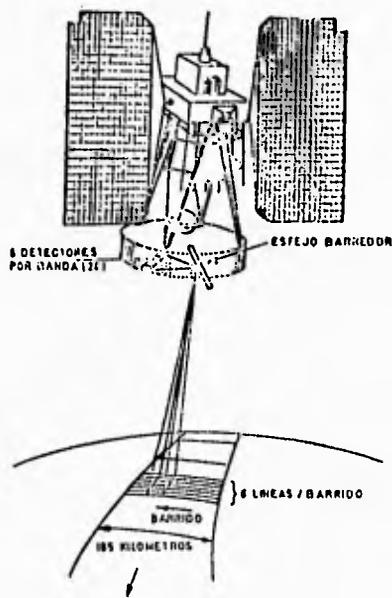


Figura 2.12 Subsistema de camaras, vidicom, del Satélite LANDSAT



**Figura 2.13 Subsistema barredor multiespectral
del satélite LANDSAT**

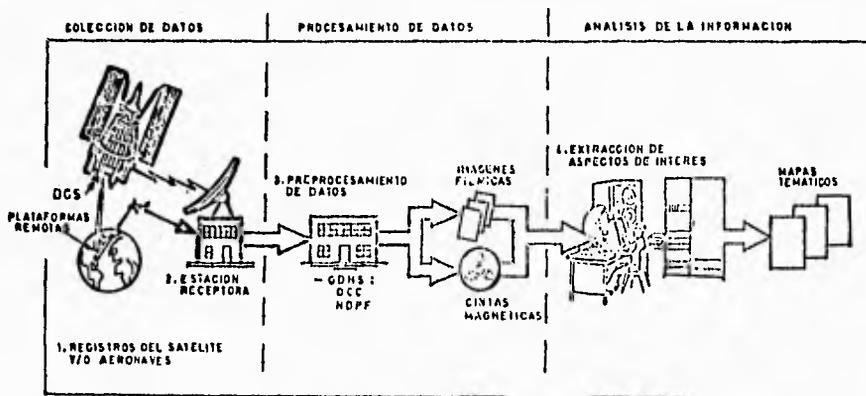


Figura 2.14 Flujo de la información obtenida de los satélites LANDSAT

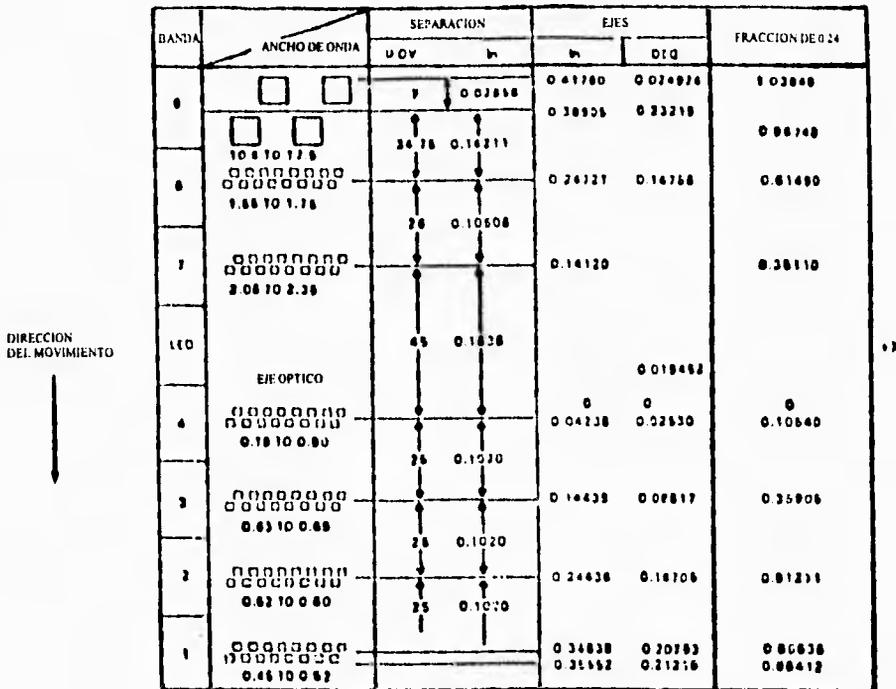


Figura 2.15 Vista de los sensores del TM proyectados en el plano focal principal (Tomada de Sorrenti, 1989).

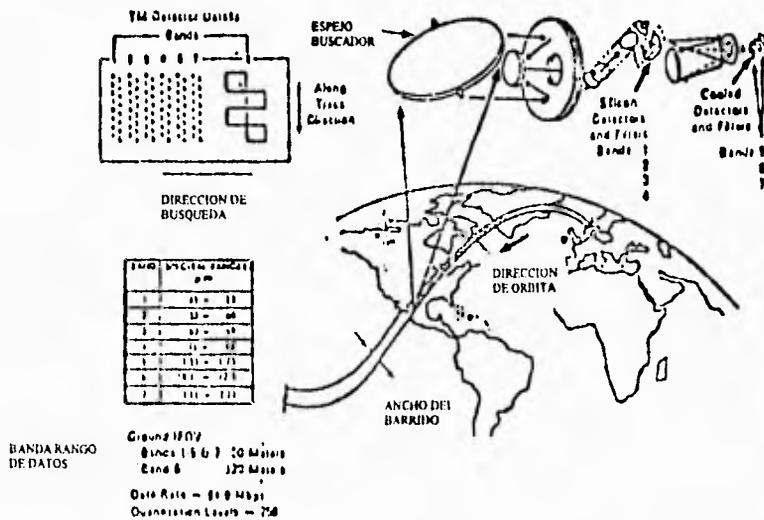


Figura 2.16 Vision general de la estructura de captación de una imagen para el sistema TM (Tomada de Sorrenti, 1989).

El sistema permite la obtención de barridos de aproximadamente 185 Km, los satélites Landsat se localizan a una altitud nominal de 705.3 Km, formando un ángulo de 98.22°, cruzan el ecuador de norte hacia el sur a las 9:45 a.m. (océano Índico), en cada pasada. Cada órbita lleva aproximadamente 99 minutos para completarse, lo que permite un total de 14.5 órbitas por día. Las figuras 2.17 y 2.18 muestran el paso de órbitas subsecuentes y órbitas adyacentes para los satélites, Figura 2.19, 2.20.

La estructura de captación de la imagen MSS, incluyendo el posicionamiento de los detectores en relación a la órbita del satélite y su área de captación en el suelo se muestra en la figura 2.11. En general una imagen MSS está formada por 2983 líneas y 3548 pixels, cubriendo un área de 185 X 185 Km, aproximadamente sobre la superficie. El área de un pixel es de 56 X 79 m.

La tabla 2.3 muestra la serie Landsat, el período de observación y los sensores que contienen. Esta serie ha producido imágenes por medio de tres sensores diferentes MSS, RBV (Sistema de televisión de 3 canales) y TM (Barredor multiespectral de 7 bandas y resolución de 30 m). Sin embargo, los dos últimos satélites contarán con dos sensores nuevos que son el ETM, instrumento formador de imágenes, semejante al TM pero con 8 bandas y una resolución de 15 m y el MLA, barredor multiespectral que contará con 8 bandas y una resolución máxima de 10 metros en la porción visible.

El Mapeador Temático (TM), es un instrumento sensor (captador de imágenes) proyectado para conseguir mejor resolución (30 m máxima de la superficie), separación espectral (7 bandas) y fidelidad geométrica precisa, en comparación con el MSS.

Los datos del TM son adquiridos simultáneamente en 7 bandas espectrales que son:

- Banda 1 de 0.45 a 0.52 μm color azul
- Banda 2 de 0.52 a 0.60 μm color verde
- Banda 3 de 0.63 a 0.69 μm color rojo
- Banda 4 de 0.76 a 0.90 μm infrarrojo
- Banda 5 de 1.55 a 1.75 μm infrarrojo
- Banda 6 de 10.4 a 12.5 μm térmico
- Banda 7 de 2.08 a 2.35 μm infrarrojo

2.2.4.2 Sistema SPOT

El programa Spot (Sistema Probatorio de observación de la Tierra), ha sido colocado a una altitud media de 830 Km, en una órbita circular quasi-polar, inclinada 8° con respecto al Norte geográfico. Da la vuelta a la tierra en 101 minutos, lo cual combinado con el movimiento de rotación de la tierra forma una traza en el suelo de 2 órbitas consecutivas lo cual hace que aparezca desplazada, en el ecuador 2,823 Km, (figura 2.10) cubriendo la tierra entera en 26 días. La escena spot cubre una superficie de 60 X 60 Km, en mira vertical y hasta 60 X 80 Km, en visión oblicua (figuras 2.21, 2.22, 2.23, 2.24, 2.25).

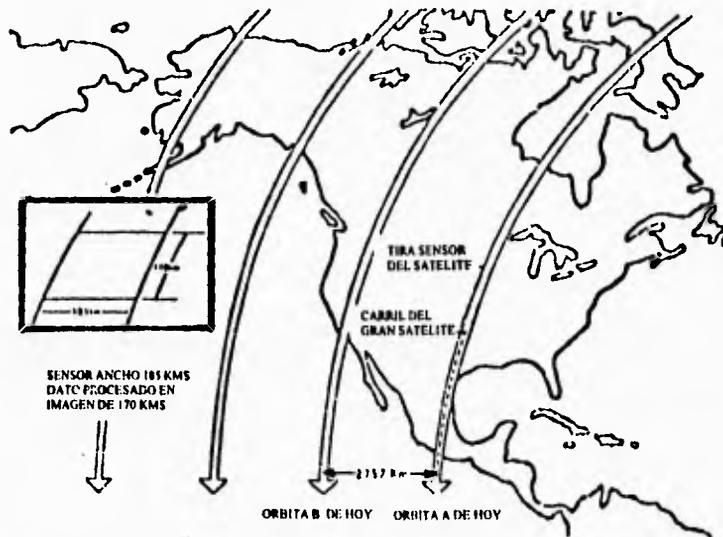


Figura 2.17 Orbits subsiguientes del LANDSAT 4 y 5 (Tomada de Sorrenti, 1989).

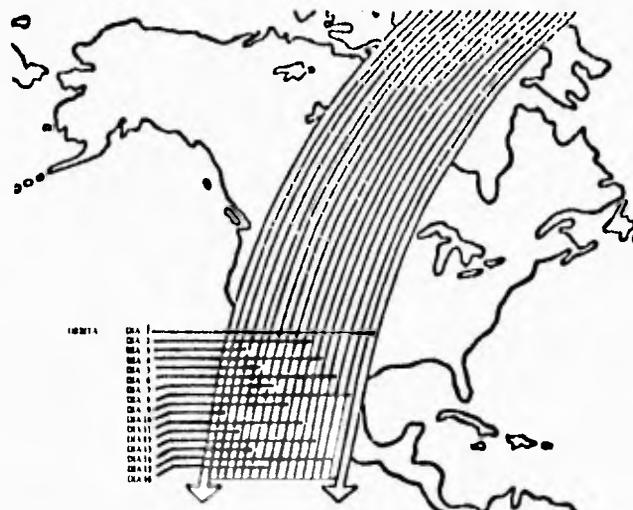


Figura 2.18 Orbits adyacentes en 16 días consecutivos para el LANDSAT 4 y 5 (Tomada de Sorrenti, 1989).

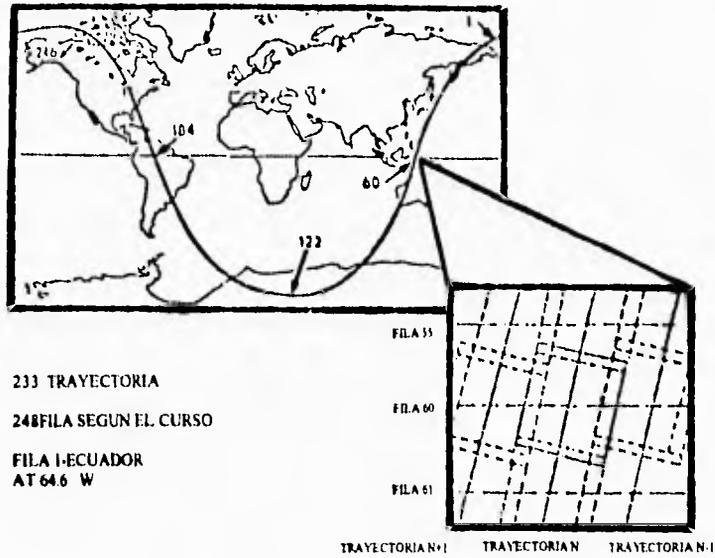


Figura 2.19 Sistema mundial de referencia (WRS) para el LANDSAT 4 y 5 (Tomada de Sorrenti, 1989).

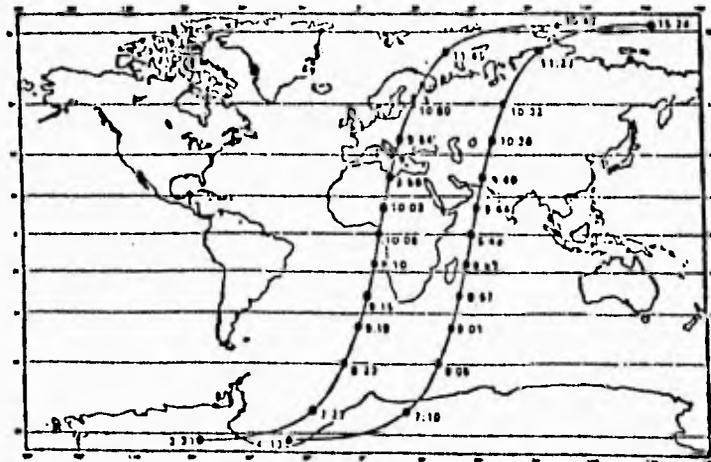


Figura 2.20 Variación de las horas locales con los cruzamientos de las órbitas con las latitudes (Tomada de Sorrenti, 1989).

SATELITES	PERIODO	SENSOR
Landsat 1	23/07/72 al 05/01/78	MSS/RBV
Landsat 2	22/01/75 al 27/07/83	MSS/RBV
Landsat 3	05/03/78 al 07/09/83	MSS/RBV
Landsat 4	16/07/82 operando	MSS/TM
Landsat 5	01/03/84 operando	MSS/TM
Landsat 6	En planes	ETM
Landsat 7	En planes	ETM/MLA

Tabla 2.3 Serie de satélites LANDSAT. MSS = TM = Mapeador temático, ETM = Mapeador temático ampliado, MLA = Arreglo multilíneal

HRV1	XS	+		+		+	
	PAN		+		+	+	
HRV2	XS	+			+		+
	PAN		+	+			+

Tabla 2.4 Modos posibles de funcionamiento simultáneo de los instrumentos sensores HRV1 y HRV2, satélites SPOT.

