UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

ANÁLISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA DE ACUíFEROS MEDIANTE LA PERCEPCIÓN REMOTA: APLICACIÓN A LA CUENCA DE ALMOLOYA DEL RÍO

TESIS:

Que para obtener el Grado de Maestría en:
Ciencias del Agua

Presenta:

José Armando Díez Pérez

Director de tesis:

Dr. Jaime Gárfias Soliz

Toluca Méx. 1998

Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM *FACULTAD DE INGENIERIA*

Oficio:

Dependencia:

Ciudad Universitaria, Toluca, Méx., a 18 de agosto de 1998.

Lic en C. JOSÉ ARMANDO DÍEZ PÉREZ
P r e s e n t e .

En contestación a su solicitud transcribo a continuación el tema que, aprobado por esta dirección propuso el **DR. JAIME GARFIAS SOLIZ** para que lo desarrolle como tesis para la presentación de su Examen de Grado de la **MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA.**

ANALISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE LA PERCEPCIÓN REMOTA:
APLICACIÓN A LA CUENCA DE ALMOLOYA DEL RÍO

CAPITULO I	**INTRODUCCIÓN.**
CAPITULO II	**CARTOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA.**
CAPITULO III	**SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**
CAPITULO IV	**ANÁLISIS DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO.**
CAPITULO V	**ANÁLISIS DE RESULTADOS.**
CAPITULO VI	**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**
	BIBLIOGRAFÍA.

Asimismo, para la aprobación de la Tesis y demás trámites deberá sujetarse al Reglamento respectivo de esta Facultad.

A T E N T A M E N T E
"PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO"
"1998, CENTENARIO DEL DR. MAXIMILIANO RUIZ CASTAÑEDA"

M. en I. ÁNGEL ALBITER RODRÍGUEZ
D I R E C T O R
FACULTAD DE INGENIERIA

c.c.p. Archivo.

ANALISIS DE LA RECARGA DE ACUIFEROS MEDIANTE LA PERCEPCIÓN REMOTA

INDICE DE CONTENIDOS

RECONOCIMIENTOS viii

RESUMEN ix

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1

1.1. ANTECEDENTES 1
1.2. OBJETIVO GENERAL 3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4
1.4. METODOLOGÍA 4
1.5. EQUIPO Y APOYOS DISPONIBLES 9

CAPÍTULO II. CARTOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA 10

2.1. INTRODUCCIÓN 10
2.2. CARTOGRAFÍA 11
2.2.1. DEFINICIÓN Y UTILIDAD 11
2.2.2. ELEMENTOS DE LA CARTOGRAFÍA 11
2.2.3. USO DEL SUELO 14
2.2.4. SUELOS 14
2.2.5. USO POTENCIAL DEL SUELO 15
2.2.6. GEOLOGIA 16
2.2.7. CLIMATOLOGÍA 16
2.2.8. HIDROLOGÍA 17

2.3. FOTOGRAMETRÍA 18
2.3.1. CONDICIONES Y LIMITACIONES 19
2.3.2. CORRECCIONES 20
2.3.3. PLANOS RESTITUÍDOS 22
2.3.3.1. Mosaicos y Fotomapas 23
2.3.3.2. Ortofotos 23
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS APLICACIONES 24

CAPÍTULO III. SISTEMAS. DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Y DE PERCEPCIÓN REMOTA 25

3.1. PRINCIPIOS 25
3.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 25
3.2.1. EXPERIENCIAS SOBRE LAS APLICACIONES DE SIGS 27
3.3. PERCEPCIÓN REMOTA 29
3.3.1. VENTAJAS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA 31
3.3.2. PLATAFORMAS E INSTRUMENTOS 33
3.3.3. INTERPRETACIÓN 43
3.3.3.1. Interpretación Manual 43
3.3.3.2. Interpretación mediante computadora 45
3.3.4. APLICACIONES DE PERCEPCIÓN REMOTA
A TEMAS HIDROLÓGICOS 47
3.3.4.1. Meteorología 47
3.3.4.2. Hidrometeorología 49
3.3.4.3. Calidad del agua y malezas acuáticas 51
3.3.4.4. Geología 51
3.3.4.5. Capacidades de almacenamiento y contenidos 52
3.3.4.6. Determinación de zonas de recarga de acuíferos 52
3.3.5. DISPONIBILIDADES DE SISTEMAS 57
3.3.6. SISTEMA SPIPR II 59
3.3.6.1. Aceptación de imágenes 60
3.3.6.2. Despliegue e impresión 60
3.3.6.3. Filtros y realces 62
3.3.6.4. Reconocimiento de patrones 62
3.3.6.5. Georeferencia 63
3.3.7. SISTEMA IDRISI 64
3.3.7.1. Antecedentes 64
3.3.7.2. Características del sistema 65

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO

DE ALMOLOYA DEL RÍO (CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA) 69

4.1. INTRODUCCIÓN.....69
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....70
4.2.1. CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA.....72
4.2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....84
4.3. INFORMACIÓN DISPONIBLE.....90
4.3.1. CARTOGRAFÍA.....91
4.3.2. FOTOMAPAS.....92
4.3.3. FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....92
4.3.4. ORTOFOTOS.....92
4.3.5. IMÁGENES DE SATÉLITE.....93
4.4. ANALISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA.....96
4.5. ESCALA Y REFERENCIA.....98
4.6. PROCEDIMIENTOS.....99

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....104

5.1. INTRODUCCIÓN.....104
5.2. EXAMEN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....105
5.2.1. CARTOGRAFÍA.....105
5.2.2. FOTOMAPAS.....113
5.2.3. FOTOGRAFÍA AÉREA.....113
5.2.4. ORTOFOTOS.....114
5.2.5. IMÁGENES DE SATÉLITE.....115
5.3. RESULTADOS.....118
5.4. ALTERACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....141

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....144

BIBLIOGRAFÍA.....151

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. ESQUEMA GENERAL DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN 5
FIGURA 2.1. ESTEREOSCOPIO Y VISIÓN DE UN MISMO OBJETO EN DOS FOTOS SUCESIVAS..... 22
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE LA NUEVA GENERACIÓN DE SATÉLITES GOES 38
FIGURA 3.2. ESQUEMA DEL CICLO HIDROLÓGICO 54
FIGURA 3.3. INTERACCIÓN ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS 55
FIGURA 3.4. ESQUEMA DE LOS MÓDULOS DE QUE CONSTA EL SISTEMA SPIPR II..... 61
FIGURA 3.5. BOSQUEJO DE FUNCIONES DEL SISTEMA IDRISI. 67
FIGURA 4.1. UBICACIÓN DEL ESTADO DE MÉXICO EN LA REPÚBLICA MEXICANA 70
FIGURA 4.2. UBICACIÓN DE LA ZONA EN LA CARTA TOPOGRÁFICA ESCALA 1:250,000 71
FIGURA 4.3. LIMITES DE LA ZONA DE ESTUDIO 73
FIGURA 4.4. GRÁFICA CLIMÁTICA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA TOLUCA 74
FIGURA 4.5. GRÁFICA CLIMÁTICA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA NEVADO DE TOLUCA. 74
FIGURA 4.6. TENDENCIA DEL NIVEL MÁXIMO ANUAL DESDE EL AÑO 1942 HASTA 1970 77
FIGURA 4.7. CAUDAL MENSUAL EN EL MES ABRIL PARA LA ESTACIÓN HACIENDA ATENCO 78
FIGURA 4.8. CAUDAL MENSUAL EN EL MES SEPTIEMBRE PARA LA ESTACIÓN HACIENDA ATENCO 79
FIGURA 4.9. PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO EN 1981 (EN METROS) 83
FIGURA 4.10. BANDA 1 DE LA IMAGEN 1973 95
FIGURA 4.11. ESQUEMA QUE MUESTRA LA SECUENCIA DE VACIADO DE DATOS 101
FIGURA 4.12. SUBIMAGEN DEL AÑO 1973 EN LA BANDA 4 103
FIGURA 5.1. CARTA GEOLÓGICA DE LA ZONA, ESCALA 1:250,000 111
FIGURA 5.2. HISTOGRAMA ORIGINAL DE LA BANDA 4 (IR) DE LA IMAGEN DEL AÑO 73. 116
FIGURA 5.3. HISTOGRAMA EXPANDIDO DE LA BANDA 4 (IR) DE LA IMAGEN DEL AÑO 73 117
FIGURA 5.4. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA MEDIANTE SPIPRII 128
FIGURA 5.5. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1973 MEDIANTE IDRISI 129
FIGURA 5.6. CLASIFICACIÓN IDRISI NO SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1980A 131
FIGURA 5.7. CLASIFICACIÓN IDRISI NO SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1980B 132
FIGURA 5.8. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1973 134
FIGURA 5.9. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1980A 136
FIGURA 5.10. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA IMAGEN 1980B 138

INDICE DE CROQUIS

CROQUIS NO. 1. ZONA DE LA LAGUNA EN LA CARTA SRH DE 1958.....88
CROQUIS NO. 2. ZONA DE LA LAGUNA EN LA CARTA SRH-DDF DE 1969 85
CROQUIS NO. 3. ZONA DE LA LAGUNA EN LA CARTA DE USO POTENCIAL DEL SUELO 107
CROQUIS NO. 4. ZONA DE LA LAGUNA EN LA CARTA DE TAXONOMÍA DE SUELOS 109
CROQUIS NO. 5. ZONA INUNDABLE. VUELO 1970. 119
CROQUIS NO. 6. ZONA INUNDABLE. VUELOS 1970-1975. 120
CROQUIS NO. 7. ZONA INUNDABLE. VUELO DE 1971. 122
CROQUIS NO. 8. ZONA INUNDABLE ORTOFOTOS AÑO 1983. 123
CROQUIS NO. 9. ZONA INUNDABLE ORTOFOTOS AÑO 1989. 124
CROQUIS NO. 10. ZONA INUNDABLE FOTOS AÉREAS AÑO 1995. 126

INDICE DE CUADROS

CUADRO 3.1. BANDAS DEL RVB DEL SATÉLITE LANDSAT. 34
CUADRO 3.2. BANDAS DEL MSS DEL LANDSAT 35
CUADRO 3.3. BANDAS DEL TM DEL SATÉLITE LANDSAT 36
CUADRO 3.4. BANDAS DEL INSTRUMENTO AVHRR 39
CUADRO 3.5. BANDAS DEL HRV DEL SATÉLITE SPOT. 41
CUADRO 4.1. BALANCE HIDRICO DE LA SUBCUENCA DE ALMOLOYA. 79
CUADRO 4.2. BALANCE HIDRICO EN EL SUBSUELO. 80
CUADRO 4.3. VALORES DE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD DE ACUERDO A LINSLEY ET AL (1977). 97
CUADRO 5.1. CENTROS DE CLASES OBTENIDOS EN LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.. 125

RECONOCIMIENTOS

A las instituciones que hicieron posible y facilitaron este trabajo, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y el Centro Interamericano Recursos del Agua, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Agradecimientos, en especial al Tutor, asesor y amigo, Dr. Jaime Garfias Soliz por su dedicación y consejos en toda la Maestría en Ciencias del Agua.

¡Gracias por todo!

A los compañeros Verónica Archundia García, René Díaz Ríos, Santos Damián Malaquías González, Horacio Garciarribas, Javier Oscos Mora, Eugenia Pérez Valdez, Luis Antonio Robles y Magdalena Osorio.
Ellos saben todo lo que hicieron y cuanto ayudaron.

Dedicatoria a mi familia por su comprensión.

RESUMEN

Se plantea en este trabajo la conveniencia de disponer de herramientas que permitan la obtención de datos espaciales de los fenómenos relacionados con la hidrología superficial y subterránea. El objeto de disponer de datos espaciales es el describir de una manera completa el objeto de estudio y sobre todo tener herramientas más efectivas para aprovechar el empleo de modelos en computador digital.

Se describen las disciplinas de Cartografía, Fotogrametría y Percepción Remota y su aplicación a los estudios geohidrológicos.

La metodología se aplica en la zona de Almoloya del río en la cuenca alta del río Lerma. Básicamente se emplea cartografía INEGI a varias escalas, fotografías aéreas, ortofotos y dos imágenes LANDSAT digitales tomadas por el sensor MSS en la zona de estudio. Estas últimas fueron procesadas en microcomputadora mediante los sistemas SPIPRII e IDRISI. La metodología abarca el empleo de todos los recursos de la percepción remota.

Mediante fotografías aéreas se ha determinado la evolución, desde los años 70 hasta 1995, de la zona lagunar comprendida en la zona y mediante clasificación supervisada de datos espectrales se han obtenido las distribuciones de tres clases principales de terrenos en lo referente a recarga.

Este análisis ha permitido constatar, una reducción progresiva no lineal debido a los fenómenos naturales y a las obras emprendidas por los diferentes organismos y el área de estudio.

Estas distribuciones están correlacionadas con datos geológicos y de taxonomía de suelos.

Se plantean propuestas para la zona de Almoloya del río y en general una metodología para aplicar en futuros estudios que requieran datos espaciales para ser integrados en sistemas de información geográfica o en modelos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Uno de los factores primordiales que sustentan el desarrollo del Estado de México es el agua subterránea. En efecto, la mayor parte de las zonas industriales de la cuenca se abastecen mediante pozos profundos, lo cual ha provocado que en algunas áreas la intensidad del bombeo ocasione efectos nocivos, como el descenso progresivo de los niveles, la infiltración de contaminantes y el agrietamiento del terreno.

En el Estado se encuentra el acuífero del Alto Lerma, que constituye una de las principales fuentes de suministro de agua potable de la Ciudad de México. Los acuíferos de esta región se encuentran en rocas basálticas y sedimentos aluviales y lacustres, de las edades del Terciario y Cuaternario.

Por ser la cuenca Alta del Lerma la fuente más próxima a la capital del país y la que ofrece mayores perspectivas de explotación inmediata, las autoridades del Departamento del Distrito Federal decidieron aprovechar sus aguas subterráneas a fin de subsanar la escasez de agua en la ciudad de México.

Al concluirse en 1970 las obras del sistema Lerma, con un total de 230 pozos en explotación conectados a 170 km. de acueducto, la deficiencia de abastecimiento de agua potable a la ciudad de México quedó remediada, en aquel tiempo, al aportar el sistema 14 m^3/s de agua potable. Sin embargo, la sobreexplotación de los acuíferos ha causado efectos negativos tales como hundimientos, agrietamientos, disminución del gasto base de las distintas corrientes, reducción de los niveles freáticos y el desequilibrio hidrológico de la cuenca.

"El futuro de la gran capital está en riesgo. Nos estamos acabando el agua a un ritmo enajenado. Cada tres horas nos bebemos el equivalente a un Estadio Azteca lleno. Diaramente el Distrito Federal consume 35,000 litros por segundo, equiparable a ingerir el contenido de ese estadio siete veces al día, pero en fugas y desperdicio se escurre por las alcantarillas..." Continúa Marín (1997): "Ingresan 20,000 litros por segundo a este valle, procedentes del río Lerma y parte del Cutzamala..."

Por estas circunstancias, surge la necesidad de estudiar el fenómeno desde un punto de vista sistemático, utilizando para ello, los avances de la computación y el desarrollo de la percepción remota.

De acuerdo con Schultz (1988) "el problema crucial en Hidrología, a diferencia de Hidráulica, es el hecho de que casi nunca se tienen los datos adecuados para describir cuantitativamente un proceso hidrológico con suficiente exactitud." Para salvar este obstáculo existen los siguientes medios: i) colectar más y más datos convencionales, ii) aplicación de métodos matemáticos complejos y finalmente, iii) el empleo de datos de Percepción Remota o Sensores Remotos. En la primera opción, como lo señala el mismo autor, se obtienen datos puntuales, cuando al hidrólogo le interesan valores referidos a un área. La segunda tiene dificultades en cuanto a los errores a que conduce y a la concepción particular de cada modelo. En cambio la tercera solución es relativamente reciente; aunque no resuelve el problema de la calidad de datos hidrológicos, muestra una perspectiva más alentadora que las opciones i) y ii). Esto es debido a que las técnicas de percepción remota ofrecen:

- mediciones espaciales en lugar de medidas puntuales;
- un solo lugar para toda la información;
- se obtiene una alta resolución tanto temporal como espacial;
- disponibilidad de datos en forma digital;
- el proceso de obtención de la información no interfiere con los procesos que se están observando;
- se puede obtener información de áreas remotas donde no se tienen estaciones disponibles.

"Los procesos hidrológicos son fenómenos que varían rápidamente en espacio y tiempo. Las mediciones de dichos procesos fueron, en el pasado, llevados a cabo principalmente por mediciones in situ puntuales. Esto requirió, segun el caso, de una retícula de mediciones muy densa o más frecuentemente, hacer uso de la suposición de uniformidad o extrapolaciones del conocimiento puntual o de la variabilidad en espacio y tiempo. La última suposición crea incertidumbres en la gestión de recursos hídricos que son menos tolerables, de acuerdo con la situación de que el valor de los recursos del agua se incrementan por su mayor uso y escasez" (Salomonson, 1983).

"La planeación hidrológica comumente está basada en datos limitados y a menudo inadecuados, especialmente en países en vías de desarrollo" (Farnsworth et al., 1984). Por ello se hace necesario el uso de nuevas técnicas de generación de información hidrológica que permitan interpretar los procesos naturales de manera más realista.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta investigación es identificar mediante fotos aéreas e imágenes de satélite, la evolución temporal y espacial de las superficies de recarga del acuífero en la zona de Almoloya del Río, y establecer una metodología que permita extraer esta información, en

base a imágenes de satélites de los que toman datos de recursos naturales, como el LANDSAT y el SPOT.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis del estado del arte de las tecnologías, mediante la bibliografía existente.
- Diagnóstico de las características de los recursos naturales de la región de estudio.
- Análisis de los diferentes programas existentes para la lectura de imágenes y selección de uno que se adecúe a la investigación.
- Elaboración y puesta en marcha del esquema de lectura de imágenes.
- Análisis del comportamiento hidrológico del proceso de recarga del acuífero.
- Análisis y crítica de los resultados.

1.4. METODOLOGÍA

En Hidrología, como lo comenta Schultz (1988), se enfrenta el problema de diseñar sistemas de manejo de agua en lugares donde no hay, o casi no existen, datos hidrológicos disponibles. El mismo autor recomienda el empleo de nuevas técnicas de adquisición de datos y apunta hacia las tecnologías de Percepción Remota.

El desarrollo de esta investigación va en el sentido de aplicar una tecnología -*know how*, conjunto de técnicas para obtener un producto- a aspectos hidrológicos con el fin de obtener mediante una adecuación, que supone la puesta a punto y pruebas, un resultado y por lo tanto, un método que podría emplearse en otras zonas o en problemas similares. Esta idea se presenta en la Figura 1.1.

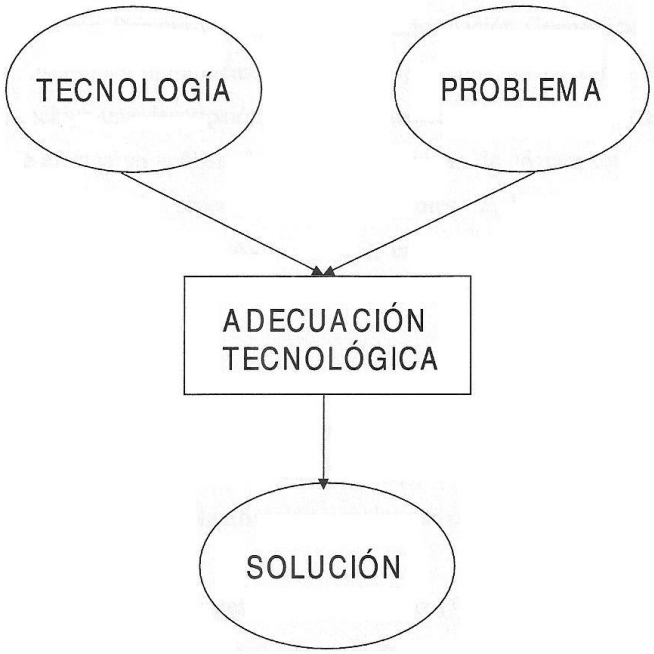


Figura 1.1. Esquema general del desarrollo de la investigación

Se pretende que la metodología descrita en este trabajo sirva para otro tipo de definición, análisis o cuantificación que se haga con fines hidrológicos o geohidrológicos en cualquier zona del país. Además de la definición y descripción del método, se pretende presentar una crítica del mismo que exponga sus limitaciones, ventajas y procedimientos generales.

La metodología debe basarse en la idea (Engman, 1982) de que "tiene más importancia estudiar, desde el punto de vista hidrológico la variabilidad en el plano horizontal". El mismo autor comenta que la percepción remota, con su facilidad para medir variables en un área, es la herramienta que da una aproximación poderosa para acercarse al problema de conocer los valores de variables sobre la superficie.

Con el fin de desarrollar esta investigación fue necesario realizar una revisión de la tecnología de Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica, así como su aplicación a las disciplinas hidráulicas. Una breve presentación de estos tópicos es el capítulo III, que incluye una descripción de su base teórica, sus principios y aplicaciones. Posteriormente, se efectúa un análisis de alcances con el fin de adaptar estos métodos, en algunos de los sistemas de procesamiento disponibles, a los estudios del Centro Interamericano de los Recursos del Agua (CIRA), en particular a los relacionados con modelos hidrológicos.

Un planteamiento importante que se hace en esta investigación es establecer que, tanto la Percepción Remota (PR) como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son *tecnologías*, como queda establecido en Parker (1988) y Díez (1993). Por lo tanto, estas tecnologías tienen por objetivo la planificación y mejor uso de los recursos.

Respecto a las características generales de los SIG, Díaz (1992) dice: "El desarrollo de la cartografía temática a nivel mundial, en el marco de los avances notables que han alcanzado las técnicas de computación y los sensores remotos, ha producido que estas tres tecnologías se acerquen cada día más para provocar su fusión en los SIG. Estos sistemas se han establecido como herramientas fundamentales en la toma de decisiones que involucran al espacio geográfico, tanto en los países de economía planificada como en los de mercado."

En García et al. (1994) se comenta: "En las principales direcciones de trabajo de la cartografía temática actual en Cuba, la teledetección ha jugado un rol significativo.... El volumen de información obtenido mediante la teledetección, dió como resultado una diversificación en la producción cartográfica. Ello hizo factible la elaboración de determinados mapas temáticos que hasta ese momento habían sido imposibles."

A lo anterior se suma que el manejo de información espacial, geográfica, mediante computadora significa rapidez, economía y mejor manejo de la información. A esto se agrega la posibilidad de realizar operaciones de análisis con los Sistemas de Información

Geográfica y la facilidad de la toma de datos a distancia y en varias frecuencias -temporales o espectrales- mediante la tecnología de Percepción Remota, poderoso apoyo para garantizar los estudios relacionados con recursos naturales. A tal punto que, en la actualidad, no se concibe la realización de inventarios o estudios mediante el empleo de los métodos tradicionales y es exigido por el Banco Mundial para justificar financiamiento a proyectos de inversión.

Debido probablemente a dificultades inherentes a terminología y especialización, se ha tenido algún atraso en aplicar las disciplinas mencionadas a la Hidrología, tanto superficial como subterránea. En ambas es interesante el empleo de las tecnologías, especialmente cuando se combina con la aplicación de métodos de modelado o simulación, que permiten efectuar diagnósticos y pronósticos de evolución a diferentes intervalos de tiempo, todo en la computadora, sin perturbar la naturaleza pero previendo su mejor conservación y aprovechamiento.

De acuerdo con Schultz et al. (1989): "Hace algunos años la comunidad profesional que aplicaba sensores remotos en las ciencias del agua era muy limitada. Recientemente muchas instituciones científicas, firmas de consultoría, autoridades de gobierno, etc, han empezado a usar estas técnicas."

En resumen, en esta investigación se han cubierto las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica. Se ha recopilado bibliografía actualizada sobre el tema de las tecnologías, la cual ha sido analizada con el fin de presentar el trabajo dentro de un marco reciente del estado del arte. El resultado de esta etapa se presenta en la bibliografía.

- Descripción de las tecnologías. Este paso se describe en los capítulos II y III.

- Análisis de aquellos programas disponibles de procesado de imágenes y de manejo y análisis de información geográfica y que además fuesen asequibles para su uso en la investigación, tanto en costo como por disponibilidad de equipo.

- Delimitación de la región en estudio y obtención de toda la información disponible, actual e histórica, tanto cartográfica como de registros hidrométricos. En la delimitación se efectuó el marcado del parteaguas superficial, de acuerdo con la topografía y el sentido de los cursos de agua. Las características geográficas así como la delimitación de la zona se presentan en el capítulo IV.

- Se ha comparado la información histórica de la zona con el fin de describir su evolución. Se han empleado los datos de los planos históricos y fotografías aéreas de diferentes fechas en la elaboración de croquis de los principales accidentes geográficos. Esta acción se ha efectuado después de un análisis de los mejores medios de presentación de acuerdo con escalas y referencias cartográficas. Los resultados de esta etapa se reseñan en los capítulos IV y V.

- Se instalaron los programas seleccionados en una microcomputadora. Posteriormente se desplegó en pantalla la información de satélite de la zona. Este paso comprendió el formatear, adaptar las imágenes y establecer el método de lectura, visualización e impresión de los datos.

- A continuación se analizaron los aspectos referentes a áreas de recarga y descarga, definiéndolas en la zona, principalmente mediante consideraciones de tipo geológico, edafológico y de uso de suelo. En esta última etapa se han realizado propiamente, el análisis de los datos y la aplicación del método para definir las mencionadas áreas. Resultados de estas acciones se presentan en el capítulo V, en el cual se presenta el análisis de los resultados, tanto de la información de tipo fotográfico como de la digital, que fue procesada mediante microcomputador.

1.5. EQUIPO Y APOYOS DISPONIBLES

Los sistemas de análisis por computadora se establecieron en un equipo 486 / 66Mhz con 16 Mb de memoria, dos unidades de discos removibles (3.5´ y 5.25´), una unidad de disco CD y un disco duro de 340 Mb. Se dispuso también de modem y acceso a INTERNET.

Este equipo ha sido suficiente, lo que es interesante desde el momento que se trata de un sistema regular o modesto, de relativamente fácil acceso. Este punto se considera importante, ya que en la realización de un proyecto deben de tomarse en cuenta factores tales como economía y disponibilidad de materiales y equipo. La consideración de los aspectos mencionados es lo que da solidez a una tecnología. Los materiales de uso corriente, permiten su fácil obtención; al igual, no siempre es factible el empleo de un equipo institucional sofisticado.

El proyecto se efectuó empleando un sistema de procesamiento del dominio público y otro académico, de bajo costo y en desarrollo continuo, así como paquetes comerciales para lograr las presentaciones.

Para procesos especiales y apoyos se dispuso, en el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), de un computador con procesador 486DX2 a 66 Mhz con memoria de 8 Mb, 2 puertos serie, 2 paralelos, monitor *SVGA*, disco duro de 255 Mb con una tableta digitalizadora de 48 por 26 pulgadas de 16 botones, de una impresora *Laser Jet VI,* lector óptico (*scanner*) de cama plana de alta resolución, así como de graficadores de planos.

Se ha contado con apoyo de información en el INEGI; el principal ha consistido en dos imágenes MSS, cuatro bandas de los años 1973 y 1980, del satélite LANDSAT que son propiedad del Instituto. Este apoyo fue facilitado por la Dirección General de Geografía del mismo.

CAPÍTULO II

CARTOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA

2.1. INTRODUCCIÓN

La Cartografía y la Fotogrametría son dos disciplinas técnicas fundamentales para describir y medir tanto recursos naturales como objetos del terreno. Su aplicabilidad a la consecución de los objetivos de este trabajo, en la definición de zonas geohidrológicas, es grande, como podrá apreciarse en las páginas sucesivas.

En este capítulo se revisan los principales conceptos de ambas disciplinas así como su enfoque a las de la hidrología. Se describen los principales productos cartográficos disponibles y a continuación los conceptos que implica la toma y uso de la fotografía aérea, la que ha sido al presente la base de la cartografía moderna, a través de la técnica de estereoscopía. A futuro es probable que la toma desde satélite (no necesariamente fotográfica), sustituya a la fotografía aérea.

2.2. CARTOGRAFÍA

2.2.1. DEFINICIÓN Y UTILIDAD

La Cartografía es la disciplina que determina la manera de representar accidentes y objetos del terreno sobre un documento. Es la herramienta que permitirá conocer los límites de los diversos accidentes del terreno en la zona de estudio en diferentes tiempos y a su vez plasmar los resultados de esta investigación.

De acuerdo con Franco (1990), "La Cartografía es la ciencia que se encarga del estudio de la representación de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella ocurren. Como tal tiene por objeto la concepción, redacción, elaboración y uso de mapas, cartas, planos, mapamundis, globos terráqueos, etc."

En Véliz et al. (1994) se presenta una definición de lo que es un mapa, debida a K.A. Salitchev que dice: "Los mapas geográficos son representaciones reducidas, generalizadas y matemáticamente determinadas de la superficie terrestre sobre un plano, en las cuales se interpreta la distribución, el estado y los vínculos de los distintos fenómenos naturales y sociales, seleccionados y caracterizados."

2.2.2. ELEMENTOS DE LA CARTOGRAFÍA

Franco (1990), enumera los elementos para la elaboración de cartografía, como:

- la ubicación geográfica, o sea el conocimiento de las distancias entre diferentes puntos del espacio.

- la proyección cartográfica, necesaria para dibujar una superficie casi esférica sobre una superficie plana.

- generalización o nivel de abstracción, imprescindible para efectuar la representación de un medio rico y complejo sobre la pequeña superficie de la carta.
- escala cartográfica, proporción entre las distancias en el terreno y su representación en el plano.

Básicamente las cartas o mapas son representaciones de la superficie terrestre elaboradas a escala definida y que se representan de acuerdo con una determinada proyección. En el caso de nuestro país las escalas oficiales son (Secretaría Programación y Presupuesto, 1980) las de:

1:1 000,000, 1: 250,000 y 1: 50,000.

En este trabajo se ha usado información en dichas escalas y se han encontrado también mapas antiguos en otras escalas, como 1:100,000.

Existe una normatividad en cuanto a los elementos de cuadrícula, canevá y la forma y densidad que debe de tener cada uno de los elementos del terreno: caminos y relación, ferrocarriles, comunicaciones y elementos relacionados, edificios y lugares poblados; áreas especiales y sus límites, obras públicas e industriales, puntos de control, elementos hidrográficos e hipsográficos y vegetación. En cuanto a la representación hay exite la norma sobre el uso de diversos colores, por ejemplo: la orografía es sepia, la hidrografía color azul y la vegetación se representa en verde. En cuanto a las obras hechas por el hombre (ciudades, carreteras) se emplea el color negro o negro con amarillo o rojo.

En publicaciones del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI 1987a), se sintetizan claramente los conceptos básicos que fundamentan el sistema de cartografía topográfica nacional.

Se expone que primeramente, es necesario contar con un sistema tridimensional de coordenadas: latitud, longitud y altitud. La primera se basa en el ecuador y la segunda en el meridiano de origen, ambos divididos en 360 grados, cada grado en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. La altitud se toma en metros desde la superficie de referencia que constituye el geoide (superficie de las alturas medias del mar).

Para trasladar los datos ubicados en la esfera, o mejor el elipsoide de revolución que define mejor la forma real de la Tierra, a un plano, se utilizan proyecciones sobre un cono o un cilindro (proyección cónica o proyección cilíndrica).

La proyección especificada para la cartografía nacional es el UTM (*Universal Transverse Mercator*) denominada también Universal Mercator por su difusión. Esta proyección es sobre un cilindro secante a la Tierra, cuyo eje forma un ángulo recto, 90° con respecto al eje del planeta; de ahí el nombre de transversa. Esta proyección es conforme, es decir conserva las formas, o sea los ángulos. El cilindro corta la superficie de la Tierra en dos círculos separados 6°, por lo que girando en intervalos de esta cantidad se llega a cubrir la totalidad. A cada faja de 6° se le denomina huso meridiano y forma una unidad cartográfica.

Las cartas nacionales estuvieron originalmente fijadas al Datum NAD27 y en la actualidad toda la cartografía nacional se está traslandando al datum ITRF92, que tiene la ventaja de haber sido obtenido mediante datos de satélite y ser totalmente referenciado al centro de la Tierra (Hernández, 1994; INEGI, 1994).

En la actualidad se elaboran cartas mediante la interpretación de fotografías aéreas en blanco y negro y color a escalas 1:25,000, 1:35,000, 1:50,000, siguiendo las etapas de (INEGI,1990e): recopilación de información bibliográfica y cartográfica, inspección preliminar del terreno, fotointerpretación, verificación de campo, reinterpretación, recolección e identificación de materiales (vegetales, minerales o de suelos), transferencia de la información al mapa base y finalmente edición e impresión de la carta.

De acuerdo con William Schneider (Holtz, 1973), la fotografía aérea pancromática ha sido usada durante muchos años en los Estados Unidos para mediciones, mediante fotogrametría y fotointerpretación, de características geohidrológicas tales como patrones de arroyos, áreas de drenaje, además de otros fenómenos físicos. En los últimos años, sin embargo, el uso de fotografía a color permite obtener datos de sedimentos y vegetación debajo del agua, de manera que se ha empleado en estudios de estuarios y determinación de manchas o plumas de contaminación.

La cartografía que despliega fenómenos específicos del terreno, recursos naturales, se denomina temática. A continuación se detallan las características de algunas de las cartas de mayor uso.

2.2.3. USO DEL SUELO

El hombre ejerce una influencia directa sobre los recursos naturales de una región desde el momento que se establece en ella. Conocer cómo se utiliza el terreno y qué recursos contiene es de gran importancia para las labores de desarrollo y aprovechamiento de los mencionados recursos.

De acuerdo con INEGI (1990e), los objetivos de una carta de uso del suelo son dar a conocer la localización de las áreas agrícolas, los tipos de cultivos que se siembran, la vegetación actual, la distribución de las áreas dedicadas a la ganadería y las que tengan un interés forestal.

2.2.4. SUELOS

De acuerdo con INEGI (1990b), para elaborar la carta edafológica se efectúan los procedimientos de: inspección preliminar, en la que se toma conocimiento de la zona con el fin de establecer los criterios para hacer las separaciones en las fotografías aéreas y determinar la manera más adecuada para la verificación de campo en detalle. En la

verificación de campo se localizan puntos en las fotografías y se obtienen en ellos muestras de cada uno de los horizontes del suelo en los puntos representativos. Posteriormente se realiza en laboratorio el análisis de muestras, se reinterpreta y estos procesos proporcionan el resultado final.

El sistema de clasificación que se emplea en esta carta es el de FAO-UNESCO (1970) que consta de 25 unidades y 98 subunidades a la escala 1:50,000; incluye también información de fases físicas, químicas y texturales. "Los nombres que se dan están tomados de las descripciones que en diferentes países se hacen de suelos típicos; por lo tanto estos nombres provienen de muy diversas raíces: griegas, latinas, rusas y japonesas, entre otras" (INEGI, 1990b).

2.2.5. USO POTENCIAL DEL SUELO

La metodología que estableció los criterios para la clasificación de la capacidad agrológica de la tierra fue diseñado al iniciarse los trabajos de la Dirección General de Geografía en 1968 y se aplicaron sin modificación hasta-1974, en que se introdujeron algunos cambios. En 1979 se estableció un nuevo sistema para la cartografía escala 1:250,000, 1:500,000 y 1:1 000,000.

La carta de uso potencial tiene por objetivos: delimitar las unidades de terreno con condiciones ambientales homogéneas; señalar las características y potencial agrológicos y por lo tanto sus alternativas de uso. Además presenta su distribución geográfica, señala las áreas que requieren control de erosión y en ella se proponen obras que promuevan el desarrollo económico.

Se consideran ocho clases, que van desde la I, con suelos muy buenos sin limitaciones para todos los usos, inclusive agricultura muy intensa, hasta la clase VIII. En esta última los suelos son considerados como no adecuados para usos agropecuarios y forestales y permiten únicamente vida silvestre.

2.2.6. GEOLOGÍA

La carta geológica forma parte del subsistema de recursos naturales (INEGI,1990c), dando información sobre la localización de recursos geológicos que afloran o se manifiestan en la superficie del terreno, las concentraciones minerales y sus relaciones. Todo a escalas 1:50,000, 1:250,000 y 1:1000,000. Las dos primeras cartas se consultaron en este estudio.

En la carta escala 1:50,000 se señalan -de interés geohidrológico- los pozos, norias y manantiales. En la escala 1:250,000, además de mostrar los tipos de roca que afloran se presentan las edades de las formaciones de rocas. En ambas cartas se muestran las minas y bancos de material.

Entre algunas de las utilidades de esta carta, mencionadas en la referencia indicada anteriormente, se encuentra la exploración de aguas subterráneas, la construcción de presas y control de ríos y la investigación científica. La primera se logra primordialmente mediante el análisis de las estructuras y tipos de roca, lo que conduce a establecer la capacidad acuífera de cada tipo de material. La segunda aplicación es por la necesidad del conocimiento del sustrato rocoso y la ubicación de fallas. En la última se puede resaltar la reconstrucción de los eventos que ocurrieron en el pasado geológico.

En Estes y Senger (1974) se menciona, haciendo referencia al trabajo de Antony J. Lewis, que es particularmente útil para estudios de tipo geológico, a diferencia de las necesidades para otros estudios, que el ángulo de elevación solar sea bajo; considera que el empleo de ángulos bajos resalta los detalles topográficos.

2.2.7. CLIMATOLOGÍA

En INEGI (1990a) se define al clima como "el sumario estadístico, o promedio de los elementos meteorológicos individuales a través de un número dado de años". El período mínimo es de 10 años y casi siempre se toma un período mayor.

La carta presenta información sobre la temperatura media anual (promedio de la máxima y la mínima durante el año) medida en estaciones meteorológicas, al igual que la precipitación total anual.

Se dispone de la carta de climas en dos escalas: 1:1000,000 y 1:500,000. Ambos proporcionan además del trazo de isotermas e isoyetas medias anuales, la clasificación de climas según el sistema de Köeppen modificado por Enriqueta García Amaro, en el año de 1964 (INEGI, 1990a), donde se definen 97 tipos y subtipos de clima. Los climas se clasifican por su grado de humedad (húmedos, subhúmedos, semisecos o semiáridos, secos o áridos), incluyendo un factor de régimen de lluvias y por su temperatura (cálidos y muy cálidos, semicálidos, templados, semifríos, fríos y finalmente muy fríos.

Entre las aplicaciones que se menciona se encuentran la frecuencia de precipitación y por lo tanto las necesidades de irrigación.

2.2.8. HIDROLOGÍA

Las cartas hidrológicas, igual a escala 1:1000,000, 1:250,000 exhiben la división de las 37 regiones hidrológicas en que está dividido el país, basándose en orografía e hidrografía. Además se presenta la división por cuencas y subcuencas hidrológicas y las líneas isotermas e isoyetas. Otro dato que incluyen es la ubicación de las estaciones hidrométricas y climatológicas.

En INEGI (1990d) se menciona, entre muchos usos, la utilidad de las cartas hidrológicas en la planeación y estimación del lugar donde deben situarse presas y conocer las áreas susceptibles de inundación.

Cartografía realizada mediante fotografías aéreas ha sido empleada en una gran variedad de proyectos de ingeniería hidrológica e hidráulica, como se señala en Estes et al. (1974); el autor comenta su aplicación al desarrollo de sistemas de distribución de agua, donde la tecnología puede suministrar la mayor parte de datos necesarios.