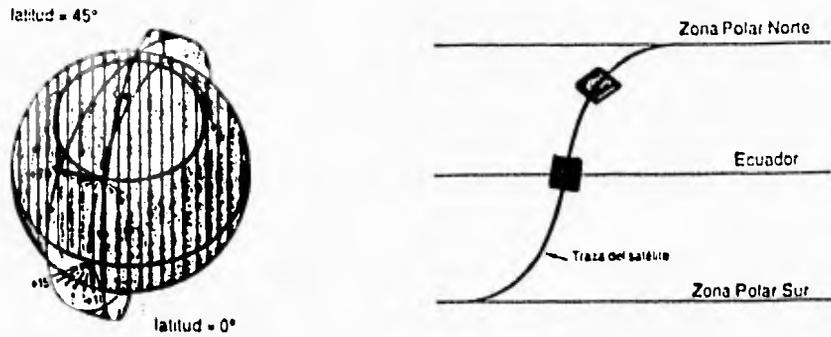


Figura 2.21 Orbitas subsecuentes del satélite SPOT. (tomada de Spot image, 1989)

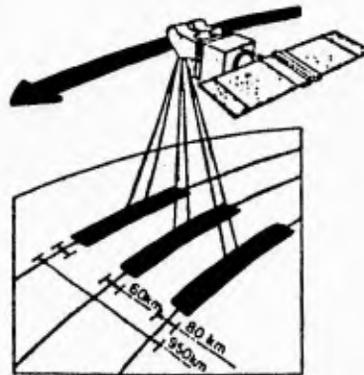


Figura 2.22 Cobertura de la mira vertical y oblicua del satélite SPOT. (tomada de Spot image, 1989)

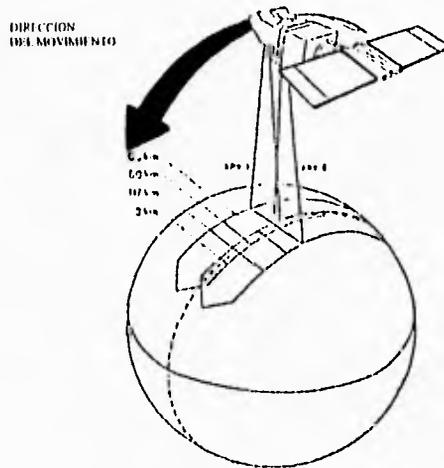


Figura 2.23 Visada vertical de los instrumentos HRV del satélite SPOT. (tomada de CNES, 1988)

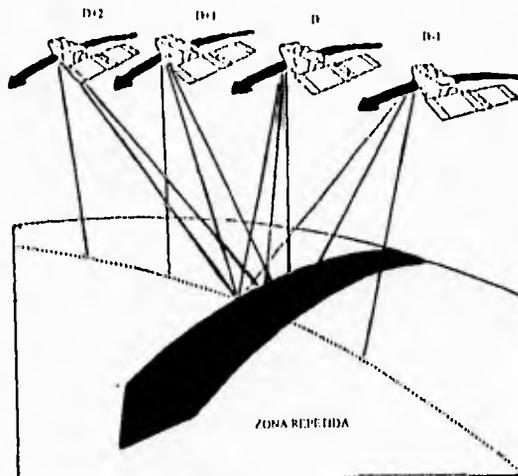


Figura 2.24 Repetividad de las observaciones durante un ciclo de 26 días, para el satélite SPOT. (tomada de CNES, 1988)

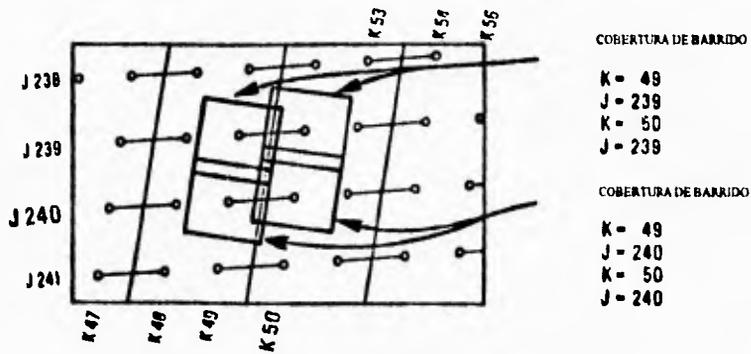


Figura 2.25 Sistema de referencia mundial (GRS) satélite SPOT. (tomada de Spot image, 1986)

Los satélites Spot capturan la información mediante dos modos distintos de observación: El modo pancromático (PM) y el modo multibanda o multispectral (XS). Ambos modos funcionan indistintamente en uno u otro de los instrumentos y de manera simultánea o individual. En la tabla 2.4 se muestran las combinaciones posibles.

Las longitudes de onda para los diferentes modos son:

- Banda pancromática de 0.51 a 0.73 μm
- Banda XS1 de 0.50 a 0.59 μm color verde
- Banda XS2 de 0.61 a 0.68 μm color rojo
- Banda XS3 de 0.79 a 0.89 μm infrarrojo

Resumiendo, las imágenes de satélite registran el valor de cada elemento que cubre la superficie terrestre, los cuales reflejan con diferente magnitud la luz que proviene del sol, que es registrada separadamente en cada una de las bandas indicadas independientemente del sistema usado (Landsat o Spot) por el sensor (Figura 2.14)

La información es captada en forma numérica y transmitida a tierra, donde recibe un procesamiento primario que corrige las distorsiones producidas por efecto de la rotación del planeta y refracción atmosférica y posteriormente comercializada en medios magnéticos compatibles con computadoras y productos fotográficos.

El formato de los archivos que constituyen una imagen, es del tipo de matriz, donde cada celda corresponde a un cuadrado sobre la superficie de área igual a la resolución del sensor, esto constituye la unidad mínima de información registrada y es conocida como pixel.

Las dimensiones de la matriz que representa la imagen cubren una superficie de 180 x 170 km para los satélites Landsat y de 60 x 60 km para los Spot.

2.3 Comportamiento espectral de los objetos

2.3.1 Firma espectral

El comportamiento espectral de los objetos o firma espectral, mide la radiación electromagnética proveniente de un objeto. La manera en que la radiación interactúa con el cuerpo y es alterada por él dependerá de sus componentes y de su estructura interna, esto es, de las características propias del objeto.

La ecuación básica de la conservación de la energía, cuando esta incide sobre un cuerpo es:

$$I_{\tau} = R_{\tau} + A_{\tau} + T_{\tau}$$

Donde:

I_{τ} = Energía incidente

R_{τ} = Energía reflejada

A_{τ} = Energía absorbida

T_{τ} = Energía transmitida

De esta ecuación se establece que la energía proveniente de un cuerpo iluminado y captada por un sistema sensor, no es otra cosa que la energía reflejada por éste. Entonces se tendrá que:

$$R_{\tau} = I_{\tau} - (A_{\tau} + T_{\tau})$$

El subíndice τ indica la longitud de onda de la energía y establece la dependencia de las interacciones (reflexión, absorción y transmisión) con ésta.

La cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida por un cuerpo depende de sus coeficientes de reflexión, absorción y transmisión. Cuando estos coeficientes, que también son función de la longitud de onda, se establecen a partir de la radiación o flujo de energía se conocen con el nombre de reflectancia (ρ), absorbancia (α) y transmitancia (Γ).

La figura 2.26. muestra la firma espectral de los tres principales componentes de una escena de la superficie terrestre (vegetación, suelo y agua).

2.3.2 Comportamiento espectral de la vegetación

El comportamiento espectral de la vegetación (Dalton, 1988) puede ser entendida como un conjunto de elementos estructurales (tallos, raíces, hojas, etc) con densidad y arreglo espacial característico para cada vegetación.

2.3.3 Comportamiento espectral del suelo

En el comportamiento espectral del suelo, las interacciones materia-energía en suelos se reducen exclusivamente a absorción y reflexión. Sin embargo, el suelo mismo es una mezcla compleja de materiales con propiedades físicas y químicas que afectan su absorbancia y reflectancia, figura 2.27.

2.3.4 Comportamiento espectral del agua

En el comportamiento espectral del agua, el efecto combinado de la acción de absorción y dispersión disminuyen el total de la energía que pasa a través de un cuerpo de agua, provocando su atenuación. Varios componentes provocan la atenuación de la luz en el

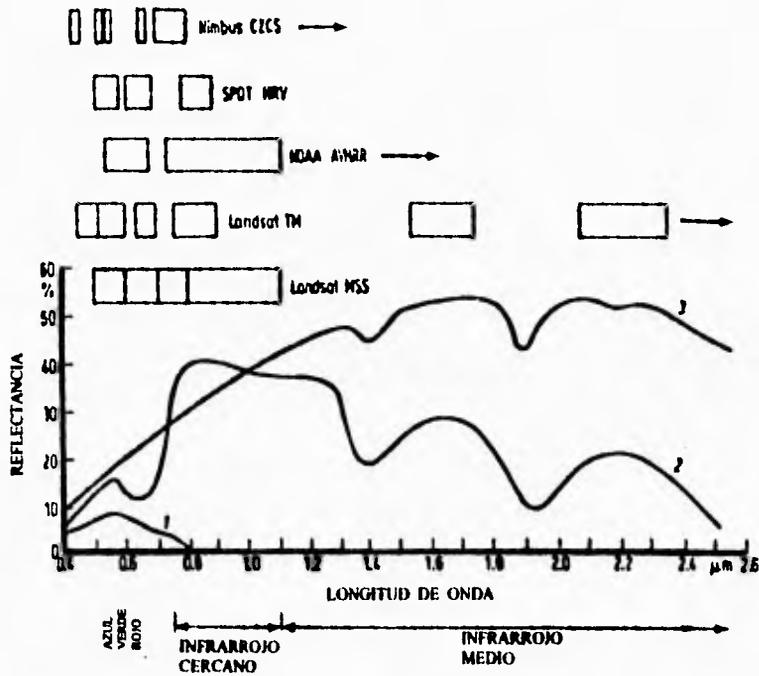


Figura 2.26 Firmas espectrales de tres materiales comunes de la superficie de la tierra. 1) Agua, 2) vegetación, 3) suelo. Posición de las bandas espectrales de los principales satélites de percepción remota (tomada de Richards, 1986).

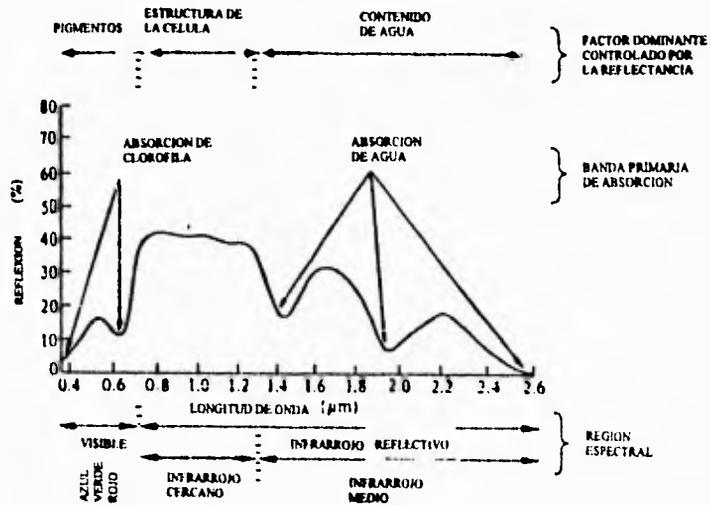


Figura 2.27 Comportamiento espectral de la vegetación verde (tomada de Hoffer, 1978).

agua, a saber (Sausen, 1989): la propia agua, las sustancias amarillas u orgánicas disueltas (gelfstoff), fitoplancton y partículas inorgánicas, figura 2.28.

2.4 Teoría del color y generación de imágenes en falso color

2.4.1 Propiedades de la luz

Lo que se percibe como luz, es una banda de frecuencia o longitud de onda estrecha dentro del espectro electromagnético y corresponde a la porción visible del mismo (figura 2.1.), cada valor de frecuencia (longitud de onda) de la banda visible corresponde a un color distinto.

2.4.2 Concepto de color

Las características de la luz formada por la combinación de dos o más fuentes, son determinadas por ellas mismas. Dos fuentes de luz de diferente color con intensidades elegidas adecuadamente pueden utilizarse para producir una gama de otros colores: Si las dos fuentes se combinan para producir luz blanca, estas se conocen como colores complementarios. Los modelos de color que se utilizan para describir combinaciones de luz hacen uso de tres colores para obtener una gama amplia de colores de ese modelo.

Los dos o tres colores que se usan para describir otros, en un modelo se conocen como colores primarios. La ecuación que permite generar un color a través de 3 primarios son:

$$\text{Color} = IP1 + IP2 + IP3$$

Donde: IP1= Intensidad del primer primario
 IP2= Intensidad del segundo primario
 IP3= Intensidad del tercer primario

2.4.3 Generación de imágenes a color y falso color

El ojo humano es sensible a tres colores primarios que son el rojo, verde y azul; los cuales son llamados colores primarios aditivos debido a que cuando las luces provenientes de tres cañones, una roja, la otra verde y otra azul se proyectan sobre una pantalla en la porción central donde se tiene la sobreposición de las tres luces se observará el color blanco (figura 2.30).

Los colores amarillo, cian y magenta son llamados colores primarios substractivos debido a que se generan mediante la substracción de alguno de los colores primarios aditivos. En el experimento en el que se proyecta luz proveniente de una sola fuente, a través de tres filtros superpuestos, donde cada uno de ellos permite únicamente la transmisión de un tipo de luz (amarilla, cian y magenta) en la porción central donde se tiene la sobreposición de los filtros se observará el color negro, pues cada uno de los tres filtros

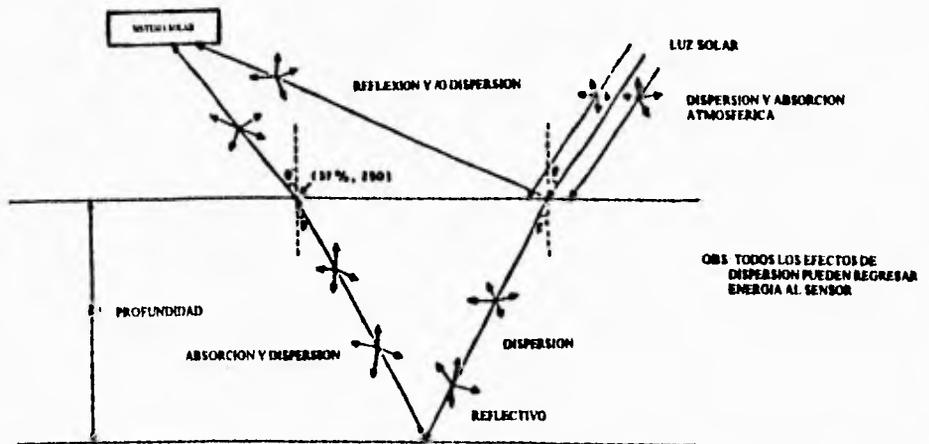


Figura 2.28 Interacciones de la luz solar con el agua (tomada de Sausen, et al 1989).

Azul + Verde = Cian.

Azul + Rojo = Magenta.

Verde + Rojo = Amarillo.

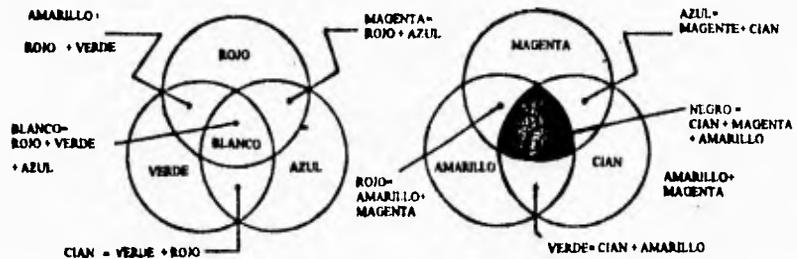


Figura 2.29 Sistemas de combinación de colores. a) aditivo, b) substractivo (tomado de Rogers, 1986).

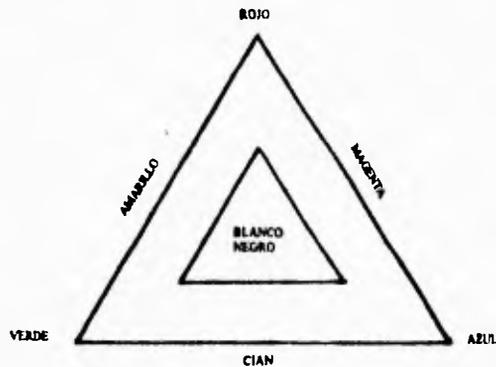


Figura 2.30 Triángulo del color para los primarios aditivos y substractivos.

sustraerá uno de los primarios aditivos (figura 2.29).

Un proceso aditivo es el que se usa para generar imágenes en color en un monitor de computadora, una televisión o una pantalla. Un proceso substractivo es el empleado para tener imágenes en papel o copia dura.

Los dispositivos de copia dura generan una imagen mediante el empleo y mezcla de tintas que reflejan uno de los tres colores primarios y absorben o transmiten los otros dos. De esta manera en una impresión fotográfica se tienen 3 capas de sustancias que reflejan luz de los 3 primarios en menor o mayor intensidad la cual al mezclarse establece el color observado.

En una imagen de satélite las bandas son usadas para controlar la intensidad de la luz que será emitida por los cañones de un monitor o reflejada por las sustancias de una fotografía. Una imagen generada a partir del empleo de una banda infrarroja permitirá observar la energía reflejada por los objetos en la región infrarroja del espectro a la cual no es sensible al ojo humano.

Una imagen en falso color permite resaltar u observar rasgos de la superficie que a simple vista no pueden ser discriminados.

2.5 Interpretación visual de imágenes de satélite

2.5.1 Elementos de análisis de una imagen

De manera general los elementos de reconocimiento más significativo en la interpretación de imágenes de satélite son los mismos de las fotografías aéreas convencionales en.

- La tonalidad y el color
- El comportamiento espectral
- El tamaño
- La forma
- La textura
- El patrón
- La altura
- La sombra
- La localización
- El contexto

2.5.2 Fotointerpretación de una banda

La interpretación de las bandas de una imagen multiespectral, se efectúa de la misma manera que una fotografía blanco y negro normal, analizando los mismos elementos anteriormente descritos. De esta manera, para llevar a cabo la interpretación es necesario conocer el comportamiento espectral (firma espectral) de los objetos que se encuentran en la imagen. Este conocimiento permitirá evaluar las tonalidades con las que se

mostrarán los objetos, por lo que debe auxiliarse de curvas espectrales como las mostradas en la figura 2.26.

Los diferentes tipos de sensores de las dos principales misiones espaciales (Landsat y Spot), tienen sus bandas proyectadas para cubrir la porción del visible y el infrarrojo cercano (figura 2.26). De esta manera, se tiene que la banda 4 del MSS corresponde a la 2 del TM y a la 1 del Spot, la banda 5 del MSS cubre a las bandas 2 del TM y 3 del Spot y finalmente se puede decir que existe una alta correlación entre la banda 7 del MSS, la 4 del TM y la 3 del Spot.

Por ejemplo, para estudios geológicos, en general, los mejores canales son MSS5 y MSS7 (TMM3 y TM4 o Spot2 y Spot3). La banda MSS5 es útil debido a la asociación que existe entre la litología y la vegetación. La banda MSS7 es usada pues en ella los aspectos estructurales son realizados (Tabla 2.5).

Las principales aplicaciones para las que fueron proyectados los canales del mapeador temático (TM), así como aquellas que se han establecido con base en la experiencia son las siguientes:

- TM1. Estudios de batimetría de agua limpia, mapeo de cuerpos de agua y aguas costeras, sedimentos en suspensión, diferencia entre suelo y vegetación, diferenciación entre tipos de vegetales indicando concentración de caroteno y clorofila.
- TM2. Caracterización de la vegetación sana, posibilidad de diagnóstico de la presencia de óxidos de hierro (limonita).
- TM3. Es el canal más importante para el estudio de la vegetación. Es una banda de absorción de la clorofila, por lo que se utiliza para separar las zona de vegetación de aquellas sin vegetación. La diferenciación de las especies vegetales asociadas a la banda de absorción de la clorofila puede ser realizada (división entre las bandas 3 y 4, Índice de vegetación).
- TM4. Estudios de volumen de biomasa y delineación de cuerpos de agua y algunas posibilidades de detección de iones férricos. Sirve para establecer la geología y la geomorfología.
- TM5. Ofrece información con respecto a la humedad de la vegetación, tipo de cultivos, humedad del suelo y vegetación con "stress" hídrico. Permite la separación de nubes y nieve y el mapeo de la geología y la geomorfología de la región.
- TM6. Auxilia en la clasificación de la vegetación, el análisis de "stress" de la misma, la observación sobre la humedad del suelo y las propiedades térmicas del suelo, rocas, vegetación y agua. Discriminación de rocas silicatadas.

CLASE	MSS4 TM2 Spot1	MSS5 TM2 Spot3	MSS6	MSS7 TM4 Spot3
Contraste tonal.	B	E	P	P
Cuerpos de agua y sus límites.	P	B	E	E
Patrón de drenaje.	P	E	B	E
Carreteras y ciudades.	P	E	P	P
Unidades litológicas.	P	E	B	B
Unidades estructurales.	P	B	B	E
Grupos de suelo.	P	B	B	E
Límite entre vegetación nat. y reforestación.	P	E	P	B
Unidades geomorfológicas.	P	B	B	E
Uso de la tierra.	P	E	P	B
Sedimentos en suspensión.	E	E	P	P
áreas húmedas.	P	P	B	E

Tabla 2.5. Análisis comparativo entre las bandas del MSS para la discriminación de diferentes clases en una imagen. E = excelente, B = Buena y P = Pobre.

- TM7. Detección de minerales con hidróxilos (Al-OH, Mg-OH) y carbonatos. Indicada para el mapeo de áreas con alteración hidrotermal (cociente de las bandas 5/7) y formaciones rocosas (geomorfología).

Cuando se realiza la fotointerpretación de una imagen, es indispensable contar con claves de análisis que permitan identificar los diferentes objetos que se encuentran en una escena. Una llave está integrada a partir de los elementos de análisis de una imagen.

Las llaves de análisis describen todos los elementos que deben de poseer las clases. De esta forma, la interpretación representa un proceso de identificación paso a paso, en que el técnico asigna el objeto a las clases probables y elimina paulatinamente las escogidas erróneamente (Tabla 2.6).

Todas las impresiones visuales de los objetos presentan alguna graduación de color; esto implica que casi todos los objetos que son vistos tienen una sensación de color asociada con ellos. El color, en las imágenes fotográficas, pueden contribuir enormemente para la identificación del objeto juntamente con la forma, tamaño y características de la textura. El ojo humano puede distinguir cerca de 400,000 colores diferentes (Hearn y Baker, 1988) esta capacidad permite la pronta discriminación de los objetos en la naturaleza.

2.5.3 Fotointerpretación de imágenes a color y falso color

Una imagen a color puede ser clasificada en dos tipos que son: color natural o falso color. En las imágenes en color natural se muestran los objetos con las tonalidades y matices que son apreciadas por el ojo humano en la naturaleza. Las imágenes en falso color, como fue visto, muestran los objetos y matices, tonos y sombras mediante el realce de los datos y la sobreposición de la luz emitida por 3 cañones (azul, verde y rojo), a los cuales se les asigna igual número de bandas para controlar la intensidad de luz que envían.

En el compuesto falso color más común; generado mediante la combinación de una banda verde, roja e infrarroja; las características observadas se asemejan a las de una fotografía tomada con película de color sensible al infrarrojo de la siguiente manera:

- La vegetación de mayor contenido de clorofila, presentará diferentes tonos de rojo.
- Las áreas sin vegetación como zonas urbanas y suelos agrícolas sin cultivo, serán observadas en tonos grises.
- Las áreas cubiertas con vegetación con bajos niveles de clorofila, como los matorrales y vegetación caducifolia, serán observados en varios tonos de café.
- Los cuerpos de agua serán observados en color negro, si son profundos y el agua clara, y en diferentes tonos de azul los de baja profundidad y cantidad de sólidos en suspensión apreciable.

CLASE	TONOS DE GRIS		TEXTURA
	TM3 MSS5 Spot2	TM4 MSS7 Spot3	
Vegetación natural.	O	C	Gruesa.
Agua limpia.	O	O	Lisa.
Agua sucia.	M	O	Lisa.
Suelo seco.	C	C/O	Gruesa a lisa.
Suelo húmedo.	O	O	Mezclada.
Vegetación quemada.	M	O	
área agrícola.	M/O	C	Lisa.
Caminos.	C	O	Lineal.
Pastos.	C/M	M/C	Lisa lustrosa.
Zona de reforestación.	O	C/M	Lisa con sombra y límites demar- cados.
Arena (playas).	C	C	Lisa.
sombra.	O	O	Lisa.
nube	C	C	
área urbana.	C	O	Indefinido con delimitación de calles.
área agrícola en desa- rrollo.	M	O	Lisa.
Cultivo seco.	C	C	Lisa.

Tabla 2.6. Llaves de análisis para identificación de clases de uso de suelo, obtenidas a partir de estudios de imágenes LANSAT TM y correlacionadas a sensores MSS y SPOT. C = Claro, M = Medio y O = Oscuro.

- Ciertos pastizales y zonas de escasa vegetación, en donde el tono de suelo tiende a predominar sobre el de la vegetación, es observado en color crema o tonalidades muy claras.
- Las sombras producidas por las formas de relieve o por nubes, generalmente serán de color negro.
- Las nubes se observarán en color blanco.

Comparando las imágenes en color natural con el compuesto en falso color más común (llamado también infrarrojo falso color, se genera mediante la combinación del canal verde, rojo e infrarrojo), se tiene:

a) Imágenes en color natural, son más útiles para estudios de las condiciones subacuáticas, estudios extensivos de la floresta tropical, en los tipos de suelo, para estudios de penetración en aguas someras y proporcionan una mejor localización de las barras de los ríos.

b) imágenes en infrarrojo falso color, son adecuadas para delinear superficies de agua, para ciertos estudios de vegetación incluyendo diferenciación de especies y mapeo de áreas con baja densidad de vegetación, detección de "Stress" y diferenciación entre vegetación sana y enferma, en la demarcación de límites de vegetación y drenaje, establece las formaciones rocosas, fallas y fracturas (geología y geomorfología).

Por lo general las imágenes infrarrojo falso color son consideradas mejores que los otros tipos de imágenes porque proporcionan un contraste tonal más preciso, que realza las regiones del terreno.

2.6 análisis e interpretación de datos obtenidos por percepción remota

ANÁLISIS.- Está definido como la separación o detalle de cualquier todo en sus partes, cuando se relaciona a los datos de las imágenes, solamente se refiere a los aspectos espectrales de la imagen.

INTERPRETACION.- Es la explicación del significado de cualquier parte con respecto al todo, relacionado a los datos de las imágenes, se relacionan tanto los aspectos espectrales como los espaciales de estos.

Los instrumentos de percepción remota graban variaciones espaciales de la radiación electromagnética que viene de la superficie de la tierra en diferentes bandas espectrales. Se pueden analizar las distribuciones espectrales y espaciales para determinar las características de los materiales que se encuentran sobre la superficie de la tierra.

La geología del subsuelo es inferida por el análisis de las condiciones superficiales.

El formato más útil de datos registrados por percepción remota para el análisis e interpretación geológica, es un despliegue de imágenes, en el cual las relaciones radiométricas y geométricas de los datos pueden ser correlacionadas con las condiciones existentes sobre la superficie de la tierra.

El análisis de una imagen puede ser de dos maneras: por medio de procesos automatizados y por fotointerpretación (electrónica o manual).

Los procesos automatizados, aunque rápidos y relativamente baratos, en algunos estudios pueden tener limitaciones, pues la mayoría de ellos están basados principalmente en las características espectrales de los objetos.

El procedimiento para la obtención de la información geológica de datos registrados por percepción remota, se realiza con el mismo argumento con que se realizan los reconocimientos geológicos en el campo, esto es: definición del problema, recolección y síntesis de datos y por último la interpretación.

Los principios de la Interpretación de las imágenes de satélite constan de cuatro premisas básicas:

- 1.- Una imagen es la representación pictórica de la superficie de la tierra.
- 2.- La imagen está compuesta por **PATRONES** Indicadores de los casos y acontecimientos que reflejan los componentes físicos, biológicos y culturales de la superficie de la tierra (Patrón: Conjunto de datos de las mismas características).
- 3.- Patrones similares y medios físicos similares reflejan condiciones semejantes y patrones diferentes reflejan condiciones diferentes.
- 4.- El tipo y cantidad de información que puede obtenerse de una imagen esta determinada por: el conocimiento, la experiencia, habilidad, motivación del intérprete, la eficiencia de los métodos utilizados y la conciencia de las limitaciones que impone el análisis al sistema de registro de percepción remota.

2.6.1 Procedimiento analítico e interpretativo

En los estudios de investigación geológica se considera que los datos de las imágenes se analizan y su significado geológico se interpreta.

Los datos espectrales espacialmente relacionados pueden ser reducidos a dos grupos de datos compuestos que se relacionan individualmente, ya sea a condiciones topográficas o composicionales del terreno. Estas dos acciones, la clasificación espectral y espacial constituyen las dos fases en los procedimientos analíticos para este proyecto, a los cuales se hace referencia como análisis e interpretación de las imágenes.

2.6.2 Análisis de las Imágenes

Los tonos o niveles de gris o sus equivalentes en color, cuando son clasificados por analogía o digitalmente, representan medidas cualitativas o cuantitativas de la cantidad de radiación electromagnética reflejada o emitida por los materiales de la superficie de la tierra y son mencionados como el intervalo espectral de longitud de onda dentro del cual el detector respectivo estaba operando.

El color visible es el resultado de la interacción de longitudes de onda específica de radiación electromagnética sobre el ojo humano. En las imágenes en falso color, los colores observados son producidos por la superposición de capas de color clasificadas en emulsión de la película, cada capa de registro de color representa un intervalo de longitud de onda espectral separado de la radiación electromagnética detectada por el instrumento.

Cuando los trabajos sobre imágenes de satélite son realizados por procesos digitales, el intérprete deberá concentrar su atención en los grupos tonales o sus equivalentes en color, concentrando únicamente el interés en un tono individual cuando se observen condiciones anómalas sobre la imagen.

La clasificación de estos grupos tonales o de colores es el producto resultante del análisis de la imagen.

2.6.3 Interpretación de las Imágenes

El analista intérprete de las imágenes, puede identificar todas aquellas relaciones espectrales en los datos, que son causados por la iluminación diferencial de los rasgos topográficos y aquellas que son causadas por la distribución en el área de los materiales superficiales.

Al realizar el análisis de los rasgos topográficos y su relación con los materiales superficiales, el intérprete relaciona tanto los aspectos espaciales como los espectrales y que se conocen como patrones de relieve y de cobertura

Los patrones de cobertura, están determinados por aquellos grupos de datos espectralradiométricos que se relacionan con las propiedades de emisión o reflexión de los materiales de la superficie de la tierra.

Los patrones de relieve, están determinados por los grupos de datos que relacionan aspectos espaciales y espectrales con las condiciones topográficas del terreno, sin referencia al tipo de material presente en el terreno.

CAPITULO 3 INTERPRETACION DE LA IMAGEN DE SATELITE

Cuando se analiza una imagen de satélite de manera manual, lo primero que se observa, son los diferentes matices que presenta, estos cambios en tonalidades, pueden deberse a los siguientes factores:

a) La presencia de los diferentes tipos de vegetación; b) la desigual concentración de humedad de los suelos; c) a la influencia de las pendientes topográficas y d) a los errores en el proceso del revelado o impresión de la imagen.

En el proceso de la interpretación se requieren dos aspectos muy importantes que son:

a) Los niveles de referencia en la interpretación de la imagen y
b) Las diferentes fases de la interpretación de la misma.

En general se puede decir que el análisis e interpretación de una imagen se puede dividir en dos partes:

a) La relación causa y efecto (de los problemas geológicos); b) La relación espacio y tiempo (para poder establecer una secuencia lógica en los fenómenos geológicos determinados por las investigaciones realizadas en el terreno de los hechos).

La relación causa y efecto, es válida, común y entraña a toda la naturaleza, por ejemplo, si se interpreta un anticlinal, esto quiere decir, que antes del plegamiento las rocas estaban dispuestas en una posición horizontal o con una pequeña inclinación, las causas por las que pueden deformarse o sufrieron un plegamiento pueden ser: a) arqueamiento de porciones de la corteza terrestre, b) por empujamiento de una masa intrusiva y c) por compresiones de porciones de la corteza terrestre.

En cualquiera de estos casos se tiene que la causa puede ser cualquiera de los procesos arriba planteados o más de uno simultáneamente o en secuencia de tiempo, uno después del otro y el efecto será el de una estructura plegada en la superficie terrestre.

La relación espacio y tiempo, es la llave de la interpretación y secuencia de los procesos geológicos, así por ejemplo, en la imagen de satélite, se puede determinar una secuencia en el tiempo de los procesos geológicos por la posición de las rocas presentes, es decir, las sierras constituidas por rocas calcáreas del Cretácico, son anteriores a los derrames de las rocas volcánicas extrusivas y al material aluvial de edad reciente. En la imagen se puede observar y deducir como las formaciones calcáreas fueron deformadas y cubiertas por derrames volcánicos del Terciario. Por otro lado, los agentes exógenos han y siguen atacando a las rocas, el intemperismo y la erosión dan lugar a la presencia de los procesos aluviales; de tal modo que la relación espacio-tiempo, se puede deducir, inferir y correlacionar a través de la génesis de cada uno de los materiales presentes en el área de la imagen estudiada.