2.3. FOTOGRAMETRÍA

La Fotogrametría es definida "como la ciencia o arte de obtener medidas confiables por medio de la fotografía" (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1966). Es una disciplina estrechamente ligada a la Fotointerpretación, a la Fotografía Aérea y a la Geodesia.

Es parte fundamental para el planteamiento de modelos hidrológicos y geohidrológicos el tener la capacidad de disponer de mediciones precisas de las áreas que son parte o están afectadas de determinado fenómeno. Estas mediciones son posibles de realizar mediante aplicación directa en el terreno empleando instrumentos topográficos o mediante un método indirecto, utilizando fotografía aérea y técnicas para aprovechar sus datos mediante correcciones.

Una ventaja que presenta la fotografía aérea en aplicaciones hidrológicas, de acuerdo con Schultz (1988) es poder adaptar su uso a un problema determinado.

"Levantamientos fotogramétricos son hechos casi siempre para la instalación de ductos a gran distancia, al igual que para líneas de transmisión de alto voltaje" (Estes y Senger, 1974). En México ha sido amplio su empleo en el diseño de los distritos de riego y posteriormente en su operación.

En el caso de cubrimientos o coberturas que abarcan grandes extensiones del terreno, se hace necesario tomar en cuenta la curvatura de la Tierra y las técnicas para representar dicha superficie sobre un plano mediante las proyecciones adecuadas.

Estos aspectos hacen necesario el planteamiento de los temas que se exponen a continuación y la consideración de sus productos.

2.3.1. CONDICIONES Y LIMITACIONES

Dada la relación con la fotografía aérea es necesario, para obtener medidas precisas y mapas exactos, considerar:

- Las condiciones óptimas para obtener los negativos ideales.

- La transferencia precisa de la información de las fotos al mapa.

- El hecho de que la superficie de la Tierra no es plana.

Las dificultades para obtener la información aérea adecuada o ideal pueden consultarse en varias obras, por ejemplo, en una de las referencias más calificadas, la de la Asociación Americana de Fotogrametría y Percepción Remota (American Society Photogrammetry and Remote Sensing, 1966) se mencionan las siguientes:

- Cada exposición debe ser realizada en la posición y altura que se determinó con antelación, en el cálculo de los parámetros del vuelo.

- El eje óptico de las lentes de la cámara debe estar exactamente vertical en el momento de la toma, o en su defecto el ángulo de desviación debe conocerse exactamente.

- La cámara debe estar orientada en azimut (hacia la vertical) en el momento de la toma, tal como fue planeado.

- No debe existir movimiento del avión con relación al terreno en el momento de la exposición.

- La cámara debe permanecer estable, estar ajustada y sus características métricas deben ser conocidas.

- La superficie que soporta la emulsión fotográfica debe ser perfectamente plana y estar orientada con referencia a los lentes en el momento de la exposición.

- La emulsión de la película debe tener una distribución uniforme y dar una máxima resolución. Igualmente, la película debe ser totalmente estable en sus dimensiones.

- Las condiciones atmosféricas durante la toma, transparencia del aire, ausencia de nubosidad, deben ser perfectas.

La imposibilidad de cumplir con todas las condiciones en el momento de realizar un trabajo son obvias: existen deformaciones, distorsiones y cambios de escala dentro de una misma fotografía y dentro de las fotografías de un mismo vuelo, por lo que es necesario aplicar métodos de corrección. Estos métodos pueden consistir en eliminar alguna de las aberraciones que tenga el sistema de lentes de la cámara o simular la posición del avión en el momento de la toma.

2.3.2. CORRECCIONES

A la tarea de eliminar la deformación que produce la proyección cónica, en la que funcionan los sistemas de lentes ópticos, se la denomina *restitución* y los productos obtenidos *restituídos.* La restitución se logra mediante sistemas que funcionan en aparatos óptico-mecánicos (analógicos), existen también métodos semianalíticos y además, más recientemente, se emplean sistemas totalmente computarizados, a los que se les denomina analíticos (Hernández y de Loera, 1996).

La principal operación de corrección de las deformaciones propias de la foto aérea debidas a los movimientos del avión, se realiza en un proceso denominado *rectificación* que se

efectúa por diversos métodos (American Society of Photogrammetry, 1966). En esta operación se eliminan, o por lo menos se minimizan, los efectos de inclinación, relieve y se ajustan los detalles del terreno a una base de control horizontal.

En el manejo de las fotos aéreas es fundamental el empleo de la estereoscopía, auxiliar de las tareas de Fotogrametría y la Fotointerpretación. La estereoscopía consiste (American Society of Photogrammetry, 1966) en el arte de crear efectos tridimensionales.

El ojo humano puede ser comparado a una cámara fotográfica que capta colores y formas obteniendo una perspectiva de los objetos. La posibilidad de estimar la distancia y profundidad de percepción se debe a la visión binocular.

Empleando la fotografía aérea se aprovecha la toma sucesiva de fotos por el avión a lo largo de una línea (lo que supone la aparición de un objeto en fotos diferentes, bajo distinto ángulo o perspectiva) para crear estereoscopía. Ésta se logra mediante la observación de cada foto (en pares) mediante ojos distintos. El aparato que facilita esta observación se denominada estereoscopio (Figura 2.1). Un estereoscopio puede ser tan sencillo como dos lentes que separen la visión de cada ojo (para que se aplique cada uno a una foto diferente), hasta aparatos complejos que incluyen espejos y prismas para desplazarse sobre el terreno en la foto.

De acuerdo con Guerra (1980) : "Con la visión estereoscópica, consecuencia de tener los dos ojos en el mismo plano, el hombre se ha adueñado, por decirlo así de la naturaleza, y dominado a todos los demás seres vivientes. Gracias a esta facultad, el hombre, no solamente puede percibir el volumen de las cosas, sino además, -lo que no es menos importante- medir distancias, pues su aparato visual no es otra cosa que un magnífico telémetro".

Se menciona la técnica en este espacio dada su trascendencia en algunos temas de las disciplinas de Fotointerpretación y definitivamente en el de la Fotogrametría.

2.3.3. PLANOS RESTITUÍDOS

En INEGI (1987b), se detalla que para la realización de las cartas básicas se utilizan modelos ópticos tridimensionales del terreno, formados a partir de fotografías aéreas puestas en relación geométrica (escala) y geográfica (posición y nivelación) con la superficie terrestre, con base cuando menos en 6 puntos de coordenadas conocidas por cada modelo. Estos 6 puntos se basan en levantamientos directos del terreno.

Tanto las cartas topográficas como las temáticas, que se basan en la anterior, han sido objeto del proceso de restitución y representan fielmente el terreno sobre un plano horizontal.

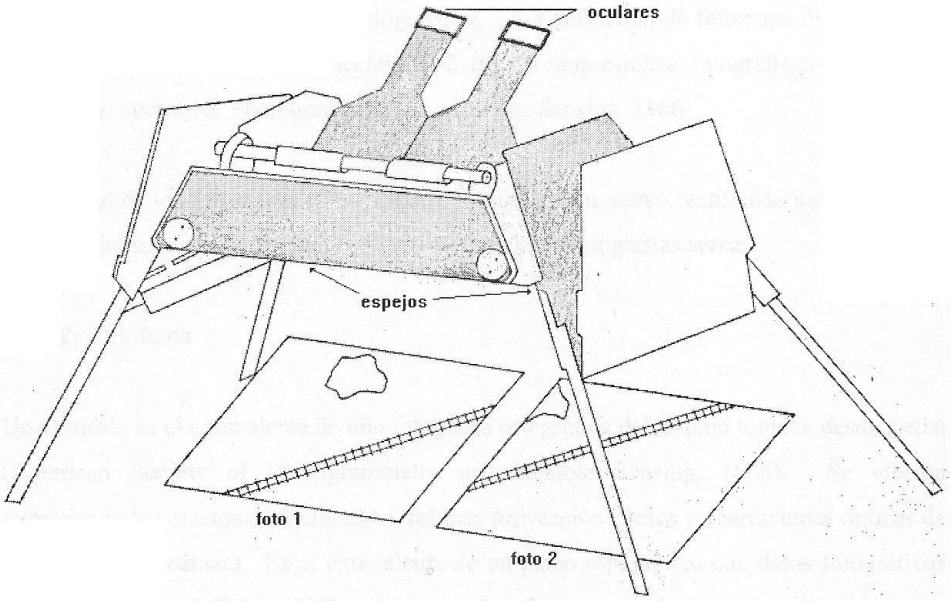


Figura. 2.1. Estereoscopio y la visión de un mismo objeto en dos fotos sucesivas.

2.3.3.1. Mosaicos y Fotomapas

El Mosaico es uno de los productos finales resultado de una misión de fotografía aérea. Éste fue originado por la necesidad de presentar una visión, en cuadro completo, de la superficie de la Tierra. El cuadro obtenido por el mosaico es el mismo que se obtendría directamente desde una cámara montada en satélite: un cuadro completo de una gran superficie.

El mosaico puede ser controlado, cuando su escala es común y por lo tanto los objetos del terreno guardan su posición y se le denomina ortofomosaico, cuando las distorsiones de inclinación y relieve han sido removidas, por lo que es tan bueno como un mapa planimétrico (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1966).

Finalmente, se dispone de un producto aun más completo en el fotomapa: un mosaico al que se le han superpuesto datos cartográficos. Otra definición de fotomapa dice que es la reproducción de un mosaico hecho de 2 o más impresiones fotográficas rectificadas (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1966).

La utilidad de los fotomapas es importante ya que dan un marco rectificado para el vaciado de datos del terreno o procedentes de interpretación de fotografías aéreas.

2.3.3.2. Ortofotos

Un Ortofoto es el equivalente de una fotografía ortográfica del terreno tomada desde arriba (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1966). Se efectúa removiendo los efectos de inclinación, relieve, proyección cónica y aberraciones ópticas de las lentes de la cámara. Es el equivalente de un plano topográfico con datos fotográficos del terreno. En INEGI (1987b) se dice: "Ortofoto: es un documento fotográfico que mantiene las características fundamentales de un plano (homogeneidad de la escala en toda

su dimensión) y además conserva los rasgos cualitativos y cuantitativos de los fotogramas a partir de los que se ha obtenido".

Su empleo en hidrología se encuentra en la facilidad y precisión con que se puede vaciar en ellos la información obtenida de diferentes estudios, debido a que en los ortofotos no existen deformaciones.

2.4. CARACTERISTICAS DE LAS APLICACIONES

En general, y resumiendo: el problema que se tiene al disponer de datos de recursos naturales es la de ubicarlos respecto a un punto localizado en un plano referenciado.

Es importante considerar, además, como señala Salama et al. (1994), que es necesario comprender que cada tipo de datos es complementario de los demás.

Las aplicaciones de estas disciplinas en hidrología superficial, dado el carácter externo de los fenómenos y de los parámetros que los cuantifican, son evidentes y se describen en diferentes capítulos de esta investigación. En cuanto a las aplicaciones en Hidrología subterránea, es imprescindible aprovechar las relaciones de las aguas subterráneas con las de superficie, de acuerdo con el concepto del ciclo hidrológico. De esta manera, se deberá realizar un proceso de inferencia para, a partir de los indicios superficiales, interpretar - crear un modelo conceptual sobre- lo que puede estar ocurriendo debajo de la superficie del terreno.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y DE PERCEPCIÓN REMOTA

3.1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta metodológica de procesamiento de todo tipo de información referida al terreno. Mediante los SIG es posible encontrar nuevas relaciones y aplicar funciones a los datos, que evidencien otras cualidades. La Percepción Remota es la tecnología que engloba los métodos más eficaces de obtener información del terreno y por lo tanto, de los fenómenos hidrológicos.

3.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Por Sistemas de Información Geográfica se entiende (Díaz, 1992) un sistema que realiza la presentación, manejo y explotación de información geográfica digital. Su objetivo es el análisis de la distribución y organización de objetos geográficos puntuales o lineales.

En el estudio de Díaz (1992), se presenta la definición de Rhind (1989) quien propone que un Sistema de Información Geográfica "es un sistema de *hardware, software* y procedimientos, diseñados para soportar la captura, el manejo, la manipulación, el análisis, el modelado y el despliegue de datos espacialmente referenciados (georeferenciados), para la solución de los problemas complejos del manejo y planeamiento territorial".

Es ilustrativa la definición de Clarke (1986), que señala que el SIG es un sistema de computadora para la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y despliegue de datos espaciales.

De acuerdo con SCOT (1995), los SIG pueden caracterizarse por cinco componentes: datos georeferenciables a la entrada del sistema, información geográfica digital a la salida, equipo informático, programas de análisis espacial y una estructura de recepción.

Es importante separar esta tecnología de lo que son los sistemas de dibujo asistido por computadora (*Computer Assisted Drawing: CAD*). Los paquetes de CAD realizan, facilitando grandemente, únicamente las tareas de dibujo.

Sobre todas las posibles vertientes que pueden presentar las definiciones de SIG, Cowen (1988) describe cuatro aproximaciones:

- PROCESO: que se basa en la idea de que un sistema de información consiste en una integración de subsistemas que ayudan a convertir datos geográficos en información útil; el sistema debe incluir procedimientos para la entrada, almacenamiento, recuperación, análisis y salida de información geográfica.

- APLICACIÓN: en esta aproximación se cataloga el SIG de acuerdo a la información que se procesa.

- PAQUETE DE HERRAMIENTAS: el sistema debe contener un complejo conjunto de procedimientos y algoritmos para manejar datos espaciales.

- BASE DE DATOS: que hace énfasis en el modelo respectivo, de manera que el sistema de manejo sea óptimo para la recuperación, análisis y despliegue de la información.

El mismo autor insiste en que, de todas las herramientas que se incluyen en los SIG, la búsqueda espacial y la superposición de información son las funciones más específicas.

Díaz (1992) comenta que un SIG está compuesto por cuatro módulos fundamentales:

- Análisis estadístico
- Clasificación y evaluación
- Análisis espacial
- Modelos Tridimensionales

3.2.1. EXPERIENCIAS SOBRE LAS APLICACIONES DE SIGS

Las funciones que facilita un SIG, de acuerdo con Ross y Tara (1990) son la superposición de mapas y el análisis espacial necesario para generar datos de entrada para los modelos hidrológicos. En segundo lugar, proporciona el mecanismo para relacionar modelos con diferentes representaciones espaciales. Los SIG convierten formas de diferentes proyecciones y escalas a uno estándar (georeferenciación) y finalmente dan una salida espacial para evaluar los resultados obtenidos después de correr el modelo.

Sobre el establecimiento de un SIG para manejo de recursos hidráulicos Leipnik et al. (1993) pasan una revista a todos los sistemas disponibles. Los mismos autores comentan sobre la necesidad de examinar periódicamente los requerimientos para determinar si el sistema en uso es aún útil. En este trabajo se menciona el sistema IDRISI, que se describe brevemente al final de este capítulo y que se emplea en los que siguen.

De Vantier y Feldman (1993) comentan que el uso de computadoras en el análisis hidrológico es tan común que se ha hecho la fuente principal de datos para la toma de decisiones en el campo. En el citado artículo, se plantea justamente la conexión que pueden tener las tecnologías de SIG con la modelación en hidrología. Cuando se aplica a sistemas hidrológicos, información de tipo no topográfica, puede ser incluída, como es la descripción de suelos, uso de suelos, cubierta del terreno, condiciones o características del agua subterránea tales como su temperatura o calidad, así como sistemas hechos por el hombre, en la superficie y en el subsuelo. Señala que el advenimiento de los sistemas digitales de mapas y SIG proporciona una alternativa sobre, la que considera una herramienta ya histórica, los mapas en papel. Finalmente, se comenta en este trabajo la falta de un consenso sobre los sistemas SIG y modelos geohidrológicos a aplicar, así como los probables costos.

En Moussa (1993) se trata sobre las entradas de datos (características hidrométricas) en los modelos espaciales. El autor se refiere a que la modelación espacial, es decir en superficie, que puede ser empleada como herramienta de simulación, permite determinar las condiciones óptimas de manejo del recurso agua y prevenir tanto los impactos provocados por los fenómenos naturales como por el hombre. Además, este tipo de planteamientos, al fundamentarse en principios físicos del medio, dan la posibilidad de transportar la experiencia de una cuenca a otra. En este mismo trabajo se describe el desarrollo de un modelo hidrológico que funciona con datos en el espacio (ModSpa) mediante el planteamiento de conceptos físicos simples, pero permite integrar el máximo de datos cartográficos en microprocesador. Para la operación del modelo fue necesario elaborar un sistema de información geográfica (TraPhyC-BV) orientado a satisfacer las exigencias de las aplicaciones hidrológicas.

Otro planteamiento interesante es el modelo de lluvia/escurrimiento SHE (Sistema Hidrológico Europeo), donde se considera un Sistema de Información Geográfica para el manejo de los datos. Este proyecto es descrito por Abbott et al. (1986) y Bathurst (1986). Abbott et al. (1986) comentan que los estudios sobre recursos hidráulicos son actualmente más influenciados por los efectos de cambios en uso de suelo provocados por prácticas

agrícolas y forestales, accidentes de contaminación o disposición de desechos tóxicos y los problemas generales que surgen de los usos del agua. Los modelos convencionales de lluvia/escurrimiento no tratan esos problemas y se requiere un nuevo tipo de modelos, basados en principios físicos que abarquen toda la cuenca hidrológica. Tal es el planteamiento implícito en el modelo SHE. Bathurst (1986) presenta además algunas aplicaciones del modelo SHE introduciendo datos espaciales.

Por último, en el trabajo de Meijerink et al. (1994), puede obtenerse una revisión general de las tecnologías disponibles para el manejo de datos espaciales, sus aspectos generales y finalmente, los diferentes métodos de aplicación en hidrología.

Además, existe una estrecha relación entre el planteamiento y uso de los SIG y la aplicación de la tecnología de Percepción Remota. Ésta suministra los datos de sustento espacial y de actualización temporal al mismo SIG.

3.3. PERCEPCIÓN REMOTA

Percepción remota es la disciplina que permite obtener información de los objetos a distancia. "Percepción remota es la adquisición de información sobre un objeto sin tener contacto físico con él", define el *Manual of Remote Sensing* (American Society of Photogrammetry, 1983). Se denomina también a esta técnica "teledetección" o "sensores remotos" y agrupa todos los métodos de estudio y técnicas que emplean información captada a distancia, principalmente mediante instrumentos montados en aviones y satélites. Usualmente, se considera como parte integrante de la técnica de percepción remota el procesamiento y análisis de los datos recibidos (Díez, 1993).

El medio o herramienta de trabajo de la percepción remota, no es solamente la fotografía, es algo mucho más amplio, denominado *imagen*. Una imagen es una representación a escala del objeto captada mediante cualquiera de los sensores (escandidores, radares, radiómetros). Es un cuadro bidimensional que contiene valores (matriz).

Las imágenes presentan en sus valores intervalos definidos -porciones continuas del espectro electromagnético- que abarcan el infinito de valores de radiación electromagnética. Esta radiación es medible, comunmente en su frecuencia o longitud de onda. Ambos parámetros de la radiación pueden usarse indistintamente. En esta investigación siempre nos referiremos a la longitud de onda, λ, que tiene dimensiones de distancia. A estos intervalos longitudinales, decididos a voluntad, de acuerdo al instrumento y objeto de estudio, se les denomina bandas.

El espectro electromagnético abarca desde ondas de partículas, de muy pequeña longitud de onda (menos de 0.01×10^{-10} m), hasta las ondas de radiodifusión, de miles de kilómetros, pasando por los intervalos de la radiación óptica (0.4 - 0.7 mμ), el infrarrojo – IR - (0.7 mμ y menos de 1 mm) y las microondas (1 mm - 1 m), que son las de mayor uso en la disciplina.

Una imagen está compuesta de líneas y de elementos; los elementos ("pixeles") son las intersecciones sobre la superficie del terreno del ángulo mínimo de toma de datos del instrumento. El tamaño del elemento es básico, corresponde a la porción del terreno sobre la que se capta información. Suele referirse a dicho tamaño como *resolución* de la imagen.

Además, como se comentó antes, a cada elemento corresponden valores numéricos de la radiación (energía) captada, sobre los que se efectúan los diferentes procesos. Al referirse a una imagen, que usualmente consta de varias bandas tomadas simultáneamente, es necesario dar los valores que definen sus bandas. Puede definirse una banda de una imagen como la matriz de valores correspondiente a un intervalo del espectro. Esta matriz puede manejarse como un archivo o como un cuadro de colores o niveles de gris que están asociados a un valor numérico (digital o analógico) de energía electromagnética.

Un aspecto importante a considerar son las plataformas, o vehículos en los que se instalan los instrumentos de percepción remota. Su disponibilidad es muy variada y amplia. Se entiende que todas las opciones de vehículos y sensores son complementarias en muchas aplicaciones, porque todos presentan alguna ventaja y desventaja respecto a los otros.

Además, cada aplicación de percepción remota plantea problemas e interrogantes diferentes, que requieren también soluciones y respuestas distintas, por lo que no es posible para su aplicación el dictado de recetas. Para cada estudio en particular es necesario definir una serie de métodos, procedimientos y medios (tecnología) para la toma de los datos, su análisis y presentación.

3.3.1. VENTAJAS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota es una disciplina muy general, que ha tenido un gran impulso con el desarrollo de las técnicas espaciales y cuyo ámbito de aplicación no ha estado limitado a los recursos de la Tierra, sino que ha sido utilizada en el estudio de otros cuerpos del sistema solar; en los últimos años la mayor parte del conocimiento que se ha obtenido de los planetas y sus satélites es debido a la aplicación de estas metodologías.

La técnica ha tenido también una gran relevancia en la búsqueda de soluciones a los problemas que presentan la detección, explotación y conservación de los recursos naturales de nuestro planeta.

Su aplicación ha sido efectiva en todos los países y regiones de la Tierra, pero es importante resaltar que su empleo tiene un interés y beneficio aún mayor en los países en vías de desarrollo, especialmente aquéllos como México, donde coinciden grandes extensiones de territorio inexplorado, carencia de recursos económicos y sobre todo, la necesidad de disponer de una cartografía adecuada de los recursos naturales para su mejor planificación y aprovechamiento.

La percepción remota se emplea en un estudio, dado que tiene las siguientes ventajas:

- No requiere la presencia física de los investigadores en la zona, lo que significa mayor comodidad y la posibilidad de no perturbar el objeto de estudio.

- Facilita o permite una mayor eficiencia en el uso de los recursos económicos, debido a su menor costo, ya que emplea menos cantidad de personal e instrumentos de apoyo.

- Consume menos tiempo de realización en los estudios.

Otras ventajas que pueden mencionarse son las de su forma de presentación, que usualmente es una carta o plano; la de permitir la observación periódica de los fenómenos, registrando su evolución y finalmente, producir un documento o material concreto, una base objetiva, con posibilidad de poder ser usada como prueba jurídica en controversias; por ejemplo: imágenes y fotografías son empleadas en la actualidad en muchos países para resolver peritajes de tránsito. Asimismo, la prohibición y penalización del lavado de las bodegas de los supertanques en el océano, ha obligado a los países al uso de la información de percepción remota tomada por aviones de vigilancia costera con el fin de aplicar las multas respectivas a las compañías navieras.

La percepción remota es de utilidad cuando se tiene la necesidad de estudiar un recurso natural (valor económico) que sufre variaciones: aumentos, disminuciones o cambios de calidad. Esta utilidad es mayor si se requiere de un inventario que suministre datos sobre la cantidad, condición del recurso y su distribución sobre el territorio.

Es interesante tener en cuenta que la tecnología incluye, no solamente el empleo de información procedente de toda la variedad de plataformas sino que también es igualmente válida la presentación digital de otro material, como el fotográfico. De la misma manera, puede variar el tipo de vehículo en el que se haga la toma o emplearse en su manejo aparatos tan diferentes como un estereoscopio en un par de fotos aéreas o una computadora para una imagen digital.

Debe entenderse que la tecnología abarca una amplia gama de materiales, técnicas e instrumentos que deben ser empleados de una manera complementaria. Se escogerá, el uso de uno u otro, de acuerdo a disponibilidades o necesidades de la aplicación.

3.3.2. PLATAFORMAS E INSTRUMENTOS

El espectro de los vehículos en los que se instalan los instrumentos de percepción remota es amplio, abarcando desde canastillas de camiones con brazo telescópico, globos, hasta una variedad de aviones, helicópteros y satélites.

El empleo de uno u otro vehículo depende del detalle que requiera el estudio y de la disciplina, la disponibilidad de presupuesto, la escala de estudio y muchos otros aspectos que deben ser analizados en cada caso. Los globos son excepcionalmente económicos, los aviones son útiles para coberturas regionales y tienen la ventaja de que su empleo es muy flexible. La información tomada desde satélite es en general, más económica que la captada por otros medios.

Los globos fabricados actualmente pueden alcanzar alturas hasta de 49 km. Se emplean también los dirigibles, vehículos similares a los globos pero provistos de medios de propulsión. Por su estabilidad y economía son una plataforma muy adecuada para la toma de información a distancia.

Los helicópteros por su posibilidad de vuelo lento y bajo han tenido mucho uso en percepción remota. Dada su estabilidad, los instrumentos pueden ser colocados en la base de la nave, en la puerta e incluso en la parte posterior. La principal limitante es su alcance, que es solamente de unos cuantos cientos de kilómetros.

Prácticamente, es posible usar todo tipo de avión para tareas de percepción remota. A fin de seleccionar el adecuado para una misión o trabajo, deben tomarse en cuenta, además de las consideraciones de tipo económico, tales como costo, mantenimiento, requerimientos de tripulación, consumo, velocidad de traslado y tiempo de ascenso, los factores de tipo técnico, como estabilidad y ausencia de vibraciones, para poder garantizar la calidad de las tomas. Otra consideración es la velocidad mínima (de desplome) para que sea compatible con el tiempo del obturador de las cámaras disponibles y la altura que alcanza la nave, para los efectos de escala.

Los cohetes son sistemas de masa variable que pueden ser usados como vehículo de toma de información directa o como medios para colocar plataformas en el espacio. Actualmente destacan como vehículos propulsores los cohetes Arianne.

Los satélites dedicados a la toma de información sobre recursos naturales de la Tierra son unos cuantos, pero han tenido una gran trascendencia en el conocimiento de los mismos. A continuación se describen algunos de ellos.

El LANDSAT fue el primer satélite de recursos naturales, lanzado el 23 de julio de 1972, con el nombre ERTS (*Earth Resources Technological Satellite*). La serie LANDSAT tiene ya seis satélites lanzados, actualmente están en operación únicamente los dos últimos.

El tamaño de los primeros era de 3 m de alto; el anillo portador de los sensores tenía un tamaño de 1.5 m por 0.3 m; la envergadura de los tableros solares era de 4 m y su peso 953 kg. La órbita era casi circular heliosíncrona, con tiempo de descenso 9:42, hora local y con una altitud de órbita 920 km. Estos portaban tres cámaras de televisión tipo vidicon (RBV:*Return Beam Vidicon*) y un barredor multiespectral de cuatro bandas (MSS: *Multispectral Scanner System*).

El aparato RVB fue desconectado en los primeros satélites por problemas de potencia, éste consiste en tres cámaras de televisión con tres bandas cuya anchura se muestra en el Cuadro 3.1. Su finalidad ha sido la de recomponer imágenes de la Tierra en color.

Cuadro 3.1. Bandas del RVB del satélite Landsat

BANDA	ANCHURA (en micras: μm)
1	0.475-0.575
2	0.580-0.680
3	0.690-0.830

El MSS ha sido el sensor más utilizado en estudios, tiene también un ancho de cubrimiento sobre el terreno de 185 por 185 km y un ángulo mínimo de 0.086 mrad. Consta de cuatro bandas, o intervalos de toma de información del espectro electromagnético. Estas bandas ocasionalmente se designan como: 4, 5, 6 y 7, dada la costumbre inicial de designar como 1, 2, 3 a las del RBV. Las bandas, definidas por sus anchuras y el aprovechamiento de las mismas se muestra en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Bandas del MSS del Landsat

BANDA	ANCHURA (μm)	UTILIDAD
4	0.5-0.6	Detección de estructuras artificiales, turbi-dez en aguas, clasificación de vegetación.
5	0.6-0.7	Tipos de vegetación.
6	0.7-0.8	Detección de agua; bosques.
7	0.8-1.1	Detección de agua, suelos mojados, mangle y plagas en vegetación.

El satélite LANDSAT 2 fue puesto en órbita en enero de 1975, desfasándolo 9 días respecto al primero, que pasaba por cada lugar de la Tierra cada 18 días. El LANDSAT 3 fue lanzado en marzo de 1978.

A partir del segundo satélite LANDSAT, se incluyó una quinta banda en el infrarrojo (IR) térmico, entre 10.4-12.6 micras (μm).

El elemento del sensor MSS tiene una superficie de 76 por 76 metros. La resolución espacial de las RBV es de 45 m. El satélite estaba provisto de un sistema de control de posición que mantenía una alineación con las direcciones de la vertical local y su velocidad; la precisión obtenida de los ejes es de 0.4° con la vertical y 0.6° con la velocidad. Las

correcciones geométricas de las imágenes se realizan mediante un sensor específico (*Attitude Measurement Sensor*) que determina las posiciones precisas de balanceo y cabeceo de la nave (dentro de 0.07 de grado).

Los satélites LANDSAT 4 y 5 (lanzados respectivamente en julio del 82 y en marzo del 84) pertenecen a una generación de satélites más avanzada. Situados a una altura de 705.3 km, disponen de mayor número de bandas con una tecnología diferente, la de barredor mediante arreglo de detectores electrónicos (cámara electrónica). Estos satélites contienen un nuevo sensor, mapeador temático, con 256 niveles de radiancia y 30 m de tamaño de elemento. Las bandas del TM (*Thematic Mapper*) se describen en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Bandas del TM del satélite Landsat

BANDA	ANCHURA(μm)	UTILIDAD (VEGETACIÓN)
1	0.45-0.52	Concentración de clorofila y carotinoides.
2	0.52-0.60	Clorofila y la reflectancia del verde.
3	0.63-0.69	Concentración de clorofila.
4	0.76-0.90	Biomasa (densidad de vegetación).
5	1.55-1.70	Masa de agua en las hojas.
6	2.08-2.35	Agua en las hojas.
7	10.40-12.5	Temperatura de la superficie.

A partir del 27 de septiembre de 1985, se inició un proceso de privatización de los satélites de Estados Unidos, de manera que actualmente la venta de la información LANDSAT la efectúa la empresa EOSAT (HUGHES-RCA). Los nuevos satélites LANSAT (el 6 no entró en órbita en 1985 y el 7 tiene fecha de lanzamiento para julio de 1998) consisten en una nueva generación (*OMNIstar-Platform*), y uno de los sensores proyectados es el ETM (*Enhanced Tematic Mapper*) que se espera tenga un elemento de 15 m de lado. De acuerdo

con información de EOSAT, los objetivos futuros serán la toma de información de amplio espectro y de color sobre los oceános.

En EOSAT se considera que lo más promisorio en percepción remota es la combinación efectiva de productos espaciales y espectrales que suministren datos económicos para muchos usos.

La empresa EOSAT (1997) se propone lanzar, un satélite que tendrá un sensor con resolución espacial de 1 m en una banda pancromática y 4 m en las bandas multiespectrales. Por otra parte, uno de los satélites meteorológicos más importante es el GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), denominado así en su fase operacional, ya que en su fase experimental se le llamó SMS (*Synchronous Meteorological Satellite*).

El primer vehículo fue lanzado en 1974 a fin de establecer el programa global de investigación sobre la atmósfera. La estructura del satélite era un cilindro con unas dimensiones de 1.9 m de diámetro y 1.22 m de alto, con un peso de 225 kg. y una órbita geoestacionaria a 36,000 km de altura. Este satélite llevaba un sistema de cámara giratoria en las bandas visible e infrarroja y además de un magnetómetro.

El 8 de abril de 1994 se lanzó el GOES-8 (parte de una nueva serie I-M) que dispone de un sistema mejorado para realizar imágenes, con 5 bandas o canales de alta resolución y un sistema de sondeo perfeccionado, ya que están separados los sistemas de toma de imagen y de sondeo. El GOES-8 es ya un satélite orientado por coordenadas hacia la Tierra. La forma de la plataforma corresponde también a una nueva generación de satélites (Figura 3.1).

La información de los satélites meteorológicos se transmite en tiempo real de dos maneras:

- APT (*Automatic Picture Transmission*), en frecuencia VHF (*Very High Frecuency*), en modo analógico de 4 km de resolución. Se estima que existen unas 900 estaciones de este tipo en el mundo.

- HRPT (*High Resolution Picture Transmission*), en la banda denominada S, en modo digital y transmite la máxima resolución de los aparatos. En el mundo existen unas 46 estaciones de este tipo.

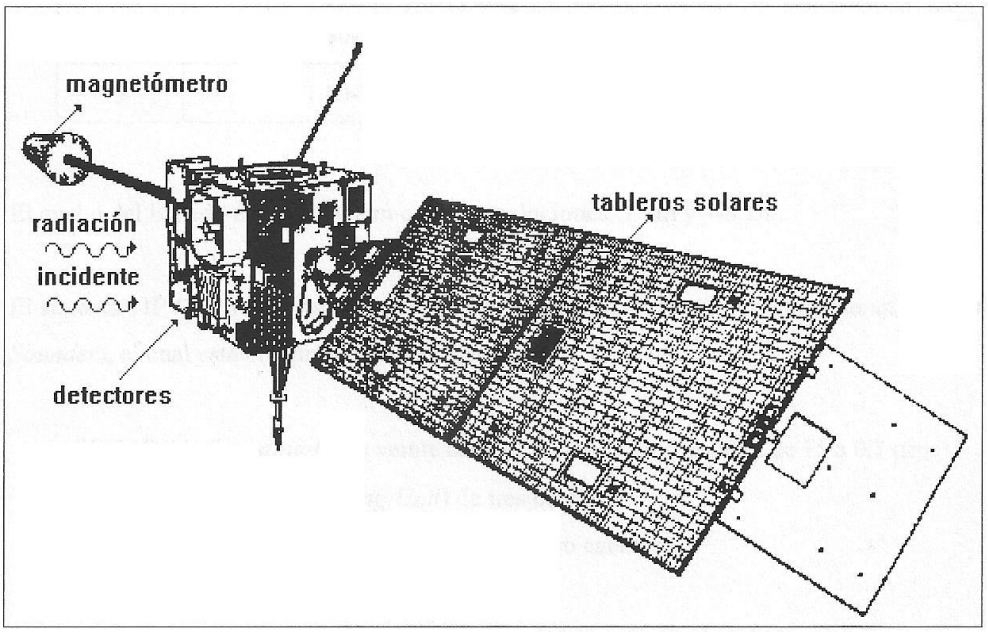


Figura 3.1. Esquema de la nueva generación de satélites GOES

Las características generales del AVHRR (*A Very High Resolution Radiometer*), que es el radiómetro más notable a bordo de los satélites meteorológicos orbitales se muestran en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Bandas del instrumento AVHRR

BANDA	ANCHURA(μm)	UTILIDAD
1	0.55-0.68	Detección de nubes.
2	0.72-1.10	Delimitación de superficies de agua.
3	3.55-3.93	Temperatura del océano; detección de nubes en la noche.
4	10.50-11.5	Detección diurna y nocturna de nubes.
5	11.50-12.5	Mapeo de temperatura de nubes.

El ancho del barrido es de 2,800 km en dos resoluciones: 1 km y 4-8 km.

El sistema TIP (*Tiros Information Processor*) consta del TOVS (*Tiros Operational Vertical Sounder*), el cual está compuesto de tres unidades:

- BSU (*Basic Sounding Unit*) veinte canales de longitudes de onda de 15 a 0.7 μm,
- SSU (*Stratospheric Sounding Unit*) de tres bandas y
- MSU (*Microwave Sound Unit*) que tiene cuatro canales.

Este sistema se usa para obtener perfiles de temperatura y humedad de la atmósfera, lo que tiene una gran trascendencia para la predicción atmosférica y para otros estudios, como flujo de protones solares, espectro y densidad de electrones y energía total de partículas.

Las determinaciones de intensidad de energía de partículas son usadas para medir y predecir eventos solares, tales como las manchas y sus efectos sobre el campo magnético terrestre; también son empleadas para definir los bordes de las auroras boreales, que afectan las comunicaciones de radio, la recepción de radares y sistemas de distribución eléctrica.

El METEOR-2 es uno de una serie de satélites meteorológicos de la Comunidad de Estados Independientes (antigua URSS) que operan tomando datos meteorológicos en órbita polar a 900 km. Los tiempos de cruce ecuatorial son 03:00 y 15:00, hora local. Los principales instrumentos que portan los Meteor son: un barredor que toma información en el visible con resolución de 2 km; un sistema de televisión con resolución de 1 km en el visible; un barredor infrarrojo con resolución de 8 km y un sondeador infrarrojo de ocho canales.

El satélite SEASAT, lanzado el 26 de junio de 1978, fue el primero de una serie de satélites de investigación oceanográfica, colocado en una órbita casi polar a 800 km de altura y suministraba un cubrimiento total de la superficie de los océanos cada 36 horas. El SEASAT estaba provisto de 5 sensores: un altímetro de pulso de radar; un dispersómetro de microonda para medir magnitudes y direcciones de vientos; un barredor de dos bandas, visible: 0.52-0.73 μm e IR (infrarrojo): 10.5-12.5 μm; un barredor de cinco bandas en el espectro de microondas (0.8 a 6.6 cm) y un radar de apertura sintética (SAR) en la banda denominada L (25 cm) para determinar el patrón del oleaje y de los bloques de hielo. Desgraciadamente un corto circuito lo destruyó el 10 de octubre de 1978.

El orbitador espacial fue lanzado por primera vez en abril de 1981. A diferencia de las otras naves es reutilizable. Comprende siete experimentos para recursos naturales: geología continental, química atmosférica, meteorología, biología marina y fisiología de plantas. El sistema de sensores incluye un radar, (*Shuttle Imaging Radar:* SIR-A) y un radiómetro (*Multispectral Infrared Radiometer:* SMIRR). El SIR-A fue desarrollado a partir del radar de banda L del satélite SEASAT. Tiene un ángulo de 47° y una anchura de barrido de 56 km con una resolución de 40 m.

El radiómetro SMIRR será empleado para evaluar la posibilidad de discriminar rocas mediante bandas angostas en el infrarrojo; incluye un telescopio, un filtro rotatorio y un detector para medir la reflectibilidad de la superficie en diez bandas entre 0.5 y 2.5 μm; su elemento es de 100 m.

Otros sensores son el OCE (*Ocean Color Experiment*), un barredor de espejo giratorio de 550 km de anchura de barrido y 3 km de elemento, con ocho bandas entre 0.49 y 0.79 μm. El SIR-B es un radar de mayor resolución (15 m) que tendrá varias mejoras sobre su antecesor, el SIR-A. Algunos de los beneficios que producirá son mejores datos para la producción agrícola y datos para seguridad en la navegación marítima.