Para la realización del trabajo de interpretación, objeto de este documento, se utilizó una sección de la imagen de satélite Landsat TM 2647, que cubre al estado de Morelos, bandas 2, 3, 4, 7 y combinación de las bandas 234 y 247. Es importante mencionar que en la interpretación de la imagen se dio énfasis al área correspondiente al estado de Morelos.

3.1. RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACION DE PATRONES ESPACIALES.

3.1.1.- Patrones de relieve.

Son las características del terreno, relacionadas con las condiciones topográficas y como puntos de apoyo se toman los cambios abruptos en la pendiente.

La clasificación del relieve se determinó con base en las geoformas de la imagen, así como el tipo de cobertura que presentan.

En la imagen se determinaron cuatro relieves: relieve alto, pendiente, lomeríos y partes bajas (Cuadro 3.1, Mapa 1).

El relieve alto corresponde a todas las elevaciones (sierras y cerros), se localiza principalmente en la parte norte y sur, se presenta también en la parte centro de la imagen.

Pendiente, se localiza en el talud o pie de monte de las sierras con el valle, se ubica principalmente en la parte norte de la entidad.

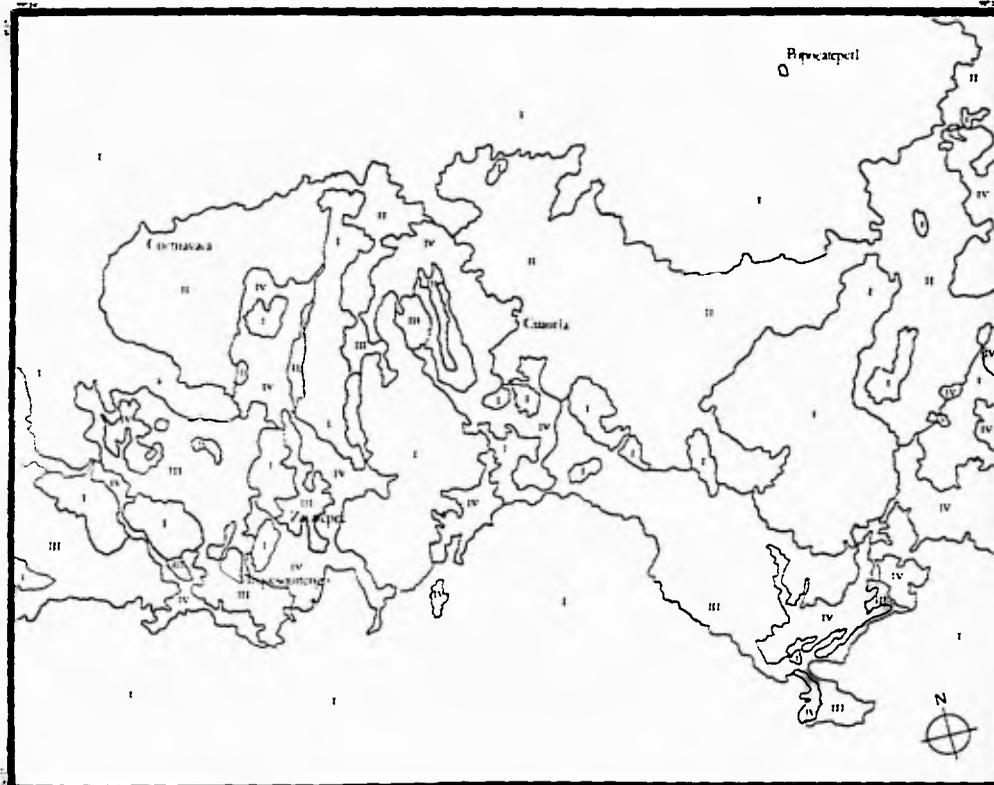
Lomeríos, esta topografía se presenta en los valles, se caracteriza por su poca elevación, con una moderada pendiente, se destina principalmente a la agricultura de temporal y a la ganadería (pastizal).

Las partes planas, se localizan en las porciones bajas de los valles y como su nombre lo indica, están caracterizadas por presentar un relieve de plano a casi plano, con suelos profundos, destinados a la agricultura de riego. En la imagen presentan un color verde fuerte.

3.1.2.- Patrones de drenaje.

El patrón de drenaje es sumamente importante en el análisis e interpretación de la imagen, está directamente relacionado con el relieve, es la representación del escurrimiento de las aguas en la superficie. Se debe pensar que es el resultado de un factor climatológico, es decir, que una misma roca presentará un tipo de drenaje diferente según el clima que lo afecte, permite inferir las características de permeabilidad de rocas y suelos.

En el drenaje se estudia: la densidad de la red hidrográfica, patrón de drenaje y la uniformidad de drenaje.



LEYENDA

- I RELIEVE ALTO
- II PENDIENTE
- III LOMERIOS
- IV PARTES PLANAS

FUENTE: IMAGEN DE SATELITZ LANDSAT TM04T BANDAS 2, 3, 7, DATTA MEXICO
 ESCALA 1:25000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
PATRONES DE RELIEVE		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESENTO		
1995	MAPA 1	

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS

CUADRO 3.1 RELACIONES GEOMORFOLOGICAS

INTERPRETACION DE LOS MATERIALES Y PROCESOS GEOLOGICOS SUPERFICIALES

UNIDAD	PATRONES DE RELIEVE	PATRONES DE DRENAJE	DENSIDAD	PATRONES DE COBERTURA	LINEAMIENTOS DENSIDAD	MATERIAL SUPERFICIAL	PROCESO
IID	CERROS ALARGADOS		MUY BAJA	VEGETACION	MUY BAJA	ROCA	RESIDUAL
IIIBb	SUBREDONDEADOS A REDONDEADOS		MUY BAJA	ROCA CONSOLIDADO	MUY BAJA	SEDIMENTARIA	RESIDUAL
IIB	CERROS ESCARPADOS	DENDRITICO	MEDIA	VEGETACION ROCA CONSOLIDADA	MEDIA	ROCA IGNEA	RESIDUAL
IIA	CERROS ALTOS ESCARPADOS		MUY BAJA	VEGETACION ROCA CONSOLIDADA	MUY BAJA	ROCA IGNEA	RESIDUAL
IIIBa	PIE DE MONTE	SUBPARALELO	MEDIA	VEGETACION ROCA NO CONSOLIDADA	ALTA	GRAVAS ARENAS	FLUVIAL
Ia	VOLCANES	SUBPARALELO	MUY BAJA	VEGETACION	MUY BAJA	IGNEO	VOLCANICO
IAb, IAc	DERRAMES	INCIPIENTE	MUY BAJA	ROCA	MUY BAJA	IGNEO	VOLCANICO
IIIBa	LOMERIOS		NULA	VEGETACION CULTIVOS	MUY BAJA MUY BAJA	GRAVAS ARENAS	ALUVIAL FLUVIAL
IIIA	PARTES PLANAS		NULA	CULTIVOS	MUY BAJA	ARENAS	FLUVIAL
IIIC	PARTES PLANAS PARTE BAJA DE DOLINAS		NULA	CULTIVOS CUERPO DE AGUA	NULA	ARC-ARE AGUA	ALUVIAL

Estos tres puntos dan información sobre la litología y las estructuras presentes, es decir el arreglo espacial de las rocas.

La densidad del drenaje; se refiere a la capacidad de solubilidad de una roca, a la permeabilidad y la erosionabilidad de dicha roca.

Los patrones de drenaje se clasifican en dos tipos: a) patrones erosionables (debidos a la erosión) y b) patrones debidos a la sedimentación (estos dan información de tipo regional).

En general los patrones de drenaje en la imagen del área de estudio, están determinados por el tipo de roca y su estructura, se clasifican de acuerdo a su forma en tres tipos: dendrítico, paralelo-subparalelo y radial.

La uniformidad del drenaje está determinada por la presencia o ausencia de un arreglo, se denomina como densidad y se divide en tres tipos: fina, media y gruesa (Cuadro 3.1, Mapa 2)

En las partes altas de las cuencas hidrológicas, la red de drenaje está definida por la naturaleza litológica del sustrato geológico, corresponden a las zonas de recarga de los acuíferos en explotación. De la imagen se pueden observar las siguientes características de las principales corrientes que drenan la entidad.

Cuenca del río Amacuzac.

La cabecera del río Apatlaco se ubica al sureste de Distrito Federal y al noroeste de Morelos, el drenaje es del tipo paralelo en el talud, pasando a ser dendrítico en la parte media y baja de esta subcuenca. La densidad en el talud es fina y hacia la parte baja es media.

Los cuerpos de agua localizados en la imagen, muestran líneas de desagüe que convergen hacia una depresión central; este tipo se encontró en las lagunas de Coatetelco y El Rodeo, lago de Tequesquitengo y lago-cráter del volcán Popocatepetl.

El sistema fluvial del río Yautepec es del tipo dendrítico en la parte superior y paralela en la inferior. La densidad es gruesa en la parte alta y media en la parte baja.

La configuración del río Cuautla es del tipo dendrítico, éste río nace de los escurrimientos de volcán Popocatepetl, en la localidad de Cuautla su caudal es enriquecido debido a la descarga del acuífero a través de los manantiales de Agua Hedionda y Los Sabinos principalmente, en la parte inferior a la altura de la localidad de San Rafael Zaragoza, se observa una amplia sección del río en la que predominan los meandros. La densidad en la parte superior es gruesa pasando a ser media en la inferior.

Las áreas cubiertas por rocas calizas de la región, muestran un drenaje que varía de paralelo a subparalelo; se desarrolla en las laderas de las sierras calcáreas principalmente



LEYENDA

-  RJO, ARROYO
-  CUERPO DE AGUA
- TIPOS DE DRENAJE
-  PARALELO A SUBPARALELO
-  DENDRITICO
-  RADIAL
- DENSIDAD DEL DRENAJE
-  FINA
-  MEDIANA
-  GRUESA

FUENTE: IMAGENES DE SATELITE "Landsat TM" 1984, 1985, 1987, 1988, 1991, MEXICO
ESCALA 1:250,000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
PATRONES DE DRENAJE		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SEBESTO		
1995	MAPA 2	

en donde se encuentra un declive pronunciado, son de corto desarrollo, desapareciendo en el contacto con los valles.

En la porción sur de la imagen, se observa que en la sierra de Huautla, la red de drenaje es dendrítica con ramificaciones irregulares, en varias direcciones, determinada por la estructura geológica, así como por el intenso fracturamiento que muestra, dando lugar a la presencia de numerosos arroyos de corto desarrollo, con una densidad fina.

Cuenca del río Nexapa.

Al igual que la cuenca de río Amacuzac, se ubica en la parte norte del estado de Morelos, se ubica en la parte sur del volcán Popocatepetl, la red hidrológica la constituyen los ríos, Tepalcingo y barranca del Amatzinac y en Puebla el río Nexapa. El río Tepalcingo presentan una configuración dendrítica subparalela con una densidad media. El arreglo de la barranca del Amatzinac es del tipo dendrítico subparalela con una densidad media, mientras que el río Nexapa presentan una configuración dendrítica con una densidad media.

3.1.3.- Patrones de cobertura.

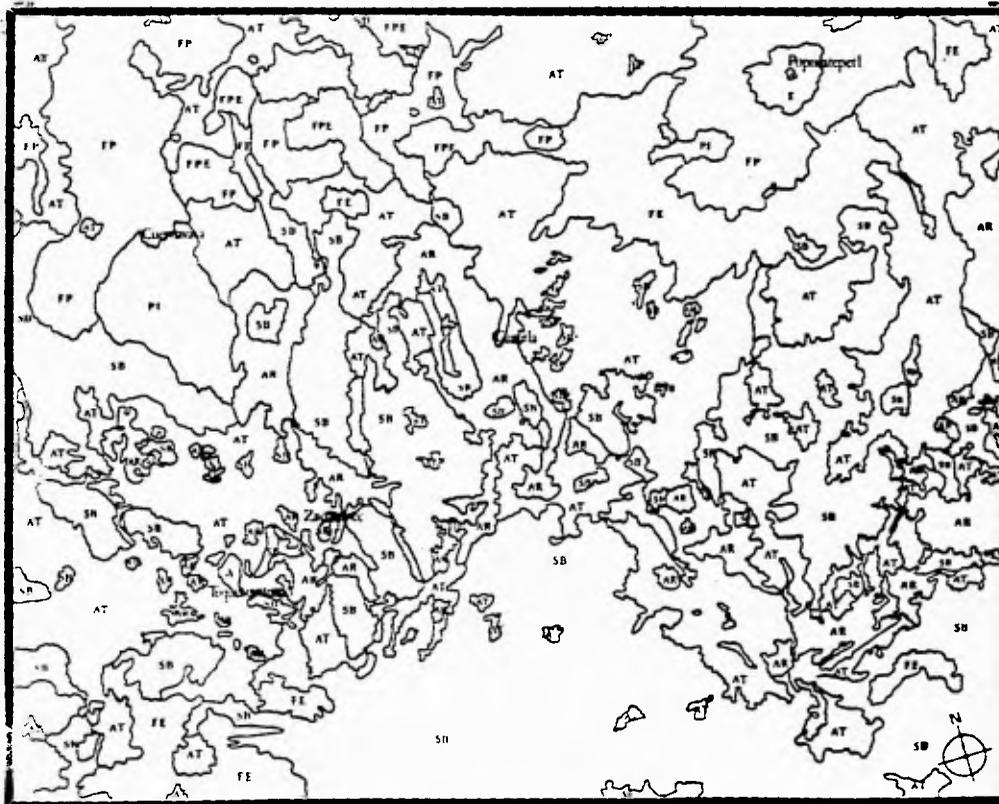
En el área de estudio, los patrones de cobertura fueron determinados por aquellos grupos de datos espectralradiométricos que se relacionan con los aspectos espectrales de estos, así como las propiedades de emisión o reflexión de los materiales de la superficie de la tierra.

Este patrón muestra una gran variedad de caracterizaciones debido a los cambios y modificaciones que presenta el suelo por las actividades del hombre y está definido básicamente por el uso que presenta el suelo al momento en que se toma la imagen.

En el presente estudio se clasificó la cobertura partiendo de la zonificación del relieve y de la vegetación, ya que existe una estrecha relación entre los parámetros de relieve, roca, suelo y vegetación:

De acuerdo a la combinación de bandas 3, 4 y 7 se tiene que los colores verdes corresponden a la vegetación, la imagen se tomó en febrero de 1990, época de esllaje, se puede apreciar que en las partes bajas de los valles, la vegetación corresponde a la agricultura de riego, en la que predomina el cultivo de caña de azúcar. En las partes altas de las sierras de Zempoala, Chichinautzin y Nevada se distingue claramente la presencia del bosque de pino en sus porciones más altas y en transición hacia el ple de monte, el bosque de pino encino. En las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla se nota una vegetación natural muy rala que corresponde al tipo de Selva Baja Caducifolia, en esta época, los árboles han tirado el follaje, por lo cual no se distingue coloración alguna que deberá de aparecer en la imagen que corresponda al temporal, además se observan en estas sierras, pequeñas zonas cubierta con vegetación de bosque de encino.

En las porciones planas y de lomeríos destinadas a la agricultura de temporal, se



LEYENDA

USO DE SUELO

- AR** AGRICOLA DE RIEGO
- AT** AGRICOLA DE TEMPORAL
- FI** PASTIZAL INDUCIDO
- FP** BOSQUE DE PINO
- FE** BOSQUE DE ENCINO
- FPE** BOSQUE DE PINO-ENCINO
- SB** SELVA BAJA CADUCIFOLIA
- A** CUERPOS DE AGUA
- E** EROSION

PROYECTO DE INVESTIGACION DE SATELITES LANDESAT-TERRA, EMPRESAS S.A.T., MEXICO
ESCALA 1:250,000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
PATRONES DE COBERTURA		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESETO		
1995	MAPA 3	

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE, DEL ESTADO DE MORELOS.

CUADRO 3.2 PATRONES DE COBERTURA

CLAVE	USO DEL SUELO
	<u>ACTIVIDAD AGRICOLA</u>
AR	AGRICULTURA DE RIEGO
AT	AGRICULTURA DE TEMPORAL
	<u>ACTIVIDAD PECUARIA</u>
PI	PASTIZAL INDUCIDO
	<u>FORESTAL</u>
FP	BOSQUE PINO
FE	BOSQUE ENCINO
FPE	BOSQUE DE PINO-ENCINO
	<u>SELVAS</u>
SB	SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	<u>CUERPOS DE AGUA</u>
A	LAGO, LAGUNA O PRESA
	<u>OTROS</u>
E	EROSION

observan colores claros, debido a que no existe vegetación alguna que cubra al suelo. Resultando aún más claras las zonas destinadas a pastizales.

Son fácilmente identificables las zonas destinadas a uso urbano, por sus tonos azules, así como los cuerpos de agua entre los que destacan la laguna de Coatetelco, lago de Tequesquitengo y las presas El Rodeo, Coahuixtla, Emiliano Zapata, Los Carros y Cayehuacan con tonos negros. La clasificación de cobertura por uso se muestran en los cuadros 3.1, 3.2 y Mapa 3.

3.1.4.- Análisis de lineamientos.

Es la representación de las condiciones anómalas del suelo en cuanto a su relieve, drenaje y cobertura o la combinación de estos, tiene relación con elementos geológicos.

De mucha importancia son los lineamientos debidos a un desarrollo del drenaje superficial, ya que estos resultan como consecuencia de los procesos tectónicos. De aquí la importancia de darle significación a los componentes más importantes de las imágenes sometidas al análisis y éstas son las líneas que se encuentran dentro del cuerpo de la imagen los que pueden ser o significar lo siguiente:

Los lineamientos en las imágenes de satélite se representan en forma de líneas continuas o discontinuas, gruesas o delgadas, tenues o destacadas, escalonadas o quebradas, rectilíneas o curvilíneas, largas o cortas, que se interceptan o no y que pueden ser las manifestaciones de fallas, fracturas, desplazamientos estructurales, linderos geomorfológicos o estructurales, linderos litológicos, afloramientos regionales de estratos, valles tectónicos, depresiones, linderos de vegetación, características culturales del suelo, etc.

En el mapa 4, se presentan los lineamientos de la manera como fueron observados en la imagen, sin tratar de realizar una interpretación geológica de los mismos y se le dio una clasificación muy general en cuanto a su densidad: alta, media, baja, muy baja y nula (Cuadro 3.1).

3.2.- Interpretación geológica.

3.2.1.- Relaciones geomorfológicas.

Son las relaciones geológicas de la forma, origen, naturaleza y evolución de la tierra; basados en el significado de los datos o características de la superficie de la tierra, obtenidos por percepción remota y la interpretación lógica de su significado.

El análisis de la imagen permite ver el modelado unitario del terreno (parteaguas, sistemas de drenaje, elevaciones, depresiones, etc.); la posición de las rocas (estructuras geológicas); los tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) y por último los cambios de vegetación (ya que estos pueden estar influenciados por los cambios de roca). Cuadro 3.1, Mapa 5.



LEYENDA

 LINEAMIENTO

FUENTE: IMAGEN DE SATELITE LANDSAT TM01T, BANDAS 2 Y 4, INIA, MEXICO
ESCALA 1:250 000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA		
PROSPECCION GEOHIDROLÓGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
ANALISIS DE LINEAMIENTOS		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESENTO		
1995	MAPA 4	

Los rasgos geomorfológicos son de los más importantes dentro del análisis planteado, son la evidencia directa de los complejos naturales involucrados, el modelado terrestre llevará a determinar los rasgos constituidos del paisaje.

Desde el punto de vista geomorfológico, la topografía tiene un papel muy importante, ya que es el resultado de los procesos endógenos y exógenos, es decir, conjuga al tectonismo y la acción de los procesos erosivos. De manera general se puede decir que las características de un paisaje dependen de los siguientes parámetros:

- 1) De los procesos endógenos y exógenos actuantes.
- 2) De los tipos de rocas y de las estructuras geológicas presentes.
- 3) Del clima bajo el cual se han desarrollado estos paisajes.
- 4) De la duración y de los cambios en el ambiente.
- 5) De las modificaciones introducidas por el hombre.

La clasificación que se presenta, es de tipo morfogenético, ya que es la conclusión de la relación entre los procesos geomorfológicos y la base geológica.

Con base en la geomorfología y la geología, las formas de relieve que se encuentran en el área de estudio se dividen en tres grupos: endógeno, endógeno modelado y exógeno, mismos que se subdividen en tipos específicos de geoformas.

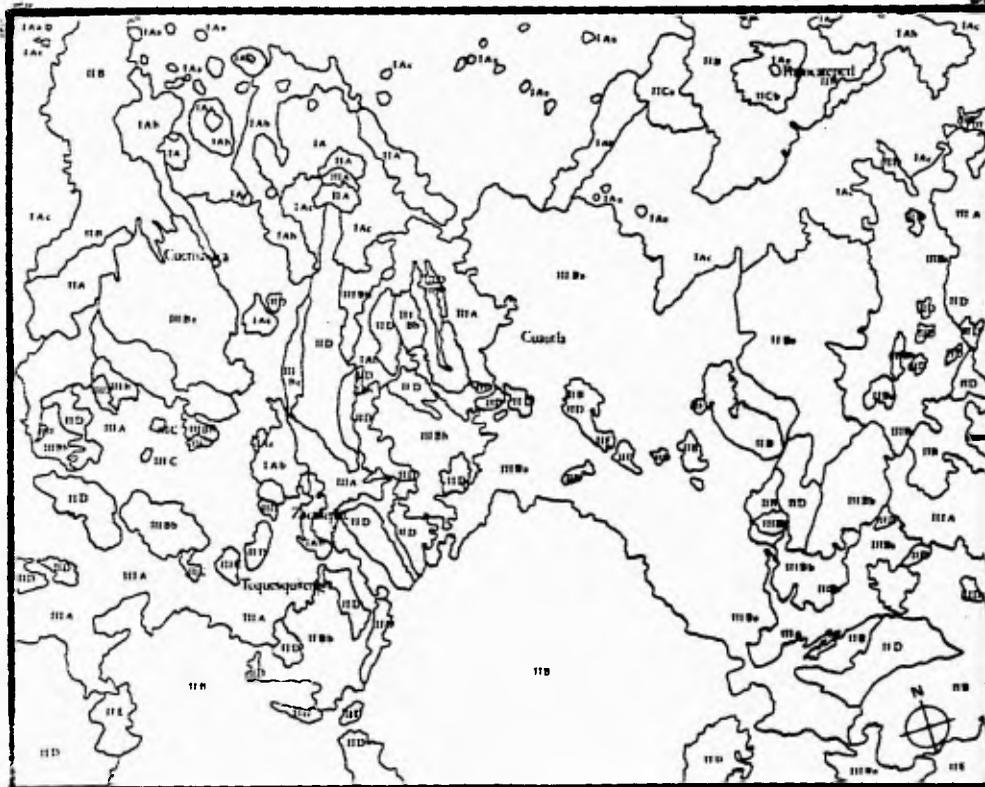
I.- Relieve endógeno.

A).- Volcánico acumulativo.

- A.a) Conos cineríticos.
- A.b) Derrames lávicos y domos (basálticos, riódacíticos y andesíticos).
- A.c) Laderas lávicas (basálticas, riódacíticas y andesíticas).

II.- Relieve endógeno modelado.

- A) Ladera volcánica con erosión fuerte constituida por brechas y tobas.
- B) Ladera volcánica con erosión de moderada a fuerte, constituida por rocas basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas.
- C) Ladera volcánica con erosión leve.
- C.a) Constituida por emisiones volcánicas (basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas).
- C.b) Constituida por piroclastos.
- D) Montañas de plegamiento.
- E) Intrusiones exhumadas erosionadas.



LEYENDA

- I.- RELIEVE ENDOGENO
 - A). VOLCANICO ACUMULATIVO
 - A. a) DE CONOS CINERITICOS
 - A. b) DE COLADAS LAVICAS
 - A. c) DE LADERAS LAVICAS
- II. RELIEVE ENDOGENO MODELADO
 - A). DE LADERA VOLCANICA CON EROSION FUERTE (BRECHA Y TOVAS)
 - B). DE LADERA VOLCANICA CON EROSION MODERADA
 - C). DE LADERA VOLCANICA CON EROSION LEVE
 - C. a) CONSTITUIDA POR COLADAS
 - C. b) CONSTITUIDA POR PIROCLASTOS
 - D). DE MONTAÑAS DE PLEGAMIENTO
 - E). DE INTRUSIONES EXHUMADAS EROSIONADAS
- III. RELIEVE EXOGENO
 - A). ACUMULATIVO DE PLANICIE ALUVIAL
 - B). ACUMULATIVO EROSIVO
 - B. a) DE PIE DE MONTE
 - B. b) DE MONTAÑAS Y LOMEROS RESIDUALES
 - C). EROSIVO CARSTICO

FUENTE: DATOS DE SATELITE LANDSAT TM/ETM, GEOMETR. LAT. NTA, MEXICO
ESCALA 1:250 000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA		
PROSPECCION GEOMORFOLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
RELACIONES GEOMORFOLOGICAS		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESEVTO		
1995	MAPA 5	

III.- Relieve exógeno.

- A) Acumulativo de planicie aluvial.
- B) Acumulativo erosivo.
- B.a) Piedemonte.
- B.b) Montañas y lomeríos residuales.
- C) Erosivo de carst o erosivo cárstico.

Relieve endógeno, endógeno modelado y exógeno.

Como su nombre lo indica, el relieve endógeno es el que se debe a un origen interno, ya sea al tectonismo o al volcanismo en la que los procesos exógenos del modelado no han alterado sus formas originales.

El relieve debido a factores endógenos modelados por la erosión comprende todas aquellas topoformas que al ser creadas por fuerzas internas se han modelado de manera significativa por los agentes denudatorios.

El relieve que se debe a factores exógenos, a diferencia de los dos anteriores, abarca las topoformas derivadas de la acción de procesos externos de carácter acumulativo, acumulativo erosivo y erosivo, aunque en algunos casos el tectonismo y vulcanismo hayan jugado un papel determinante, de manera directa o indirecta.

A continuación se describen las topoformas identificadas en la imagen de satélite.

IAa.-Relieve endógeno volcánico acumulativo de conos cineríticos.

Este tipo se localiza en el norte de Morelos como resultado de una extraordinaria actividad volcánica que se tradujo en una acumulación masiva de lava y tefra.

Se observan numerosos aparatos aunque no se podría precisar su número, ya que se presentan volcanes sobrepuestos o cubiertos. Casi todos poseen cráter con grado variable de relleno, algunos se encuentran abiertos en forma de herradura, son frecuentes los conos adventicios, sus pendientes son medias y homogéneas. Conservan sus rasgos originales, su alineamiento este-oeste indica zonas de debilidad cortical que coincide con fallas en la misma dirección.

IAb.- Relieve endógeno volcánico acumulativo de derrames lávicos y domos (basálticos, riódacíticos y andesíticos).

Esta forma está representada por derrames de lavas basálticas recientes que conservan su aspecto original. Se ubican alrededor de centros eruptivos, cubren materiales preexistentes de diversa naturaleza geológica, los principales derrames son:

- 1.- En el extremo noreste de la entidad, los derrames en forma de domos conocidos con los nombres de La Gloria y El Tabaquillo.

- 2.- Al sur de los volcanes de Tres Cumbres y Tezontle.
- 3.- Al sur del aparato volcánico de Tezoyuca.
- 4.- Al sur de los conos cineríticos de Atlacholoaya.
- 5.- En el oeste de Yautepec, proveniente de los volcanes Las Tetillas.
- 6.- Al norte de Yecapixtla en la loma Malpaís, su origen se debe a un derrame de fisura, orientado de noreste a suroeste.
- 7.- El derrame de lava del volcán Chichinautzin.
- 8.- Al sureste del volcán La Herradura en el derrame llamado El Texcal.

Todos los derrames corresponden a la Formación Chichinautzin. Su composición básica facilita su movilidad. Los rasgos sobre los derrames son incipientes.

IAc.- Relieve endógeno volcánico acumulativo de laderas lávicas (basálticas, riódacíticas y andesíticas).

Estas laderas relativamente jóvenes, comúnmente coronadas por conos cineríticos, están integradas por basaltos, riódacitas y piroclastos. Se localizan en toda la parte septentrional de la entidad.

Esta amplia forma no presenta grandes pendientes y desciende del extenso flanco del área montañosa.

Sobrayace a rocas sedimentarias mesozóicas, tienen una disección débil y nula erosión, debido a la cubierta vegetal de bosque templado, así como a su corta edad.

Este relieve al igual que los dos anteriores está constituido por la Formación Chichinautzin, presentan aislados fracturamientos con una orientación dominante de noreste a suroeste.

A diferencia de las derrames lávicas antes mencionadas, éste tiene una mayor integración de drenaje, de tipo radial como consecuencia de la forma cónica de las estructuras volcánicas.

IIA.) Relieve endógeno modelado de ladera volcánica con erosión fuerte, constituido por brechas y tobas.

Esta forma queda representada por depósitos volcanoclásticos que constituyen la Formación Tepoztlán, localizada en los alrededores del poblado del mismo nombre, así como al noreste de Morelos.

Ochoterena, afirma que esta geoforma se originó por el flujo de corrientes andesíticas coalescentes provenientes de la sierra de Xochitepec, ubicada en el sur de la cuenca de México. Posteriormente por un movimiento epirogénico de descenso, se formó un graben en las inmediaciones del poblado de Tepoztlán. (Ochoterena 1977, 41-45).

Por otro lado, Lugo, considera que es muy difícil establecer la antigua fuente de suministro para que se produjeran tan grandes acumulaciones; que si fueran flujos de corrientes

coalescentes crearían un relieve de lomeríos (pero no de peñascos de grandes dimensiones), que se ubicarían mucho más al sur; además menciona que el nivel base actual de la cuenca de México, (2,240 m.s.n.m.), por lo que no es posible la acumulación exógena del tipo de conos de deyección de la cuenca de México hacia la del Balsas (Lugo, 1984, 37-39).

Si se toma como punto de referencia que la sierra de Xochitepec, del Terciario Superior (2,400 m.s.n.m.), se extendía hacia el sur con altitudes mayores y que la aparición de la sierra de Chichinautzin del Cuaternario (3,480 m.s.n.m.), cubrió a la Serie Xochitepec, al tiempo que obstruyó el drenaje de la cuenca de México que se dirige a la cuenca del Balsas, se puede afirmar que es muy probable que la Formación Tepoztlán tenga su origen de flujos coalescentes andesíticos proveniente de la sierra de Xochitepec y/o de la sierra de Zempoala (3,690 m.s.n.m.). Además es factible que ciertos depósitos de estos materiales han sido erosionados por lo que no quedan testigos al sur de la altitud del poblado de Oacalco en el municipio de Yautepec.

Otro afloramiento de estos materiales, se localiza al norte de la localidad de Palpan, en las estribaciones de la sierra de Ocuilan, en la porción limitrofe entre los estados de México y Morelos.

II.B.) Relieve endógeno modelado de ladera volcánica con erosión de moderada a fuerte, constituida por rocas basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas.

Esta geoforma se localiza en las sierras volcánicas de edad anterior al Cuaternario, como la sierra de Zempoala al noreste, la sierra de Huautla al sureste, la Sierra de Buenavista al suroeste y parte parcial del Popocatepetl. También se incluyen algunos afloramientos aislados al este de Chalcatzingo, sur de Huitzililla y noreste de Totolapan.

Cabe aclarar que aun cuando la erosión se efectúa con moderada intensidad, las partes superiores de la ladera sí conservan su forma original. En ellas tienen desarrollo numerosos barrancos, deslaves, corrimientos de tierras, derrumbes y otros.

II.C.a.) Relieve endógeno modelado de ladera volcánica con erosión leve, constituido por emisiones volcánicas (basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas).

Esta topoforma se sitúa al norte de Tetela del Volcán y oeste de Ixtlilco El Chico. En la primera porción forma parte de Popocatepetl; predominan materiales volcánicos intermedios (andesita y toba andesítica). Tienen un drenaje radial. En ella quedan comprendidos 10 centros volcánicos explosivos de carácter cinerítico.