El nombre SPOT (*Système Probatoire d'Obervation de la Terre*) denomina una serie de satélites franceses de la nueva generación y también el primero comercial, administrado por Spot Image Co. El primer satélite SPOT fue lanzado desde Guyana el 21 de febrero de 1986. En la actualidad se espera el lanzamiento del cuarto satélite. Básicamente contiene dos instrumentos (HRV:*High Resolution Visible*) idénticos en el visible, cámaras de alta resolución, dos grabadoras magnéticas y un transmisor. El HRV fue diseñado para operar en modo multiespectral o pancromático, de acuerdo con las bandas descritas en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Bandas del HRV del satélite SPOT

Multiespectral (μm)	Pancromática (μm)
0.50----0.59 0.61----0.68 0.79----0.89	0.51----0.73

Los elementos en el primer caso tienen un tamaño de 20 por 20 m y en el segundo de 10 por 10 m. En el modo multiespectral, el número de elementos por línea es de 3,000 y de 6,000 en el segundo. El ancho del barrido es de 60 km, es decir, un ángulo de cubrimiento de 4.13º. El satélite SPOT cruza la línea del ecuador a las 10:30 hora local, pasando sobre el mismo punto cada 26 días.

Una particularidad de este satélite es que tiene capacidad para observar fuera de su órbita mediante el movimiento de un espejo. Esta característica permite que un punto pueda ser observado en siete pasos diferentes si se encuentra cerca del ecuador o en once si se encuentra en una latitud de 45º, además de permitir la generación de pares estereoscópicos.

Se dispone de información de los satélites de la Agencia Espacial Europea ERS-1 y ERS-2 (*European Space Agency Resources Satellite*), lanzados en 1991 y 1995; están equipados, a 780 km de altura, de un radar de apertura sintética de 30 m de dimensión de elemento, un observador del océano que toma información en color, con diez bandas entre 0.4 y 11.5 μm, un radiómetro de imágenes de microondas con seis frecuencias, un altímetro de radar y un radar dispersómetro de dos frecuencias. El último cuenta además, con un detector de ozono para la alta atmósfera.

El RADARSAT-1 de Canadá, lanzado en noviembre de 1995 es un satélite que dispone también de radar para cuantificar recursos naturales.

Los satélites indios, presentes desde 1989: IRS-1A, IRS-1B, IRS-P2, IRS-1C, IRS-P3 han prácticamente revolucionado la tecnología en cuanto a calidad y resolución. El sensor pancromático del IRS-1C -lanzado en 1995- que cubre un ancho de banda de 0.5 a 0.75 μm tiene una dimensión de elemento de 5 m. Otros sensores de este satélite son el escandidor multiespectral LISS-3 que toma en cuatro bandas: 0.52-0.59, 0.62,-0.68, 0.77-0.86 y 1.55-1.70 μm, con un tamaño de elemento de 25 m.

El WiFS (*Wide Field Data*) tiene dos bandas: 0.62-0.68 y 0.77-0.86 μm, con elementos de 180 m. La información de estos satélites puede ser adquirida en las agencias de la empresa EOSAT.

Una conclusión que puede extraerse del estudio de todas las plataformas, es que no es posible conseguir que solamente una de ellas satisfaga todas los requerimientos de información para un determinado uso o disciplina, lo que lleva de nuevo a la necesidad de

planteamientos multietápicos; sin embargo, en la mayoría de los casos, no se agotan las posibilidades de obtención de los datos mediante un solo tipo de satélite. Es conveniente para cada estudio, buscar la combinación más adecuada de sensores y plataformas, de manera que se cubran con mayor eficiencia las necesidades de información del proyecto.

3.3.3. INTERPRETACIÓN

3.3.3.1. Interpretación Manual

Para la interpretación de fotografías aéreas e imágenes en papel se emplea el proceso manual o visual, que consiste en la detección, delineamiento, delimitación e identificación de las formas en las mismas imágenes.

Los elementos que se deben tomar en cuenta en esta interpretación son:

- La forma, aunque hay que considerar que los objetos no son observados en la manera acostumbrada sino verticalmente.

- El tamaño que puede definirse mediante una simple medición tomando en cuenta la escala de la foto.

- El tono y color del objeto, si se trata de foto blanco y negro se manifestará en variaciones de gris.

- La textura es la frecuencia de los cambios tonales o de color, es decir una apreciación de la homogeneidad del objeto.

- El patrón es la disposición espacial de los objetos, puede ser natural o artificial.

- La sombra da una idea de la altura o profundidad del objeto.

- Sitio y asociación. Los objetos están ubicados de manera que se relacionen con características del terreno u otros objetos.

La interpretación monoocular permite percibir o ver:

- El tamaño relativo de los objetos.
- Los claros y sombras; usualmente los claros intensos están más cerca.
- El traslape: el objeto sobrepuesto se encuentra más cerca que el cubierto.
- La perspectiva espacial.
- Los contrastes visuales.
- El paralaje de movimiento: los objetos más cercanos se mueven sobre los más lejanos.

La visión binocular agrega a los puntos anteriores el dato del ángulo de convergencia de las líneas definen la profundidad de un objeto. Esta es la visión estereoscópica o en tercera dimensión, descrita en el Capítulo II.

La interpretación de imágenes -en un plano, en la mayoría de situaciones- se efectuó durante un breve intervalo de tiempo, en la década de los setenta, mediante analizadores analógico-digitales, instrumentos de ayuda en las interpretaciones de variados tipos, pero el mayor y reciente impulso ha sido mediante la computadora digital. En estas máquinas se procesan valores numéricos discretos, captados digitalmente desde su incidencia en el instrumento de la nave, o digitalizados en el gabinete a partir de una carta o fotografía.

Casi todos los barredores toman y graban valores de los elementos del terreno en forma numérico-digital; los barredores de los satélites modernos suelen captar hasta 256 diferentes valores, que son niveles de energía y por ejemplo, en presentación fotográfica blanco y negro, aparecerán como diferentes tonos de gris.

El uso de imágenes en procesadores tiene algunas ventajas sobre la observación de fotografías convencionales, aunque se insiste en que el uso de un método no suple ni

erradica al del otro. Los datos de apoyo a los estudios por percepción remota pueden tener también características muy variables, tal como consistir en valores climáticos puntuales, información cartográfica de suelos o datos de densidad poblacional, y tener diversas presentaciones (listas, mapas a diferentes escalas); por lo que es necesario adecuarlos, por ejemplo: digitalizarlos para que sean compatibles con la información procedente de los sensores o la que conforma a la base de datos. La introducción de los valores puede efectuarse a través de diversos periféricos, que dependen de los recursos disponibles en la institución que hace el estudio (cámara de televisión conectada a un digitalizador, tableta digitalizadora, lector de textos, digitalizadores de mapas, etc.).

3.3.3.2. Interpretación mediante computadora

En computadoras digitales pueden efectuarse una serie de operaciones sobre las imágenes; algunas de éstas son:

- Preprocesado
- Realce
- Corrección geométrica
- Ajuste cartográfico
- Filtrado
- Transformación de datos
- Extracción de formas
- Procesado o agrupamiento
- Interpretación

La aplicación de estas operaciones puede también variar, de acuerdo con las necesidades del estudio. Puede ocurrir, por ejemplo, que no se requiera ajuste cartográfico en la información, por lo que si no se aplica se tiene una optimación de tiempo y economía.

El preprocesado consiste en las operaciones previas al procesado, como son las correcciones geométricas y radiométricas. Estas correcciones son necesarias debido a las

variaciones en la respuesta de los detectores y en la velocidad del barrido, a los efectos cinéticos debidos al movimiento de la Tierra, del vehículo y a las deformaciones en la imagen provocadas por la curvatura del planeta.

Algunos procesos a las imágenes se efectúan únicamente con el propósito de mejorar su información (realce, filtrado) y obtener de nuevo una imagen que será interpretada por métodos manuales o visuales. El más importante es el de procesado o agrupamiento de valores cercanos, que puede efectuarse mediante varios algoritmos. La identificación de los agrupamientos con objetos del terreno es la interpretación.

El último punto es el producto o salida de la información procesada. La imagen procesada puede ser observada en un monitor normal de TV o en un monitor de alta resolución. La salida puede efectuarse en impresora normal, asignando una letra a cada clase, en impresión que superponga varias letras para simular niveles de grises o ser realizada en una impresora de puntos que mediante programas imprime diferentes niveles de grises en el papel por superposición de caracteres. Actualmente la opción de impresión a color es factible económicamente con las impresoras laser y de chorro de tinta, lo que erradica la opción, de antaño, de tomar fotografías directamente del monitor.

Las imágenes fotográficas provienen de aparatos planos o de tambor giratorio, cuya óptica forma las imágenes por la superposición sucesiva de la proyección de las líneas sobre el papel fotográfico. La imagen fotográfica puede ser en blanco y negro o a color, y su resolución puede también variar dentro de un intervalo grande.

Las principales ventajas de uso de los procesadores estriba en los incrementos de rapidez en la entrega del trabajo y economía de costos, en función de las grandes áreas que pueden ser cubiertas y en la homogeneidad con que pueden efectuarse las interpretaciones; aunque no hay que olvidar que el procesador más completo, el que puede tomar en cuenta el mayor número de criterios (variables), tales como los descritos en el capítulo anterior, es el cerebro humano.

Por razones prácticas, los algoritmos o grupos de operaciones que se efectúan sobre las imágenes, aprovechan únicamente el dato de radiancia, o sea, las diferencias de niveles de la energía emitida o reflejada por los cuerpos. Se han elaborado algunos algoritmos que toman en cuenta otros tipos de la información contenida en las imágenes, tales como alineamientos geológicos, pero no han tenido mayor difusión porque son complicados, emplean mucho tiempo de computadora y finalmente generan resultados que deben ser analizados posteriormente con mucho cuidado por un intérprete.

Ha existido una gran variedad de sistemas de interpretación de imágenes. La primera interpretación de cuadros fue efectuada mediante analizadores analógicos e instrumentos de ayuda a la interpretación analógico-digital, que se emplearon durante algún tiempo en instituciones que poseían sistemas de toma analógicos, pero los métodos modernos comprenden información digital que se procesa en las respectivas computadoras. El uso de estas máquinas es variable. Algunos de los sistemas de trabajo operan de forma que lo que se efectúa en la computadora es primordialmente un realce y corrección de la información a fin de facilitar el trabajo al intérprete. En otros, se pretende que la operación se efectúe con el mínimo de participación de los interpretadores.

En la descripción de los sistemas de procesamiento, parágrafos 3.3 y 3.4 se puede ampliar la comprensión del procesamiento de imágenes.

3.3.4. APLICACIONES A TEMAS HIDROLÓGICOS

3.3.4.1. Meteorología

El aporte de esta tecnología a la meteorología ha sido muy amplio, desde que se lanzó en el año 1961 el primer satélite TIROS-1. Las posibilidades de obtener datos valiosos a través de imágenes son grandes. Se ha ampliado aún más con el establecimiento del INTERNET, pues en la actualidad es posible obtener imágenes y cartas a través de la misma.

En México, con información digital del satélite GOES (Díez, 1993), se elaboró un sistema de manejo de imágenes que permitía, además de las funciones de presentación de los datos, el cambio de escala, la corrección geométrica, la navegación y el señalamiento de contornos. Empleando este sistema de manejo se obtuvieron también datos de medición de temperaturas y velocidad de viento.

El dato de la temperatura es de gran importancia para los trabajos relacionados con la disciplina meteorológica. En especial, el de temperatura en las cúspides de las nubes, ya que proporciona datos básicos en proyectos tales como los de modificación del clima, que comprenden la estimulación de la lluvia o la supresión de granizo y la integración de modelos que permiten estimar la precipitación mediante mediciones desde el espacio.

El dato de temperatura es de gran interés igualmente para determinar corrientes en cuerpos de agua, surgencias procedentes de un acuífero o contaminaciones industriales.

El viento es producto del desplazamiento de las masas de la atmósfera causado por diferencias de presión. Dado que es un desplazamiento es necesario medirlo en su magnitud, velocidad y sentido; los tres parámetros varían durante el día y estacionalmente.

En el estrato próximo a la superficie, la velocidad se mide mediante el empleo de anemómetros. A más altura, en los estratos sucesivos, se han empleado los datos obtenidos por diversas sondas atmosféricas, principalmente los globos sonda soltados en superficie (radiosondeo).

El dato de velocidad del viento es importante para proyectos que emplean otros datos climatológicos, dada su interrelación con el mismo; también es necesario considerar el viento en la evaluación de efectos que originan las alteraciones hechas por el hombre sobre el ambiente; estas evaluaciones son parte de los estudios de impacto ambiental.

El requisito para medir la velocidad del viento es la presencia de nubes, que se emplean como cuerpos trazadores, y dos o más imágenes sucesivas que cubran la zona de estudio. La precisión de los valores obtenidos depende de la cantidad de imágenes y de su resolución.

Se conoce la altura aproximada a la que se suele encontrar cada tipo de nube, diferenciada por su forma. De esta manera, se determina el nivel de la atmósfera en el que se mide la velocidad del viento, que es el que acompaña a la nube. El valor numérico obtenido puede ser diferente al medido en una estación ubicada sobre el terreno, sin embargo, puesto que la observación en la imagen es un promedio espacial, lo mencionado más que ser una limitante es una ventaja, al facilitar una medida regional donde un dato puntual tiene poco significado.

El uso de datos del satélite GOES es indicado porque tiene una adecuada frecuencia de toma (cada media hora toma una imagen del disco de la Tierra), posee una toma espacial y además con información que facilita la correlación del dato de viento al de otros fenómenos meteorológicos, como presencia de corrientes marinas o precipitación pluvial.

3.3.4.2. Hidrometeorología

La banda infrarroja térmica se emplea en las determinaciones de temperatura; ésta permite la conversión de la radiancia, mediante una tabla, a la temperatura aparente de los cuerpos que se encuentran en el ángulo del sensor. La medida es aparente, dado que existe atenuación-modificación en la radiación debido al efecto de los gases de la porción de atmósfera atravesada. Sin embargo, como las nubes que precipitan, como los cúmulos, alcanzan grandes alturas, la porción de atmósfera situada entre sus cúspides (algunas veces a más de 15 km de altura) y el satélite, tiene una densidad tan baja que su efecto se puede ignorar.

En la actualidad, la tendencia principal es hacia la instalación de sistemas integrados como el que propuso el UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*) con el nombre de Unidata (Sherretz y Fulker, 1988). Este sistema, esencialmente señala como productos que deben obtenerse:

- Rutinas de uso general para despliegue y análisis de datos: sinópticos de superficie, atmósfera superior y de pronóstico, por ejemplo, rutinas de contorno, diagramas termodinámicos y sondeos, secciones, análisis objetivo de datos de atmósfera superior, mesoanálisis de superficie, lineas de flujo, cambios de cantidad en el tiempo y análisis de estabilidad.

- Rutinas de despliegue y análisis de datos de radar: gráficas convencionales de radar, despliegues Doppler y productos especiales.

- Rutinas de satélite: despliegue de las coordenadas de las imágenes, retícula de la imagen, extracción de datos digitales, realce en seudocolor, realce en blanco y negro y superposición de imágenes.

- Rutinas relacionadas con el clima: análisis de autovalores y descomposición, información de flujo de calor y evaporación, datos de temperaturas, humedad del suelo, despliegue y cálculo de índices de sequía.

Farnsworth et al. (1984) resumieron los principales métodos de estimación de precipitación, que consisten en la utilización de diferentes observaciones que, siguiendo pasos definidos empíricamente, permiten la obtención de:

- los bordes de las áreas que han sido afectadas por la precipitación;
- precipitación total en la cuenca;
- precipitación total acumulada;
- climatología de las distribuciones de precipitación y
- predicción rápida de la precipitación que va a ocurrir.

Farnsworth et al. (1984) también aclara que se han desarrollado métodos numéricos para obtener estimaciones de inercia termal del suelo, humedad relativa de la superficie y evapotranspiración, todo esto a través de la solución de ecuaciones inversas. En la

actualidad, el trabajo sobre estos temas requiere de datos que no se pueden obtener desde satélite, como es la humedad del aire y la velocidad del viento cerca de la superficie.

3.3.4.3. Calidad del agua y malezas acuáticas

La necesidad del control de la calidad del agua queda señalada en la importancia que tiene para la vida humana, animal y para el desarrollo de la agricultura. La aplicación de la percepción remota es de gran utilidad para la ejecución de la Ley Federal de Aguas y el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas, cuya necesidad y justificación ha quedado plenamente establecida. Algunos de los beneficios que se tendrían son:

- Posibilidad de disponer de información objetiva, oportuna y económica sobre el problema.
- Agilización de trabajos, como inventario de descargas.
- Base objetiva para proyectos económicos, como plantas procesadoras de lirio acuático, para forrajes, fertilizantes o mejoradores de suelo.
- Medición de sólidos totales en suspensión, contaminantes o clorofila.

Sobre algunos proyectos de calidad del agua, se tienen como ejemplo la cuantificación del área cubierta por lirio acuático, maleza que es un problema para el buen funcionamiento de lagos y presas.

3.3.4.4. Geología

Es una disciplina de gran importancia para la planeación de obras de ingeniería en general, y en estudios geohidrológicos.

Los estudios geológicos pueden dividirse en función de dos objetivos: identificación de unidades de roca y definición de estructuras.

En ambos casos se logra un gran avance o la realización completa de un estudio mediante el empleo de la interpretación de fotografías e imágenes; para esta tarea es interesante considerar el contenido de las reglas de la fotointerpretación, expuestas brevemente en el inciso 3.2.3.1 y que se refieren al análisis de datos espectrales mediante labor manual o visual.

En el análisis de estructuras se discrimina, principalmente, la presencia de lineamientos o rasgos del terreno que separan dos zonas de diferente tono o textura. En este análisis se emplean las características de: longitud, dirección, azimut, tendencia y orientación, frecuencia de ocurrencia y espaciamiento entre líneas paralelas.

Algunos de los aspectos prácticos de los estudios geológicos son:

- Definición de cimentaciones.
- Localización de bancos de materiales para obras civiles.
- Ubicación del trazo de carreteras.
- Localización y evaluación de yacimientos minerales.

3.3.4.5. Capacidades de almacenamiento y contenidos en cuerpos de agua

Este aspecto incluye la ubicación de los cuerpos de agua superficial y de acuerdo a la estimación de su área, la capacidad de almacenamiento. Igualmente se pueden determinar las líneas de drenaje y los sentidos del flujo superficial.

3.3.4.6. Detección de zonas de recarga de acuíferos

Este tema, de gran interés, ha motivado la investigación que se presenta en este trabajo. Es aplicación de la tecnología a la hidrología del agua subterránea en las zonas de recarga. El agua subterránea procede de la superficie –recarga natural- a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. El proceso de recarga ocurre en zonas determinadas.

De acuerdo con Farnsworth et al. (1984), la información útil para los administradores del agua implica: la presencia o ausencia del agua en una zona, la profundidad, la calidad y cantidad, el impacto del bombeo del agua en los hundimientos del terreno, la superficie que abarca el acuífeo, la interacción entre la extracción de pozos y la descarga natural en ríos y la localización de las zonas de recarga y descarga del acuífero.

Es importante recordar algunos de los conceptos expuestos en este capítulo, de que en la tecnología de percepción remota se capta, mediante los sensores, la radiación electromagnética que se genera o refleja en la superficie de los objetos. Cualquier estudio que pretenda conocer más allá de esta superficie requerirá del uso de información complementaria y emplear la herramienta de la inferencia lógica.

Salomonson (1983) comenta: "La definición de un acuífero, en el sentido hidrológico, sin embargo, requiere de la descripción de los parámetros de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento, así como información sobre la profundidad del acuífero superficial o las alturas de la presión a través del sistema acuífero. Los datos de sensores remotos no pueden ser usados para obtener directamente esas propiedades del acuífero. Unicamente se pueden hacer inferencias del subsuelo a través de las expresiones en la superficie del acuífero." Añade más adelante: "El análisis geohidrológico a partir de imágenes es uno de los usos más complejos de la percepción remota. La complejidad resulta del hecho de que el objeto de estudio, el agua subterránea, no aparece directamente en los datos."

La detección de las áreas de recarga y descarga es aun más, una tarea difícil. Lo que explica la escasez de referencias sobre el tema. Las superficies de recarga en un acuífero son todavía más dificilmente identificables que las de descarga. Descarga natural es el volumen de agua que sale del acuífero a través de manantiales o por evapotranspiración, cuando la zona saturada se encuentra cercana a la superficie del terreno. Ambas regiones han tomado un gran interés en los últimos años, aparejado con la creciente importancia que tienen los acuíferos como suministradores del vital líquido, en cantidad y calidad.

Las zonas de recarga y descarga de los acuíferos son etapas definidas a partir del ciclo hidrológico.

Domenico y Schwartz (1990) presentan (Figura 3.2) el concepto de ciclo hidrológico en una cuenca superficial.

El flujo superficial es el que transcurre sobre la superficie del terreno, el flujo subsuperficial o interflujo es el que existe entre la superficie del terreno pero sobre la zona donde los materiales están saturados con agua. El flujo subterráneo se produce en la zona donde los materiales están saturados por agua. El agua subterránea tiene su origen, fundamentalmente, en la infiltración, que es la alimentación del acuífero a partir de las aguas superficiales.

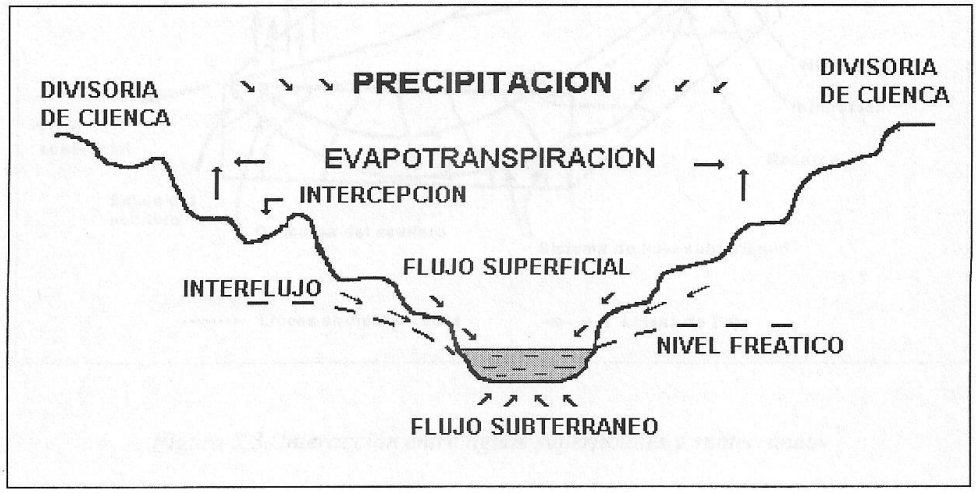


Figura 3.2. Esquema del ciclo hidrológico

En Freeze y Cherry (1979) se encuentra definida la zona de recarga mediante cuantificaciones hechas a partir de mallas de líneas del flujo del agua subterránea, las cuales son función de las condiciones climáticas. Los mismos autores explican: "Es claro, a partir de la malla de flujo que el agua subterránea transcurre desde las alturas hacia los valles." En la misma referencia se encuentra el siguiente esquema del ciclo hidrológico que muestra la interacción de aguas superficiales y subterráneas (Figura 3.3).

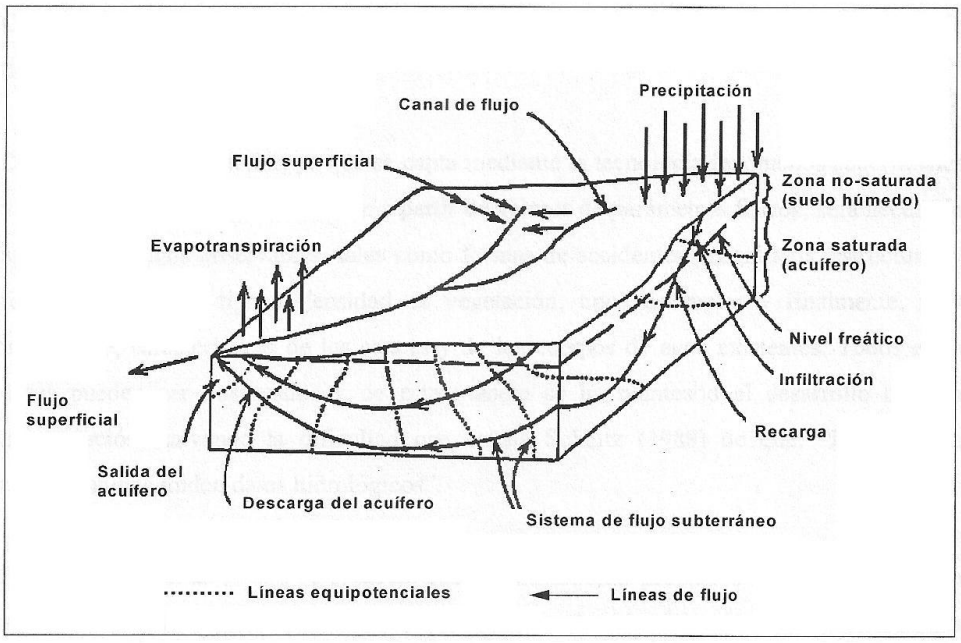


Figura 3.3. Interacción entre aguas superficiales y subterráneas

Bobba et al. (1992) señalan, de una manera acertada, que un área de descarga ocurre donde la dirección del flujo es en la dirección perpendicular a la superficie freática y con un sentido desde el interior hacia la superficie del terreno. Además, comentan que dicha área constituye una fuente de escurrimiento. El área de recarga, por el contrario, se define donde el flujo tiene una dirección perpendicular a la superficie freática y un sentido hacia el

interior del acuífero, alejándose de dicha superficie. En medio de las dos áreas, de descarga y recarga, se presentan zonas de transición.

En otra parte los mismos autores expresan que los "contornos de iguales valores piezométricos de un acuífero dan la dirección del flujo de agua subterránea así como la distribución de las áreas de recarga y descarga. Por definición, contornos cerrados de igual potencial en un alto de la superficie freática indican recarga o movimiento hacia abajo. Contornos equipotenciales cerca o sobre la superficie del terreno indican un área de descarga."

De acuerdo con lo anterior, ya que se capta mediante la tecnología fenómenos superficiales y que el objeto de estudio se define a partir de valores de parámetros físicos, será necesario apoyarse en datos observables, tales como formas de accidentes geográficos, estructuras y formas geológicas, tipo y densidad de vegetación, tipos de suelos y finalmente, muy importante, características de los cauces y de los cuerpos de agua existentes. Todos estos datos pueden ser observados y de esta manera se ha planteado el desarrollo de esta investigación, salvando la dificultad que señala Schultz (1988) de que: "los sensores remotos nunca miden datos hidrológicos".

En Farnsworth et al. (1984) se concreta que "para encontrar probables áreas que contengan agua, mediante la Percepción Remota, implica la identificación de determinados indicadores, tales como: estructuras geológicas favorables, evidencia de anterior actividad de agua superficial, existencia de vegetación de alta transpiración en zonas no irrigadas y la presencia de manantiales." Mas adelante comentan los mismos autores que los materiales permeables del suelo influyen en la infiltración y además son identificables por su aspecto geomorfológico. La Geomorfología, disciplina establecida a partir de la fotografía aérea, trata sobre el estudio de las formaciones superficiales. Las llanuras de inundación, playas, depósitos aluviales y morrenas forman áreas permeables, que pueden almacenar agua. Farnsworth et al. (1984) concluyen que "La presencia de estas formas del terreno (las que

son identificables en fotos aéreas e imágenes de satélite), aun en zonas áridas, sugieren a menudo la existencia de aguas subterráneas."

Detalles sobre los indicadores de estructuras geológicas y de evidencia de actividad anterior de agua superficial son discutidos en Maxley (1964). Este autor señala que la permeabilidad del suelo influye en la cantidad del agua precipitada que se infiltra o se evapora. En materiales de alta permeabilidad, reconocibles por su aspecto, el agua se infiltra rápidamente. En materiales rocosos, que son naturalmente poco permeables, la infiltración ocurre por la presencia de fallas y fracturas.

Por otra parte, información de los satélites Landsat ha sido ya empleada en la identificación de aspectos hidrogeológicos en algunos estudios (Gurney et al., 1982). La mayor resolución, tanto espectral como espacial, así como la presencia de un mayor número de bandas, como la infrarroja térmica, incrementarán el uso de información de satélite.

El uso de la banda espectral de microondas (Schmugge, 1987), ha probado ser especialmente indicada para la detección de humedad en el terreno, aunque su uso no se ha estandarizado en las plataformas. Probablemente sea usada en el futuro. Las bandas correspondientes al radar, ya usadas desde el espacio, como se ha comentado, son especialmente útiles para este tipo de estudios.

3.3.5. DISPONIBILIDADES DE SISTEMAS

A la fecha se han revisado algunos programas SIG y algunos sistemas de manejo de imágenes de satélite disponibles. Afortunadamente en la actualidad, se tienen versiones de estos sistemas que funcionan perfectamente en equipos de microcomputadora.

Existen en la actualidad muchos sistemas de información geográfica; se han revisado el IDRISI -*Geographic Analysis System*- (Eastman, 1993) desarrollado en la Escuela de Graduados en Geografía de la Universidad de Clark y también el MAPINFO (1994) y el

OSUMAP (Tromlin et al., 1987), el primero comercial y el segundo un sistema generado en las universidades de Harvard, Estado de Nueva York, Carolina del Sur y Ohio.

Todos los sistemas permiten trabajar y presentan algunas ventajas particulares. El programa IDRISI tiene varias ventajas. Es un programa universitario, ya disponible y que permite la realización de las funciones básicas de los sistemas de procesado de imágenes y de los sistemas de información geográfica con funciones de edición de planos. El IDRISI es un sistema muy actualizado, cuenta con versión para *Windows* y además ha tenido un desarrollo continuo, presentando mejoras y más funciones en cada versión.

Igualmente, en la actualidad se dispone de una gran variedad de sistemas de procesamiento de imágenes y en microcomputadora, lo que hace algunos años hubiera parecido algo imposible, por el volumen de información que se maneja en una imagen. Los sistemas de procesamiento pueden ser divididos en dos tipos: comerciales y científico-universitarios.

Los del primer tipo tienen ventajas de operación y apoyo del fabricante, pero su costo suele ser alto y los requerimientos de equipo son considerables, en comparación con los segundos. De éstos se revisaron los sistemas: SANDI, Sistema de Análisis Digital de Imágenes (Lira y Landgrave, 1994) y SPIPR (IBM-INEGI, 1989), Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota, ambos en su versión 2. Este último consiste en un sistema didáctico de procesamiento de imágenes desarrollado conjuntamente entre el Centro científico de la empresa IBM (*International Business Machine*) en México e INEGI.

Finalmente, el mencionado antes, IDRISI, que además de funciones de SIG presenta las funciones de procesado de imágenes, como se expone más adelante. Aunque todos ellos eran aptos para los procesos que requería esta investigación, se optó, por tener más conocimiento y familiaridad por los dos últimos, el SPIPR versión 2 y el IDRISI para *Windows* versión 1. Además, un factor preponderante fue la disponibilidad de los mismos y el apoyo técnico correspondiente. Otro aspecto importante, en términos de investigación, es la posibilidad de comparar dos sistemas de concepción diferente, pero que persiguen el mismo objetivo.

Ambos sistemas se describen a continuación. Indiscutiblemente el IDRISI tiene ventajas sobre el SPIPR en cuanto a la mayor cantidad de funciones, realizar operaciones de SIG y comodidad al efectuarse su operación mediante la interfase *Windows* La mencionada comodidad se traduce finalmente en velocidad de procesamiento de las imágenes.

3.3.6. SISTEMA SPIPR II

El Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota fue desarrollado conjuntamente entre el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Centro Científico IBM. La versión disponible es la última, liberada en 1992, que incluye una interacción más gráfica con el usuario, un mejor aprovechamiento de la memoria del monitor para facilitar los despliegues y un menor limitante en el tamaño de la imagen a procesar.

El SPIPR II, es un programa del dominio público (Lobo, 1996), por lo tanto gratuito, fácil de usar y que no requiere de un equipo de cómputo complejo.

Los requerimientos de equipo del sistema son bastante sencillos: funciona en un microcomputador 80286, no necesariamente con coprocesador matemático. El sistema ocupa 6 Megabytes y se sugiere tener un área de trabajo de cuando menos 30 Megabytes, aunque este espacio va a ser mucho mayor dependiendo del tamaño de la imagen y del número de bandas que tenga. Se debe tener disponible una tarjeta gráfica VGA o 8514/A y un monitor VGA. Todos estos requerimientos son fácilmente cubiertos por la tecnología de los equipos actuales.

El sistema consta de cinco módulos, incluyendo cada uno una ayuda particular. Estos módulos son:

-ACEPTACIÓN DE IMÁGENES
-DESPLIEGUE E IMPRESIÓN
-FILTROS Y REALCES
-CLASIFICADORES
-GEOREFERENCIA

Consta de dos tipos de menús: los que ejecutan acciones siguiendo una opción seleccionada y los que agrupan una serie de operaciones bajo un título común. En la Figura 3.4. se muestran los cinco módulos y el contenido de los submenús (IBM-INEGI,1989).

3.3.6.1. Aceptación de imágene:

En Aceptación de imágenes (Administración) se encuentran las utilerías que permiten la manipulación de imágenes. Contiene, a su vez, submenús para decodificación de diferentes formatos, cálculo de estadísticas y prototipo y generación de subimágenes. Con varias operaciones: recortar, expandir, añadir y finalmente reducir la dimensión de las imágenes.

La administración de bandas e imágenes puede ser utilizada en el mantenimiento de los directorios y en la exportación de bandas e imágenes. Esta opción posee varias operaciones, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

3.3.6.2. Despliegue e impresión

Permite el despliegue multiespectral (rojo, verde y azul), donde se selecciona cualquier combinación de bandas y tablas de asignación de colores, para que, aprovechando los colores disponibles de acuerdo con el tipo de tarjeta de gráficos y monitor, se despliegue la imagen a 256 colores. El despliegue monobanda en grises, que aunque no es tan rico como el multiespectral, es la única posibilidad para visualizar imágenes monobanda o bandas aisladas de una imagen. Presenta en pantalla la imagen dando sus valores numéricos como una variación de grises que va del blanco al negro.

Se tienen disponibles las opciones de ajuste lineal, exponencial y logarítmico. En la primera opción, el histograma se divide de forma que a cada porción se le asigna un número igual de elementos y un determinado tono de gris. En la segunda el número de elementos de las porciones se incrementa exponencialmente y en el tercera se reduce logarítmicamente.

Dispersograma es la gráfica de la frecuencia de ocurrencia de los valores que tienen los elementos de una banda contra la otra. Se presenta con colores en gráficas x-y. También es posible la impresión en grises.

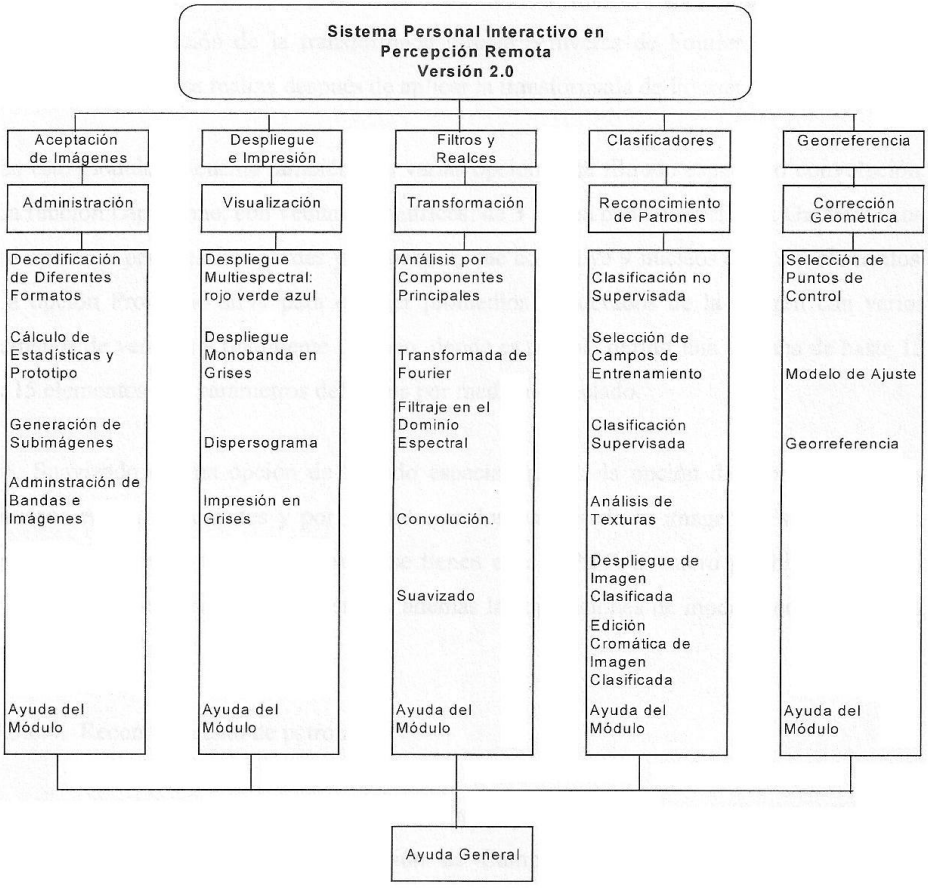


Figura 3.4. Esquema que muestra los módulos de que consta el sistema SPIPR II

3.3.6.3. Filtros y realces

En el módulo de Filtros y Realces se tiene la posibilidad de transformación de la información. Este módulo consta de las siguientes opciones:

a) Análisis por componentes principales. Con este análisis se calcula la matriz de covarianza de las bandas de entrada y al normalizar el espacio espectral, crea un nuevo grupo de bandas entre las cuales no existirá información redundante y se elimina la correlación entre bandas.

b) Transformada de Fourier presenta las acciones de transformar y antitransformar, que significa la obtención de la transformada directa e inversa de Fourier. El filtraje en el dominio espectral se realiza después de aplicar la transformada de Fourier.

En este módulo se cuenta también con varias opciones de filtrado espacial o convolución. La función Laplaciano, con ventanas (matrices) de 3 x 3 en ocho direcciones; Gradiente con 16 opciones para resaltar bordes y Ortogonal, que construye 9 núcleos de 3 x 3 elementos. La opción Promedio sirve para obtener promedios ponderados de la imagen con varios tamaños de ventana y finalmente Usuario, donde es posible definir una ventana de hasta 15 x 15 elementos con parámetros definidos por medio del teclado.

c) Suavizado es una opción de filtrado espacial que da la opción de suprimir cambios bruscos en las tonalidades y por lo tanto, en los valores de la imagen. Esto se efectúa mediante el mismo tipo de ventanas; se tienen en el SPIPR II cuatro posibilidades en el tamaño de la ventana para suavizado y además las operaciones de moda, media y ventana con el mismo fin.

3.3.6.4. Reconocimiento de patrones

En esta opción se encuentran los clasificadores, donde se tienen disponibles: la Clasificación no Supervisada, Selección de Campos de Entrenamiento, Clasificación Supervisada y Análisis de Texturas.

La clasificación no supervisada requiere de los siguientes datos: número de clases deseado, número de cambios permitidos de un cúmulo a otro (cambios de membresía) y salto, que es el dato para determinar cada cuantos elementos se hace el muestreo para definir los centros de los cúmulos.

En la selección de campos de entrenamiento, se separan campos (pequeñas áreas de elementos) cuyas estadísticas se utilizarán para efectuar la clasificación supervisada de toda la imagen. En la clasificación supervisada se tiene una función de análisis donde se calculan y despliegan las estadísticas, histogramas de las bandas de cada campo de entrenamiento y los dispersogramas de una banda contra la otra. Puede obtenerse también la separación de una banda contra la otra (distancia Jeffries-Matusita). Una vez efectuadas estas estadísticas, puede procederse a la clasificación.

Los módulos de clasificación son la parte medular en un sistema procesador de imágenes, son los generadores de una nueva imagen con un valor agregado: las interpretaciones de los datos que describe a los objetos del terreno.

El análisis de texturas genera una nueva imagen donde los grises oscuros representan las zonas de variaciones suaves de valores de la imagen original y los grises claros, las rugosas o de mayor variación. El Despliegue de imagen clasificada muestra el resultado de una clasificación. Este es un cuadro matricial, similar a un mapa temático.

En la opción edición cromática de imagen clasificada es posible modificar la apariencia visual del despliegue, cambiando el color de cada una de las clases, una a una.

3.3.6.5. Georeferencia

El módulo de Georeferencia (Corrección Geométrica) se aplica para dar validez cartográfica a la imagen de satélite. Tiene las opciones de Selección de Puntos de Control y Modelo de Ajuste.

En algunos casos pueden existir dificultades en la impresión de las imágenes o de los

productos de los procesos que se hayan efectuado en ellas. Al efecto, se agrega al paquete una serie de rutinas realizadas en INEGI (Hernández, 1995) para efectuar cambios en el formato de las imágenes, conduciéndolas a formatos manejados fácilmente por paquetes comerciales. Las rutinas elaboradas en INEGI son PROTO, un ejecutable en su versión 1.1 que permite la generación de prototipos -imágenes con menos líneas y menos columnas, pero que representan la forma de la imagen consumiendo menos recursos- a partir de imágenes de satélite. La otra rutina es TRANSPCX, un ejecutable que convierte las imágenes manejables en el SPIPRII a imágenes en formato PCX. Esta rutina está en su versión 3.0.

Las imágenes en formato PCX son fácilmente editadas, modificadas e impresas por los paquetes comerciales, como se mencionó antes.

3.3.7. SISTEMA IDRISI

3.3.7.1. Antecedentes

El sistema IDRISI de la Universidad de Clark, disponible desde 1987 (Eastman, 1993 y 1995), cambió su funcionamiento a *Windows* en 1995. Se aclara que es un producto de un esfuerzo de cooperación entre un grupo de profesionales encabezados por Ron Eastman, de la Escuela de Graduados en Geografía, usado en 120 países. Nombrado así en honor del geógrafo árabe creador de la primera clasificación de climas, Abu Abdallah Muhammad al Idrisi, el sistema incluye alrededor de 100 módulos de programación para la entrada, despliegue y análisis de datos geográficos. Incluye el manejo y conversión de archivos de datos matriciales (*raster*) y vectoriales.

El nuevo sistema efectúa la presentación de las imágenes mediante ventanas, con una gran comodidad -típica de *Windows*- permitiendo una fácil, en modo interactivo, composición cartográfica que incluye la superposición de sucesivos niveles de información (*layers*), anotaciones y tipos de colores.

En la Figura 3.5., tomada del manual del IDRISI (Eastman,1995), se presentan a grandes rasgos las componentes del sistema, que son las que conforman un SIG completo. Este tema se ha tratado en el párrafo 3.1.

3.3.7.2. Características del sistema

Al accesar al programa, en la parte superior se muestra una serie de menús cuyas funciones pueden también ser accesadas desde una barra de opciones. Algunas de estas funciones, que como ya se ha mencionado, pertenecen al común de los sistemas de información geográfica, mientras que otras pertenecen a lo que estrictamente se conoce como sistemas de procesamiento de imágenes. Éstas son las siguientes:

-AMBIENTE (*Environment*)
-ARCHIVOS (*File*)
-DESPLIEGUE (*Display*)
-ANÁLISIS (*Analysis*)
-REFORMATEO (*Reformat*)
-ENTRADA DE DATOS (*Data Entry*)
-VENTANAS (*Window*)
-AYUDAS (*Help*)

La primera, ambiente de trabajo, es una función, que a través de un módulo, establece las condiciones de trabajo para el uso de IDRISI. En este módulo se escoge la senda en la que se ubicarán los archivos de trabajo y donde se situarán los productos. Puede definirse también la posición de la barra de control.

El menú denominado archivos contiene utilerías para examinar, disponer (copiar, renombrar, borrar), importar o exportar archivos de otros sistemas al formato IDRISI. La importación puede hacerse desde varios sistemas SIG y la exportación, rutinas que fueron empleadas en este trabajo, como se describió oportunamente, a formatos BMP, TIF, WMF, PostScript y DXF. Este módulo es muy importante porque, al igual que el SPIPRII, este sistema tiene salidas limitadas de impresión.

El menú de despliegue da entrada a una variedad de presentaciones y composiciones. Además, permite la creación de perspectivas en tercera dimensión de modelos de elevación. Contiene dos utilerías interesantes, la primera para crear o modificar archivos de símbolos y la segunda para crear o modificar el archivo que asigna colores a los objetos (*palette*).

Contiene también dos rutinas muy importantes, una que facilita, en salida gráfica o numérica, el histograma de los valores (valores de energía contra su frecuencia) de una imagen así como su rango. La otra rutina es la que estira la distribución de los valores, abarcando toda la gama disponible y por lo tanto puede usarse para dar mayor contraste a una imagen.

Como se ha mencionado, lo referente al análisis es la parte medular del sistema ya que permite realizar análisis basándose en la ubicación geográfica. Todo este tipo de funciones no aparecen en el SPIPRII, mientras que algunas de las aplicables a procesamiento de imágenes puede observarse que se encuentran en los dos sistemas.

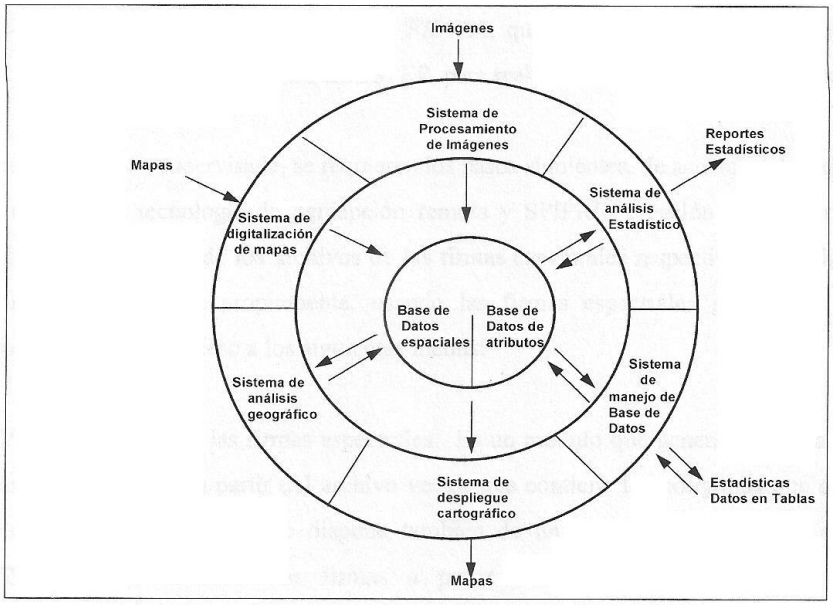


Figura 3.5. Bosquejo de funciones del sistema IDRISI.

La opción Análisis permite las operaciones de:

- Búsqueda en Base de datos (*Database Query*)

- Operadores matemáticos (*Mathematical Operators*)
  Este incluye todo lo relativo a álgebra de mapas. Operaciones entre imágenes y sobre una imagen, como puede ser la multiplicación por un escalar.

- Operadores de distancia (*Distance Operators*)

- Operadores de contexto (*Context Operators*)

En esta última función se encuentran varias operaciones útiles en análisis geográficos: estadísticas (*Statistics*) y procesamiento de imágenes (*Image Processing*). Esta última opción dispone de los submenús de las siguientes operaciones, algunas de las cuales las hemos encontrado en el SIPRII: con el fin de resaltar las imágenes una rutina (*STRETCH*) que redistribuye los valores entre la gama disponible. *COMPOSIT* es una herramienta para formar una composición (de falso color). *FILTER*, que se utiliza para efectuar filtrados dentro de las imágenes y finalmente *CLUSTER*, para realizar clasificación no supervisada.

Para la clasificación supervisada, se requieren los pasos siguientes, de acuerdo a lo expuesto en lo referente a tecnología de percepción remota y SPIPRII: creación de los sitios de entrenamiento, creación de los archivos de las firmas espectrales respectivas y finalmente, efectuar la clasificación propiamente, usando las firmas espectrales generadas. Esta plataforma permite el acceso a los siguientes menus:

(*MAKESIG*): para hacer las firmas espectrales. Es un módulo que genera las firmas, para realizar la clasificación a partir del archivo vector que contiene los polígonos que definen las áreas de entrenamiento. Se dispone también de un menú que permite la edición (*EDITSIG*) de las mencionadas firmas a partir del histograma de las clases de entrenamiento.

Para procesar las imágenes cuenta con tres opciones: clasificador mediante paralelepípedo (*PIPED*), clasificador mediante distancia mínima (*MINDIST*) y clasificador de máxima verosimilitud (*MAXLIKE*). Este es el menú más importante.

Para transformación de imágenes se dispone de un módulo o rutina de análisis de componentes principales (*PCA*), que permite transformar las bandas a un nuevo juego de bandas no correlacionadas.

Existen, además, disponibles otras rutinas para igualar los valores en la composición de diferentes tipos de coloraciones y restaurar imágenes que tienen líneas faltantes. Un módulo de reformateo cambia el tipo de archivo, reorienta el archivo vectorial o la imagen, cambia la extensión del área de estudio, cambia la resolución, modifica el nivel de detalle y sobre todo, convierte de archivos matriciales (*raster*) a vectoriales. Tiene finalmente, los menús de entrada de datos y ayudas para accesar al sistema de ayuda en línea, que exhibe información de apoyo sobre cada tema.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA EN LA ZONA DE ALMOLOYA DEL RÍO (CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA)

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la zona de estudio, sus aspectos geográficos, climáticos, hidrométricos y geohidrológicos. Asimismo se exponen los antecedentes históricos para señalar la evolución de los fenómenos geohidrológicos. Posteriormente se describen los materiales que permitirán la aplicación de las tecnologías de Percepción Remota en la zona de estudio. También, en base al concepto de áreas de recarga, se explican los pasos que se han seguido para identificar dichas áreas. Finalmente, el análisis se centra en la identificación de las áreas de recarga en la zona de Almoloya del Río.

El capítulo termina con un comentario de la escala de presentación y referencias que se han utilizado en el estudio así como el procedimiento general de trabajo.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En una primera aproximación se definió un área en el Estado de México (Figura 4.1) ubicada entre las coordenadas 99° 30' y 100° 00' Longitud Oeste; 19° 00' y 19° 30' Latitud Norte, área que a grandes rasgos corresponde al nacimiento del río Lerma, -Región Hidrológica No. 12- originado, en parte, de los escurrimientos que se generan en el volcán Nevado de Toluca al Oeste, la sierra Nahuatlaca-Matlazinca al Sur y las sierras del Ajusco y de las Cruces al Este.

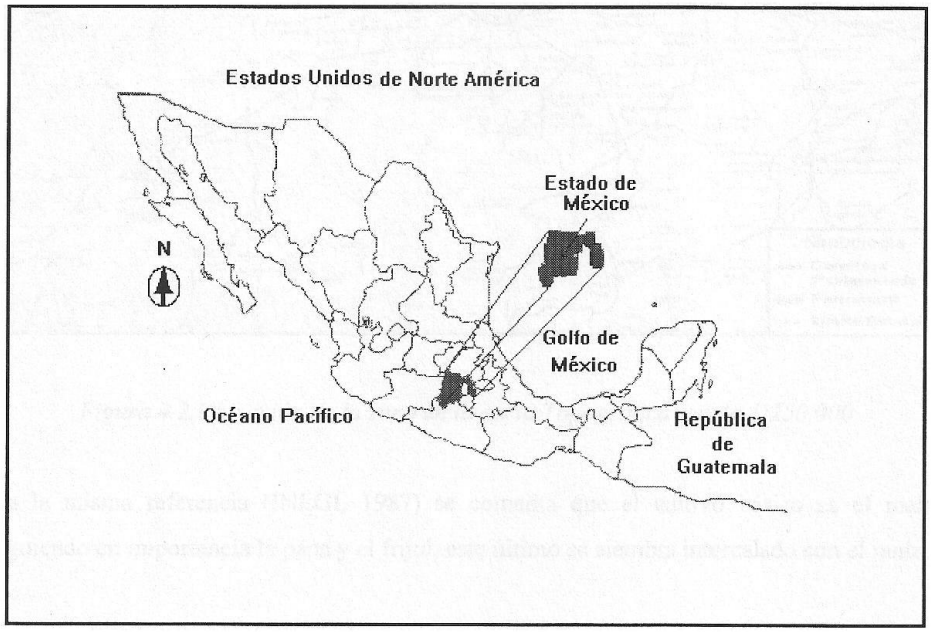


Figura 4.1. Ubicación del Estado de México en la República Mexicana

Un mapa del área, que incluye la ciudad de Toluca y el nacimiento y curso del río Lerma, con sus primeras presas, los embalses Antonio Alzate y José Ignacio Ramírez, tomado de la Carta INEGI 1: 250,000, se presenta en la Figura 4.2.

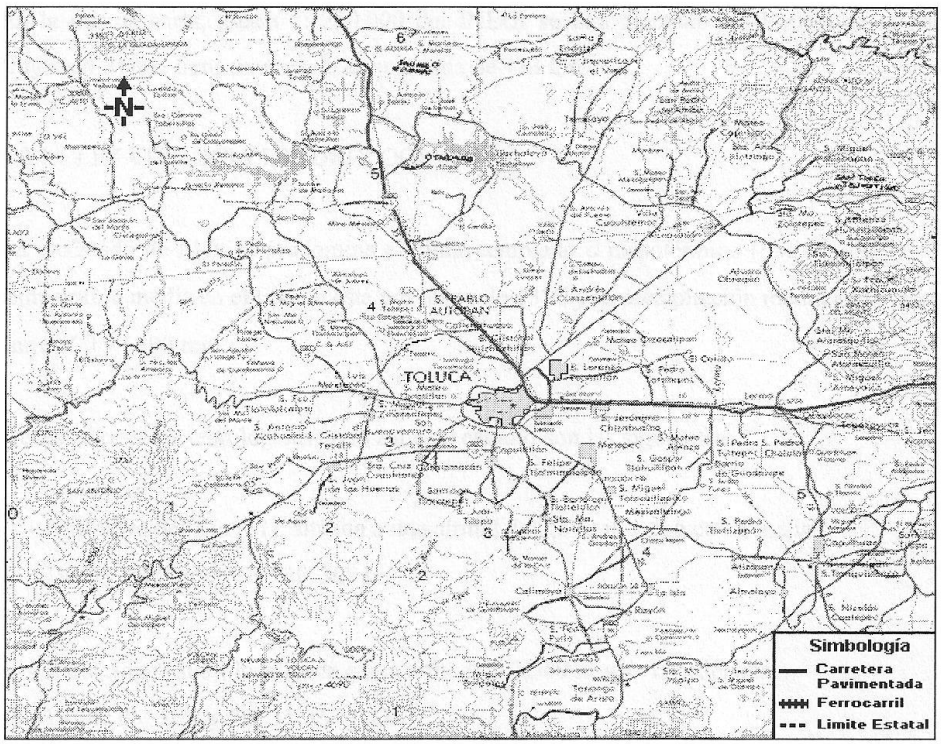


Figura 4.2. Ubicación de la zona en la carta Topográfica escala 1:250,000

En la misma referencia (INEGI, 1987) se comenta que el cultivo básico es el maíz, siguiendo en importancia la papa y el frijol, este último se siembra intercalado con el maíz.

La zona de Almoloya del Río es la primera subcuenca, cabecera del río Lerma. Tiene su límite más occidental en un vértice en el Nevado de Toluca y el más oriental en la cadena montañosa que separa la entidad del Distrito Federal y del Estado de Morelos, en las proximidades de las cuencas endorreicas de las lagunas de Cempoala. La porción más ancha corresponde al nacimiento del río Lerma, que forma su cauce hacia el norte. Al sur se encuentra la sierra que forma el parteaguas con la cuenca del río Balsas.

En la misma carta, escala 1: 250,000 del INEGI se han marcado los límites de la zona (Figura 4.3) que tiene un área de aproximada de 413 km^2.

4.2.1.CLIMATOLOGIA E HIDROLOGIA

En el Estado de México predomina el clima templado o mesotérmico (INEGI, 1987). La temperatura media en el Estado está por abajo de 13°C y la precipitación media anual oscila entre 600 y 1800 mm.

Las estaciones meteorológicas en la zona de estudio son las siguientes:

- Almoloya del Río (11), situada a una altitud de 2,572 m y con coordenadas: 19° 09' 20" L.N. y 99° 29' 30" L.O.

- Joquicingo (205), localizada a una altitud de 2,569 m y de coordenadas: 19°06' 05" L.N.y 99° 31' 15" L.O.

- Tenango del Valle (231) situada a una altitud de 2,607 m y en las coordenadas: 19° 06' 25" L.N.y 99° 35' 07" L.O.

En la zona de estudio, de acuerdo con la clasificación de Köppen se presentan tres tipos de climas:

- En la cúspide del Nevado de Toluca clima E(T)H, del grupo de climas fríos y muy fríos, literalmente frío de altura con marcado invierno, régimen térmico medio en el mes más caliente entre 0 y 6.5°C y temperaturas del mes más frío menores a 0°C.

- En las alturas intermedias clima C(E)(w_2)(w), que corresponde a clima semifrío con menos de 5% de precipitación invernal.

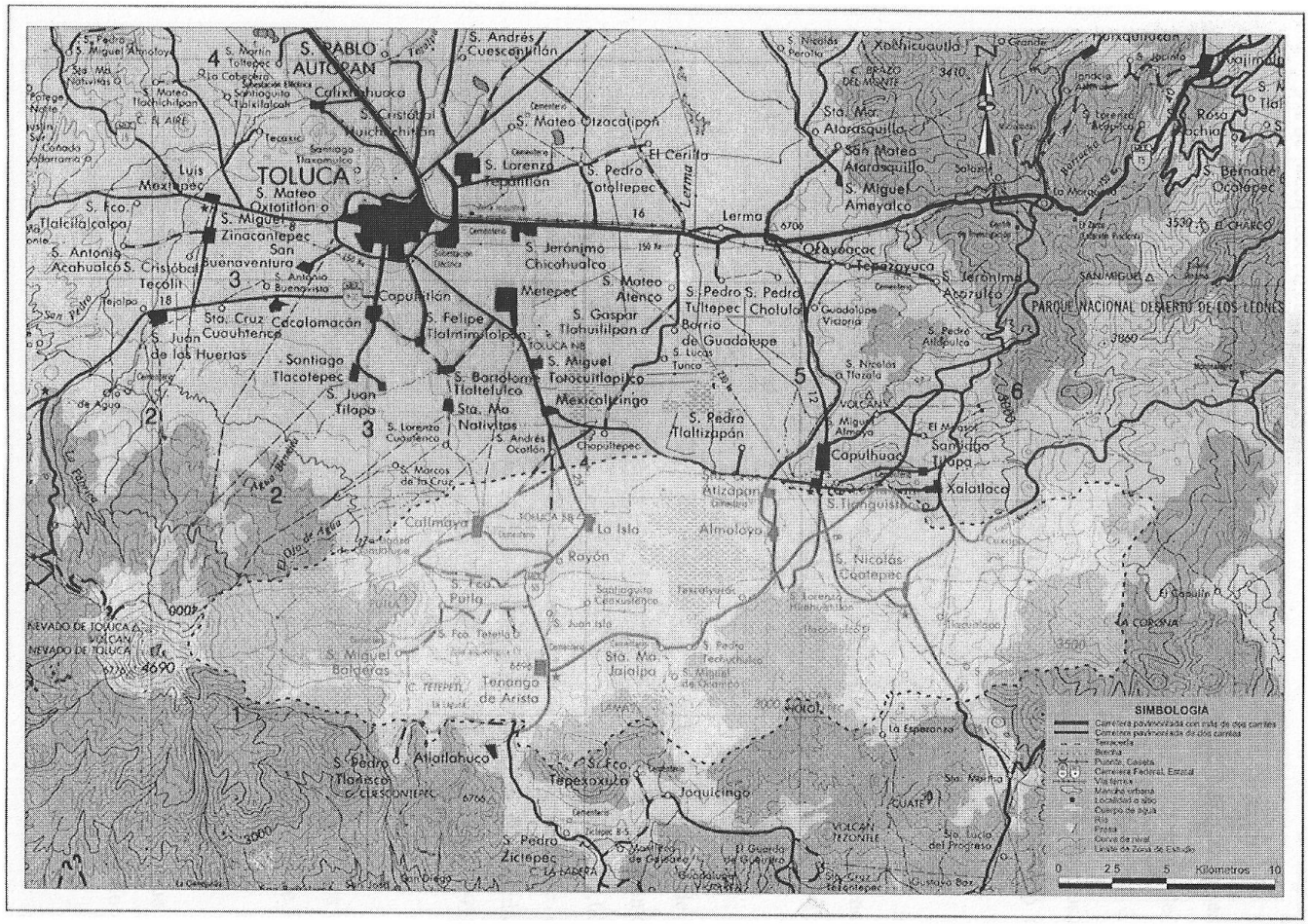


Figura 4.3. Límite de la Zona de Estudio.

- En la porción baja C(w_2)(w), que es un clima templado subhúmedo con menos de 5% de precipitación en la época de invierno.

En la primera región, la del volcán Nevado de Toluca, la temperatura media anual está comprendida entre 4 y 10°C, en la región intermedia entre 10 y 12°C y en la región de la porción más baja entre 12 y 14°C. La frecuencia de granizadas está comprendida entre 4 y 6 días; las granizadas se presentan principalmente entre los meses de junio y agosto. Ocurren heladas, en promedio en el año, entre 120 y 180 días en el volcán Nevado de Toluca contra 80-100 días en promedio, en la región baja.

La precipitación media anual varía desde las alturas hacia las partes bajas entre los intervalos de: 1,500-1,200 mm, 1,200-1,000 mm y 1,000-800 mm. La máxima incidencia se presenta en julio, con un valor que fluctúa entre 150 y 160 mm. La sequía se registra entre diciembre y febrero, con valores menores a 10 mm.

En la Figura 4.4 se muestra la gráfica climática mensual que presenta la variación de la lluvia y la isoterma media, de la estación Toluca y en la Figura 4.5 la misma información de la estación Nevado de Toluca; información tomada de la Carta Climatológica 1:500,000 (INEGI, 1990e). Los datos de elaboración de estas cartas proceden básicamente de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y de la Comisión Federal de Electricidad, con un mínimo de 10 años de observación dentro del período comprendido entre 1921-

En estas figuras puede apreciarse que la máxima precipitación ocurre entre los meses de julio y septiembre, así como que la isoterma declina paulatinamente desde el inicio de los meses de lluvia (presencia de nubosidad) hasta los mínimos invernales.

En la estación Nevado de Toluca este efecto puede notarse cuando se observa que la isoterma media tiene un incremento de unos tres grados centígrados al cesar el período de lluvias, valor que se mantiene hasta mediados del mes de noviembre.

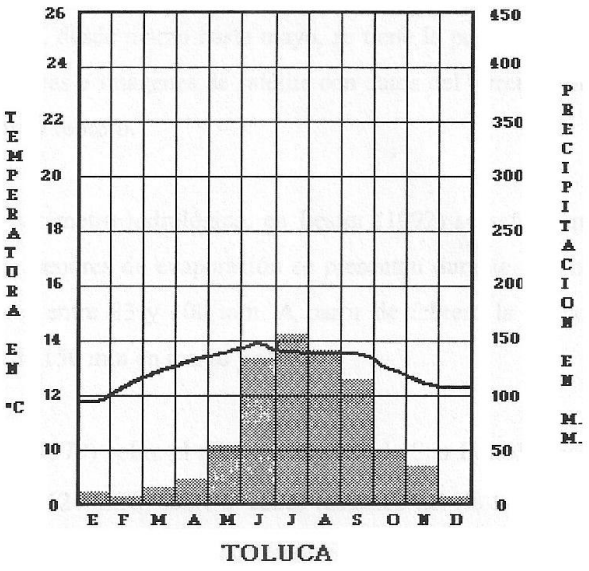


Figura 4.4. Gráficas climáticas de la estación meteorológica Toluca.

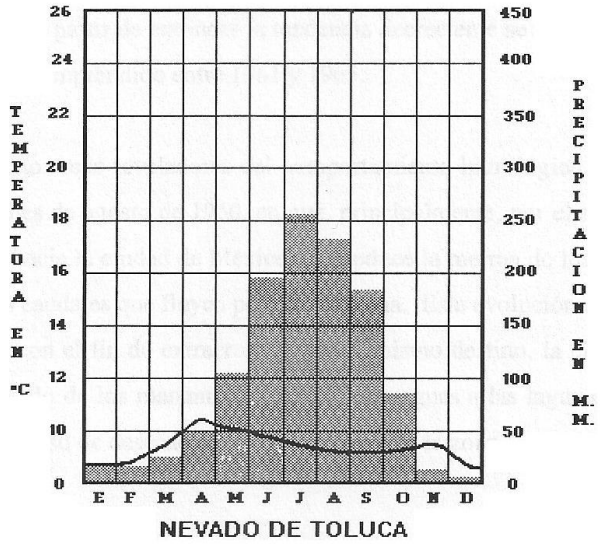


Figura 4.5. Gráficas climáticas de la estación meteorológica Nevado de Toluca.

Asociada a la nubosidad, de mayo a octubre, asicomo a la presencia de polvo y bruma y posteriormente humo, desde marzo hasta mayo, se tiene la posibilidad –no la garantía- de tomar fotografías aéreas e imágenes de satélite con datos del terreno, unicamente entre los meses de noviembre y febrero.

En cuanto a otro parámetro hidrológico, en Lesser (1992) se señala que "en el valle de Toluca los valores menores de evaporación se presentan durante los meses de Octubre a Enero y con valores entre 83 y 100 mm. A partir de febrero la evaporación sube hasta alcanzar máximos de 150 mm en marzo y abril".

Una estación (SRH, 1970) sobre el río Lerma, es la de San Bartolo localizada en 99° 34' 27'' L. O. y 19° 23' 52'' L.N., sobre el cauce histórico del río Lerma, en el nuevo puente de San Bartolo en dirección a Villa Cuauhtémoc. La tendencia de los niveles hidrométricos máximos anuales, en metros sobre el nivel del mar, entre los años 1942 y 1970, se muestra en la Figura 4.6. De esta información puede colegirse que la tendencia de los caudales ha sido en el sentido de reducirse en el transcurso de los años. Esta disminución se inicia a partir del año 1953 y a partir de entonces la tendencia decreciente se acentuó en años como 1957 y en el período comprendido entre 1961 y 1965.

Sin embargo, los datos más reveladores del comportamiento hidrológico del río Lerma se tienen a partir del mes de agosto de 1950, en que, principalmente, por el encauzamiento de aguas superficiales hacia la ciudad de México, se produce la merma de los cuerpos de agua y por lo tanto de los caudales que fluyen por el río Lerma. Esta evolución negativa continúa al perforarse pozos con el fin de extraer agua con el mismo destino, la ciudad de México. Esto conduce al secado de los manantiales que aportan aguas a las lagunas y por lo tanto, que se acentúe el proceso de desecación en la superficie de la zona.

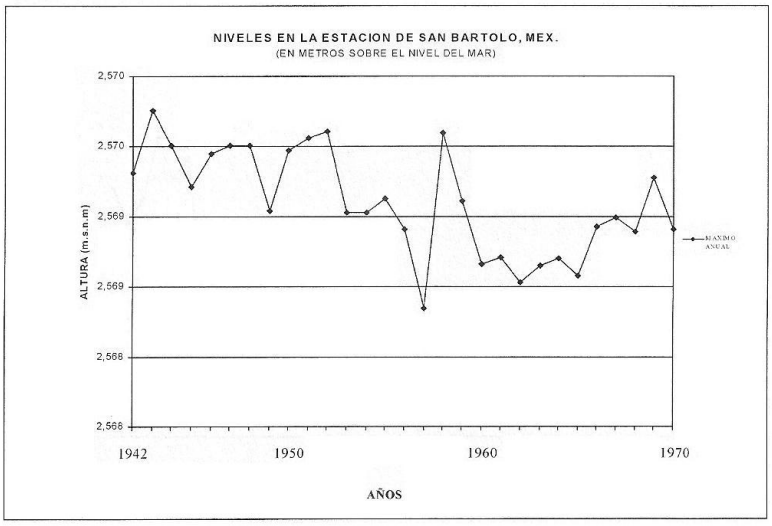


Figura 4.6. Tendencia del nivel máximo anual, desde el año 1942 hasta 1970.

En la salida de la zona de estudio se localiza la estación hidrométrica Hacienda Atenco (99° 30' 56'', 19° 10' 54''), de la que existen lecturas desde el año 1942 (CNA, 1997).

El descenso de caudales a partir de la década de los años 50 queda evidenciada en la Figura 4.7, donde se presenta el valor del caudal mensual en la estación Atenco, correspondiente al mes de abril (época de secas), para el período 1942-1985.

En la Figura 4.8, se grafica la evolución de caudales correspondiente al mes de septiembre, época de llu vias. Aunque podría presentarse toda la secuencia anual de valores, en estas dos gráficas puede apreciarse, en toda su magnitud, el descenso de caudales que ocurrió a partir de la década de los años 50.

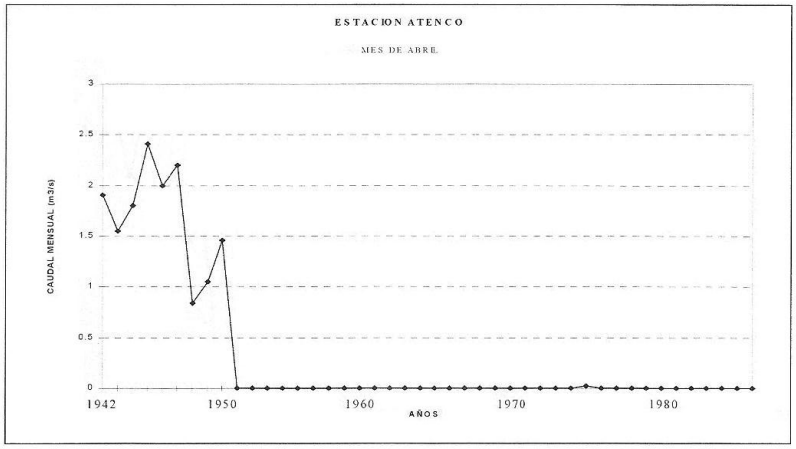


Figura 4.7. Caudal mensual de la estación Atenco en el mes de abril

Como dato actual, la estación hidrométrica La "Y", situada en el cauce del río Lerma, al norte de la zona (99° 35' 22'', 19° 24' 22''), presenta un valor anual medio de escurrimiento de 129527.99 x 10^3 m^3/año.

Las evoluciones anteriores se explican, de acuerdo con el Atlas Ecológico (Aguilar, 1997) a que en el año 1942 se inicia el "Plan Lerma", que envía 2.5 m^3/s de agua a la ciudad de México a través del túnel Atarasquillo-Dos Ríos.

En el Atlas Ecológico (Aguilar, 1997) se presenta un balance de agua superficial en la cuenca alta del río Lerma; para la subcuenca que denominan como Almoloya, dentro de la cual se enmarca la zona de estudio. En este balance se sigue la relación:

Precipitación – Evapotranspiración = Escurrimiento + Almacenamiento + Infiltración

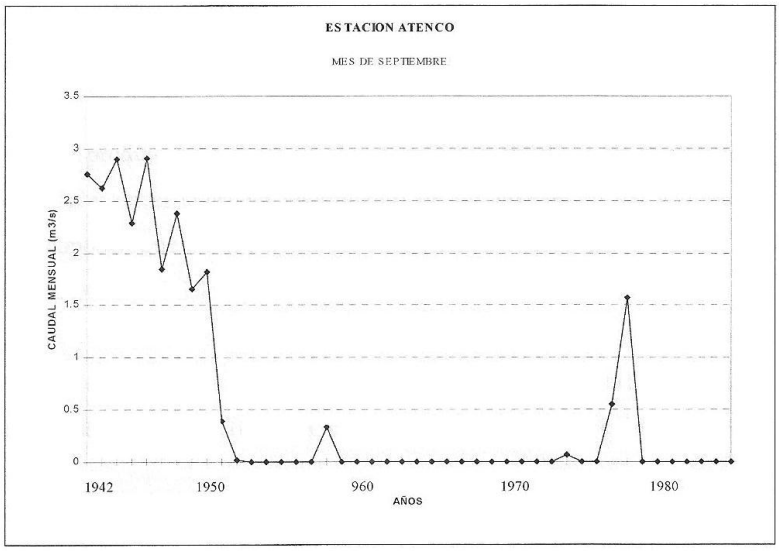


Figura 4.8. Caudal mensual de la estación Atenco en el mes de septiembre

De la información del Cuadro 4.1 se deduce un volumen infiltrado de 145.54 $x10^6$ m^3.

Cuadro 4.1. Balance hídrico de la subcuenca de Almoloya (Mm^3).

Precipitación menos evapo-transpiración	Escurrimiento Efectivo	Número de Almacenamientos significativos	Volumen almacenado	Infiltración P - (Ev + Es + Al)
195.116	42.285	2	7.29	145.54

La misma referencia menciona que en 1969, tres años después del establecimiento de un convenio entre el gobierno del estado de México y el del Distrito Federal "se habían perforado 132 pozos con los que sumados a los 97 existentes extraían 12.69 m^3 s^{-1}."

Esta situación produjo un cambio en el sistema, cuyo resultado en superficie ha consistido en desecación y en el subsuelo abatimiento de los niveles en los acuíferos. Todos los estudios reconocen que en la cuenca del Alto Lerma existen dos acuíferos: el del valle de Ixtlahuaca al norte y el del valle de Toluca al sur.

Mas adelante en la misma referencia se hace para la misma subcuenca de Almoloya el balance de agua subterránea (Cuadro 4.2, en millones de metros cúbicos).

Cuadro 4.2. Balance hídrico en el subsuelo

Volumen para infiltrar y percolar	Extracciones por pozos	Volumen de agua que recarga al acuífero
145.54	117.30	28.23

Tratando el tema del agua subterránea, el Atlas Ecológico (Aguilar 1997), basándose en información de las dependencias abocadas al tema del agua, determina que: "Casi la totalidad del agua subterránea en la cuenca puede considerarse como agua meteórica, proveniente de la precipitación, pues en ningún estudio se refieren al ingreso subterráneo de agua proveniente de cuencas vecinas".

La misma referencia (Aguilar, 1997) explica que en 1958 el Gobierno del Distrito Federal contrató un estudio del geohidrólogo A. Loehnberg, quien recomendó "que en un lapso de 10 años se abatieran los niveles freáticos entre 5 y 6 m con el fin de evitar las pérdidas por evaporación, estimadas en 90-150 Mm^3. Lo anterior reduciría las áreas pantanosas y permitiría incorporar esas tierras a la agricultura; así también se aconsejó iniciar un

programa de recarga artificial de la cuenca y los estudios para conocer el funcionamiento del acuífero. Desafortunadamente lo único que se llevó a cabo fue el incremento de los volúmenes explotados..."

En el Atlas Ecológico (Franco,1993) se comenta que las transmisibilidades del acuífero varían de media a alta. "Al oriente y norte, correspondiente al pie de la Sierra de Las Cruces, alcanza hasta 148 x 10^{-3} m^2/seg; en el área de Lerma de 11 x 10^{-3}; en el área de Almoloya los valores son más altos, alcanzan 1286 y 257 x 10^{-3} m^2/seg. En la parte central varía de 1 a 5 x 10^{-3} m^2/seg. En cuanto al coeficiente de almacenamiento, este varía de 0.003 a 0.009."

En el Atlas Ecológico (Aguilar, 1997) se dice que, en el lapso 1970-1986, la evolución del nivel piezométrico y con ello el comportamiento del agua subterránea, varía desde 0 hasta –8 m, para períodos de cuatro años. Predominan los abatimientos de –1 y –2 m para los mismos períodos. Se encuentrn los máximos abatimientos en las proximidades de la ciudad de Toluca y su corredor industrial (en el límite norte de la zona de estudio). Se menciona también que: "los valores de abatimiento mínimos o nulos para el lapso 1970-1986 se ubican generalmente en las zonas de recarga, es decir en las estribaciones del complejo montañoso situado en la parte occidental" es decir, en el área del volcán Nevado de Toluca.

En la Figura 4.9 se presenta un mapa de la profundidad del nivel piezométrico, que aparece en la mencionada referencia, con fecha 1991. Este mismo mapa de configuración aparece en Lesser (1992), de donde debió ser tomada. Otros mapas de la misma referencia muestran las elevaciones del nivel piezométrico y curvas de igual variación en el nivel piezométrico.

Información sobre el acuífero se encuentra en estudios posteriores, como Basin (1993) y en el estudio más reciente, elaborado por Unitecnia (1996). Los mapas de configuraciones señalan, con valores más actuales, similares características en la evolución del acuífero.

En Lesser (1992) se agrega la interpretación de que el agua, al precipitar sobre las montañas y el valle, en una proporción se dirige al acuífero, en donde se tienen dos flujos subterráneos, uno que va del Oeste hacia el Este y Noreste hasta el borde oriental del valle y otro de dirección contraria, desde la Sierra de Las Cruces hacia el área intermedia, al Oeste, que denomina de las antiguas lagunas. En este estudio se afirma que la principal recarga ocurre en las elevaciones topográficas desde las cuales el flujo se dirige hacia el valle.

En la actualidad, en las dichas porciones bajas de la zona, aparecen aún algunos cuerpos de agua de inundación, en la época de lluvias. Es más, con el fin de secar los terrenos y permitir los cultivos, se tienen baterías de pozos para abatir el nivel freático. Sin embargo es interesante el comentario que aparece en el Atlas Ecológico (Aguilar, 1997): "Lo cual significa que lejos de haber recarga de los acuíferos está existiendo una extracción de las reservas de agua subterránea existente; esto resulta obvio, al considerar que es en esta zona donde se tienen las principales baterías de pozos de extracción que abastecen localmente y exportan al D.F."