En ambas porciones existen altas pendientes y fuerte disección. Estas geoformas se diferencian de las que se consideran como relieve endógeno, porque en este caso existe una mayor integración del drenaje. Son formas que muestran un relieve erosivo intermedio entre las topoformas volcánicas endógenas y aquellas que han perdido sustancialmente

su expresión original, como serían las sierras constituidas por tobas y brechas.

II.C.b.) Relieve endógeno modelado de ladera volcánica, constituida por piroclastos.

Este tipo morfológico se encuentra representado en la parte más alta de estratovolcán Popocatepetl, por un cono de piroclastos, se localiza en la zona de las nieves perpetuas, la cima tiene un amplio cráter.

II.D.) Relieve endógeno modelado de montañas de plegamiento.

Este relieve se encuentra ampliamente distribuido en la entidad; destaca en la porciones centro y oeste. Corresponde a rocas sedimentarias químicas y clásticas de ambiente marino cretácico. Estos materiales forman estrechas y alargadas serranías constituyendo estructuras anticlinales, separadas por valles sinclinales en donde se ha acumulado un potente espesor de sedimentos aluviales.

Los anticlinales que dividen Morelos, se localizan en la parte central, dividen los valles de Cuernavaca, Yautepec, y Cuautla.

Al oeste se localizan en las sierras de Xochicalco, Ocuilán, Chalma y Cacahuamilpa.

En estas sierras plegadas los rasgos fluviales son escasos debido al fracturamiento y débil resistencia de las calizas, su pequeña altura determina una poca profundización de corrientes fluviales que da lugar a una red de drenaje subparalela.

II.E.) Relieve endógeno modelado de intrusiones exhumadas erosionadas.

Estos cuerpos intrusivos se enfriaron en el interior de la corteza terrestre y quedaron expuestos por procesos de desgaste de los materiales que los cubrían.

Al oriente de Cuautla, se localizan cuerpos intrusivos discordantes, en forma de troncos y diques de composición heterogénea, principalmente pórfido riolítico, pórfido andesítico y diabasa.

III.A.) Relieve exógeno acumulativo de planicie aluvial.

Este relieve se vincula a las formas originadas por las corrientes fluviales. Están integradas por aluviones cuaternarios resultado del intemperismo y erosión de las rocas que la rodean. Las planicies aluviales son a nivel estatal de extensión notable debido al porcentaje de relieve plano.

Se ubican en la parte centro-oeste de la entidad en pequeñas depresiones relativas, se derivan de la sobreposición de derrames lávicos que al alterar las condiciones de drenaje, propiciaron el depósito de materiales que aceleraron el surgimiento de estas geoformas semiplanas.

Otra área de planicies aluviales se sitúa en los sinclinales del centro de Morelos y al oeste de la ciudad de Cuautla, dichas planicies se han formado como resultado de la erosión fluvial de las sierras mencionadas y por los aportes del río Cuautla.

III.B.a.) Relieve exógeno acumulativo erosivo de piedemonte.

Los piedemonte son estructuras complejas formadas por varios procesos exógenos y aún endógenos. Se localizan dos; uno al este y otro al oeste de la entidad, comprende sedimentos fluviales derivados de corrientes coalescentes que se han depositado en pendientes suaves.

El primero corresponde a la Formación Cuernavaca. El segundo a las Formaciones Tlayecac y Riodacita Popocatepetl. Ambos tienen una dirección norte-sur.

El piedemonte de la Formación Cuernavaca ha sido cubierto en la parte oriental por lavas de la Formación Chichinautzin. Fue designado por Ortiz, como Glasis de Buenavista (Ortiz 1977, 25-44).

Dicho autor señala que en épocas glaciales del Pleistoceno, la sierra de Zempoala estuvo expuesta a intemperismo físico, lo que ocasionó una fuerte gelifración. Posteriormente, en una época seca, sus características lluvias torrenciales dieron lugar a la solifluxión que transportó las rocas previamente intemperizadas y las acumuló al sur de la sierra mencionada.

Palacio, agrega que dichos sedimentos coalescentes al encontrar como barrera a la sierra de Xochicalco, sufrieron un proceso de acumulación, colmatación y desbordamiento y así cubrieron las rocas cretácicas que se localizan en el centro-oeste de la entidad. (Palacio 1982, 72-79).

Por lo anterior, se puede afirmar que el glasis de Buenavista es una mezcla de conglomerados clásticos y volcanoclásticos andesíticos, originados por abanicos aluviales.

La aparición del volcán Popocatepetl favoreció el desarrollo de un manto de acumulación a sus pies, por la acción de la gravedad, procesos fluviales y gelifración. Aguilar, lo denominó piedemonte del Plan de Amilpas, ubicado al este de la entidad. (Aguilar 1989, 47-48).

La gran altura de volcán ha propiciado una fuerte intensidad de los procesos modeladores, condicionados por factores orográficos y climáticos. Al desarrollarse la disección de las laderas montañosas se produjo un manto acumulativo de piedemonte. Conforme se expandió alejándose del Popocatepetl, se han diferenciado dos regiones: una superior más antigua que muestra disección y extinción de las acumulaciones y otra acumulativa más joven.

La primera comprende los derrames lávicos que llegaron a la superficie por el centro eruptivo de volcán. La segunda representa un secuencia de derrames de lodo o lahares

interdigitados y emplazados al mismo tiempo que las lavas, pero a mayor distancia del centro eruptivo.

Dichos derrames han cubierto hasta más de 50 km a partir de su fuente original en una o varias etapas. El material no está cementado no obstante que está muy compacto y suele formar acantilados en los flanco de las barrancas.

El piedemonte del Plan de Amilpa, a diferencia del de Buenavista está en proceso de formación más que de extinción.

III.C.) Relieve exógeno acumulativo de montañas y lomeríos residuales.

Esta forma queda representada por los primeros depósitos terciarios que descansan encima de las rocas cretácicas. Consiste en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres no marinos, que se denominan Grupo Balsas.

Las áreas de afloramiento quedan junto a las formaciones del Cretácico, en sitios donde hubo fallamiento, que levantaba algunos bloques mientras otros bajaban. Su máxima expresión se observa en el cerro Amarillo al oriente de Ticumán.

Este depósito se considera como relieve postorogénico del tipo molasse continental.

C) Erosivo de carst o erosivo cárstico.

Este tipo morfológico se ha desarrollado en la depresión relativa del sureste de la entidad, a mil metros de altitud sobre el nivel del mar, que está rodeando al Complejo Oligomiocénico y las sierra Cretácicas plegadas. Dos factores han determinado esta geoforma, el drenaje y la estructura geológica.

Hacia la depresión señalada drenan las cuencas superficiales y subterráneas que alimentan al río Amacuzac, alcanzando allí mismo su nivel base, dando lugar a la erosión subterránea y al surgimiento de manantiales.

Esta topografía está constituida por calizas, dolomías y en menor cantidad mármol, ocupan miles de kilómetros cuadrados bajo la superficie del área de estudio e integran la Formación Morelos principalmente, su composición mineralógica influye en la existencia de dolinas.

Las dolinas son depresiones causadas por procesos de disolución bajo la superficie, con el hundimiento subsecuente. Las más notables que están ocupadas por agua son Tequesquitengo, El Rodeo y Coatetelco, también se presentan ocupadas por zonas de cultivos como las de Alpuyecá y Puente de Ixtla.

Estas rocas son en forma particular susceptibles al ataque del agua subterránea que contiene sustancias en solución. Su capacidad para disolver y oxidar depende del contenido de bióxido de carbono y oxígeno libre al penetrar en la zona de aereación. El

agua de lluvia contiene ambos, los adquiere de la atmósfera y cuando pasa a través del suelo obtiene más bióxido de carbono generado por las bacterias. El proceso anterior explica por qué en la parte superior de la zona de aereación, el agua subterránea es un ácido carbónico muy diluido, una sustancia corrosiva y solvente (Mapa 5.)

3.2.2.- Correlaciones estratigráficas.

Es la interpretación de los materiales del subsuelo con características petrográficas similares a otras que han sido estudiadas en otros sitios y corresponden a la misma edad geológica y que se constituyeron a través de los procesos de formación geológica, por capas, lechos, estratos y láminas.

Esta interpretación se realiza tomando en cuenta las características del relieve, drenaje, materiales de la superficie (cobertura) y relaciones geomorfológicas.

En el cuadro 3.3 y Mapa 6, se ilustran la distribución estratigráfica del subsuelo, que incluye: **ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS BASICAS (Igeb), ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS ACIDAS (Igea), ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS INTERMEDIAS (Igei), ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS (Igi), LUTITAS (Li), CALIZAS (Cz), YESOS (Y), METAMORFICO (Mi), ARENISCAS Y CONGLOMERADOS (Ar-Cgi), CONGLOMERADOS (Cg), ALUVION (Al).**

Al igual que en la interpretación de relaciones geomorfológicas, se recurrió al apoyo de trabajos, estudios e información existente de INEGI, CNA, IPN y UNAM.

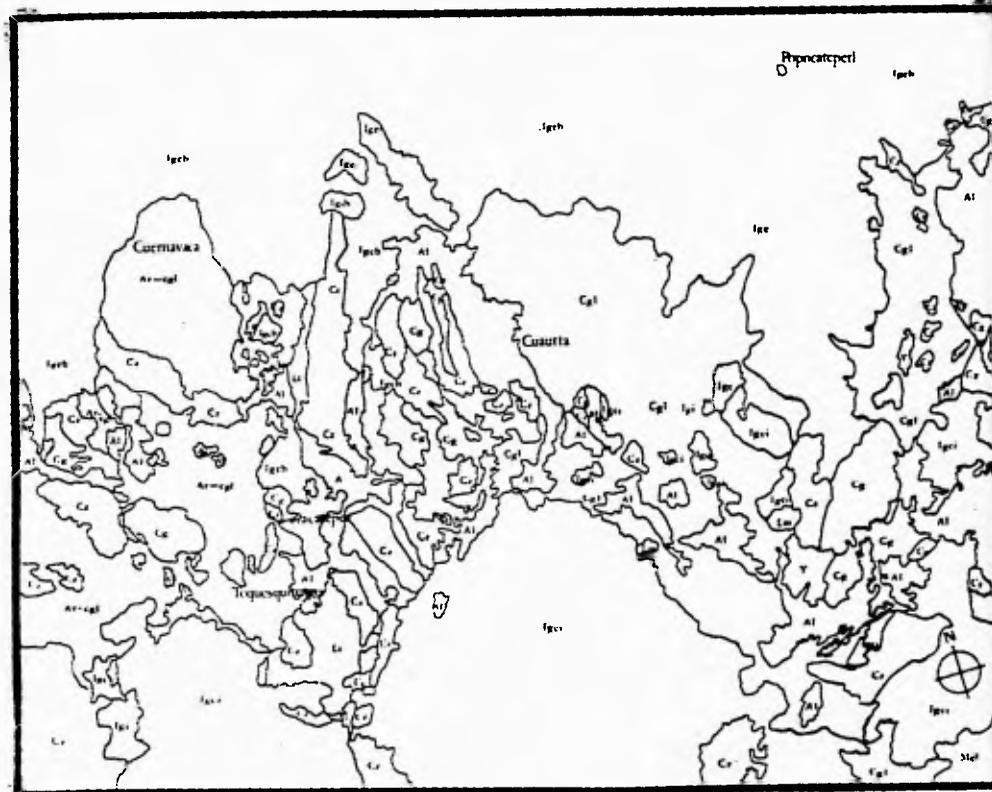
Una vez que se concluyó el reconocimiento e identificación de los procesos que están o han estado actuando en la zona de estudio, se llegó a la fase de interpretación de las unidades geológicas existentes, mismas que se caracterizan por pertenecer a dos dominios geológicos principales, los cuales son de tipo sedimentario, constituido por rocas de tipo calcáreo de edad cretácica, conglomerados continentales y materiales aluviales del Terciario y Cuaternario respectivamente y el segundo representado por rocas ígneas extrusivas, conos cineríticos, etc.

3.2.3.- Interpretación de lineamientos.

Esta fase del estudio tiene su apoyo en los patrones de lineamientos superficiales, realizando un escrutinio y selección detallada de cada uno de estos, para seleccionar sólo aquellos que representen mayor interés para el estudio que se realiza.

Sin perder de vista que uno de los objetivos del presente estudio, es la prospección geohidrológica de la zona como acuífero; revisten gran importancia los lineamientos como fracturas y fallas geológicas, ya que pueden tener relación con zonas de recarga o salida por flujo horizontal. Son muy importantes los lineamientos de mayor longitud y la intersección de estos, ya que pueden representar zonas sumamente fracturadas y falladas.

Por lo anteriormente referido, se eliminaron los lineamientos superficiales, líneas de drenaje, linderos geomorfológicos y de vegetación, cambios de textura por cambios de



LEYENDA

- Al** ALUVION, CONSTITUIDO POR CLASTOS DE ARENA, GRAVA Y ARCILLA
- Igch** IGNEO, EXTRUSIVO BASICO, CONSTITUIDO POR BASALTOS, TOBAS Y BRECHAS BASALTICAS
- Igi** IGNEO INTRUSIVO ACIDO
- Igpi** IGNEO EXTRUSIVO INTERMEDIO, CONSTITUIDO POR TOBAS, BRECHAS Y BERRAMES DE LAVA
- Igea** IGNEO EXTRUSIVO ACIDO, CONSTITUIDO POR IGOLITA, TOBAS Y BRECHAS
- Ac-nd** ARENERCA-CONGLOMERADO, DERIVADO DE ANDESITA
- Cc** CONGLOMERADO, CONSTITUIDO POR CLASTOS DE CALEZAS EMPACADOS EN ARCILLAS
- Ca** CALEZAS
- Lu** LUTITAS
- Y** YESOS
- Mbr** METAMORFICO, SIBRN
- Cgl** CONGLOMERADO VOLCANICO
- Lm** LIMOLITAS

PROYECTO FINANCIADO POR FOLIO LABORIST YERREY, EMPRESA S.A.T. SINTA, MEXICO
 ESCALA 1:25000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCION GEOMIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESENTO		
1995	MAPA 6	

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS

CUADRO 3.3 CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS

INTERPRETACION DE LA LITOLOGIA SUPERFICIAL Y DEL SUBSUELO

UNIDAD	MATERIAL SUPERFICIAL	ASOCIACION LITOLOGICA
IID IIIB	RESIDUAL	CALIZAS Y LUTITAS
IIB	RESIDUAL	ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS (INTERMEDIAS Y ACIDAS)
IIE	RESIDUAL	ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS
IIA	RESIDUAL	VULCANOCLASTICOS
IIIBd	TRANSPORTADO	CONGLOMERADO
IIIaA IIIAb IIIAC	RESIDUAL	ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS (BASICAS E INTERMEDIAS)
IIIA IIIBa	TRANSPORTADO	ALUVION Y CONGLOMERADO

tono de la imagen, características culturales, etc.

Para esta actividad se contó con el apoyo de cartas geológicas de INEGI, ya que por la escala de la fotografía de satélite, no se pueden interpretar o diferenciar ciertos lineamientos.

En la imagen se observan claramente los pliegues anticlinales y sinclinales de las rocas calizas cretácicas por efecto de la Orogenia Laramide. Relacionadas con estas estructuras se distinguen las fallas del Cañón de Lobos, de Jojutla de edad posterior a la Orogenia Laramide, ya que únicamente afectan a las estructuras plegadas de calizas, presentan una dirección NE-SW y NW-SE, respectivamente presentando desplazamientos vertical normal de aproximadamente 1,500 m en la primera y en la segunda el movimiento es lateral derecho, dentro de este sistema se incluyen fallas normales de dirección NE, localizadas al occidente del anticlinal de Ticumán.

Resulta interesante el alineamiento de conos cineríticos y volcanes escudo, que constituyen las sierras de Chichinautzin, Zempoala y Nevada la dirección que presentan es E-W y NW-SE, respectivamente, a este alineamiento se le denomina Falla Clarión.

En el área de Tepoztlán se presenta una estructura del tipo de Graben asociado a Horts del Plioceno. Se distingue un alineamiento de los afloramientos de la Formación Tepoztlán la cual se puede continuar hacia la parte SW del estado.