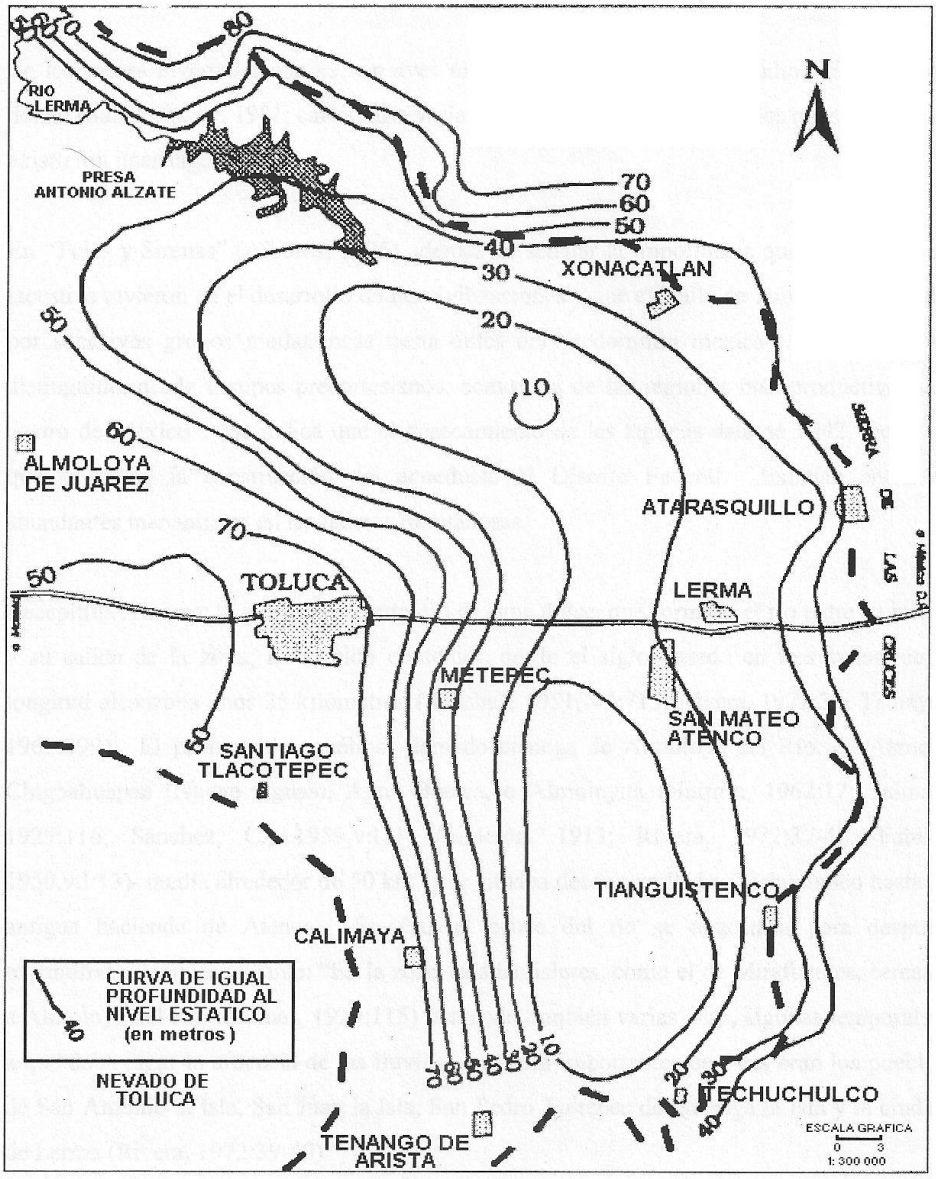


Figura 4.9. Profundidad al nivel estático en 1991 (en metros)

4.2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En los meses invernales aún se ven aves migratorias en la zona de estudio. Es el paraje donde (Sabalcagaray, 1981; cartografía varia; testimonios) se sabe, hasta los años cincuenta, existieron unas lagunas.

En "Tules y Sirenas" (Albores, 1995) además de señalar la importancia que los ambientes lacustres tuvieron en el desarrollo de las civilizaciones y que el Valle de Toluca, "dominado por sucesivos grupos matlatzincas hasta antes del predominio mexica", el cual "se ha distinguido, desde tiempos precortesianos, como una de las regiones más productivas del centro de México". Se indica que el desecamiento de las lagunas data de 1942, fecha en que se inicia la construcción del acueducto al Distrito Federal. Existían entonces abundantes manantiales en las laderas montañosas.

Recapitula Albores: "La laguna o complejo de agua dulce, que formaba el río entre su inicio y su salida de la zona, había sido contenido desde el siglo pasado en tres vasos, cuya longitud alcanzaba unos 25 kilómetros (Sánchez, 1951, v.I:715; Rivera, 1972:39; Tamayo, 1962:399). El primero de aquéllos -llamado ciénega de Almoloya del Río, de Atenco, Chignahuapan (Nueve Aguas), Agua Blanca, o Almoloyita (Huitrón, 1962:17; Salinas, 1929:116; Sánchez, C., 1959,v:I71; Calderón, 1913; Rivera, 1972:37-40; Fabila, 1950,v.I:13)- medía alrededor de 50 km^2 y se situaba desde San Pedro Techuchulco hasta la antigua hacienda de Atenco. En ésta el cauce del río se angostaba para después expandirse..." y más adelante: "En la zona existían islotes, como el de Mirafuentes, cercano a Almoloya del Río (Salinas, 1929;115) habiendo también varias islas, algunas temporales, a que daba lugar la afuencia de las lluvias. Las más importantes de éstas eran los pueblos de San Antonio la Isla, San Juan la Isla, San Pedro Tultepec de Quiroga la Isla y la ciudad de Lerma (Rivera, 1972:39-40)."

En Albores (1995) también se encuentra la cita de una misiva enviada al Secretario Federal de Agricultura y Fomento por los síndicos de Almoloya del Río, Santa Cruz Atizapán,

Santa María Rayón, San Antonio la Isla y San Mateo Texcalyacac, en la cual se señala: "De llevarse adelante la pretendida desecación de la laguna de Lerma se nos ocasionaría gravísimos perjuicios por la desaparición de una importantísima fuente de riqueza pública, consistente en la explotación de los recursos de pesca, caza y productos del tule existente en el lago, así como los forrajes que son indispensables para el sostenimiento de los semovientes empleados en las labores de los pequeños terrenos que poseemos".

En la misma referencia (p.146) se expresa que "Hacia 1918, en la parte ribereña del barrio de San Juan, del mismo municipio, sus habitantes pescaban acocil, carpa, pescado blanco, pescado negro, atepocate, cazaban ranas y patos silvestres, existiendo además zacateros que cortaban pastura, tuleros y cortadores de palma, y algunos chinamperos. En todo el barrio cada familia tenía dos o tres cabezas de ganado."

En la página 148 cita Albores (1995) a uno de los lugareños de San Mateo Atenco; "Desde pequeño empecé a trabajar en la laguna; sacaba yo yerbas para que mi padre las fuera a vender...lo mismo papas de agua y chicamoles. El sábado me ponía a cortar pastura para las cuatro vacas que teníamos en mi casa; ocupaba yo cuatro días en traer la pastura. A los diez y siete años fui jornalero...Ya de adulto dedicaba yo un día para traer tule y palma, y otro día para cortar chicamoles y papas de agua."

En las cartas topográficas se puede apreciar la pendiente de los niveles del terreno en la zona, que en su porción central es casi plana, señalando las zonas que en algún tiempo estuvieron inundadas.

La toponimia de los lugares (Atlas Histórico y Cartográfico del Estado de México, 1993) da también idea del tipo de paraje; Almoloya procede de *Almoloyán* que significa lugar de donde mana el agua. *Atl*: agua, *moloni*: manar; *yan*: lugar.

En el plano del Estado de México presentado en el Atlas Histórico y Cartográfico del Estado de México (1993), levantado en los años 1828-1829 por la Comisión Científica a

cargo del perito facultativo en minas coronel de Ingenieros Tomás Ramón del Moral, pueden apreciarse los dos cuerpos de lagunas que dan origen al río Lerma. El tamaño de los cuerpos de agua es de mayor extensión que los de la cuenca del Valle de México.

De acuerdo con Albores (1995), el proyecto para desecar lo que se llamaba la ciénaga de Lerma, que "se extendía desde el inicio de las colinas meridionales de la zona, hasta los llanos del norte de San Bartolo y Buenavista."

En 1879 se iniciaron algunas obras con el fin de dar salida a las aguas, que causaban inundaciones anuales. Al final "logró represarse la laguna en tres vasos que quedaron divididos por los puentes de Atenco, San Mateo Atenco y San Bartolo."

En aspectos de toponimia sobre estas lagunas existen algunas discrepancias. En un plano elaborado por la Residencia General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1986) presenta un esquema de cuatro cuerpos de agua diferenciados, de sur a norte:

- Laguna de Almoloya 3,171 has.
- Laguna de Tultepec 2,638 has.
- Laguna de Chignahuapan 1,096 has.
- Laguna de San Bartolo 2,465 has.

probablemente deducidas de la morfología, tipos de suelos y curvas de nivel de las cartas topográficas, aunque un plano (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1969) de la zona señala tres cuerpos de agua, de sur a norte, con extensiones de: 2,900, 4,000 y 3,200 hectáreas respectivamente. En Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A. (1984) se menciona para Almoloya 3,300 has., para Tlaltizapán 1,900 y para San Bartolo 3,400 has.; haciendo la salvedad de que estas superficies son en época de lluvias y que en estiaje son respectivamente: 200, 110 y 300 hectáreas cada una.

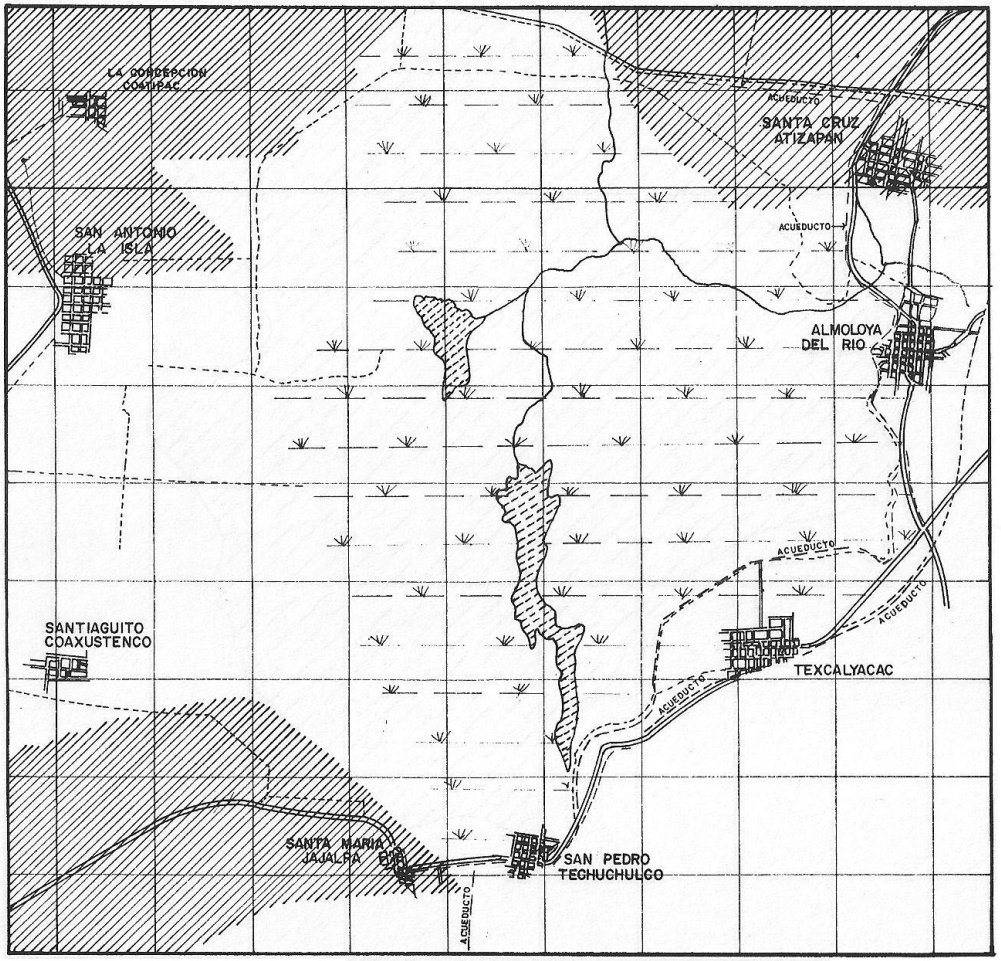
El aspecto -impreciso por el tipo de cartografía- de la zona antes del año 1958 se muestra en el CROQUIS No. 1. Los datos más antiguos son imprecisos, debido posiblemente a la característica: cuerpo de agua y a la fluctuación natural que tiene su borde, por las variaciones estacionales. Un ejemplo de ello es el croquis de Calimaya (1927).

En el Atlas Ecológico (1993) se dice que hasta 1951 un bien integrado sistema lagunar se alimentaba por varios manantiales de piedemonte, como los de Almoloya, Texcaltengo y Alta Empresa. Estos cuerpos de agua tenían 30 km de largo y se conectaban por cortos canales que unían a la laguna de Chignahuapan o Almoloya con la de Chimaliapan, en Lerma y San Bartolomé Otzolotepec. En esta área nacía el río Lerma. El mismo Atlas refiere que al concluirse en 1970 las obras de 230 pozos y 170 km de acueductos que aportan algo más de 14 m^3/s al Distrito Federal se modificaron las condiciones.

En la Carta SRH-DDF (CROQUIS No. 2) de 1969 se representa una porción de lo que posiblemente sea una copia de una versión de trabajo en uso en la dependencia (Secretaría de Recursos Hidráulicos, Departamento del Distrito Federal, Cuenca Alta del Río Lerma, 1969) durante algunos años y basada principalmente en las curvas de nivel (isohipsas) de la región de la primera laguna.

El proyecto para llevar agua a la ciudad de México se inició en el año de 1942 y se concluyó en 1951, con el inicio del bombeo a la ciudad de México inaugurado por el presidente Miguel Alemán, con 2,500 litros por segundo.

En la cartografía de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, SRH (1969) se nota un descenso en el nivel piezométrico para el período comprendido entre el 2-VII-66 al 3-II-70 que oscila entre -2 m en la porción norte del área correspondiente a la laguna de Lerma a -8 m, con respecto al nivel original del manto freático, en los terrenos ubicados en el borde sur de la zona. Otro plano, de evolución piezométrica a 150.0 m de profundidad, durante el período mayo a septiembre de 1969 presenta un valor de abatimiento de -1.00 para la porción norte y -0.50 m para la porción sur. En ambos planos se marcan las zonas inundadas.



CROQUIS No. 1

ZONA DE LA LAGUNA
EN LA CARTA **SRH** DE 1958

ZONA DE INUNDACION

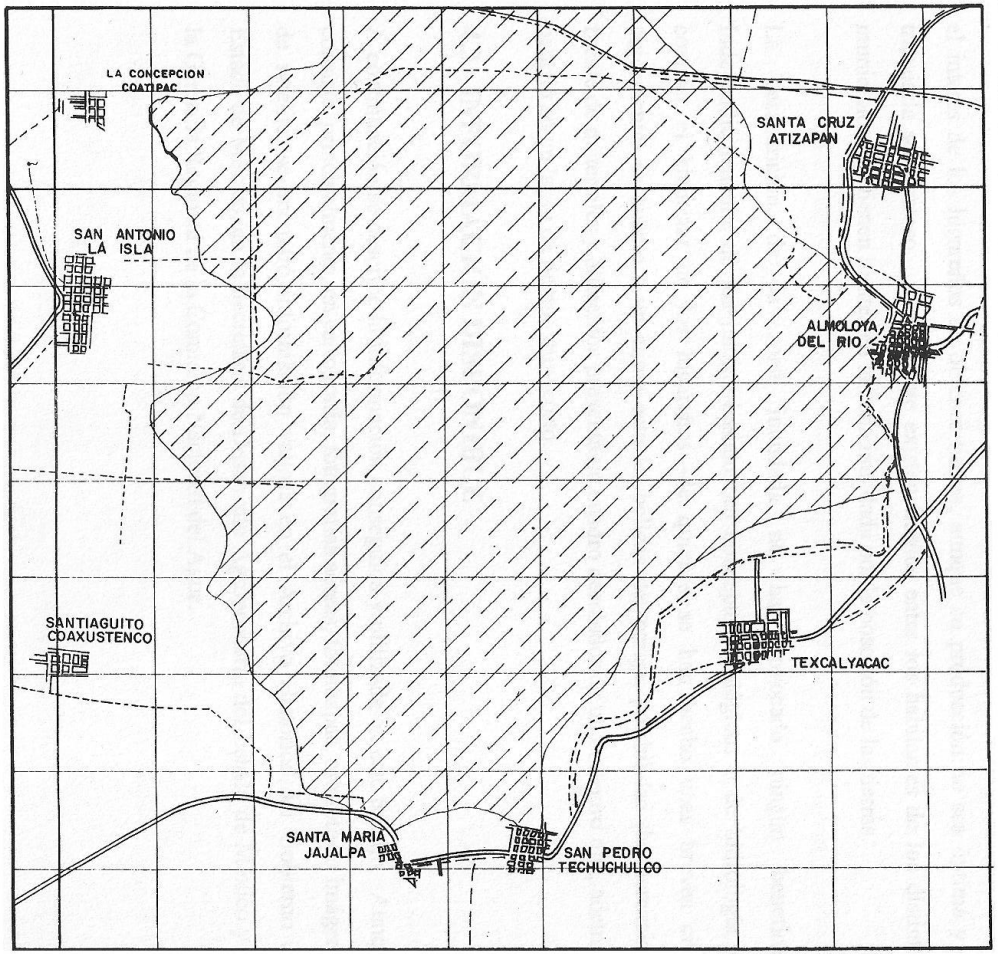
CUERPOS DE AGUA

ZONA AGRICOLA

ESCALA 1:50 000

0 .5 1 2

KILOMETROS



CROQUIS No. 2

ZONA DE LA LAGUNA

EN LA CARTA **SRH-DDF**

1969

ZONA INUNDADA

ESCALA 1:50000

0 .5 1 2

KILOMETROS

Como muestra la información revisada, en la zona de estudio se ha producido una disminución de caudales, desecación y finalmente, pérdida de un ecosistema dotado de rica fauna y flora que permitía un desarrollo económico equilibrado.

Es interesante señalar que la desaparición de las lagunas data del inicio de los años 50 y es un fenómeno que está ligado a la extracción de agua con el fin de canalizarla hacia el Valle de México. En un principio se bombeó hacia el exterior de la cuenca de agua superficial y posteriormente agua del subsuelo. En una última etapa el proceso se ha visto acelerado por el interés de los lugareños de obtener tierras, aunque su producción no sea óptima y el trabajarla sea costoso. Actualmente existen litigios entre los habitantes de los distintos municipios que tienen límites en la zona inundada por la posesión de las tierras.

La desaparición de la zona inundada no ha provocado ningún beneficio. Independientemente de los juicios basados en conceptos ecológicos o de hidrología, el conocer el bienestar de los lugareños -de quienes se han hecho unas breves citas unicamente- en cuanto a un clima estable, belleza del paraje, posibilidad de recreación, fuente de materiales y alimentos presenta un cuadro desolador de un deterioro que, además, ocurrió en un lapso de tiempo muy corto.

4.3. INFORMACIÓN DISPONIBLE

A continuación se describe la información conseguida y utilizada en este trabajo. Aunque consiste, principalmente, en cartografía, fotografías aéreas, fotomapas, ortofotos e imágenes de satélite, se encontró información valiosa en el Archivo Histórico del Gobierno del Estado de México, en la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México y en la Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua.

4.3.1. CARTOGRAFÍA

El área de estudio fue definida en las cuatro cartas INEGI escala 1:50,000: E14A37, E114A47, E14A38 y A14A48 y en la carta Hidrológica de Aguas Superficiales, escala 1:250,000 (E14-2). Posteriormente, se usaron también las cartas de Capacidad de Uso de Suelo (E14A48) y la Edafológica (E14A 48), ambas a escala 1:50,000. Se contó igualmente, con las cartas INEGI geológicas a escalas 1:50,000 y 1:250,000 (E14-2). También las de Climas y de Suelos a escala 1:500,000. Se dispuso también de alguna cartografía procedente del Museo Histórico del Estado de México, donde se encontraron planos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Se buscó información histórica y de fotografía aérea en diferentes bibliotecas, entre ellas las del Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Gobierno del Estado de México (IIINGECGEM), de la Regional Centro Sur del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, en la delegación de la Comisión Nacional del Agua, en el archivo histórico de la empresa AEROFOTO, que administra la compañía Ingenieros Civiles Asociados (ICA) y en el Museo de Historia ubicado en la capital del Estado de México.

En el Museo Estatal de Historia se obtuvieron diversos planos, relacionados con el proceso de perforación y establecimiento de acueductos, de la década de los años 60 y 70 en donde puede observarse la zona.

Se visitó la zona, en especial el ayuntamiento del poblado San Antonio de la Isla. Al respecto en dicha localidad los pobladores comentan que el embarcadero estaba a las afueras del pueblo y es curioso observar en el frontispicio de la iglesia dos columnas con forma de sirenas y otras figuras de reminiscencias acuáticas. Todo indica la liga de la vida de la comunidadad a un cuerpo de agua.

4.3.2. FOTOMAPAS

Los fotomapas son a escala 1:20,000 y fueron elaborados por la misma dependencia en base a un vuelo a escala 1:80,000 de febrero de 1983. Los fotomapas contienen información fotográfica, como fue descrito anteriormente, por lo que fue posible, además de usarlos para vaciar información -ya rectificada, o sea sin deformaciones- extraer información del mencionado año. Los fotomapas están referenciados al elipsoide de Clarke de 1966 y al Datum norteamericano de 1927. Su proyección es la Transversa de Mercator.

4.3.3. FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Es posible encontrar fotos aéreas de la zona, y en general del Estado en el IIINGECGEM y en empresas como Aerofoto, aunque estas dependencias cuentan unicamente con vuelos recientes.

En el INEGI se encontraron los vuelos más antiguos, a partir de 1970. Se dispuso de los siguientes:

- Vuelo escala 1:25,000
  realizado con una cámara UA6-381 efectuado alrededor de octubre de 1970.

- Vuelo escala 1:50,000
  efectuado entre noviembre de 1970 a enero de 1975.

- Vuelo escala 1:50,000
  efectuado en enero de 1971 con una cámara UA6-388.

4.3.4. ORTOFOTOS

En el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Gobierno del Estado de México se obtuvieron las siguientes copias:

- cuatro ortofotos escala 1:10,000, de febrero de 1983;

- cuatro ortofotos escala 1:5,000, del año 1989;

- cuatro ampliaciones (no totalmente rectificadas) escala 1:5,000 tomadas en el año 1995.

4.3.5. IMÁGENES DE SATÉLITE

Se pudo disponer de cuatro imágenes fotográficas escala 1:1 000 000 de la serie del satélite Landsat, instrumento MSS de fechas:

- 8 de febrero de 1973
- 3 de abril de 1973
- 27 de marzo de 1976
- 24 de enero de 1981

Todas estas se escogieron en la Banda 7, que como se expuso anteriormente, es la que tiene mejor definición para detectar cuerpos de agua por tratarse de una Banda infrarroja.

A través de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del Estado de México se intentó conseguir algunas imágenes SPOT sin éxito. Se obtuvieron del INEGI dos porciones de imágenes digitales a través de la Dirección General de Geografía.

Estas subimágenes, procedentes del Multispectral Scanner (MSS), instrumento ya descrito en el capítulo respectivo, del satélite LANDSAT comprenden las cuatro primeras bandas (1, 2, 3, 4) y ambas están compuestas de 1024 elementos en 1024 líneas, lo que da un área aproximada de la imagen de 5,776 km^2. Abarcan desde las presas Alzate e Ignacio Ramírez del río Lerma, al norte de la ciudad de Toluca, hasta la totalidad del Nevado de Toluca y las sierras que al sur y oriente cierran la cuenca y la zona de estudio.

La más antigua, del LANDSAT-1 (DL 42, notación INEGI), es del 11 de diciembre de 1973 y la más reciente es del 19 de diciembre de 1980 (DLC 42, notación INEGI). Ambas identificables como procedentes de las imágenes principales 28/47 en el sistema de coordenadas del Banco Mundial.

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo III, los satélites LANDSAT, recorren una órbita polar de norte a sur. Por lo tanto el barrido en el que captan información del terreno tiene una dirección oriente-pontiente. La presentación en el monitor, al igual que el procesado, se realizan a partir de la primera línea (situada al extremo superior) de la imagen, que corresponde al norte geográfico. Es pues, normal que en todas las imágenes el norte se localice en la porción superior, siendo el barrido, que de ordinario no se aprecia en las impresiones, en dirección este-oeste.

En la Figura 4.10 se muestra la Banda 1 (porción visible azul-amarillo) de la imagen 1973. Al comparar la imagen con la carta mostrada en la Figura 4.2 puede identificarse la forma del volcán Nevado de Toluca cerca del borde inferior (sur) izquierdo; las sierra Nahuatlaca-Matlazinca al oeste del volcán y en el borde derecho (oeste) las sierras del Ajusco y de Las cruces. Los cuerpos montañosos se manifiestan por su textura y tonalidad. Con un poco de observación puede localizarse la ciudad de Toluca y parte de la infraestructura de carreteras (alineamientos). Al centro, aproximadamente, se localiza la primera laguna y hacia el norte las líneas que señalan el cauce del río Lerma, con las presas Ignacio Ramírez y Antonio Alzate, ésta ubicada cerca del borde superior izquierdo (norte).

Las dificultades de encontrar imágenes se consideran meramente coyunturales. La oportunidad y valor de la información que suministran las tomas de satélite es notable. El procesamiento que se presenta en este trabajo es igualmente válido.

Figura 4.10. Banda 1 de la imagen 1973

La discusión de los párrafos anteriores demuestra que la información tomada desde el aire y el espacio es comparable. Además, en el tiempo, se ha visto que corresponden a la misma época del año. Todas las fotos aéreas, ortofotos así como la cartografía elaborada a partir de ellas, así como las imágenes, fueron tomadas durante el intervalo de tiempo entre los meses de diciembre y marzo. Este dato se nos ha dado en la fecha de las tomas, pero de no haber sido así, pudo haberse inferido, a partir de las condiciones de nubosidad. Fuera del intervalo mencionado de meses, la bruma o las nubes impiden la captación de información del terreno.

4.4. ANALISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA

De acuerdo con Salama et al. (1994), la recarga, transmisión y descarga de acuíferos son controlados por la geomorfología de la cuenca, su geología y los patrones estructurales de la región. El mismo autor comenta más adelante que grandes áreas pueden ser evaluadas rápidamente a partir de fotografías aéreas o imágenes LANDSAT.

La geomorfología influye por el hecho de que el agua después de ser precipitada fluye de los terrenos altos a los bajos en la superficie y bajo de ella; las cárcavas y cauces interrumpen dicho flujo y lo canalizan, fenómeno que es provocado, aunque con alguna diferencia, por las fallas y discontinuidades de las formaciones geológicas.

Los materiales que constituyen las formaciones geológicas son definitivos en lo referente a su capacidad de transmitir o contener el agua, es decir los valores de su permeabilidad y porosidad.

Se realizó una revisión de información bibliográfica. En el Cuadro 4.3 se muestran los datos de porosidad y permeabilidad que señalan Linsley et al. (1977).

Cuadro 4.3. Valores de porosidad y permeabilidad de acuerdo a Linsley et al. (1977).

MATERIAL	POROSIDAD (%)	PERMEABILIDAD m^3/día/m^2
Arcilla	45	0.0004
Arena	35	41.00
Grava	25	4100.00
Grava y arena	20	410.00
Arenisca	15	4.10
Calizas densas y esquistos	5	0.041
Cuarcito y granito	1	0.0004

Bogomolov (1970) da los siguientes datos de porosidad (%):

Arenas diversas (cuaternarias, glaciales)	30.0-32.0
Vaso de pantano	38.0-40.0

Campos (1992) describe, al analizar el proceso de escorrentía, complementario al de infiltración, un parámetro de velocidad de infiltración y un indicador del potencial de escurrimiento del suelo que sirve de base a una clasificación del *Soil Conservation Service*, en cuatro grupos hidrológicos de suelos (A, B, C, D) que suministra factores que conducen a estimaciones del mencionado parámetro.

Los suelos o formaciones que constituyen las áreas de recarga o descarga corresponderán terrenos que contengan grava y gravas y arenas. Además deben considerarse las superficies donde existen formaciones fracturadas. La presencia de manantiales y humedad abundante permitirán señalar la zona de descarga, mientras que la zona de recarga carecerá de manantiales e hidrológicamente se comportará como un sumidero.

Los materiales existentes en las áreas de recarga/descarga, que presentan una respuesta definida en su superficie al espectro electromagnético, llámese albedo, brillo o coloración, tendrán, además, probablemente, la característica adicional de la presencia de humedad. Esta podría ser definitivamente detectada mediante sensores operando en bandas de microondas- o apreciada como una tonalidad más oscura (debida a menor respuesta de energía por la absorción del agua) en las bandas del visible o infrarrojo.

La topografía y el régimen hidrológico, son apreciables mediante la identificación de las geoformas, mediante las técnicas de fotointerpretación y fotogrametría.

El uso de suelo diferencia las zonas menos permeables, como las urbanas, de las de mayor capacidad de infiltración, por ejemplo bosques, pero indiscutiblemente, el factor, indicador básico, es la vegetación, cuyo tipo, vigor, tamaño y distribución delata las condiciones y procesos que tienen lugar en el terreno.

4.5. ESCALA Y REFERENCIA

Oportunamente se trató brevemente en el Capítulo II el problema que presenta la forma de la Tierra y su proyección plana para que pueda manejarse en papel.

El diferente origen de la información que debe usarse en un proyecto como el que se presenta, que se ve aumentado con las tomas desde satélite, que implican también diferentes formatos, tamaño de elementos y escalas. El primer problema a resolver es el acoplamiento de este tipo de información para que sea compatible y por lo tanto comparable.

El escoger la escala de presentación fue uno de los aspectos que se planteó desde el principio del estudio. La escala 1:50,000 tiene la ventaja de ser oficial, de acuerdo a la Ley de Información Estadística y Geográfica. Además es conveniente, ya que se encuentra en dicha escala parte de la información disponible, vuelos y cartografía. El resto de la información obtenida se encontraba a escalas más grandes, 1:5,000, 1:10,000 o más pequeñas, como 1:250,000. Las escalas más pequeñas, como 1:1000 000 dan una información muy regional.

La presentación 1:50,000 demostró, en el caso de este estudio, ser la más práctica, por varias razones, como es la cobertura, nivel de detalle alcanzado y además permite la visualización de la información central de la zona, en tamaño carta aproximadamente.

La referencia empleada es la que marca la cartografía INEGI de las fechas utilizadas: cuadrícula y proyección UTM, basada en el esferoide de Clarke de 1866. El datum horizontal es el Norteamericano de 1927.

Esta presentación se encuentra reflejada en la serie de Croquis que se presentan en este capítulo y en el siguiente.

La escala de los resultados de salida de microcomputador es variable; en este caso se ha perseguido más bien presentar la zona completa en una sola hoja con fines de mayor facilidad de manejo.

4.6. PROCEDIMIENTOS

Un primer paso consistió en revisar la documentación referente a las tecnologías. Se acopió y revisó información sobre la tecnología de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica.

Posteriormente se procedió a la búsqueda de antecedentes de trabajos aplicados a hidrogología y geohidrología. Una de las primeras dificultades encontradas fue la de definir una zona de recarga o de descarga y su aspecto en superficie.

Un paso muy importante ha sido la búsqueda de materiales y su adquisición. En esto se tuvieron muchas dificultades, como se ha insinuado en otros capítulos de esta investigación. En nuestro país lamentablemente no se ha tenido el cuidado de guardar información histórica, por lo que lotes de fotografías aéreas y mapas han desaparecido. Se procedió a recopilar información cartográfica, de fotografía aérea, y de imágenes de satélite de la zona.

En cuanto a las imágenes de satélite, hay que señalar que, hasta cierta fecha eran prácticamente de libre circulación y bajo costo, pero se ha entrado en un período, como se ha mencionado en el capítulo III, en que su comercialización ha pasado a empresas privadas. Esto ha incrementado sustancialmente el costo de una imagen, además de que la empresa comercializadora impone cláusulas prohibiendo el uso de la imagen fuera del ámbito del comprador original. Esta situación hizo lenta la adquisición de materiales, por la búsqueda e intentos fallidos.

En cuanto a los sistemas de procesamiento, afortunadamente los avances en microcomputación y la aparición de sistemas académicos y de bajo precio, han hecho posible los procesamientos de imágenes que hace algunos años se podían realizar únicamente en organizaciones provistas de grandes computadoras (*mainframes*).

Las fotografías se examinaron mediante lente de aumento y estereoscopio con el fin de observar aspectos de tercera dimensión (altura de los accidentes geográficos). Es posible apreciar los diferentes accidentes geográficos y concretamente la zona inundada y las zonas inundables. Estas se marcaron con un lápiz de color. Al analizar las fotografías aéreas de la zona de estudio se tomaron en cuenta las recomendaciones de los diferentes manuales, que para la fotointerpretación señalan:

- El uso del centro de la fotografía para evitar la principal causa de aberración geométrica.

- Escoger fotos de plataforma estable con el eje vertical dirigido exactamente en la vertical.

- Terreno plano, con elevaciones poco pronunciadas y además que la escala del levantamiento no implique correcciones de tipo geodésico (curvatura de la Tierra).

Los ortofotos se analizaron y su interpretación se efectuó de la misma manera que los planos o cartas. La información de todos estos materiales se vació en una serie de croquis.

En la elaboración de los croquis se emplearon precisamente los fotomapas. Este material es útil ya que es el medio para referir, apoyándose en algunos puntos del terreno, la información de las fotos aéreas y vaciar la información en el lugar que le corresponde (Figura 4.11). Mediante los fotomapas se obvia el uso de aparatos rectificadores y restituidores.

Un paso subsecuente consistió en obtener los sistemas de procesamiento así como sus autorizaciones. En seguida se procedió a efectuar las adaptaciones y configuraciones para que funcionaran en los equipos disponibles.

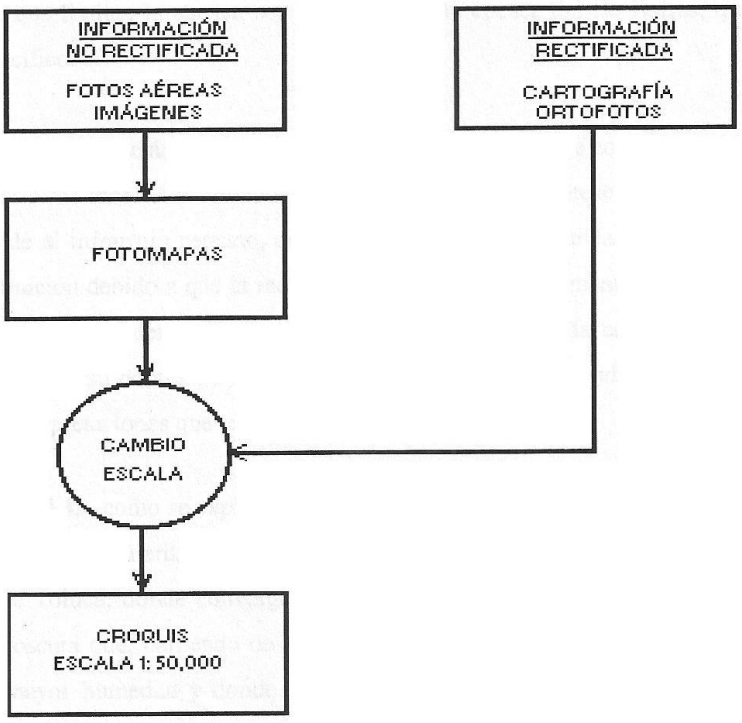


Figura 4.11. Esquema que muestra la secuencia de vaciado de datos

De las imágenes facilitadas por el INEGI, ya descritas, de dimensión 1024 x 1024 se extrajo una subimagen que cubriera la zona de estudio. Esta subimagen de trabajo, de menor dimensión, después de varios intentos se dejó en un rectángulo de 300 x 700 (210,000 elementos). Se obtuvieron subimágenes similares, a partir de las imágenes de las dos fechas, de manera que se abarcara la zona en estudio. Esta operación de corte o extracción de subimagen, es también fácil de realizar en los dos sistemas de procesamiento empleados, SPIPRII e IDRISI.

El trabajar sobre una subimagen permitió ocupar menos espacio de almacenamiento y efectuar más rápidamente los procesos. Además de esta manera se eliminaron la mayor parte de nubosidades (zonas saturadas), como las que aparecen en la imagen de 1973, denominada LAN73, en la que se notan algunos cuerpos nubosos en las zonas altas localizadas en la porción inferior derecha, que corresponde a las montañas localizadas al sur y oriente, que limitan la cuenca con los valles de la cuenca del río Balsas, que drenan al océano Pacífico.

Esta subimagen, el rectángulo de 700 x 300 elementos, abarca la zona, desde el Nevado de Toluca hasta las montañas orientales. En la Figura 4.12 se presenta la Banda 4, la cual corresponde al infrarrojo cercano, de esta subimagen. Esta banda presenta, de ordinario, mejor definición debido a que la radiación infrarroja tiene una menor absorción en su paso por la atmósfera. Además tiene una correlación muy pequeña con respecto a las otras bandas, es decir su contenido de información es grande. La banda 4 se ha empleado en todas las interpretaciones que se describen en el siguiente capítulo.

En la Figura 4.13, como se explicó anteriormente, el norte se localiza en la parte superior y el occidente a la izquierda, por lo que puede observarse en el costado izquierdo el volcán Nevado de Toluca, donde convergen las líneas de drenaje. En el centro se aprecia una tonalidad oscura que, partiendo de la porción sur se prolonga hacia el norte, señalando la zona de mayor humedad y donde se encontraba, todavía a mediados de siglo, la zona lagunar. En la actualidad el cuerpo de agua puede observarse ligeramente abajo (hacia el sur) del centro de la subimagen.

Figura 4.12. Subimagen 1973 en la banda 4

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en la investigación emprendida en la zona de estudio mediante la aplicación de las disciplinas enunciadas en los capítulos anteriores.

Se realiza un análisis del contenido de los diferentes materiales de trabajo, en el mismo orden seguido en su descripción, realizada en el capítulo anterior, para a continuación exponer los resultados obtenidos, igualmente para cada uno de los mencionados materiales de trabajo utilizados en el desarrollo de la investigación.

Al final del capítulo se presenta en una breve reseña, las principales alteraciones ocurridas en la zona de estudio, de acuerdo con el análisis realizado.

5.2. EXAMEN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

5.2.1. CARTOGRAFÍA

Se analizó a detalle la zona baja donde se encuentran aún cuerpos de agua de inundación y existieron unas lagunas (Sabalcagaray, 1981), parajes donde suelen ocurrir con mayor intensidad los procesos geohidrológicos de carga y descarga (Capítulo III y Capítulo IV).

Dadas las dificultades en la obtención de información, de la zona se consiguieron unicamente levantamientos que abarcan desde el año 1970 hasta 1995, como se ha expuesto en el Capítulo IV.

Se visitaron algunas de las localidades que bordeaban a las antiguas lagunas y aunque existe alguna memoria de las mismas entre los habitantes actuales, algunos nombres que denuncian los antecedentes acuáticos, tal como calle "del embarcadero" y motivos alusivos, tales como sirenas y conchas en el frontispicio de la iglesia principal de San Antonio La Isla, se concluye que la documentación impresa es muy escasa.

Aunque en la mapoteca del Museo de Historia del Estado de México se encontraron referencias cartográficas más antiguas que la Carta de Uso de Suelo editada por Luis M. Tamayo para la S.R.H. en 1958 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1958); la ambigüedad hace a estos documentos prácticamente inútiles. Ocurre que, en algunas cartas, no se dibuja la frontera precisa del cuerpo de agua, sino se indica su presencia por medio de algún símbolo, por lo que es imposible determinar en su límite, si el punto corresponde a la ribera o se encuentra inundado. El área lagunar de la zona en la carta S.R.H. se ha presentado en el Capítulo IV, en el CROQUIS No. 1.

En el CROQUIS No. 2, del mismo capítulo IV, se ha presentado una versión de la superficie cubierta por la primera laguna, tomada de la Carta SRH-DDF de 1969 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, Departamento del Distrito Federal, Cuenca Alta del Río Lerma, 1969).

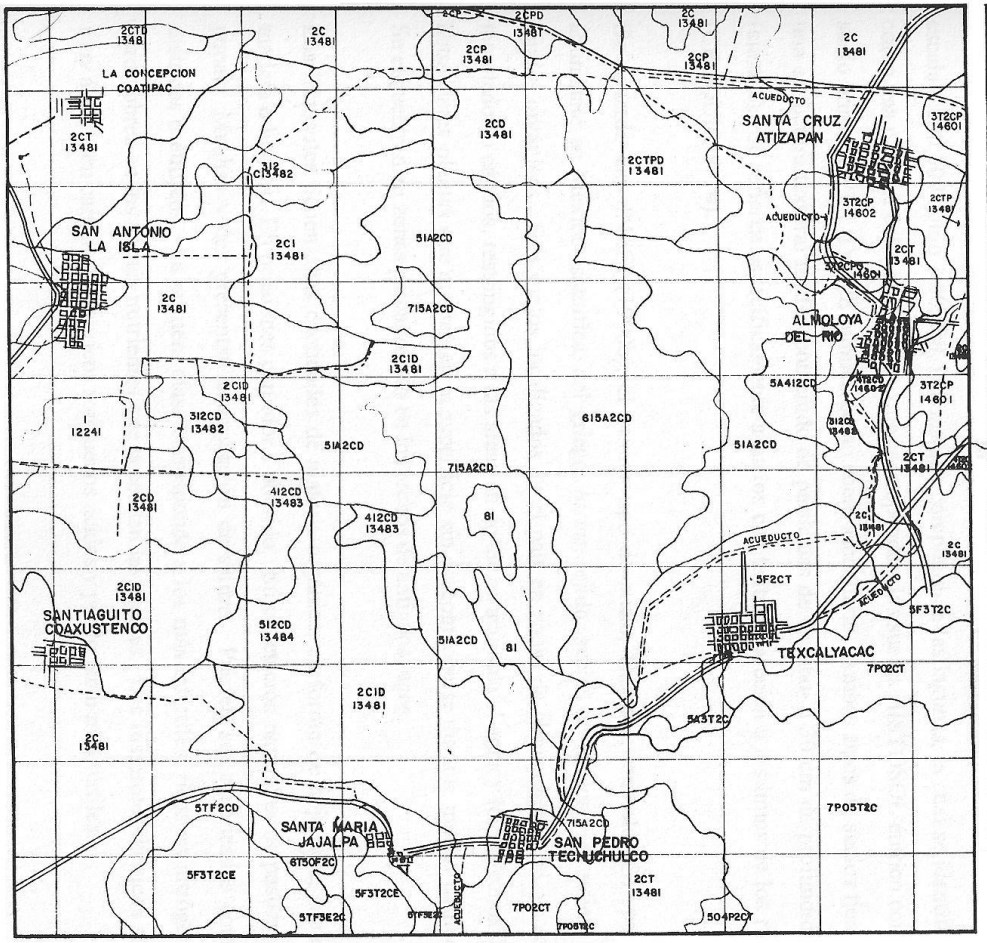
En general, tanto en la cartografía, como en las fotografías aéreas, ortofotos y en la pantalla de la computadora puede efectuarse la definición de la zona que correspondía a la primera laguna, que en algunas referencias se la denomina como de Chignahuapan y en otros como de Lerma.

El uso de suelo que se observa en la zona, de acuerdo con la carta 1:50,000 de INEGI, es principalmente de agricultura y pastizales en el centro de la cuenca, con bosques hacia las partes altas. En la parte central se conservan algunos cuerpos de agua mantenidos por bordos y existen también varias poblaciones, todas localizadas en las porciones del terreno ubicadas a una altura intermedia.

La Carta de Uso Potencial del Suelo, que pertenece al subsistema de Actividades Económicas (INEGI, 1989), proporciona información sobre el potencial agrológico de los suelos y sus alternativas de uso. Esta carta ilustra el estado de los suelos de la zona y de acuerdo con esos datos, el clima, temperatura, altitud, pendiente y el uso que puede dárseles.

En la zona se encuentran prácticamente las ocho clases; la VIII, de uso silvestre, de menor calidad, en las áreas altas, de montañas. En algunas de las partes bajas puede apreciarse la clase I, de todos los usos, pero son las clases intermedias y con limitaciones en el uso las que predominan en la zona.

Esta carta muestra en la zona de las lagunas (CROQUIS No 3), un suelo 6I5A2CD. Los dos primeros signos (6I) indican un suelo afectado por inundaciones (exceso de agua) frecuentes, las cuales permiten el crecimiento de pastos (aprovechamiento de pastizales con limitación moderada). Los siguientes dos caracteres, 5A, limitante de acidez y por lo tanto, indican el grado de sodicidad (mayor de 30 PSI) o salinidad (más de 16 mmhos). Los siguientes caracteres, 2CD, indican que la zona tiene una precipitación entre 700-800 mm y que el drenaje interno corresponde al de suelos arcillosos o pesados, con drenaje lento o deficiente.



CROQUIS No. 3

ZONA DE LA LAGUNA

EN LA CARTA DEL **INEGI**

USO POTENCIAL DEL SUELO

FACTORES LIMITANTES:

DEFICIENCIA DE AGUA	C
PENDIENTE DEL TERRENO	T
PROFUNDIDAD EFECTIVA DEL SUELO	P
OBSTRUCCIONES	O
INUNDACION	I
DRENAJE INTERNO	D
ACIDEZ	A
FIJACION DE FOSFORO	F

UNIDADES DE CAPACIDAD DE SUELOS

INCREMENTO DE LAS LIMITACIONES DEL USO DEL SUELO ↓	CAPACIDAD DE USO DEL SUELO	INCREMENTO EN LA INTENS. DEL USO DEL SUELO →							
		VIDA SILVESTRE	FORESTAL	PRATICULTURA LIMITADA	PRATICULTURA MODERADA	PRATICULTURA INTENSA	AGRICULTURA LIMITADA	AGRICULTURA MODERADA	AGRICULTURA INTENSA
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								

ESCALA 1:50 000

0 .5 1 1.5

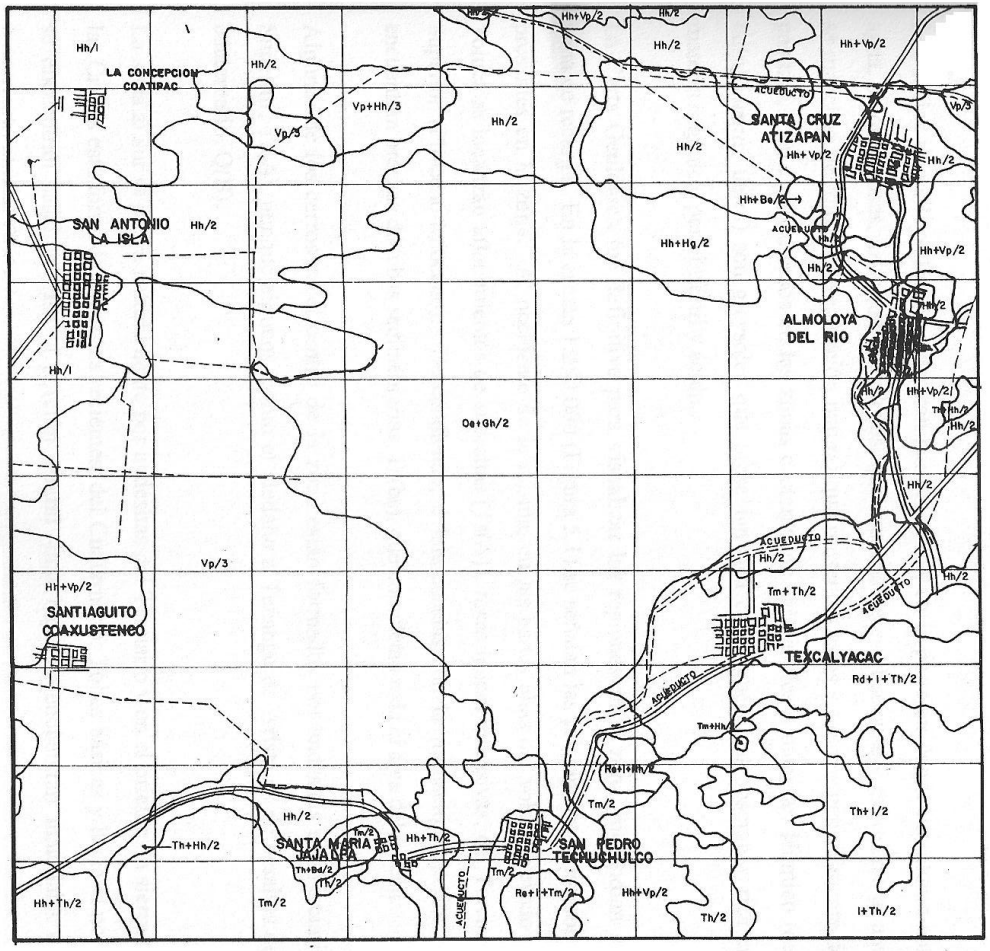
KILOMETROS

Las clases de suelo vecinas presentan mejores características y por lo tanto un suelo con más usos y de mayor calidad, excepto 7I5A2CD que especifica inundaciones muy frecuentes que no permiten actividades de aprovechamiento (pastizales, agricultura). Otras clases que se pueden indentificar son: 8I, que indica suelos inundados casi todo el año, inaprovechables por inundación y la clase 5I que se refiere a inundaciones frecuentes que impiden la agricultura.

Finalmente, se identifica claramente, en los planos INEGI de taxonomía de suelos, tanto a escala 1:500,000 como 1:50,000, la zona que comprendían las lagunas, la cual se identifica como una mancha color gris oscuro, que corresponde a los suelos HISTOSOL éutrico como suelo primario y GLEYSOL húmico como suelo secundario. Ambos tipos de suelos tienen una estructura textural media -contenido de partículas de tamaño- a 30 cm de profundidad (clase 2). Se refieren específicamente a suelos con textura parecida a los limos de los ríos (CROQUIS No. 4).

De acuerdo con INEGI (1990b), el primer tipo de suelo, Histosol, símbolo (O) -poco abundante en México- significa, del griego, *histos*, tejido, suelos de tejidos y se refiere a tejidos orgánicos. Son suelos localizados en el país en zonas de climas húmedos, ya sea templados o cálidos, restringidos a las áreas en donde se acumula el agua y los desechos de abundantes plantas que quedan en la superficie sin descomponerse durante mucho tiempo. Se encuentran en zonas pantanosas o en los lechos de antiguos lagos.

Los histosoles tienen altas cantidades de materia orgánica, en forma de hojarasca, fibras, madera o humus. En ocasiones con olor a podrido. Su vegetación natural es de pastizal o popal. Muchas veces presentan acumulación de salitre. Pueden ser clasificados como dístricos o éutricos. La primera clase corresponde a los más infértiles, ricos en nitrógeno pero pobres en los demás nutrientes que necesitan las plantas. Los histosoles dístricos son muy ácidos, en cambio los éutricos son menos ácidos y por lo tanto más fértiles.



CROQUIS No. 4

ZONA DE LA LAGUNA
EN LA CARTA DEL **INEGI**

TAXONOMIA DE SUELOS.

UNIDADES DE SUELO

H	**FEOZEM**	B	**CAMBISOL**
Hh	HAPLICO	Be	EUTRICO
Hg	GLEYICO	Bd	DISTRICO
V	**VERTISOL**	T	**ANDOSOL**
Vp	PELICO	Th	HUMICO
		Tm	MOLICO
R	**REGOSOL**		
Re	EUTRICO	O	**HISTOSOL**
Rh	HAPLICO	Oe	EUTRICO
Rd	DISTRICO	G	**GLEYSOL**
I	**LITOSOL**	Gh	HUMICO

CLASE TEXTURAL

1 – GRUESA 2 – MEDIA 3 – FINA

Oe+Gh/2 = SUELO PREDOMINANTE+SUELO SECUNDARIO/CLASE TEXTURAL

ESCALA 1:50000

0 .5 1 2

KILOMETROS

El que aparece en la carta de suelos INEGI de la zona es tipo éutrico. Corresponde a suelos menos ácidos y por lo tanto más fértiles que los dístricos. Su símbolo es (Oe).

El suelo secundario que aparece en la zona de las lagunas es Gleysol Húmico (Gh), que proviene del idioma ruso *gley*: suelo pantanoso. De acuerdo con la publicación citada, son suelos que se encuentran en casi todos los climas, en zonas donde se acumula y estanca el agua, cuando menos en la época de lluvias, como las lagunas costeras, o las partes más bajas y planas de los valles y llanuras.

Los suelos tipo Gleysol se caracterizan por presentar, en la parte en donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se manchan de rojo. La vegetación natural que presentan estos suelos es generalmente de pastizal, y en algunos casos en las zonas costeras, de cañaverales o manglar. Húmico (del latín, *humus*, tierra) son gleysoles que presentan una capa superficial obscura y rica en materia orgánica, pero infértil y ácida.

La Carta Geológica fue definitiva para visualizar las regiones en la zona que podían ser zona de recarga. En la escala 1:250,000 (Figura 5.1) se señalan las principales formaciones presentes en la zona: Al occidente de la misma, en las partes altas del volcán Nevado de Toluca se localizan afloramientos de andesitas (Ts(A)), rocas ígneas extrusivas, del Terciario Superior (Plioceno-Mioceno). Descendiendo, e intercaladas con la formación anterior, se encuentran brechas de tobas sedimentarias, Ts(bs), que completan toda el área del volcán.

Algunos de los cerros en el centro de la zona están formados por andesitas del Terciario Superior, Ts(A), aunque algunos, como el aledaño a Tenango de Arista es de basaltos del cuaternario, Q(B).

La zona al sur se cierra naturalmente por andesitas del Terciario y en el oriente, la sierra de las Cruces está formada por rocas recientes, del Cuaternario: Tobas básicas y hacia el norte se encuentran basaltos. En la porción central -más baja- se encuentran materiales del cuaternario aluvial Q(al).

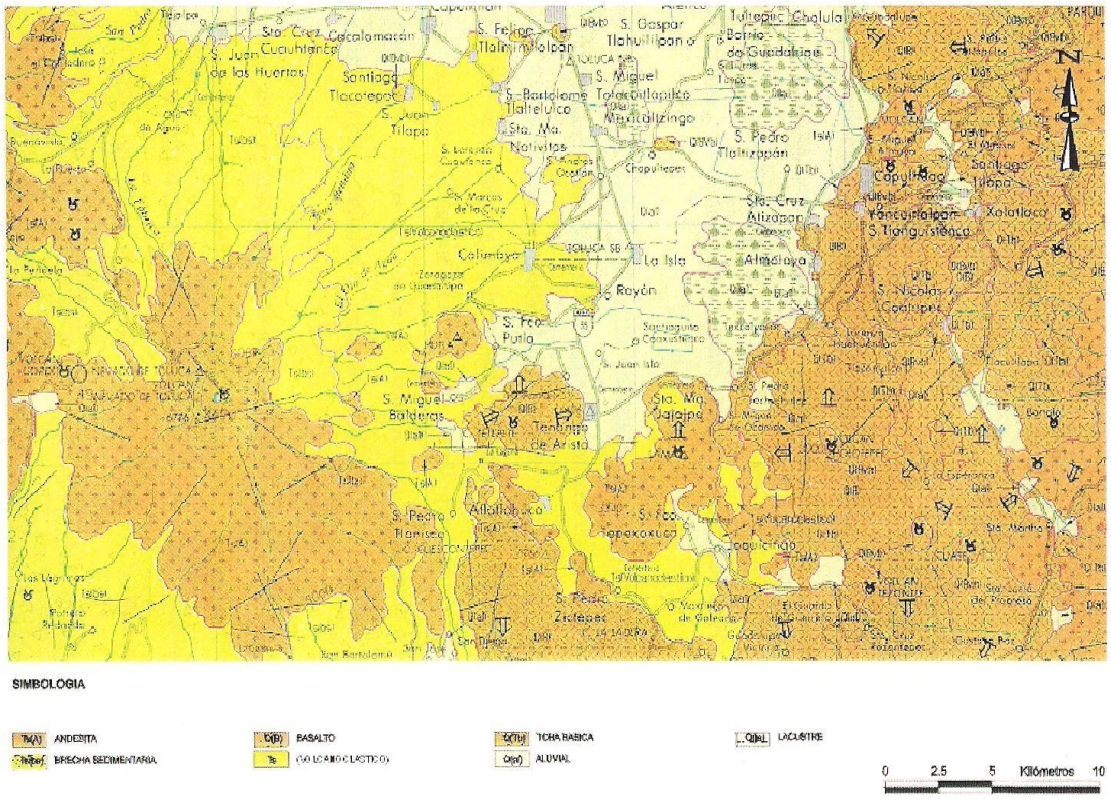


Figura 5.1. Carta Geológica de la Zona, escala 1:250 000

En la escala 1:50,000 el mayor detalle permite apreciar la gran cantidad de conos, volcanes, de materiales básicos, principalmente basálticos que afloraron en la zona. En los bordes oriental y occidental de la zona se señalan afloramientos de roca ígnea extrusiva intermedia (Igei), algunas zonas con basaltos (B) y en zonas de mediana altitud, tobas (T) y brecha volcánica (Bv). En las zonas bajas del valle se observa Suelo aluvial (al) y en la zona inundable, de la laguna, suelo lacustre (la).

De acuerdo a lo anterior se concluye que en toda la extensión de la zona puede ocurrir recarga, de acuerdo con los valores de porosidad que las referencias dan a los materiales geológicos, presentes, pero es significativamente mayor en las zonas de tobas y brechas que se ubican entre las montañas y los bordes de las lagunas. Estos materiales rocosos presentan porosidad y permeabilidad, tanto primaria como secundaria.

Los planteamientos anteriores se vieron reforzados con la observación de Lesser (1992) de que "El valle está constituído por materiales granulares con intercalaciones de (materiales) volcánicos. Presentan una permeabilidad que va de media a alta". En otro párrafo refuerza lo anterior, que se usará para la clasificación de zonas de recarga, el cual dice: "En forma general se puede considerar que en la zona de estudio predominan las rocas permeables, las que se encuentran formando zonas de recarga o constituyendo acuíferos. Otro aspecto general es que su permeabilidad se incrementa del Oeste al Este."

En sus partes altas, el volcán Nevado de Toluca está formado de materiales clásticos, como arenas y cenizas provenientes de las erupciones. Estos materiales son altamente permeables. La sierra de las Cruces, está constituída por rocas similares, probablemente de menor porosidad primaria pero con fracturamiento y fisuramiento, fenómenos que constituyen la porosidad secundaria.

En la región intermedia los materiales de tobas, brechas y aglomerados de arrastre originan una industria de minas para materiales de construcción. Estas se encuentran en las salidas de la carretera que conduce de la ciudad de Toluca al poblado de Calimaya.

5.2.2. FOTOMAPAS

La presentación de los fotomapas, cartas con datos de infraestructura con la información de la foto aérea pero con todas las referencias, fueron de gran utilidad en el vaciado de los datos, pues facilitaron el paso de una escala a otra.

Los fotomapas pueden ser empleados como una fuente de información en sí mismos, dado que están formados por fotos aéreas del terreno. En este trabajo no se usaron de esta manera ante la posible duplicidad de éstos y las fotografías aéreas.

5.2.3. FOTOGRAFÍA AÉREA

Después de la cartografía disponible, se analizaron las fotografías aéreas de la zona.

En el INEGI se encontraron los vuelos más antiguos, a partir de 1970. Se utilizaron todos los descritos en el capítulo anterior:

- Vuelo escala 1:25,000:
  de este vuelo, realizado en el año 1970, en total se adquirieron 31 fotografías. Este vuelo 19B consta de dos rollos de fotografías: R6 y R8 y de cuatro líneas: 38, 77, 78 y 79. Se utilizaron la 38, la 78 y la 79, dado que eran las que cubrían el área.

- Vuelo escala 1:50,000:
  en este vuelo del año 1971 se interpretaron las 14 fotografías.

- Vuelo escala 1:50,000:
  del año 1975, se emplearo en la interpretación 10 fotografías.

Como se mencionó en el capítulo IV, todas las fotografías se encuentran a escala 1:50,000 ó 1:25,000 y presentan, como es normal, lo que se denomina como aberraciones ópticas, variaciones de escala producidas por cambios en la altura del avión y deformaciones con

respecto a un plano horizontal producidos por las inclinaciones del avión con respecto a la misma horizontal.

Con el fin de disponer de información comparable, con respecto a los otros medios empleados, se procedió a definir un método que permitiese vaciar la información:

- reduciéndola a una misma escala, ya mencionada, de 1:50,000,
- referenciándola a una cartografía (plano donde las distancias y ángulos sean los reales).

Esto último de acuerdo a lo comentado en el capítulo (Capítulo II) referente a geodesia y cartografía.

El vaciar los diferentes datos a esa referencia permite tener datos comparativos y eventualmente, poder efectuar la medición de áreas.

Para realizar esta función se usó la cartografía definida para los CROQUIS antes mencionados, y para referir la información se aprovechó la ubicación de accidentes del terreno observables en los fotomapas, escala 1:20,000. Estos documentos, elaborados en base a un vuelo de 1983 fueron descritos en el capítulo anterior.

5.2.4. ORTOFOTOS

Los ortofotos en cada caso fueron cuatro, a una escala 1:10,000. Los datos interpretados en los ortofotos se vaciaron directamente en los croquis escala 1:50,000, aunque auxiliándose con los fotomapas en razón de las diferencias de escala. Las copias de febrero de 1983 son escala 1:10,000 y las de las dos fechas siguientes (1989, 1995) están a 1:5,000.

En los ortofotos no existe deformación, como se explicó en el capítulo II, además de que prácticamente las amplicaciones no la tenían, por lo que la transcipción se efectuó básicamente apoyándose en el aspecto y formas de los fenómenos del terreno.

5.2.5. IMÁGENES DE SATÉLITE

Las imágenes fotográficas de satélite a escala 1:1 000,000, se usaron unicamente para fines de ubicación y observación de la zona. En este caso su calidad, papel blanco y negro y lo grande de su escala imposibilitaron su empleo para fines de interpretación. En general, dada la disponibilidad de sistemas utilizables en microprocesador, siempre es mucho más útil una imagen digital de satélite que una impresa en papel. En este caso una limitante fue, además de la escala, el que estuviesen en blanco y negro.

Las imágenes digitales de satélite al visualizarlas en el monitor se observa que sus valores espectrales son bajos, lo que da, al presentarlas en blanco y negro, tonalidades oscuras y por lo tanto baja resolución. Inmediatamente después de desplegarlas, una primera operación, factible de hacer en los dos sistemas consiste en mostrar el histograma de la imagen. En ambas imágenes se nota que su histograma está limitado a un reducido intervalo y siempre menor al valor 127, cuando lo óptimo es aprovechar la totalidad del rango de valores que permite la unidad byte, que al tener ocho posiciones binarias permite un rango de valores que va desde 1 hasta 256.

De acuerdo con lo anterior, en el momento de desplegar la imagen en el monitor o de efectuar algún procesamiento, se hizo necesario emplear métodos de estiramiento o ampliación del histograma de las imágenes.

En la Figura 5.2 se muestra el histograma original de la banda 4 de la imagen del año 73. Puede apreciarse que la máxima frecuencia se encuentra alrededor del valor 40, además de que prácticamente todos los valores de la imagen se encuentran entre los valores 5 y 70, siendo en este caso la gama de grises o de colores estrecha.

En el "estiramiento" se abarca la gama de 256 valores. El proceso discretiza los valores en paquetes, siendo el aspecto del histograma similar al que se presenta en la Figura 5.3, de la imagen del año 73 en la misma banda 4.

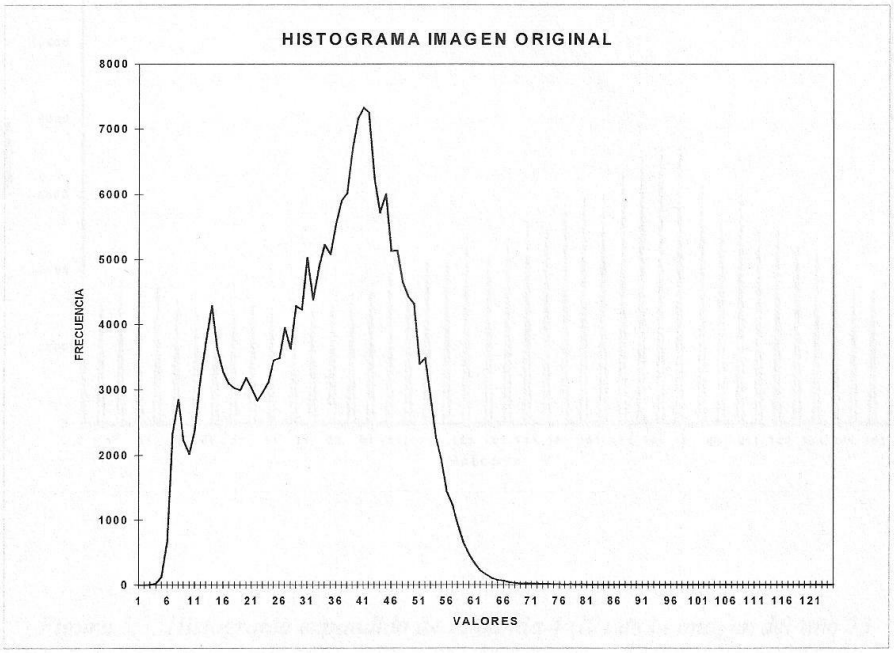


Figura 5.2. Histograma original de la banda 4 (IR) de la imagen del año 73.

En la imagen, denominada LAN73 se notan algunos cuerpos nubosos en las zonas altas, en la porción inferior derecha, es decir las montañas localizadas al sur y oriente, que limitan la zona con los valles que drenan al océano Pacífico.

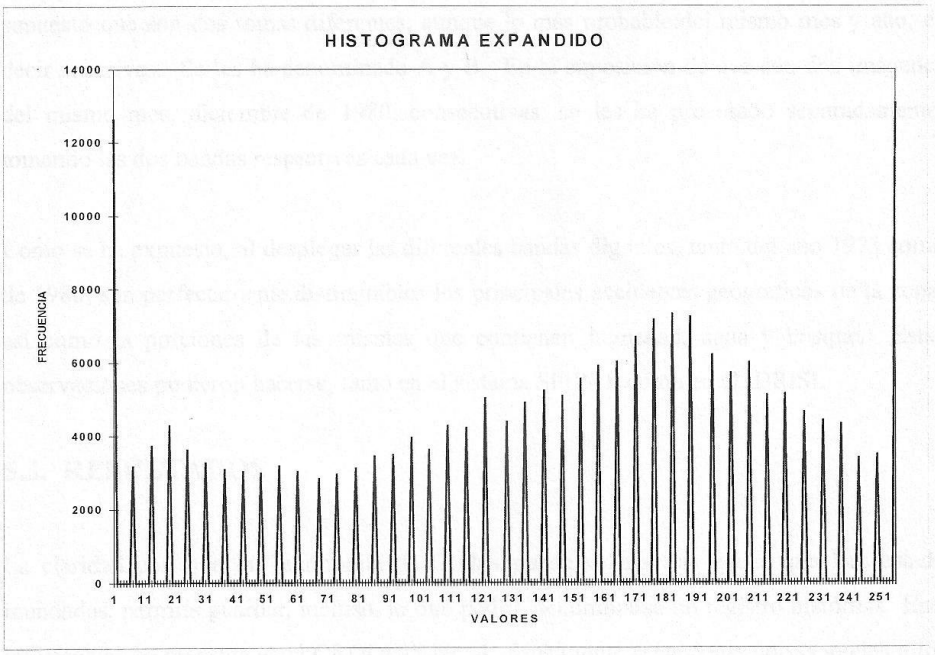


Figura 5.3. Histograma expandido de la banda 4 (IR) de la imagen del año 73

Al revisar la segunda subimagen, LAN80, tiene una línea faltante, localizada en la porción norte, en la banda 2. La falta de una línea es un defecto común (falla de uno de los detectores a bordo del satélite) que puede corregirse fácilmente, aunque no se hizo debido a que, como se explicará más adelante, no se utilizó esa zona de la imagen, al recortarse para crear una subimagen.

La imagen de 1980 presenta particularidades en las dos primeras bandas (1 y 2) ya que sus valores no son congruentes con los de las dos últimas. Al desplegar las primeras en blanco y negro no aparece nieve en la zona del volcán Nevado de Toluca y en las segundas aparece blanco, lo cual no es de extrañar dadas las fechas de toma. Sin embargo, al sobreponer información de los dos grupos de bandas se perciben desfases en los tonos, por lo que se ha

supuesto que son dos tomas diferentes, aunque lo más probable:del mismo mes y año, es decir sucesivas. Se les ha denominado A y B. En la suposición de que son dos imágenes del mismo mes, diciembre de 1980, consecutivas, se les ha procesado separadamente, tomando las dos bandas respectivas cada vez.

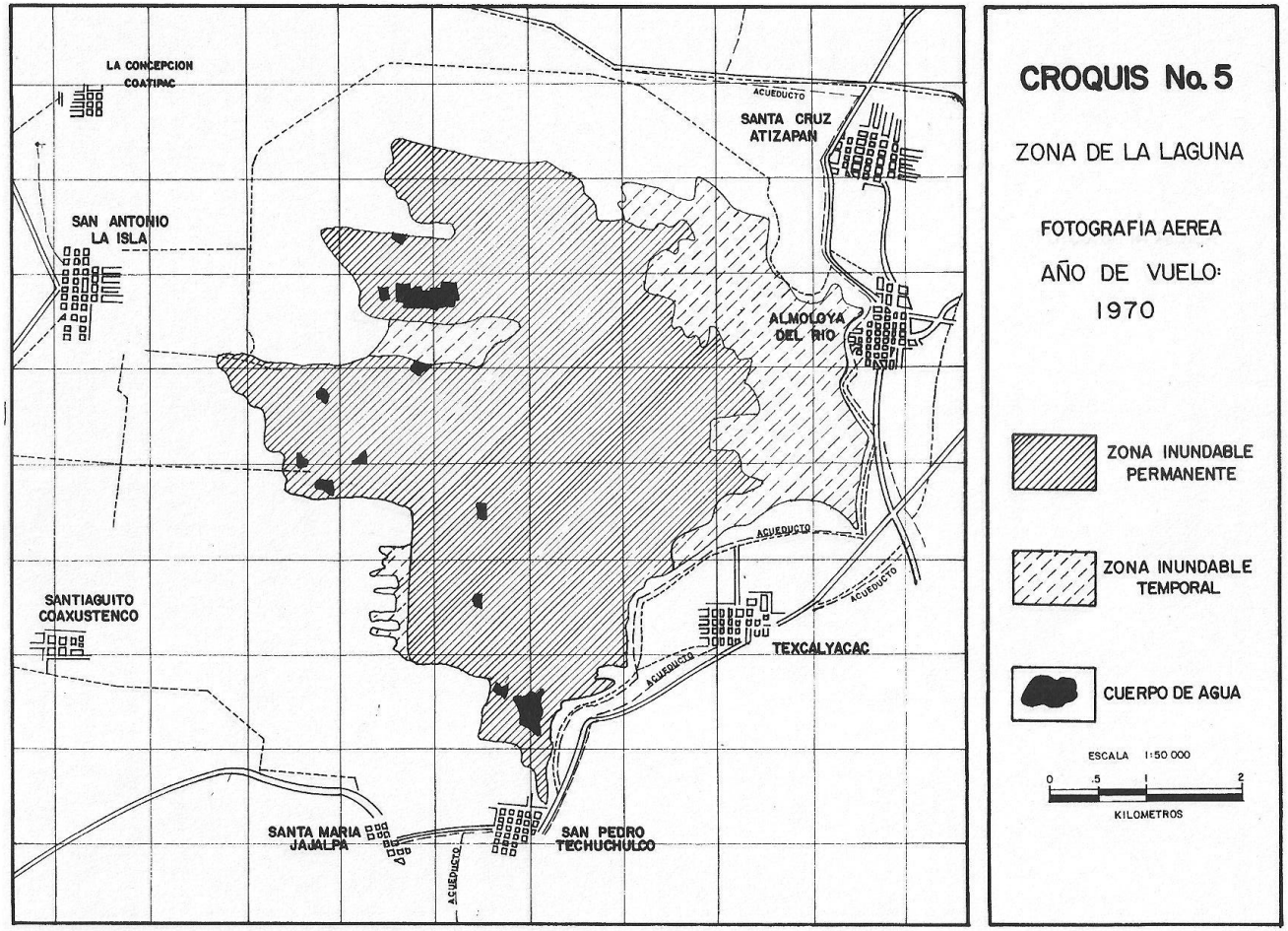
Como se ha expuesto, al desplegar las diferentes bandas digitales, tanto del año 1973 como de 1980, son perfectamente distinguibles los principales accidentes geográficos de la zona, así como la porciones de las mismas que contienen humedad, agua y bosque. Estas observaciones pudieron hacerse, tanto en el sistema SPIPRII como en el IDRISI.

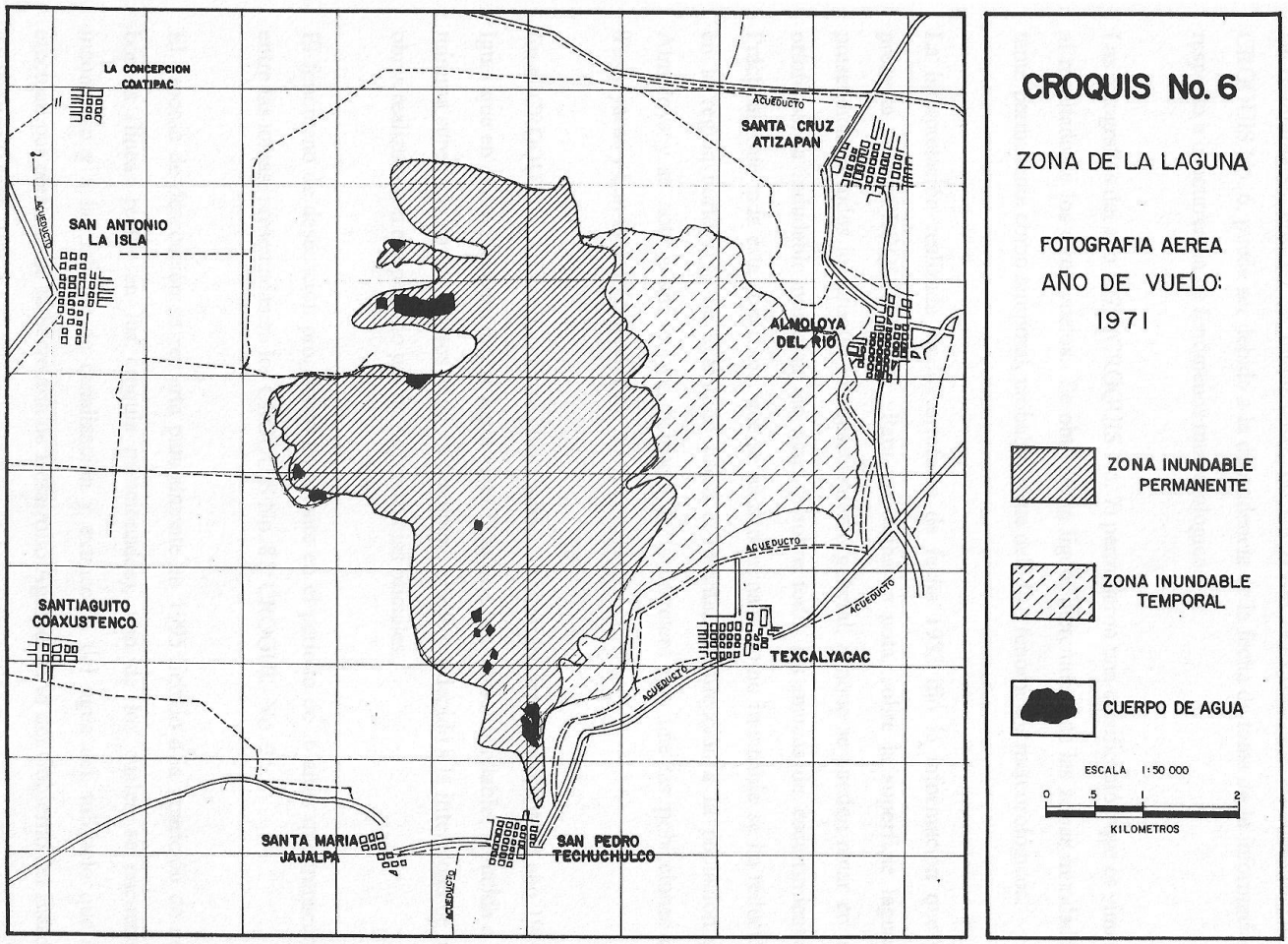
5.3. RESULTADOS

La claridad con que la Taxonomía de Suelos puede señalar las zonas que han estado inundadas, permite guardar, incluso, lo que podría denominarse un registro histórico. Esta información se presenta en el CROQUIS No. 4. Igualmente estas zonas corresponden a los terrenos bajos, donde debido a que son totalmente planos, no aparece curva alguna en el modelo topográfico.

El CROQUIS No. 5 muestra información resultado de la interpretación del primer grupo de fotografías aéreas, vuelo del año 1970. En esa fecha pueden apreciarse en las fotos aéreas tres clases, la de zona inundable permanente, que se ubica, como es lógico, en el centro de la depresión y conteniendo zonas más profundas que se marcaron como cuerpos de agua. Las zonas inundables temporalmente se localizan en la periferia de las áreas anteriores.

En el CROQUIS No.6. se muestra el resultado de la interpretación de fotografías del año 1971. Se señalaron igualmente tres clases, notándose que algunos meses después de la información anterior, la disposición es similar, aunque el área inundable permanente se ha reducido, pero se ubica igualmente al centro, casi equidistante entre las poblaciones de Almoloya del Río y San Antonio La Isla. De hecho, ambas poblaciones se ubicaban en islas dentro de la zona lagunar.


LA CONCEPCION COATINAC
SAN ANTONIO LA ISLA
SANTIAGUITO COAXUSTENCO
SANTA MARIA JAJALPA
SAN PEDRO TECHUCHULCO
SANTA CRUZ ATIZAPAN
ALMOLOYA DEL RIO
TEXCALYACAC
ACUEDUCTO
CROQUIS No. 5
ZONA DE LA LAGUNA
FOTOGRAFIA AEREA
AÑO DE VUELO:
1970
ZONA INUNDABLE PERMANENTE
ZONA INUNDABLE TEMPORAL
CUERPO DE AGUA
ESCALA 1:50 000
0 .5 1 2
KILOMETROS


LA CONCEPCION COATIPAC
SAN ANTONIO LA ISLA
SANTA CRUZ ATIZAPAN
ALMOLOYA DEL RIO
SANTIAGUITO COAXUSTENCO
TEXCALYACAC
SANTA MARIA JAJALPA
SAN PEDRO TECHUCHULCO
ACUEDUCTO
CROQUIS No. 6
ZONA DE LA LAGUNA
FOTOGRAFIA AEREA
AÑO DE VUELO:
1971
ZONA INUNDABLE PERMANENTE
ZONA INUNDABLE TEMPORAL
CUERPO DE AGUA
ESCALA 1:50 000
0 .5 1 2
KILOMETROS

El retraimiento, que no es homogéneo, de las zonas húmedas, que se muestra en el CROQUIS No. 6, puede ser debido a la dependencia de la fecha de toma de la información, respecto a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos.