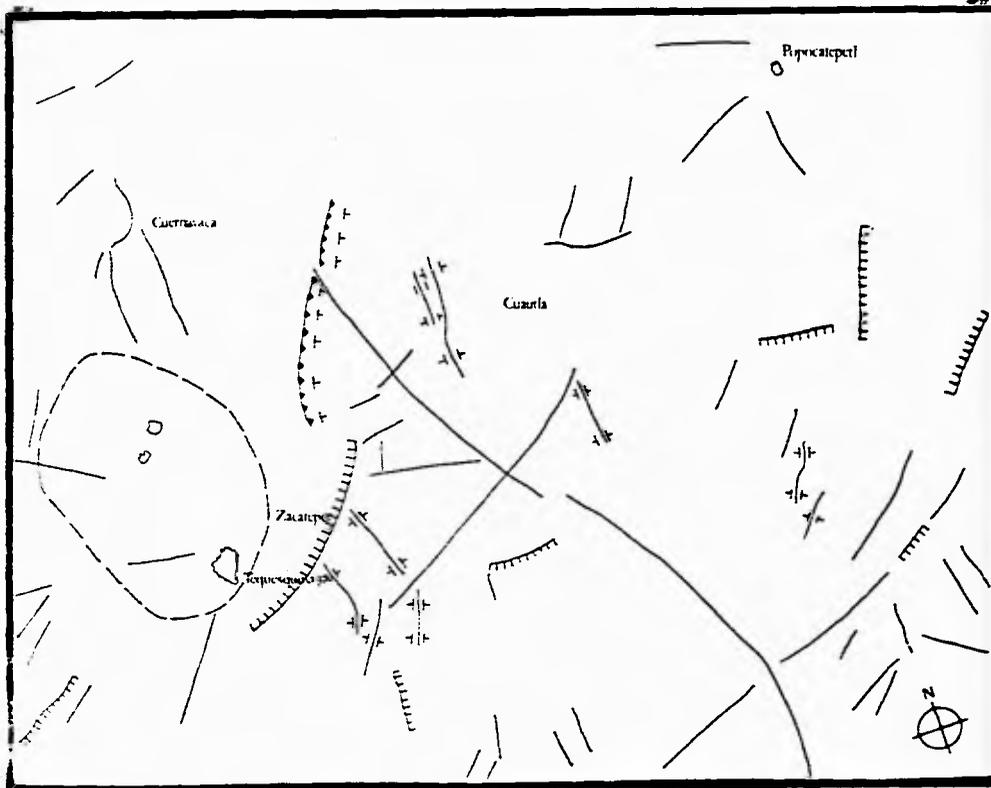
Es notable el alineamiento que presenta la Falla del Cañón de Lobos, el cual se puede continuar hacia el suroeste del estado, y se manifiesta en el trazo que presenta el río Tepalcingo. De la misma manera se distingue el alineamiento que parte de la población de Atlixco en dirección NW-SE hacia la localidad de Axochiapan. Este mismo alineamiento se aprecia que continúa en la sierra de Huautla internándose en el estado de Guerrero.

En el Mapa 7, se ilustran la interpretación de las formas y su distribución de los lineamientos asociados a las estructuras geológicas.

3.2.4.- Asociaciones estructurales.

En la parte centro del área objeto de este estudio, se observan las estructuras sinclinales y anticlinales de las sierras de calizas plegadas, con una orientación preferencial NE-SW. Al Norte se observa la presencia de la actividad volcánica representada por la alineación de numerosos aparatos volcánicos del Eje Neovolcánico, en donde destacan la sierra de Chichinautzin con dirección E-W, La sierra Nevada N-S y hacia el Sur se presenta la sierra de Huautla constituida por materiales ígneos extrusivos intermedios, en donde se distinguen gran cantidad de lineamientos producidas por fallas de corrimiento. (Cuadro 3.4, Mapa 7).

El significado de los patrones interpretados en la imagen y las relaciones que existen entre estos, se tiene que, las rocas sedimentarias calcáreas marinas fueron plegadas por esfuerzos producidos durante la Orogenia Laramide, desarrollándose anticlinales



LEYENDA

-  ANTICLINAL
-  FALLA NORMAL
-  FALLA INVERSA
-  FRACTURA
-  ZONA DE CARST

FUENTE: IMAGENES DE SATELITE LANDSAT TM/PT, BANDAS 2A, 5, 7, 4, MEDICO
 ESCALA 1:250,000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
PROSPECCIÓN GEOTERMOLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS	
INTERPRETACIÓN DE LINEAMIENTOS	
TESIS PROFESIONAL	
ALFONSO GARCÍA SESENTO	
1995	MAPA 7

**PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION
DE IMAGENES DE SATELITE, DEL ESTADO DE MORELOS.**

CUADRO 3.4 ASOCIACIONES ESTRUCTURALES

**INTERPRETACION DE LA LITOLOGIA DEL SUBSUELO Y ASOCIACIONES
ESTRUCTURALES**

UNIDAD LITOLOGICA	ASOCIACIONES ESTRUCTURALES
Igeb	DERRAMES HORIZONTALES E INCLINADOS
Igi	FRACTURAMIENTO VARIABLE
Igei	FRACTURAMIENTO VARIABLE, FALLAS NORMALES
Igea	FRACTURAMIENTO VARIABLE, FALLAS NORMALES
Cz	ANTICLINALES, SINCLINALES. FALLAS NORMALES E INVERSAS

y sinclinales que dieron forma a las sierras actuales como son las sierras de Tepoztlán-Tlaltzapán, cerro Santa María y cerro Jojutla. En la zona se identifican fallas y fracturas de diferentes dimensiones las cuales se encuentran afectando a las rocas sedimentarias, por su movimiento fueron denominadas como fallas de tipo normal e inverso.

Partiendo de su génesis, las estructuras son la consecuencia de los procesos endógenos. De sus asociaciones estructurales se llega a establecer una interpretación de cada una de ellas basándonos en:

a) Los principios de identidad; estos se soportan en los caracteres que de los orígenes de cada tipo de roca les ha sido impuesto por su naturaleza (sedimentaria, ígnea o metamórfica).

b) Las relaciones externas de las estructuras; en este caso no necesariamente implica correspondencia interna entre estructuras relacionadas externamente ya que por su origen y por sus relaciones temporales pueden pertenecer a sistemas estructurales diferentes.

c) Las relaciones internas de las estructuras; estas relaciones se pueden ejemplificar con un anticlinal ligado a un sinclinal: Esto puede ser siempre y cuando ambas estructuras reúnan el conjunto de condiciones o parámetros que les den los caracteres de identidad y de correspondencia, tales como, la misma secuencia litológica que hayan sido afectadas por los mismos procesos que tengan relaciones de parentesco en cuanto a su génesis se refiere, etc.

d) La conexión de las estructuras está basada en cuanto a sus caracteres de correspondencia o de no correspondencia como ejemplo del primer caso se puede citar una situación en la cual un intrusivo joven está afectando a un paquete de rocas pre-existentes metamorfolizándolo y provocando en él fallamientos y fracturamientos. Por otro lado, se puede tener una roca granítica anterior a la depositación de un paquete sedimentario, entonces este sería el caso de caracteres de no correspondencia.

e) Los sistemas de estructuras; estos se definen como las asociaciones de estructuras originadas por un mismo fenómeno o por un mismo período de fenómenos geológicos, por ejemplo: cuando se presentan campos de fallas normales asociadas a capas basculadas, el cambio de buzamiento de una falla geológica puede provocar el desarrollo de fracturas secundarias o bien, una rotación de las capas.

De acuerdo con lo expuesto en lo anterior se puede deducir que en la zona se tiene la presencia de derrames volcánicos de composición intermedia a básica, estratos sedimentarios calcáreos formando anticlinales y sinclinales, fallas de tipo normal e inverso que afectan principalmente a las rocas de origen sedimentario y por último sistemas multidireccionales de fracturas primarias que se encuentran tanto en las rocas ígneas extrusivas y sedimentarias.

3.2.5.- Interacciones geodinámicas.

A la escala de la imagen se distinguen numerosos lineamientos, en primer lugar destacan las estructuras de sierras plegadas de rocas calizas mesozoicas, localizadas en la parte media, siguen una dirección preferencial NE-SW. En segundo lugar, en la parte norte se observa la presencia de la actividad ígnea del Eje Neovolcánico, el cual sigue una dirección E-W en la sierra de Chichinautzin, NE-SW en las sierras de Zempoala y Nevada. La presencia del Eje Neovolcánico vino a modificar la secuencia sedimentaria marina y continental del Mesozoico observando como se encuentran rodeadas por materiales ígneos en la parte oriente, poniente y sur dando lugar a los lineamientos regionales en la zona de: Cañón de Lobos - Tepalcingo, Jojutla y Atlixco Iguala. Cuadro 3.5, Mapa 8.

3.4.- Verificación geológica de campo.

La verificación de campo de lo interpretado, se realizó de manera expedita, en función del amplio conocimiento que se tiene de la geología y de la geohidrología de la región.

3.5.- Interpretación geohidrológica.

La aplicación de la metodología para la interpretación de imágenes de satélite en la prospección geohidrológica, requiere de un entendimiento claro del significado geohidrológico de los rasgos de los patrones identificados en la imagen de satélite.

En su desarrollo se puede partir de dos caminos:

a).- Cuando se tiene conocimiento y experiencia de un área determinada, la metodología de interpretación puede ser desarrollada antes de iniciar la interpretación de la imagen, por lo que dicha metodología servirá para confirmar si el empleo de las imágenes de satélite pueden ser útiles en la interpretación para la obtención de datos conocidos.

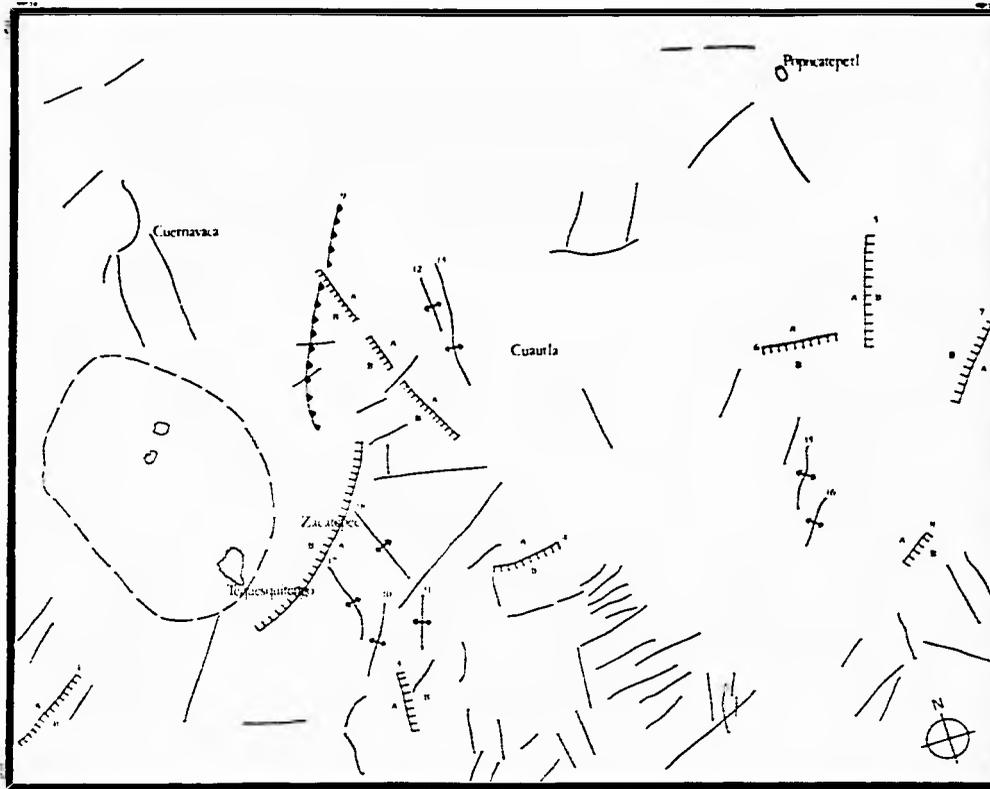
b).- Cuando el conocimiento de las zonas por explorar son escasos o poco confiables, el modelo conceptual para la interpretación geohidrológica, puede ser desarrollada con base en la interpretación geohidrológica de los patrones de la imagen.

En el presente caso, el modelo que se siguió, pretende abarcar en forma global la interpretación general de los patrones de la imagen en la prospección geohidrológica, en áreas conocidas, se consideraron las siguientes premisas en la interpretación:

1.- Las fracturas y las fallas han tenido influencia en el desarrollo de los patrones de drenaje, así como en la evolución temprana de la geomorfología de la zona.

2.- Los materiales de grano grueso transportados por corrientes antiguas, se encuentran localizados hacia las partes internas de las cuencas.

3.- Los lineamientos son la representación de fallas y fracturas.



LEYENDA

-  ANTICLINAL
-  FALLA NORMAL
-  FALLA INVERSA
-  FRACTURA
-  ZONA DE CARST

FUENTE: BANCO DE SATELITE LANDSAT TM/DTM BANDAS 2,4,7, DATA, MEXICO
ESCALA: 1:25000

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA		
PROSPECCION GEOMORFOLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE DEL ESTADO DE MORELOS		
INTERACCIONES GEODINAMICAS		
TESIS PROFESIONAL		
ALFONSO GARCIA SESENTO		
1995	MAPA 8	

PROSPECCION GEOHIDROLOGICA MEDIANTE LA INTERPRETACION DE IMAGENES DE SATELITE, DEL ESTADO DE MORELOS.

CUADRO 3.5 INTERACCIONES GEODINAMICAS

INTERPRETACION DE LA SECUENCIA ESTRUCTURAL Y MOVIMIENTO RELATIVO

ESTRUCTURA	MOVIMIENTO RELATIVO
1,2,3,4,5,6,7,8, FALLAS NORMALES	BLOQUE B DESPLAZADO CON RESPECTO AL BLOQUE A EN FORMA VERTICAL O INCLINADA
9 FALLA INVERSA	BLOQUE B DESPLAZADO O MONTADO SOBRE BLOQUE A
10,11,12,13,14, 15,16,17 Y 18 ANTICLINALES	ESTRUCTURAS PLEGADAS ORIENTADAS NW-SE, NE,SW Y NS.

4.- Generalmente cuando un mayor número de lineamientos de diversas direcciones se interceptan, crean zonas de debilidad en la corteza, resquebrajándola en sumo grado, y si esto ocurre en rocas que aunque no sean favorables para formar acuíferos, tales como rocas ácidas intrusivas (granitos y granodioritas) y extrusivas (riolitas, andesitas y basaltos compactos), o las metamórficas (esquistos y pizarras), las zonas de fracturamiento y/o fallamiento pueden permitir que el agua proveniente de la precipitación pluvial se infiltre a través de ellas y el flujo subterráneo continúe en dirección de las mismas para recargar las zonas que presentan condiciones favorables para el almacenamiento del agua subterránea.

5.- Cuando las condiciones anteriormente descritas se localizan en las rocas sedimentarias (principalmente calizas), entonces se establecen ambientes favorables para el posible desarrollo de zonas cársticas que pueden llegar a contener acuíferos de importancia económica.

6.- En algunos casos los lineamientos (fallas o fracturas), que se observan en las zonas montañosas se continúan a través de los valles pero se encuentran cubiertos por aluvión; la continuidad de estos lineamientos es posible detectarla cuando en la misma dirección de los lineamientos se forman arroyos que se continúan generalmente hacia el centro de los valles. Las fallas y fracturas pueden permitir que el agua proveniente de la precipitación pluvial se infiltre a través de ellas y el flujo del agua infiltrada puede continuar en la dirección de los lineamientos permitiendo con esto, actuar como zona de recarga para los materiales granulares que se localizan en los valles.

7.- La máxima infiltración se produce a lo largo de las corrientes principales en áreas caracterizadas por drenaje de densidad media y gruesa.

8.- El drenaje de densidad fina indica sedimentos de grano fino en donde la infiltración del agua en el subsuelo varía de baja a muy baja.

9.- Las rocas fracturadas son susceptibles de intemperismo y erosión; estas zonas de debilidad en las rocas se extienden desde las montañas hacia las cuencas y son cubiertas por aluvión.

10.- En las áreas semidesérticas, la vegetación ribereña (que crece en las cercanías de los ríos) y las freatofitas (vegetación que depende del agua subterránea para su subsistencia), son buenos indicadores de agua subterránea cerca de la superficie, principalmente donde estos tipos de vegetación crecen en forma abundante.

11.- Los principales acuíferos o los más conocidos se encuentran en materiales granulares, no se tienen datos del acuífero en calizas en Morelos, ya que casi no se ha explorado, pero destaca por su importancia, los manantiales Las Estacas, La Taza, Oaxtepec y La Fundición.

12.- Las rocas ígneas extrusivas de tipo básico (basaltos, brechas y tobas), pueden ser formadores de acuíferos.

13.- Las rocas ígneas extrusivas ácidas e intermedias (andesitas y riolitas fracturadas, así como brechas y tobas), pueden ser también ser buenas formadoras de acuíferos.

14.- Dentro de las rocas sedimentarias, las calizas arrecifales y las de plataforma, representan la mayor importancia como formadoras de acuíferos, debido a que presentan las mejores condiciones para el desarrollo de fenómenos de carsticidad.

Con base en lo anterior y atendiendo a la metodología planteada para el análisis e interpretación de las imágenes de satélite expuesta con anterioridad y con la finalidad de llevar a cabo una interpretación sistemática de las imágenes en la prospección geohidrológica se plantea:

- A.- Interpretación de los patrones de relieve.
- B.- Interpretación de los patrones de drenaje.
- C.- Interpretación de los patrones de cobertura.
- D.- Identificación o análisis de lineamientos.
- E.- Interpretación de las relaciones geomorfológicas.
- F.- Correlación estratigráfica (litología).
- G.- Interpretación de lineamientos (análisis estructural).
- H.- Interpretación geohidrológica.

En general la interpretación de cada uno de los temas anteriores, se deberá de realizar en acetato y a la misma escala de la imagen que se está interpretando, utilizando preferentemente marcadores de punto fino o extrafino de diferente color para cada tema.

El objetivo de manejar diferentes colores para cada tema, es evitar confusión al iniciar la interpretación geohidrológica, que resulta de la sobreposición de cada uno de los temas antes mencionados.

Para la interpretación geohidrológica se consideraron los temas desarrollados, utilizando la siguiente mecánica:

- A.- Colocar uno sobre otro los acetatos: A,B,C,E,F y G.
- B.- Colocar un acetato sobre los acetatos anteriores que contienen la interpretación de los temas mencionados.
- C.- Marcar sobre el acetato las corrientes principales, así como las direcciones del flujo superficial y subterránea inferido.
- D.- Marcar las zonas de densidad gruesa y media en los aluviones.
- E.- Observar el conjunto de datos interpretados para únicamente encerrar en un círculo discontinuo la vegetación que se encuentre relacionada con los cuerpos de agua subterráneos cercanos a la superficie (vegetación ribereña y freatofita).

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

F.- Encerrar en un círculo con línea continua las zonas de intercepción de fallas y/o fracturas (lineamientos), que se encuentren relacionadas con zonas de textura media y gruesa en materiales granulares.

G.- Las zonas que se seleccionen para realizar estudios de geofísica o perforaciones exploratorias, serán aquellas que presenten el mayor conjunto de características hidrogeológicas como resultado de la interpretación realizada.

Del análisis e interpretación de los diferentes patrones espaciales, en la imagen estudiada se concluye la siguiente interpretación geohidrológica (Mapa 9).

ZONA DE BAJA POSIBILIDAD.- El relieve montañoso y la fuerte pendiente de la ladera sur de la sierra de Chichinautzin, así como la presencia de materiales volcánicos permeables, determina que en esta zona, no se presenten condiciones geohidrológicas adecuadas para el aprovechamiento de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

Los materiales impermeables de la región sur, como son las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla determinan a su vez bajas posibilidades. Las geoformas constituidas por rocas calizas, se encuentran sometidas a procesos de erosión y carsticidad, por lo que la presencia de corrientes subterráneas es muy localizada.

ZONA DE MEDIANA POSIBILIDAD.- Las partes de lomeríos de la imagen, presentan condiciones de mediana permeabilidad, debido a la presencia de materiales granulares de regular a bajo espesor, ubicación en la cuenca, así como de la naturaleza litológica de los materiales del subsuelo.

ZONA DE ALTA POSIBILIDAD.- Las partes bajas de los valles constituidos por materiales granulares, presentan posibilidades altas para el establecimiento de aprovechamientos subterráneos.

Los depósitos de pie de monte presentan condiciones propicias para la descarga de los aguas subterráneas debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad.

En ésta zona se tienen ubicados numerosos manantiales entre los que destacan El Túnel, Chapultepec, Las Fuentes y Oaxtepec.

3.6.- Revisión y evaluación preliminar.

La evolución histórica de los recursos hidráulicos en la zona de estudio, muestran una disponibilidad del recurso agua, en donde se tiene una gran cantidad de manantiales, así como corrientes superficiales de régimen intermitente alimentadas por manantiales.

Para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, el área de estudio se ha dividido en valles acuíferos, los cuales presentan diferentes grados de explotación. Los valles de

Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec están subexplotados y el valle de Tepalcingo-Axochiapan se encuentra sobreexplotado.

Las zonas bajas de los valles de los ríos Apalaco, Yautepec, Cuautla, Tepalcingo y Nexapa presentan una agricultura de riego, en la que las fuentes de abastecimiento son aguas superficiales y subterráneas.

Las parte altas de la porción norte presentan abundantes recursos naturales, pero no se dispone de agua subterránea, lo cual limita las actividades económicas y se considera que no pueden ser modificadas las condiciones actuales, aunque no es del todo negativo, ya que la ausencia de agua subterránea permite que se conserven otros recursos naturales (la vegetación, el suelo, el uso del suelo, pero sobre todo, es el área de recarga de los acuíferos que se explotan en las partes bajas.)

Hacia el sur, las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla, presentan bajas posibilidades para la captación de las aguas subterráneas, debido al tipo de roca, al relieve, así como el uso del suelo que presentan, no hay áreas por beneficiar, ni demanda de la población por cubrir.

CAPITULO 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones.

Sobre la metodología empleada.

Para la prospección geohidrológica, el empleo de imágenes de satélite, es una técnica que permite agilizar el análisis e interpretación de los recursos naturales, haciendo énfasis en las condiciones naturales que determinan la presencia o ausencia de los recursos hidráulicos subterráneos.

Sobre el relieve.

El Eje Neovolcánico da lugar a la presencia de una geoforma característica (sierras), que da lugar a un marcado desnivel en un tramo muy corto, variando de los 3,500 a los 1,000 m en una distancia de 65 km con una talud muy pronunciado. Es importante resaltar este aspecto, ya que el relieve combinado con las características hidrogeológicas de los materiales del subsuelo, determinan la forma en que se drena la región tanto superficial como subterráneamente.

Sobre la hidrografía.

La red hidrográfica está determinada por los materiales que constituyen el sustrato geológico, de tal manera que en la partes altas de las cuencas de los ríos Apatlaco y Yautepec, se tienen en términos generales condiciones de alta permeabilidad, como lo demuestra la ausencia de drenaje, mientras que para la parte alta de la cuenca del río Cuautla muestra un arreglo dendrítico, debido a que los materiales presentan una permeabilidad de baja a nula. El volcán Popocatepetl presenta drenaje de tipo radial, el cual se define con mayor precisión, hacia las partes media y baja con una densidad media. Hacia las porciones sureste sur y suroeste de la imagen se observa que las cuencas muestran poca permeabilidad, representado por una alta densidad en el drenaje.

Sobre la cobertura.

Resulta significativo la presencia de la cobertura de la imagen, la cubierta vegetal está determinada por la fecha en que se tomó la imagen (Febrero de 1990), donde se identifican claramente la presencia de varias coberturas (usos del suelo), en las que se identificaron las zonas agrícolas, pecuarias, de bosques, trazas urbanas, cuerpos de agua y áreas sujetas a erosión.

En geohidrología es recomendable la prospección en la época de estiaje, los elementos acuosos del clima, ocasionan la presencia de la vegetación, al encontrar un desarrollo anormal de la vegetación en esta época, nos indican la presencia de agua en o cerca de la superficie.

Sobre los lineamientos.

En la imagen se observan una gran cantidad de lineamientos, tanto en las rocas ígneas, como en las sedimentarias marinas y continentales, destacando por su densidad en la parte poniente de Cuernavaca, sierra de Huautla y en el flanco sur del volcán Popocatepetl.

Asociaciones estructurales.

En la imagen se observa un control estructural, que ejerce un dominio preponderante sobre el flujo subterráneo, especialmente en los valles sinclinales, en donde el relleno de los valles funciona como un dren colector subterráneo, recibiendo aportaciones laterales de las sierras adyacentes, para transitar el agua hacia las áreas de descarga.

Interpretación geohidrológica.

La presencia de un relieve tan especial dentro del Eje Neovolcánico, así como de un potente paquete de materiales volcánicos permeables, determina que el movimiento y dirección de las corrientes de aguas superficiales y subterráneas, sea de las partes altas a las bajas, siendo generalmente en dirección N-S, en la porción oriente la presencia del Popocatepetl da lugar a la presencia de un drenaje radial con dirección preferencial NW-SE.

La parte norte de Morelos, las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla al sur y las sierras de calizas de la región centro, se consideran como zonas de bajas posibilidades geohidrológicas para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos tanto superficiales como subterráneos, esto lo podemos concluir por la nula o escasa presencia de aprovechamientos naturales o artificiales.

Las zonas de pendiente (pie de monte), presentan condiciones propicias para la descarga natural y artificial de los aguas subterráneas, debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad. Esto queda demostrado por la aparición de numerosos manantiales, entre los que destacan El Túnel, Chapultepec, Las Fuentes, Itzamatillán y Oaxtepec.

Las zonas de lomeríos de la zona centro de la imagen, presentan medianas posibilidades para el establecimiento de obras de captación.

Las partes bajas de los valles sinclinales en la porción poniente y centro, así como el valle del río Nexapa, debido a la presencia de materiales granulares, son áreas que presentan un alto potencial para la exploración geohidrológica.

4.2.- Recomendaciones:

Se recomienda la exploración geohidrológica en los siguientes lugares:

En los valles sinclinales de la porción poniente y centro, constituidos por materiales granulares, constituyen fuentes seguras, para satisfacer las necesidades de agua de las comunidades ahí establecidas.

Los pie de monte presentan condiciones propicias para la descarga de los aguas subterráneas debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad.

El valle del río Nexapa, debido a la presencia de materiales granulares, se considera que presenta un alto potencial para la exploración geohidrológica.

Los aprovechamientos serán a través de pozos a cielo abierto o profundos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aguilar Benitez Salvador. Geografía Física y Turismo en el Estado de Morelos. Tesis de Doctorado. UNAM. México, 1989.
- 2.- Aguilar Benitez Salvador. Dimensiones Ecológicas del Estado de Morelos. CRIM-UNAM. México, 1990.
- 3.- De Cserna Zoltan y Fries Carl Jr.. Hoja Taxco 14 Q-h(7) Estados de Guerrero, México y Morelos, Carta Geológica de México. Serie 1:100,000 Instituto de Geología. UNAM, México. 1981.
- 4.- Fries Carl Jr. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México, y Guerrero, Región Central Meridional de México. Boletín No. 60. Instituto de Geología. UNAM, México. 1961.
- 5.- Fries Carl Jr. Hoja Cuernavaca 14 Qh(8), Estado de Morelos, Carta Geológica de México. Serie 1: 100 000, Instituto de Geología. UNAM, México. 1966.
- 6.- García Sesento Alfonso. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Morelos.- Publicación interna. CNA-Morelos, México, 1992.
- 7.- García Sesento Alfonso. Modelo Matemático del Acuífero de Yautepec, Estado de Morelos. Publicación interna. CNA-Morelos, México, 1992.
- 8.- García Sesento Alfonso. Prospección Geohidrológica Mediante Imágenes de Satélite del Estado de Morelos. Publicación interna. CNA-Morelos. México, 1993.
- 9.- Jaimes Palomera Luis Ricardo. Isotopos Ambientales Aplicados al Agua Subterránea de las Cuencas de los Ríos Apalaco y Yautepec, Estado de Morelos, Tesis Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1989.
- 10.- Lugo Hubp José. Geomorfología del Sur de la Cuenca de México, Serie Varia No. 8, Instituto de Geografía. UNAM, México, 1984.
- 11.- López Ramos Enrique. Geología de México. México, D. F. Edición escolar, Tesis Reséndiz, 3 volúmenes, 1979.
- 12.- Martín del Pozzo Ana. Vulcanología de la Sierra Chichinautzin. Tesis de Maestría en Geología, UNAM, México, 1980.
- 13.- Morán Zenteno Dante J. Geología de la República Mexicana, SPP y UNAM, 1985.
- 14.- Ochoterena Hector. Origen y edad del Tepozteco. Boletín No.8, del Instituto de Geografía. UNAM, México, 1977.

- 15.- Ordaz Ayala Anselmo. Estudio Geológico e Hidrogeológico en el Estado de Morelos. Tesis de Ingeniero Geólogo, IPN, México, 1981.
- 16.- Ortiz Mario. Estudio Geomorfológico del Glasis de Buenavista Estado de Morelos. Boletín No. 8, del Instituto de Geografía. UNAM, México, 1977.
- 17.- Palacio Prieto José. Análisis Geomorfológico de la Región de Cuernavaca-Tenancingo-Ixtapan de la Sal, Estados de Morelos y México. Tesis de Maestría en Geografía, UNAM, México, 1982.
- 18.- Sanvicente Sánchez Hector. Principios de Percepción Remota y Bases para la Fotointerpretación de Imágenes Multiespectrales. CNA-IMTA. México. 1993.
- 19.- SARH - CESI, S.A. de C.V. Estudio Geohidrológico Proyecto Oacalco, Morelos. 1989.
- 20.- SARH - CNA. Situación Hidráulica en el Estado de Morelos. Publicación Interna. CNA-Morelos, México, 1994.
- 21.- SARH - TACSA. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Zacatepec, Estado de Morelos. 1981.
- 22.- SARH - TACSA. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos. 1981.
- 23.- SARH - TACSA. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Tepalcingo-Axochiapan, Estado de Morelos. 1981.
- 24.- SARH - ININSA, S.A. Estudio Geohidrológico Integral de los Acuíferos de la Porción Oriental del Estado de Morelos. 1982.
- 25.- SARH - UNAM. Análisis de flujo de agua subterránea de Valle de México mediante trazadores isotópicos. Instituto de Geofísica, UNAM, México, 1987.
- 26.- SARH - ROCHA Y ASOCIADOS, S.A. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Cuautla- Yautepec, Morelos. 1981.
- 27.- SERVICIOS GEOLOGICOS, S. A., Estudio Geológico y Geohidrológico del Valle de Cuernavaca, Morelos, Financiadora BANAMEX, Gobierno del Estado de Morelos. 1970.
- 28.- Schlaepfer Carmen. Hoja México 14 Q-h(5) Distrito Federal y Estados de México y Morelos, Carta Geológica de México. Serie 1: 100 000, Instituto de Geología. UNAM, México. 1968.
- 29.- SPP-INEGI. Cartas temáticas escala 1: 50,000 y 1: 250,000. México. 1970.

30.- Torre Piña De la, Juan Ignacio. Percepción Remota, Sus Imágenes y su Aplicación en la Geohidrología de la Porción Sur-sureste del Estado de Puebla. CNA-IMTA, México, 1993.

31.- Uruñuela Saldivar Gustavo. Prospección Hidrogeológica de la Porción Oeste del Estado de Morelos. Tesis de Ingeniero Geólogo, IPN, México, 1981.

32.- Vásquez Sánchez E. Comportamiento Hidrogeoquímico del Agua Subterránea en la Zona Norte y Centro del Estado de Morelos, Tesis de Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1987.

33.- Velázquez Aguirre Luis, Ordaz Ayala Anselmo y Gastelum Fraijo Armando. Metodología para el Análisis e Interpretación de Imágenes de Satélite. CNA-IMTA. México. 1993.