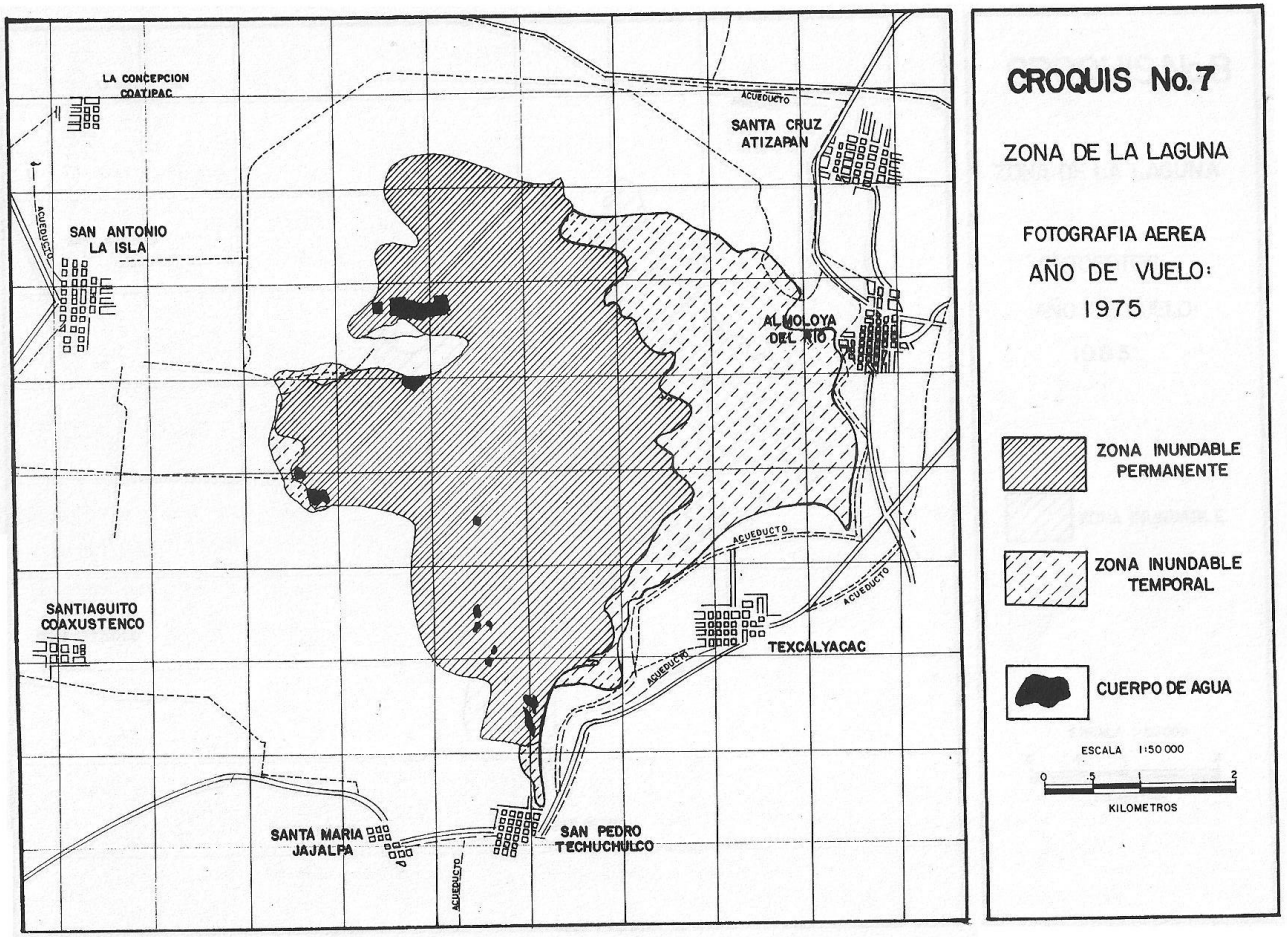
Las fotografías del año 1975 (CROQUIS No. 7) permitieron una clasificación que es similar al resultado de los otros vuelos. Se obtiene un ligero incremento de las zonas inundadas, tanto permanente como temporal, probablemente debido a fenómenos meteorológicos.

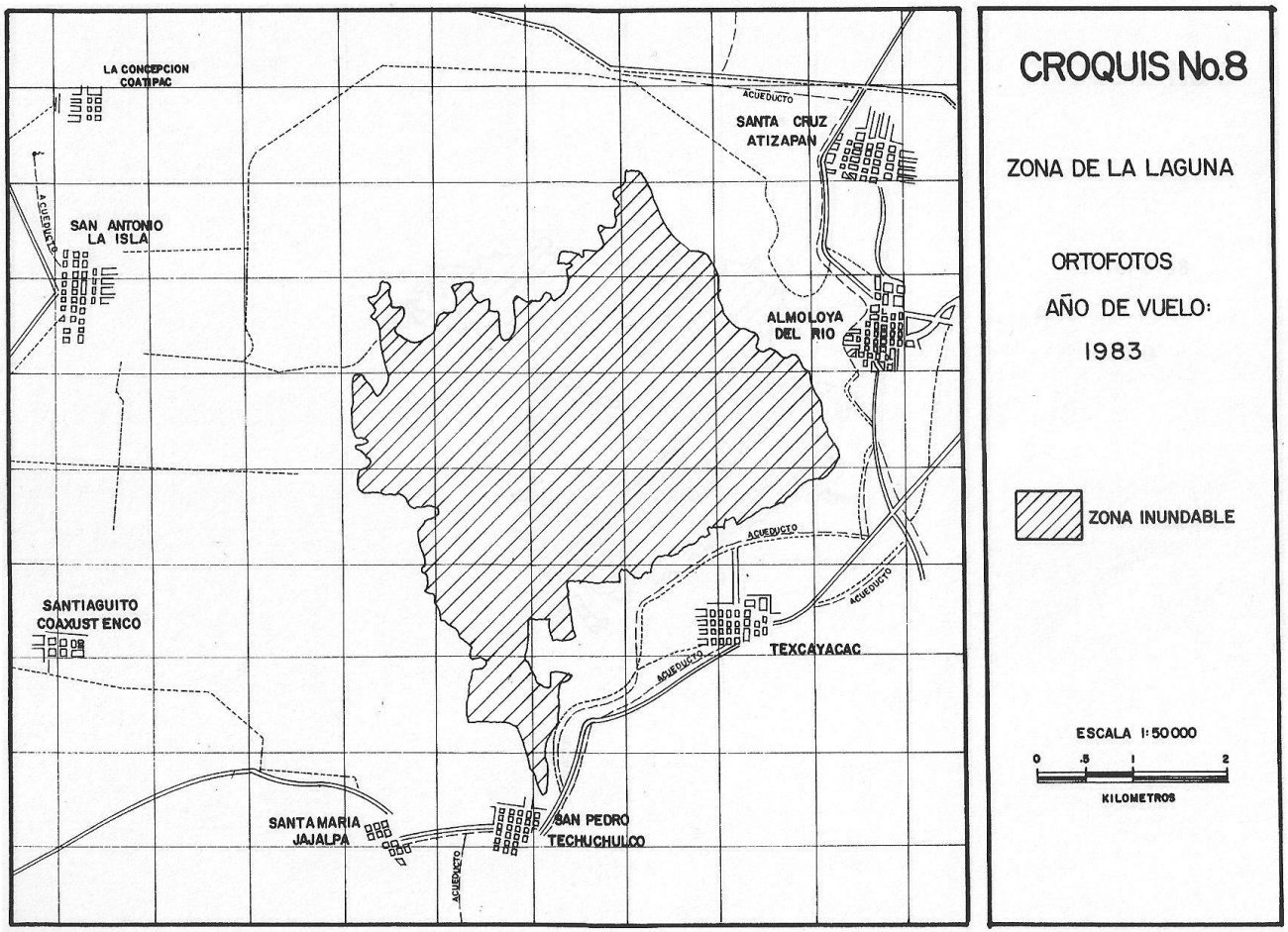
La interpretación realizada en los ortofotos de fecha 1983 dió la información que se presenta en el CROQUIS No. 8. Para esa fecha se nota, sobre la superficie lagunar presentada en todos los croquis, un desecamiento general, aunque se pueden notar en los ortofotos, la indudable presencia de agua y sobre todo, las marcas de escurrimientos. Prácticamente toda esta superficie, que se ha denominado como inundable se ha reducido en la región norte y se ha extendido hacia el oriente, en dirección a la población de Almoloya y se nota a una mayor distancia de la carretera que une las poblaciones de Texcayacac y San Pedro Techuchulco.

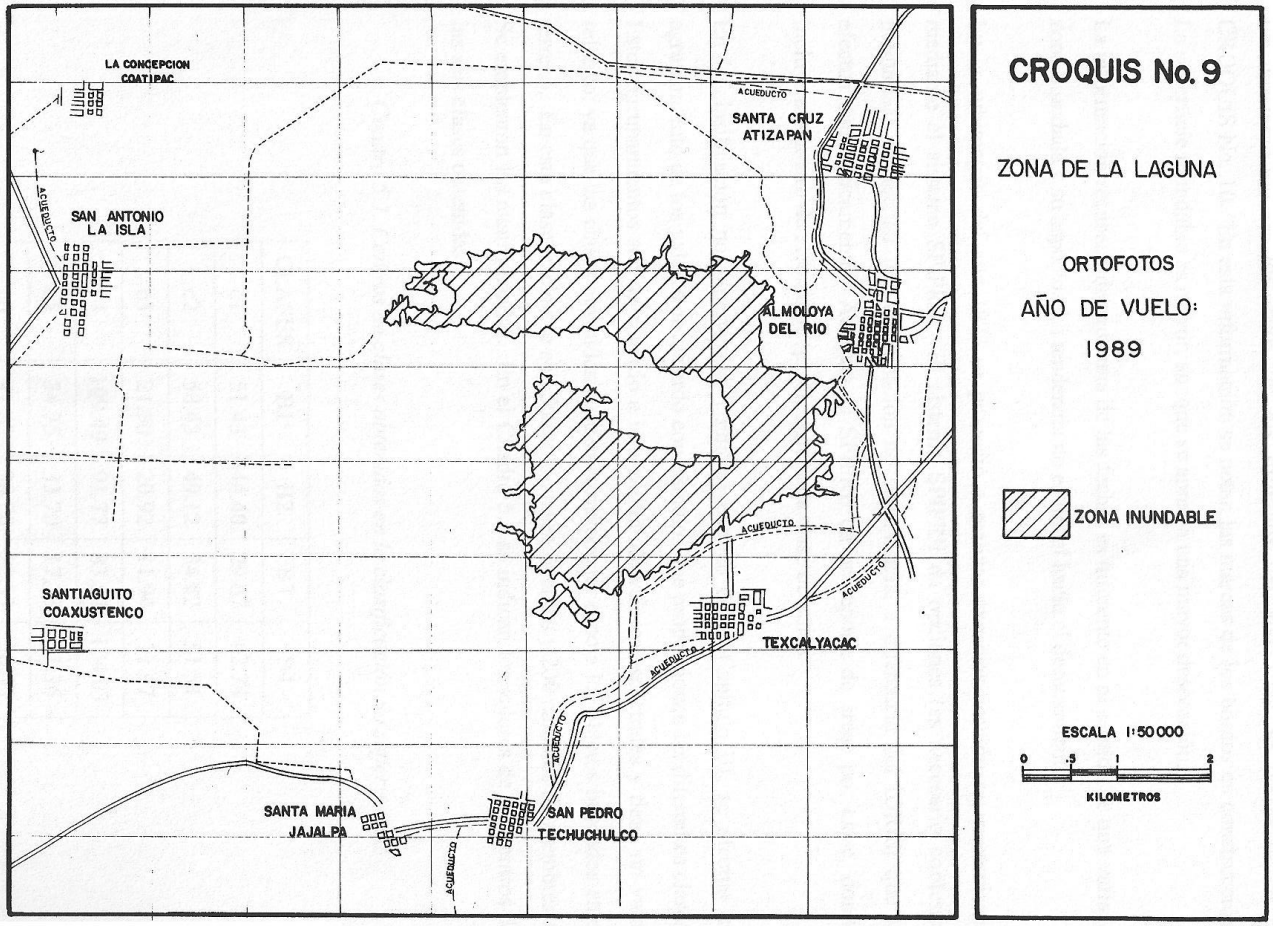
En el CROQUIS No. 9 se muestra la información de ortofoto correspondiente al año 1989. Igual que en el croquis anterior, se logra identificar una sola clase inundable, reducida a la mínima superficie en todos estos años. El fenómeno puede ser debido a la intensidad de las obras realizadas en ese período por las dependencias oficiales.

El fenómeno de desecación progresivo es patente en el período de 6 años que transcurre entre las tomas, presentadas en los CROQUIS No. 8 y CROQUIS No. 9.

El proceso de desecación se revierte parcialmente en 1995 debido a la aparición de dos bordos (líneas rectas en los croquis mencionados), uno de los cuales se encuentra inconcluso y a las labores de canalización y extracción del agua del subsuelo que se efectúan por personal de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del Estado de México (Maya, 1997).


LA CONCEPCION COATIPAC
ACUEDUCTO
SANTA CRUZ ATIZAPAN
SAN ANTONIO LA ISLA
ACUEDUCTO
ALMOLOYA DEL RIO
ACUEDUCTO
ACUEDUCTO
SANTIAGUITO COAXUSTENCO
TEXCALYACAC
ACUEDUCTO
SANTA MARIA JAJALPA
SAN PEDRO TECHUCHULCO
ACUEDUCTO
CROQUIS No. 7
ZONA DE LA LAGUNA
FOTOGRAFIA AEREA
AÑO DE VUELO:
1975
ZONA INUNDABLE PERMANENTE
ZONA INUNDABLE TEMPORAL
CUERPO DE AGUA
ESCALA 1:50 000
0 .5 1 2
KILOMETROS


LA CONCEPCION
COATIPAC
ACUEDUCTO
SANTA CRUZ
ATIZAPAN
SAN ANTONIO
LA ISLA
ALMOLOYA
DEL RIO
ACUEDUCTO
ACUEDUCTO
SANTIAGUITO
COAXUSTENCO
TEXCAYACAC
ACUEDUCTO
SANTA MARIA
JAJALPA
SAN PEDRO
TECHUCHULCO
ACUEDUCTO
CROQUIS No.8
ZONA DE LA LAGUNA
ORTOFOTOS
AÑO DE VUELO:
1983
ZONA INUNDABLE
ESCALA 1:50000
0 .5 1 2
KILOMETROS


LA CONCEPCION
COATIPAC
ACUEDUCTO
SANTA CRUZ
ATIZAPAN
ACUEDUCTO
SAN ANTONIO
LA ISLA
ALMOLOYA
DEL RIO
ACUEDUCTO
ACUEDUCTO
SANTIAGUITO
COAXUSTENCO
TEXCALYACAC
ACUEDUCTO
ACUEDUCTO
ACUEDUCTO
SANTA MARIA
JAJALPA
SAN PEDRO
TECHUCHULCO
CROQUIS No. 9
ZONA DE LA LAGUNA
ORTOFOTOS
AÑO DE VUELO:
1989
ZONA INUNDABLE
ESCALA 1:50 000
0
.5
1
2
KILOMETROS

La interpretación de los datos de los ortofotos del año 1995 se presentan en el CROQUIS No. 10. En esta información se notan las marcas de los bordos en construcción. La superficie inundable es mayor, aunque se aprecia una mayor desecación.

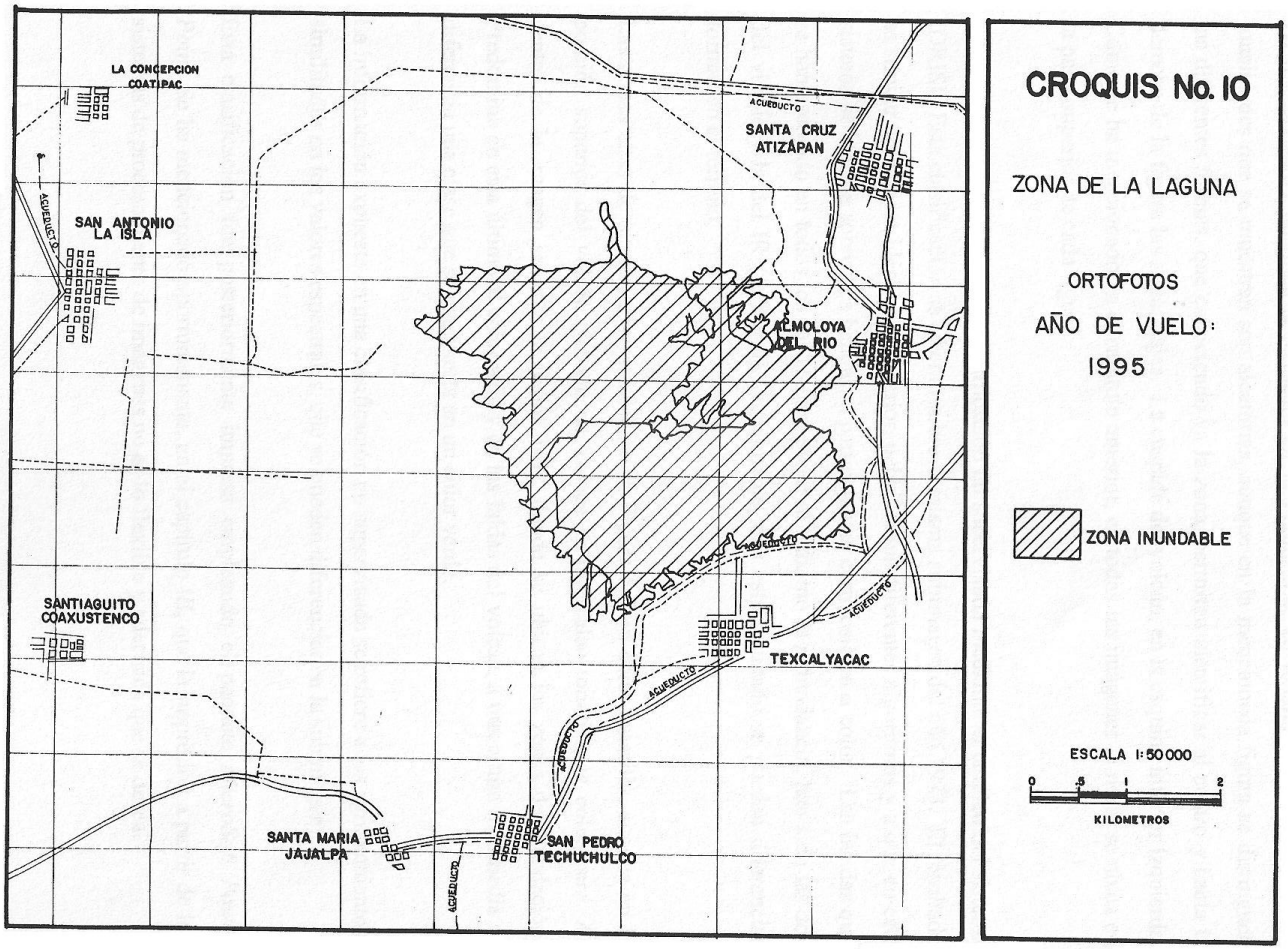
La información recabada de cada una de las fechas es diferente en el sentido de que varía la zona inundada y su aspecto. La tendencia no es lineal hacia el desecamiento.

En la subimagen del año 1973 se procedió a realizar una clasificación no supervisada mediante el sistema SPIPRII. El sistema SPIPRII da opciones (es necesario contestar preguntas) al efectuar una clasificación no supervisada, a diferencia del IDRISI que lo efectúa automáticamente. Además, el SPIPRII da un reporte de áreas por clase, donde incluye el número de elementos (pixeles) de cada clase obtenida.

En la clasificación no supervisada, como se explicó en el Capítulo III, se efectúa un agrupamiento de los valores de acuerdo con cúmulos que proporcionan las diferentes clases. Estos agrupamientos son de acuerdo a la similitud de valores espectrales y tiene un valor relativo, ya que las clases obtenidas pueden corresponder o no a los objetos buscados en el terreno. En esta clasificación se solicitaron 6 clases, 5 saltos y 200 cambios de membresía. Se emplearon las cuatro bandas. En el Cuadro 5.1 se indican los valores de los centros de las seis clases obtenidas.

Cuadro 5.1. Centros de clases obtenidos en la clasificación no supervisada.

CLASES	B1	B2	B3	B4
c1	51.43	44.40	29.67	42.74
c2	58.43	49.12	34.82	51.51
c3	21.50	20.92	11.94	11.97
c4	109.49	91.77	83.54	104.03
c5	34.75	33.70	17.33	21.36
c6	41.62	38.20	22.91	30.43


LA CONCEPCION
COATIPAC
SAN ANTONIO
LA ISLA
SANTA CRUZ
ATIZÁPAN
ACUEDUCTO
ALMOLOYA
DEL RIO
SANTIAGUITO
COAXUSTENCO
TEXCALYACAC
SANTA MARIA
JAJALPA
SAN PEDRO
TECHUCHULCO
CROQUIS No. 10
ZONA DE LA LAGUNA
ORTOFOTOS
AÑO DE VUELO:
1995
ZONA INUNDABLE
ESCALA 1:50000
0 .5 1 2
KILOMETROS

La interpretación obtenida se presenta en la Figura 5.4, en tonalidades de grises. Las tonalidades que se muestran son aleatorias, aunque en la mencionada figura se distinguen las diferentes formas, que conociendo ya la zona, permiten identificar al centro y hacia la derecha de la figura las zonas bajas. La cúspide del volcán, en la esquina inferior izquierda. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, en todas las imágenes el norte se ubica en la parte superior de cada figura.

En la Figura 5.5 se presenta la clasificación no supervisada mediante el empleo del sistema IDRISI. Esta clasificación se efectuó sobre la misma subimagen del año 1973. El resultado es similar aunque no idéntico al anterior, debido a los diferentes algoritmos y a que en este sistema se efectúa sobre tres bandas, a partir de una composición a color. Las bandas que se han escogido en todos los casos, para evitar al máximo la redundancia, han sido las dos del visible y la del IR (1, 2 y 4). Igualmente, con este resultado se pueden diferenciar formas en el terreno.

Las zonas altas de la sierras se señalan en la Figura 5.5 en color amarillo, aunque en la porción superior del volcán Nevado de Toluca se intercalan tonalidades color ocre. Al centro de la imagen se sitúa la región baja, donde se ubican las zonas de inundación. Predomina en esta última el color azul y en las faldas del volcán, a una altura intermedia se diferencia una clase que se manifiesta en un color verde.

La información expuesta en una clasificación no supervisada se refiere a los agrupamientos, similitudes en los valores espectrales, que se pueden diferenciar en la subimagen.

Esta clasificación fue posteriormente impresa empleando el paquete *MicroSoft Power Point*. Se ha mencionado oportunamente, en el capítulo III, que la impresión a partir de los sistemas de procesamiento de imágenes no es lo flexible y adecuada que se desea.

Figura 5.4. Clasificación no supervisada mediante spiprii

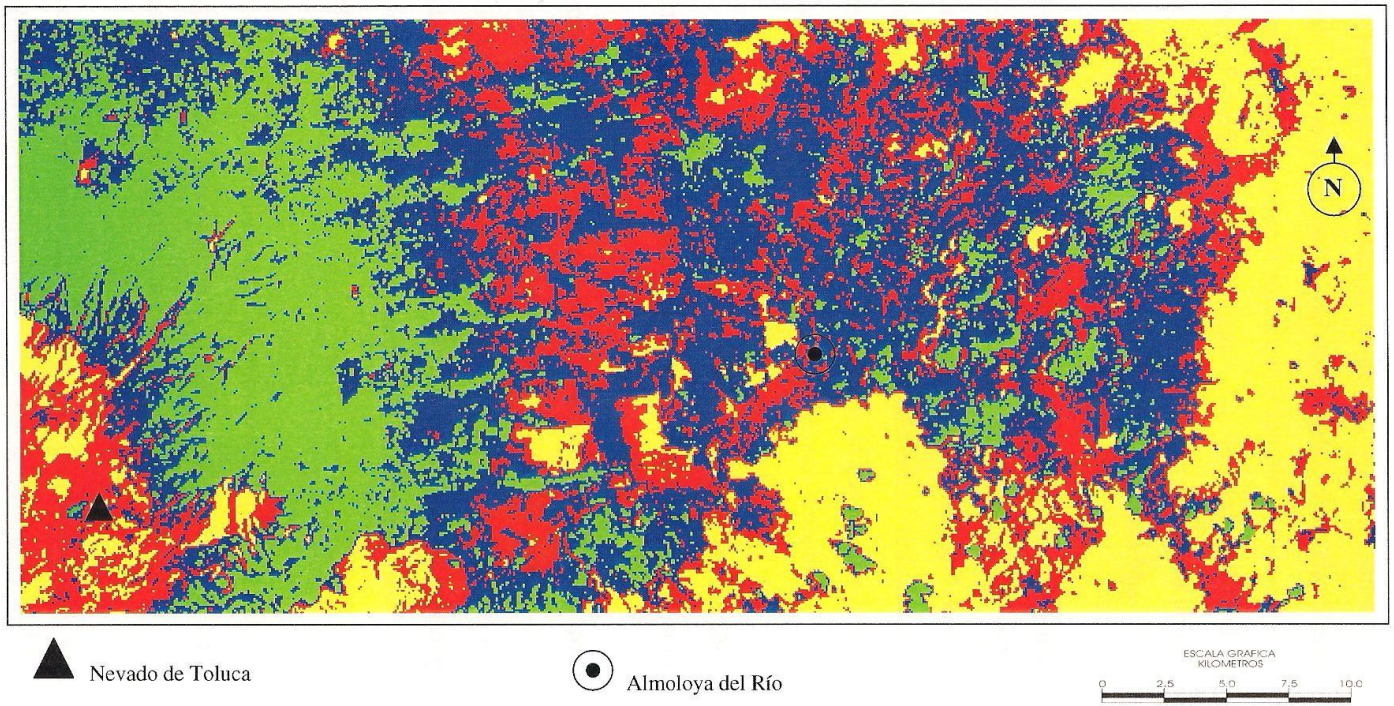


Figura 5.5. Clasificación No supervisada de la imagen 1973 mediante IDRISI

En la Figura 5.6 se muestra la subimagen del año 1980 con las bandas 1 y 2(1980A), después de una clasificación no supervisada. Esta clasificación fue realizada también mediante IDRISI y aplicada sobre un compuesto a color de las dos primeras bandas de la imagen. Posteriormente, la imagen fue impresa utilizando el mencionado paquete comercial. Las principales accidentes del terreno pueden ser observados, tales como el volcán así como las sierras que bordean al sur y oeste y las zonas bajas con las zonas inundables.

La Figura 5.7 presenta la subimagen del año 1980, con las bandas 3 y 4. Esta subimagen corresponde al resultado de una clasificación no supervisada, realizada también, mediante el sistema IDRISI e impresa con el mismo procedimiento. Este resultado, aunque ha sido obtenido sobre dos juegos de bandas diferentes, deberían de tener mayor similitud si correspondiesen a la misma imagen (fecha), lo que refuerza la hipótesis antes presentada, de que con fecha 1980 se tienen dos tomas distintas, probablemente cercanas en el tiempo.

Las siguientes clasificaciones de la información de satélite, digital consistieron en clasificaciones supervisadas, mismas que se realizaron sobre las tres subimágenes descritas.

En toda clasificación supervisada es necesario definir los campos de entrenamiento. Estos campos de entrenamiento consisten en porciones del terreno donde se conoce la existencia del objeto o característica de estudio. La mayor área con esta característica se rodaliza, se señala, con el fin de que la máquina extraiga los valores espectrales y sus estadísticas y de esa manera el procesamiento sobre toda la imagen manifieste todas las regiones del terreno similares.

Los campos de entrenamiento se marcan con todo cuidado, de preferencia sobre una composición de falso color, con el fin de que sea más fácil identificar los accidentes y fenómenos naturales sitos en la imagen.

Los campos de entrenamiento se guardan en un archivo de tipo vectorial en los dos sistemas empleados en esta investigación.

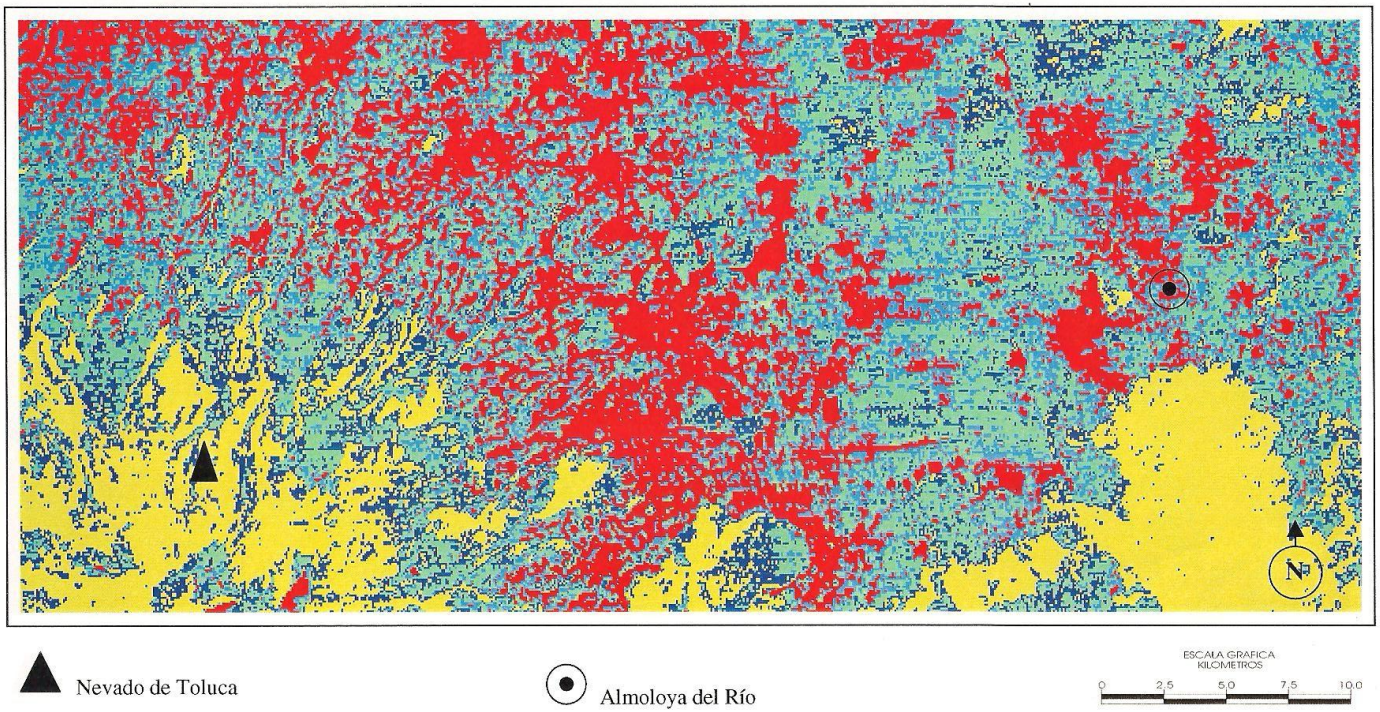


Figura 5.6. Clasificación IDRISI No supervisada de la imagen 1980A

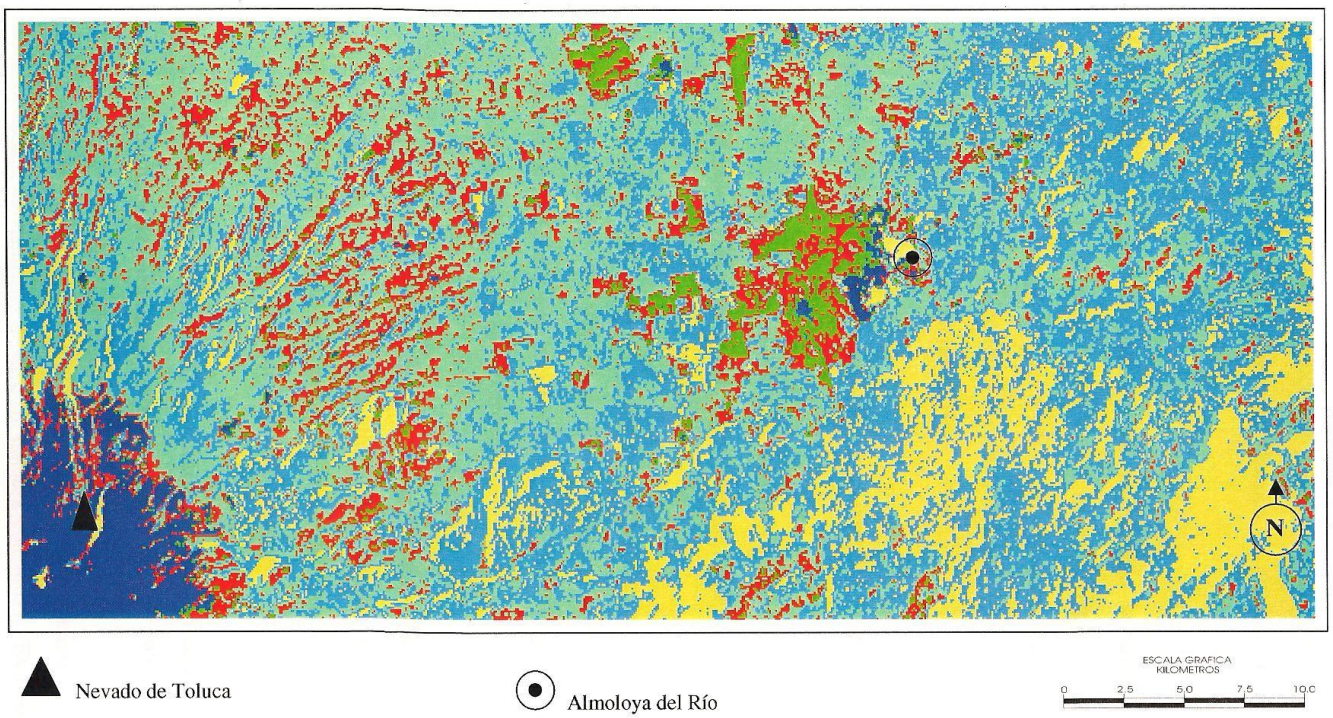


Figura 5.7. Clasificación IDRISI No supervisada de la imagen 1980B

En ambos sistemas el último vértice del polígono -líneas de color amarillo con cruces en cada vértice- se cierra automáticamente. Es posible guardar en el archivo una descripción de la clase.

Todas estas clasificaciones supervisadas se hicieron basándose en las evidencias del terreno, los datos de la cartografía y la información expuesta por las clasificaciones no supervisadas. En las composiciones a color de la imagen, que simulan el falso color de la fotografía infrarroja, era evidente la separación en tres clases que se resaltaban en los tres pasos del satélite sobre la zona (años 1973 y 1980).

Las clases que se definieron, de acuerdo con el interés del estudio, fueron:

- **Bosque**: presente en las partes altas de la zona. Indica una zona de alta precipitación y donde además el coeficiente de infiltración es alto.

- **Intermedia**: son las zonas donde a mediana altura, donde el fenómeno de recarga ocurre también. En esta zona, denominada así por estar comprendida entre la de bosque y la zona plana, existen minas de arena y grava que son explotadas para obtener materiales para la construcción.

Humedal: la zona de los terrenos de la laguna. Es una zona plana, con escasa vegetación y la existente es de tipo tular; abunda el suelo desnudo, compuesto principalmente por arcillas y limos. Se encuentran en esta zona, dependiendo de la foto o imagen, ocasionales estanques y pozas con agua.

En el siguiente cuadro (Figura 5.8) se muestra el resultado de la clasificación supervisada, empleando campos de entrenamiento, de la imagen del año 1973.

Se empleó en la Figura 5.8 la clasificación con las cuatro bandas disponibles. El marcado de los campos de entrenamiento se hizo de manera cuidadosa. Es posible obtener estadísticas, como valores medios y datos de dispersión de las diferentes clases de entrenamiento.

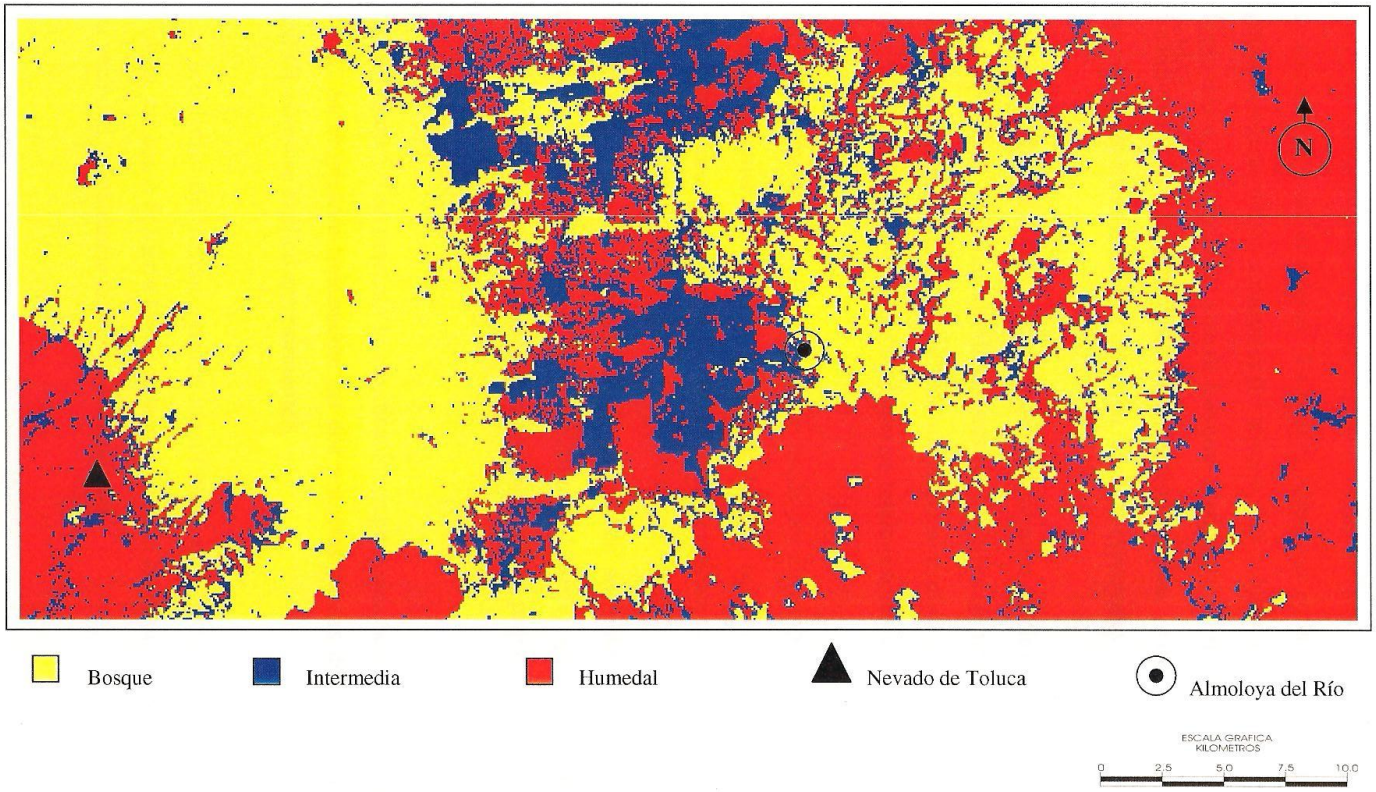


Figura 5.8. Clasificación Supervisada de la imagen 1973

La clasificación (Figura 5.8), muestra las manchas de cada una de las tres clases, tal y como se encuentran sobre el terreno. Es posible identificar en la clasificación las características geohidrológicas de los accidentes del terreno. Los colores, en este caso aleatorios, y desde luego falsos, diferencian el área de **Bosque**, la superficie **Intermedia** y el área de **Humedal**. La información no ha permitido una separación perfecta, ya que alrededor de la última clase se marcan algunas superficies con características espectrales similares a las de bosque.

Aunque el IDRISI tiene varias opciones o algoritmos de clasificación supervisada, al igual que el SPIPRII, todas las clasificaciones supervisadas se hicieron empleando el algoritmo de Bayes o de máxima verosimilitud, que como se explicó oportunamente, es el que puede dar mejores resultados en casos de clases no totalmente disjuntas en el espacio espectral.

Históricamente este algoritmo era poco usado por el tiempo que se llevaba en el proceso, dado el volumen de cálculos. Actualmente, con la velocidad de procesamiento de los modernos microcomputadores, se realiza en unos cuantos segundos.

Las presentaciones de las clasificaciones pueden ser observadas en pantalla de varias maneras, de acuerdo con la tabla de colores (palette) que se escoja. La impresión definitivamente es necesario realizarla por medio de los paquetes que se han mencionado en este trabajo.

En la Figura 5.9 se presenta la clasificación supervisada sobre la subimagen 1980A de la zona. Se emplearon unicamente las dos primeras bandas de la imagen facilitada por el INEGI, como se explicó anteriormente.

Los accidentes del terreno pueden identificarse en la Figura 5.9. El volcán Nevado de Toluca, así como la Sierra Matlazinca, que señalan las regiones de **Bosque, Intermedia** en su vecindad y finalmente las zonas de **Humedal**.

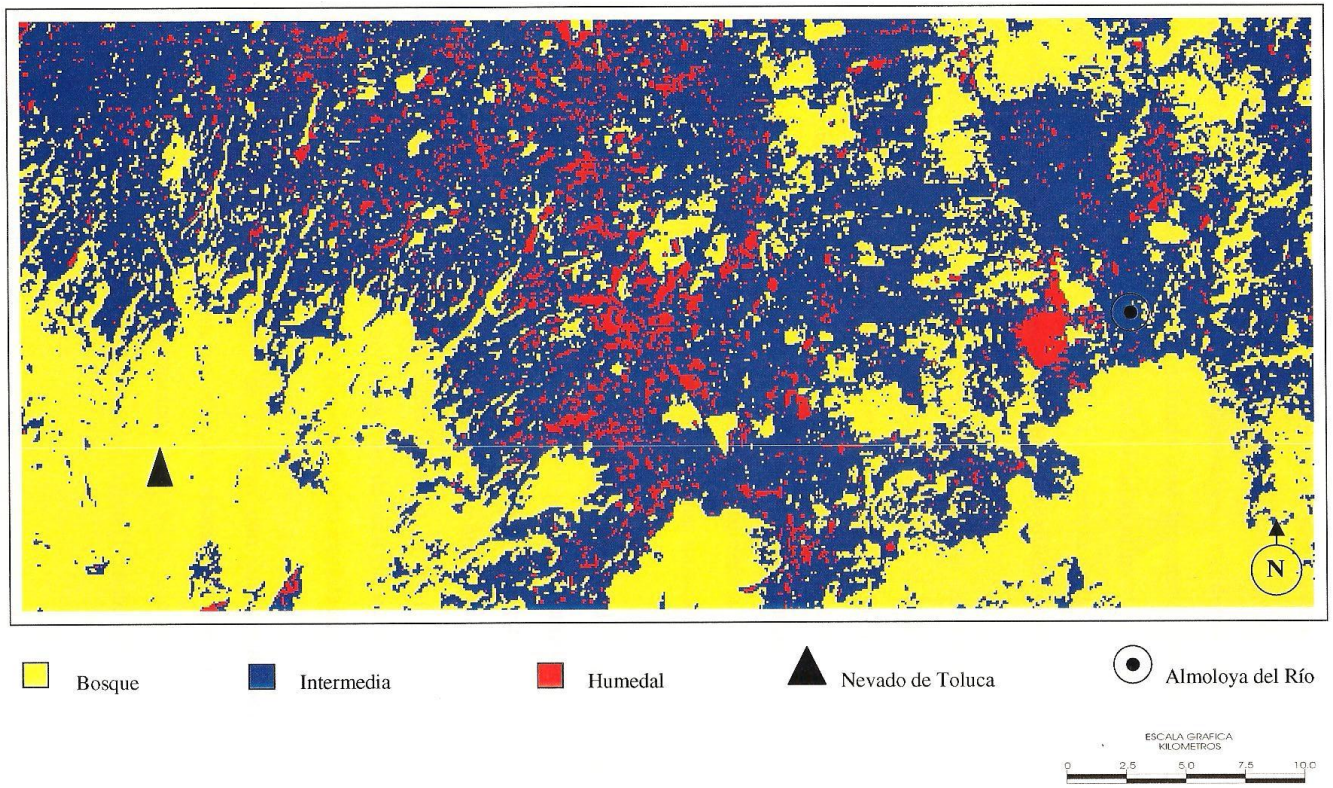


Figura 5.9. Clasificación Supervisada de la imagen 1980A

En la Figura 5.10 se muestra la clasificación supervisada realizada usando el sistema IDRISI sobre la subimagen 1980B es decir, a partir de unos campos de entrenamiento definidos en una composición a color elaborada a partir de las bandas 3 y 4 de la imagen de 1980. Esta clasificación, mejor definida que la anterior en unos aspectos, como las superficies de **Humedal;** parece perder fidelidad al mostrar el mismo color en la cúspide del volcán, aunque en la fecha se nota la ocurrencia de una nevada que cubre la parte alta del volcán. Las zonas de **Bosque** e **Intermedia** se diferencian también.

En ambas clasificaciones se utilizaron campos de entrenamiento diferentes, aunque definidos sobre características similares del terreno. Al igual que en las clasificaciones no supervisadas, los resultados no son iguales, aunque pueden identificarse las tres clases definidas. En la Figura 5.9 se encuentran las zonas montañosas con la misma tonalidad, mientras que en la Figura 5.10 se muestran valores más saturados en el interior del volcán Nevado de Toluca, probablemente debidos a la presencia de humedad. En esta última se aprecia con más definición el contorno de las zonas inundadas.

Dados los indicadores antes mencionados de permeabilidades y porosidades, se plantea que existe recarga al acuífero en toda la zona, considerando también los materiales geológicos que se encuentran en la misma. Los mayores valores de estos parámetros se presentan en los alrededores de la región lagunar, y ampliando un poco, en los terrenos correspondientes a la clase **Intermedia**. En las superficies de la región lagunar se tiene, además de materiales permeables, una menor velocidad de escurrimiento y la probable presencia de un gradiente vertical hacia el acuífero que está siendo explotado.

La presencia de este fenómeno se refuerza con los resultados de diversos estudios realizados para las dependencias oficiales abocadas al tema, como son la compañía Ingeniería y Procesamiento Electrónico, SA (1983), asicomo los datos obtenidos de las configuraciones presentadas en el Atlas Ecológico (Franco, 1993).

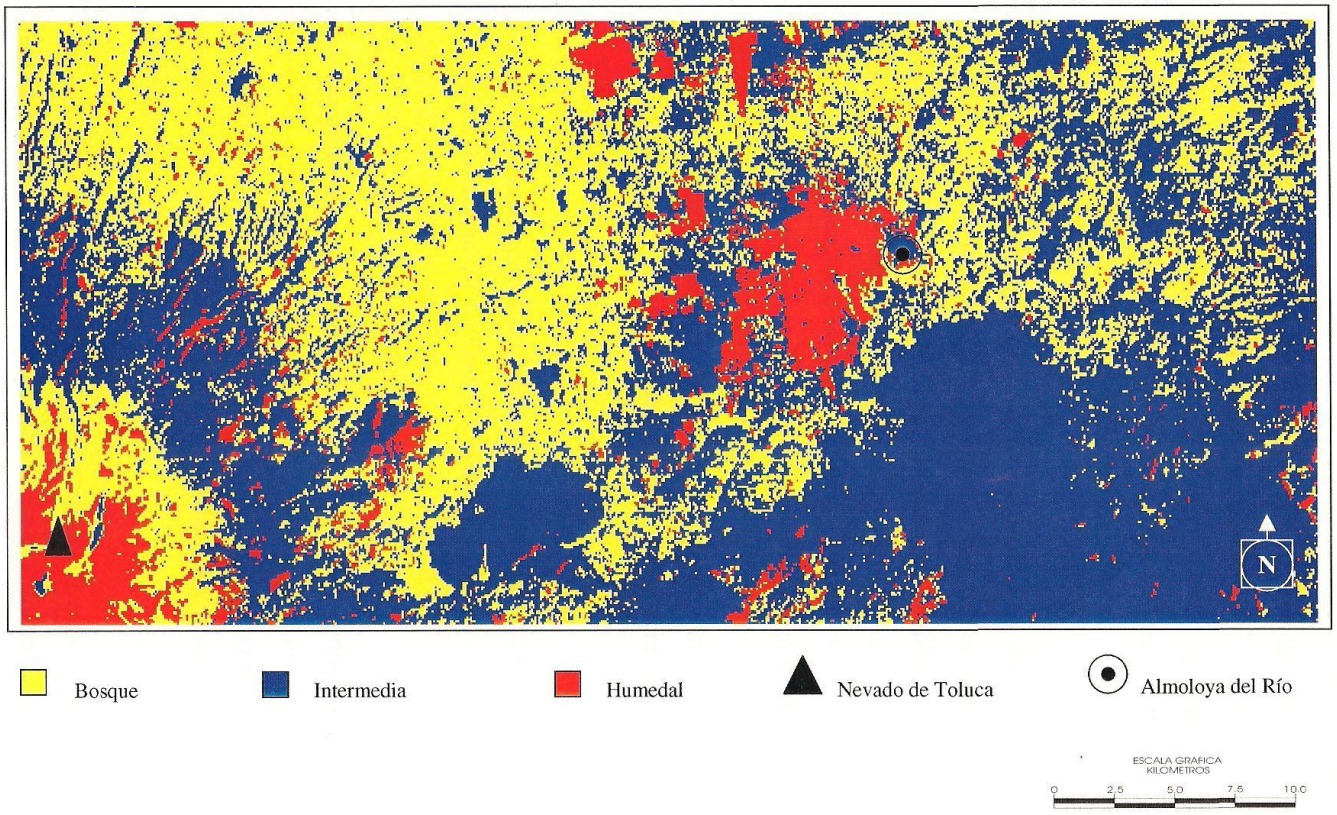


Figura 5.10. Clasificación Supervisada de la imagen 1980B

Los estudios de estas empresas muestran que en el área de lagunas la profundidad del nivel estático es mayor y que las mayores variaciones del nivel estático se dan en esta misma región (aumentos de profundidad del nivel piezométrico). Igualmente señalan el cierre de isopietas e isopletas y por lo tanto, la confluencia de las líneas de flujo hacia el centro de la misma.

La explicación que se plantea es que en las partes altas -las montañas que bordean la zona y el mismo volcán- se tiene una mayor precipitación, lo que es normal en las conformaciones montañosas (lluvia orográfica), que escurre sobre la superficie y subsuperficialmente hacia las partes bajas. En estas regiones bajas se acumula el agua superficial, formando antes las lagunas y en la actualidad las áreas de inundación. El agua subsuperficial formaba los manantiales, que describen los historiadores, localizados en la parte baja de las montañas, algunas veces siguiendo el camino de un afloramiento de roca, como el manantial que se localizaba en la población de Almoloya del Río. La información histórica, la toponimia, así como los detalles fisiográficos dan muchas claves complementarias sobre lo que ha ocurrido en la zona.

Finalmente la acumulación del líquido que ocurría en la parte central de la zona funciona como área de recarga del acuífero y el excedente origina el río Lerma (en la actualidad lo que queda de él, en la época de lluvias).

Los razonamientos anteriores se ven reforzados por información presentada en el Atlas Ecológico (Franco, 1993) sobre la zona. Según el mismo, las transmisibilidades del acuífero varían de media a alta. "En la zona de Almoloya los valores son más altos, alcanzan 1286 y 257 x 10^{-3} m^2/s. En cuanto al coeficiente de almacenamiento, varía de 0.003 a 0.009."

Un valor del coeficiente de infiltración, mediante el método de los dos cilindros, en la localidad de Calimaya, dentro de la zona en estudio, dió un valor de 120 mm/h (Barreto y Díez, 1995).

Se identifican fácilmente las zonas que están cubiertas por agua y las que son inundables. En la cartografía de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1958 y 1976) pueden observarse las zonas inundadas en esos años.

Dadas las fechas de la información obtenida, correspondiente a un lapso de tiempo muy corto, así como su resolución, no es factible apreciar los cambios ocurridos en las áreas boscosas, de cultivo o habitacionales.

Se evidenció, en cambio, desde el inicio del trabajo, que había ocurrido una rápida modificación en las condiciones hídricas en la zona. Los cuerpos de agua se han reducido y prácticamente desaparecido.

Globalmente, sin embargo, se aprecia el avance del desecamiento con el paso del tiempo, aunque existe una zona de la laguna, próxima al poblado de Almoloya, afuera del bordo DUMAC, que permanece inundada a pesar del avance de la desecación.

Indiscutiblemente el desecamiento tiene varias causas:

- posible (?) voladura con dinamita de los manantiales;
- obras de drenaje con el fin de rescatar terrenos al agua;
- obras superficiales de canalización de agua;
- extracción de agua con destino a la ciudad de México, que ha continuado a través de los años.

En una visita en la zona se pudo comprobar:

- que se extrae agua del subsuelo para mantener el nivel freático bajo durante la época de lluvias;

- que se ha logrado rescatar una primera zona de inundación mediante un primer bordo (bordo interior) y se pretende ampliar la zona mediante un segundo bordo exterior que cubrirá al primero. El objetivo principal de estos trabajos, que realiza la Secretaría de Agricultura del Estado de México (Maya, 1997), es retener agua de la época de lluvias para apoyar riegos en la época de secas;

- que existen conflictos de terrenos entre particulares y municipios en la zona;

- que no hay interés en restituir la unidad ecológica. Esto debido al interés económico provocado por los terrenos ya adjudicados.

De acuerdo con la cartografía INEGI de Taxonomía de Suelos y Uso Potencial:

- los terrenos de la zona no son óptimos para la producción agrícola principalmente por ser pesados, es decir, arcillosos y carecer de drenaje.

5.4. ALTERACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Puede notarse que en la zona, a través de los años ha ocurrido una disminución de la superficie y cubierta de los cuerpos de agua, asi como un aumento de las zonas urbanas y zonas cultivadas dentro del área de lagunas. El proceso de urbanización y la disminución de zonas boscosas es también observable, en cierta manera lógico, aunque con la información disponible y por el lapso de tiempo transcurrido aun es difícil de cuantificar. Al respecto en Alvarado (1996) se comenta: "En contrapartida, el uso forestal a pesar de ser en lo general el segundo más importante por extensión, no alcanza a cubrir la totalidad de la superficie que bajo esta denominación protege al suelo, por lo que se incrementan los procesos erosivos y sus consecuentes afectaciones en otros aspectos del medio físico tales como: la reducción de infiltración y por lo tanto en la recarga del acuífero...".

Las gráficas que se muestran en la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 del capítulo anterior, correspondiente a los volúmenes de escurrimiento, dan una idea de los eventos que sellaron la suerte del río Lerma, en su nacimiento.

Toda la zona y su entorno han sufrido grandes modificaciones en los tiempos recientes. Incluso algunas porciones del área lagunar han sido consideradas en el Plan Regional Metropolitano de Toluca, como zona habitacional (Alvarado, 1996). Sin embargo, se ha planteado que la región ocupada por la primera laguna y sus alrededores es clave en el proceso de recarga y de origen del río Lerma. A su vez esta zona es la más afectada por los procesos de deterioro ambiental que han ocurrido.

Respecto a la desecación de la laguna, en Albores (1995) se recoge un testimonio que atribuye al viejo campanero del barrio de San Pedro, San Mateo Atenco: "Muchos viejitos murieron de tristeza al ver que la laguna se secaba. Dijeron que si eso había pasado, ya estaba próximo el fin del mundo." El mismo autor explica el proceso general de secado a la captación de agua para conducirla al Distrito Federal, que experimentó un crecimiento a causa del desarrollo industrial. Añade el autor que todo el proceso es consecuencia de la acumulación capitalista en el país.

Se ignoran las profundidades de las lagunas originales. Las diversas fuentes indican que la superficie de la laguna principal (Lerma) era aproximadamente 3,500 hectáreas. En varias fuentes, como Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A. (1983) se describe el hecho de que los descensos en los niveles de agua, tanto superficial como subterráneos, han ocasionado la desaparición de casi todos los manantiales y la manifestación de agrietamientos en el terreno. La presencia de las grietas estuvo a punto de provocar el secado total de la laguna, hecho que se evitó mediante la construcción del bordo DUMAC (¿DUck Management And Conservation?). Este bordo permite el embalse del cuerpo interior de agua. Su construcción fue financiada por organizaciones canadienses en favor de lugares para la hibernación del pato.

De acuerdo con Ruiz (1997), recientemente la aparición de un sumidero nuevo, en las proximidades de Almoloya del Río modificó el trazo del DUMAC. En otra referencia personal (Maya, 1997) se ha conocido el tirante de esta laguna "reducida": 1.5 m, aproximadamente.

El origen de la construcción de esta laguna artificial aparece en una propuesta de rehabilitación (Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A., 1984). En esta propuesta se indica la conveniencia de construir un cuerpo de agua de 1000 hectáreas con el fin de almacenar 5×10^3 m^3 anuales de agua con objeto principalmente, de conservar humedad para cultivos en 2, 000 ha.

Las acciones que actualmente realiza la autoridad y las que se han ejecutado durante los últimos años, han consistido en la realización de drenes y perforación de pozos que han sido bombeados con el fin de abatir el nivel estático. Estas acciones con el fin de permitir el cultivo y reducir el área de inundación a una superficie definida (Maya, 1997).

Existe además la opinión (Maya, 1997) de que existe un problema de contaminación en el agua superficial que se encuentra en la zona, debido a la carencia de drenajes en las poblaciones aledañas. Al visitar la zona se nota la contaminación en las aguas residuales que llegan a la región baja. Además se nota en esta región el depósito de materiales; igualmente existe azolvamiento en los cauces, por la naturaleza deleznable de los materiales y la desforestación que existe en las zonas altas.

Las obras de ingeniería civil han consistido, primeramente, en el bordo Dumac, al lado de la población de Almoloya del Río, construído en 1975. En 1991 se inició la construcción de un bordo más amplio, que hemos denominado como bordo exterior, el cual no ha sido concluído y que englobará el primero. A la fecha, de este bordo se han construído 8 km y quedan pendientes unicamente 1.8 km. El bordo exterior, terminado, supone mantener tirantes de agua entre 1.40 y 0.90 m, aunque se encuentra su construcción avanza lentamente, por presiones de tipo social.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En el medio técnico nacional, una de las principales dificultades que se tienen para desarrollar cualquier tipo de estudio es la obtención de datos recientes y confiables. Este tipo de insumo es factible obtenerlo mediante la Percepción Remota, con las especiales ventajas que tiene su información, tales como oportunidad y cubrimiento x-y.

La información histórica corresponde a relatos o documentos únicamente. Existe escasa cartografía para estar en posibilidad de dar seguimiento a un proceso.

La información cartográfica fue muy útil en este estudio. El contenido de las fotografías aéreas proporcionó el apoyo necesario para los subsiguientes análisis mediante imágenes de satélite.

La información digital de satélite es de gran utilidad por su actualidad y costo. La presentación, de una banda en blanco y negro, en la pantalla de la microcomputadora

permite observar diversos fenómenos, su evolución y aclara muchos conceptos, amén de facilitar la comprensión regional de los mismos. La zona de estudio pudo captarse en un solo cuadro y de esta manera apreciar el proceso geohidrológico que ocurre.

Las áreas de recarga son identificables mediante las imágenes de satélite en base a sus características de respuesta del terreno y vegetación que crece sobre el mismo. Es importante tomar en cuenta información geológica, la fisiografía del terreno así como los aspectos hidrológicos de la zona. En el corto intervalo de tiempo comprendido entre las dos imágenes disponibles, de siete años, se aprecia la disminución de las superficies de recarga así como su descontinuidad debido a la aparición de otros usos de suelo.

La región que fue ocupada por la primera laguna -ubicada en el centro de la zona y fácilmente identificable en todos los productos de percepción remota- en algunas referencias denominada como de Chignahuapan y sus alrededores, son clave en el origen del río Lerma. A su vez, esta zona es la más afectada por los procesos de deterioro ambiental que han ocurrido.

La Carta de Taxonomía de Suelos, proporcionó la revelación de la desaparecida secuencia lagunar. Además en las fotografías aéreas es posible apreciar la evolución que ha tenido la laguna de Chignahuapan, en la actualidad desaparecida. Su utilidad para el estudio de cuerpos de agua ha quedado demostrada.

La observación del terreno, la de los diferentes tipos de información disponibles evidencian el deterioro ecológico que ha ocurrido en toda la cuenca alta del Lerma, en especial en la zona de estudio. Las causas generales del deterioro, apuntan, de acuerdo al alcance de este estudio, a la desforestación, que ha ocurrido en las regiones altas, a la urbanización que se ha desarrollado en las regiones intermedias y bajas y a la extracción de agua, a través de pozos, para enviarla a la ciudad de México.

La zona de estudio ha sufrido modificaciones en los tiempos recientes. Se han ampliado las áreas de cultivo sobre terrenos inundables, hecho constatable con toda claridad en las fotografías aéreas. Al igual igual que puede apreciarse en las imágenes de satélite, del año 1973 al año 1980, en sólo 7 años, la aparición de un mayor número de discontinuidades en las superficies de las clases denominadas como Bosque e Intermedia, lo que indica una disminución de la cantidad y calidad de las zonas de recarga. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada ha ocurrido un notable aumento de la población que ha incrementado las zonas urbanas. Incluso algunas porciones de la zona lagunar han sido consideradas, como zona habitacional, en el Plan Regional Metropolitano de Toluca.

Existe una reducción del área de agua superficial en la zona de la laguna que se señala en la secuencia de los CROQUIS presentados, elaborados en base a la información disponible, que ha sido de los últimos años. En estos croquis se observa la progresiva reducción -no lineal sino con incrementos/decrementos debidos a la precipitación y a las obras emprendidas por los organismos oficiales- de las zonas inundadas. Comparando la cartografía de los años 1958 y 1959, a la información del vuelo de 1970 se aprecia una reducción aproximada de un 50% del área inundada. Para 1989 las áreas inundables se han reducido aproximadamente al 16% de la superficie original. En la actualidad dichas áreas quedan limitadas a una pequeña superficie cercana a la población de Almoloya del Río.

En toda la zona estudiada se produce recarga, dadas las características de los materiales aflorantes en la superficie; sin embargo, de acuerdo a los materiales geológicos y la respuesta de los suelos y la vegetación que los sobreyace, a la radiación electromagnética, puede señalarse una estratificación en tres regiones, de acuerdo a la intensidad del proceso. En las regiones denominadas Bosque e Intermedia es donde ocurre el fenómeno de recarga.

En los terrenos denominados como de Humedal se tiene la presencia de suelos arcillosos con menor permeabilidad.

En cuanto al acuífero, las líneas de flujo indican que su dirección es hacia la parte antiguamente ocupada por las lagunas, donde el nivel estático se encuentra en la actualidad

a una profundidad de 10 m. Continúa en la zona un flujo superficial y subsuperficial que inunda la zona durante la época de lluvias pero los volúmenes de extracción han provocado el mencionado abatimiento y la desecación de las lagunas.

De acuerdo a los datos de pozos y estudios realizados en la zona, existe sobreexplotación del acuífero. La extracción de agua subterránea para abastecer a la ciudad de México ha provocado dicha sobreexplotación, que se manifiesta en la desaparición de los manantiales y en los abatimientos que han tenido lugar en la parte central del valle.

En esta zona confluyen, además de los intereses de los ayuntamientos cuyos habitantes se han enfrascado en un proceso de adquisición de tierras, el de organizaciones técnicas como la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del Estado de México, la Comisión Nacional del Agua y el Departamento del Distrito Federal. En algunas de estas organizaciones la obtención de información es prácticamente imposible.

El empleo de la tecnología de Percepción Remota y de las disciplinas afines, como Cartografía y Fotogrametría, a la Hidrología y Geohidrología se han mostrado en este trabajo como posibles apoyos para la obtención de algunos datos que facilitarían la estimación de parámetros de escurrimiento e infiltración en la zona no saturada, para entrada en los modelos hidrológicos de escurrimiento superficial e hidrogeológicos para estimar las tasas de infiltración al acuífero.

RECOMENDACIONES

Se considera que la zona, por su importancia como cabecera del río Lerma, debe ser motivo de investigaciones hidrológicas y geohidrológicas más detalladas, que permitan ubicar los sentidos de los flujos y la de los antiguos manantiales.

La mejor aproximación para llevar a cabo un estudio donde se establezcan las medidas correctivas y de protección a aplicar en esta zona, es la realización de una investigación basada en la toma sistemática de datos para después utilizar los avances de los modelos matemáticos en computador digital. El modelado del acuífero permitirá definir sus características y propiedades hidráulicas, aspecto indispensable para su cabal aprovechamiento. Al tener un modelo del acuífero es posible justamente realizar la gestión racional del mismo, al disponer de la posibilidad de simular las diferentes alternativas de explotación antes de efectuarlas en el terreno.

En el estudio que emplee modelado geohidrológico, se aconseja la aplicación de las tecnologías utilizadas en esta investigación para captar información sobre el terreno, como diferentes usos de suelo, sitios de escorrentía o variaciones estacionales de los cuerpos de agua. Estas tecnologías, fotogrametría y percepción remota, se han detallado en los primeros capítulos. Con esta aproximación se podrán plantear las mejores políticas, que concilien todos los intereses y necesidades del agua.

La explotación racional del acuífero, usando métodos científicos, permitirá sostener su producción, evitando daños, que pueden ser irreversibles, en el mismo acuífero y en la superficie del terreno, tales como fisuras y asentamientos.

En los estudios que se realicen en las cuencas del río Lerma es importante plantear, desde el principio, el establecimiento de Sistemas de Información Geográfica para el análisis y despliegue de los datos hidrométricos. Aplicando esta herramienta se tendría el acceso a

datos de tipo geográfico: topografía, suelos, coeficientes de infiltración, precipitación, etc en una base relacionada con información de tipo sociodemográfico y económico con la posibilidad de comparar variables y efectuar análisis.

A futuro, para otros trabajos en esta zona a más detalle se propone el uso del sistema de información geográfica IDRISI, que se ha descrito brevemente. El sistema IDRISI abarca las operaciones de SIG, procesamiento de imágenes y edición de mapas.

El objetivo de los programas de conservación de la zona, idealmente, sería de intentar, en la medida de lo posible, restaurar las condiciones naturales. Restablecer las lagunas es imposible, pero alguna propuesta integral debe emprenderse. Esta propuesta debería ser un proyecto hidro-turístico, que incluyese un compromiso de la población lugareña (aspectos sociales) y un plan que comprendiera obras de:

- reforestación
- drenaje
- construcción de algunos bordos y embarcaderos
- instalación de criaderos de ranas y peces.

La detención del deterioro ecológico y el establecimiento de mejoras requieren, en primer lugar, la propuesta de programas que restituyan las áreas boscosas. El bosque evitaría el acelerado proceso de erosión debido a la escorrentía superficial que arrastra manteriales hacia las partes bajas, inclusive la contaminación de desechos de las poblaciones ribereñas. La presencia de árboles igualmente aumentaría los procesos de infiltración y recarga y protegería la existencia de los cuerpos de agua aún existentes.

Deberán plantearse a la brevedad posible y de una manera clara políticas de uso del suelo que normen los crecimientos de las poblaciones aledañas a las lagunas. Deben prohibirse construcciones en pendientes y dentro de la zona lagunar, especialmente carreteras que crucen esta última para evitar el aumento del proceso de su desaparición, además de los

riesgos y costos que implican la construcción dentro de los mismos. Esto último en la perspectiva de lo que se denomina como protección civil.

Se recomienda insistir en los proyectos de mejor aprovechamiento y reuso del agua en la ciudad de México. La zona de estudio es muestra del daño que se ha hecho a los ecosistemas con el objeto de llevar agua a la misma.

BIBLIOGRAFÍA

Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, J. Rasmusssen, 1986a, "An Introduction to the European Hydrological System -Systeme Hydrologique europeen, SHE, 1: History and Phylosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System, Journal of Hydrology, 87:45-59.

Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, J. Rasmusssen, 1986b, "An Introduction to the European Hydrological System -Systeme Hydrologique europeen, SHE, 2: Structure of a physically-based distributed modelling system.of a Physically-Based, Distributed Modelling System, Journal of Hydrology, 87:61-77.

Aguilar, S. A., G. Arévalo, A. Torres, 1997 "Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma", , Tomo III, 256 p. , Toluca: Atlas de ecosistemas productivos. Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma, Gobierno del Estado de México.

Albores, B., 1995, "Tules y Sirenas, El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma". 472 p. Toluca: El Colegio Mexiquense y Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México.

Alvarado, G., 1996, "Peligro por inundación en la zona urbana y urbanizable de la ex-laguna de Tultepec Lerma, Estado de México", 130 p. Toluca: Programa interinstitucional de Maestría en Estudios Urbanos y Regionales, Universidad Autónoma del Estado de México.

American Society of Photogrammetry, 1966, "Manual of Photogrammetry", M. Thompson ed., 3ed., 2 vols, 1199 p. Washington.

American Society of Photogrammetry, 1983, "Manual of Remote Sensing", R. Colwell ed., 2ed., 2 vols., 2440 p. Washington.

Baker, C., M. Dein, S. Kaczor, 1993, "Wellhead Protection Area Delineation: Linking Flow Model with GIS", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, No.2: 275-287.

Barreto, N., J. A. Díez, 1995, "Cálculo de la infiltración mediante el empleo de dos cilindros", Práctica de la Asignatura de Hidrología Paramétrica. Toluca: Centro Interamericano de Recursos del Agua. UAEM.

Basin S. A., 1993. "Comportamiento del acuífero del Alto Lerma de Octubre de 1990 a Octubre de 1991. Informe Final", no paginado. México, D.F.: Bufete de Asesores en Ingeniería.

Bathurst, J. C., 1986a,"Physically- Based distributed modelling of an upland Catchment using the Systema Hydrologique Europeen", Journal or hydrology, 87: 79-102.

Bathurst, J. C. , 1986b,"Sensitivity Analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an Upland Catchment", Journal or hydrology, 87: 103-123.

Bogomolov, G.,1970, "Hydrogéologie et notions de géologie d'ingénieur", 275 p. Moscú: Editions de la Paix.

Bobba, A.G., R. P. Bukata, J. H. Jerome, 1992, "Digitally processed satellite data as a tool in detecting potential groundwater flow systems", Journal of Hydrology 131: 25-62.

Calimaya, 1927, "Croquis, Mostrando los terrenos que inundan las Aguas en los pueblos de S. Antonio La Isla y la Concepción. Municipio de Calimaya Distrito de Tenango. E. de M. (firma ilegible)". Toluca.

Campos, A. D., 1992, "Procesos del Ciclo Hidrológico", 493 p. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Clarke, K. C., 1986, "Advances in GIS", Computers, Environmental and Urban Systems, Pergamon Press Ltd., Vol 10, no.3/4:175-184.

CNA, Comisión Nacional de Agua, 1997, "Banco Nacional de Aguas Superficiales". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Morelos.

Cowen, D., 1988, "GIS versus CAD versus DBMS: What are the Differences?", Photogrammetry and Remote Sensing, GIS Special Issue, Vol. LIV. 11:1551-1556.

DeVantier, B., A. Feldman, 1993, "Review of GIS Aplications in hydrologic Modeling", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, 2: 246-261.

Díaz, L. R., ed., 1992, "Sistemas de Información Geográfica", 381 p. Toluca: Colección Textos y Apuntes/40, Universidad Autónoma del Estado de México.

Díez, J. A., 1993,"Introducción a la Percepción Remota", 144 p. Toluca: Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

Domenico, P. A., F.W. Schwartz, 1990, "Physical and Chemical Hydrogeology", 823 p. New York: John Wiley & Sons.

Eastman, J. R., 1993, IDRISI, Version 4.1, Update Manual, 209 p. Clark University, Graduate School of Geography.

Eastman, J. R., 1995, IDRISI for Windows, Version 1.0, Users Guide, 373 p. Clark University, Graduate School of Geography.

Engman, E. T., 1982, "Remote sensing applications in watershed modeling", Applied Modeling in Catchment Hydrology, 494 p. Littleton, CO.: Water Resources Publications.

Estes, J. E., L. W. Senger, eds, 1974, "Remote Sensing, Techniques for Environmental Analysis", 340 p. John Willey and Sons, Hamilton Publ. Co.

Fortin, J. P., M. Bernier, 1991, "Processing of remotely sensed data to derive useful input data for the Hydrotel Hydrological Model", IEEE, INRS-Eau.

Farnsworth, R. K., E. C. Barrett, M. S. Dhanju, 1984, "Application of Remote Sensing to Hydrology including Ground Water", 122 p. Paris: Technical Documents in Hydrology, IHP-II Project A.l.5, Unesco.

Franco, S., 1990, "Documento guía para la materia de introducción a la Geografía", 40 p. , Toluca: Colegio Mexiquense.

Franco, S., coord., 1993, "Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma", Tomo I, 422 p. Toluca: Cartografía, Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma, Gobierno del Estado de México.

Freeze, R. A., J. A. Cherry, 1979,"Groundwater", 604 p. New Jersey: Prentice-Hall.

García, M., M. del Valle, N. Lizarazu, L. Díaz, 1994, "El estado actual de la Cartografía Temática en Cuba como base para el desarrollo de obras cartográficas complejas", ATLAS REGIONALES Y ESPECIALES, Teoría y Práctica, R. Candeau coord., 115 p. Toluca: Facultad de Geografía, UAEM.

Guerra, P. F., 1980, "Fotogeología", 330 p. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Gurney, R. J., D. K.Hall, 1983, Satellite-derived surface energy balance estimates in the Alaskan sub-Artic. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22:115-125.

Hernández, A., 1993, "¿Es necesario cambiar de sistema Geodésico de Referencia en México?", Revista Vértices, INEGI, Aguascalientes No. 3:18-24.

Hernández, A., 1995, Comunicación Personal, INEGI, Aguascalientes.

Hernández, A., M. de Loera, 1996, "Restitución Digital", Vértices No.10:27-33. INEGI, Aguascalientes.

Holtz, R., ed., 1973,"The Surveillant Science, Remote Sensing of the Environment", 390 p. Boston: Houghton Mifflin Co.

IBM-INEGI, International Bussiness Machine-Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1989, "Sistema Personal Interactivo de Percepción Remota Versión 2.0", Manual de Operación. 100 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1987a, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFIA. TOPOGRAFÍA". 30 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1987b, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. ORTOFOTOGRAFÍA". 25 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1987c, "SÍNTESIS GEOGRÁFICA, NOMENCLÁTOR Y ANEXO CARTOGRÁFICO DEL ESTADO DE MÉXICO". 112 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1989, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. USO POTENCIAL DEL SUELO". 52 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1990a, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. CLIMATOLOGIA". 50 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1990b, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. EDAFOLOGIA". 48 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1990c, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. GEOLOGÍA". 32p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1990d, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. HIDROLOGÍA". 33 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1990e, "GUIAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA. USO DEL SUELO". 49 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1994, "LA NUEVA RED GEODESICA NACIONAL, UNA VISIÓN HACIA EL FUTURO". 36 p. Aguascalientes.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1996, Cartas digitales actualizadas E14A37, E114A47, E14A38 y A14A48, indéditas. Aguascalientes.

IPESA, Ingeniería y Procesamiento Electrónico SA, 1983, "Rehabilitación de la laguna de Almoloya, Edo. de México", no paginado, México, D.F.: Estudio para la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Dirección de Infraestructura Agropecuaria, Departamento de Estudios y Proyectos. Gobierno del Estado de México.

IPESA, Ingeniería y Procesamiento Electrónico SA, 1984, "Rehabilitación de la laguna de Almoloya en Lerma, Edo. de México". No paginado. México, D.F.

IPESA, Ingeniería y Procesamiento Electrónico SA, 1988, "Estudios y Proyectos para el saneamiento integral de la cuenca alta del río Lerma", No paginado, México, D.F.: Propuesta para la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del Estado de México.

Leipnik, M., K. Kemp, H. Loaiciga, 1993, "Implementation of GIS for Water Resources Planning and Management, Journal of Water Resources Planning and Managemente, Vol. 119, No.2, 184-205.

Lesser y Asociados, S. A., 1992, "Estudio para el diagnóstico del acuífero del Valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción de agua subterránea", no paginado, proyecto para la Dirección de Infraestructura Rural, Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Gobierno del Estado de México.

Lira, J., R. Landgrave, 1994, "SANDI 2.0" 23 p. México, D.F.: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Linsley, R., M. Kohler, J. Paulus, 1977, "Hidrología para Ingenieros", 386 p, México, D.F.: McGrawHill de México.

Lobo, J., 1996, Comunicación personal, Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.

Marín, N., 1997, "En riesgo el DF: Consume 35 mil Litros de Agua por Segundo", Primera plana. EXCELSIOR, 24 de junio, México, D.F.

MAPINFO, 1994, Manual v. 3, Mapinfo Co.

Maxey, G. B., 1964, "Geology", Handbook of applied hydrology, V. T. Chow ed., 4:1-76. New York: McGraw Hill.

Maya, J.,1997, Comunicación personal, SEDAGRO, Toluca.

Meijerink, A., H. de Brouwer, C. Mannaerts, C. Valenzuela, 1994, "Introduction to the use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology", 243 p. UNESCO, International Hydrological Programme, ITC, No.23.

Moussa, R., 1993, "Modélisation hydrologique spatialisée et systeme d'information géographique", La Houille Blanche No.5: 293-301.

Notes, 1997, SPACE IMAGING EOSAT, Vol.12, No.1, Toulouse.

Parker, H. D., 1988, "The Unique Qualities of a Geographical Information System: A comentary", Photogrammetry and Remote Sensing, GIS Special Issue, Vol. LIV, 11:1547-1550.

Rhind, D., 1989, "GIS, Trends", ARC News, ESRI, Red Lands, 28-29.

Ross, M., P. Tara, 1990, "Integrated Hydrologic Modeling with Geographic Information Systems", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, 2: 129-140.

Ruiz, E., 1997, Comunicación Personal. SEDAGRO, Toluca.

Ruiz, V. M., comp., 1993, "Atlas General del Estado de México" Vol 1, Cartografía Histórica, 162 p. Toluca: Gobierno del Estado de México.

Sabalcagaray, M. D., 1981, "Erase una vez Chignahuapan: La primera de las tres lagunas de Lerma", Boletín del Archivo General del Estado de México, No.9:69-74.

Salama, R. B., I. Tapley, T. Ishii, G. Hawkes, 1994, "Identification of areas of recharge and discharge using Landsat- TM satellite imagery and aerial photography mapping techniques", Journal of Hydrology, 162: 119-141.

Salomonson, V.,ed., 1983, "Water Resources Assessment ", Manual of Remote Sensing 3ed., Vol 2, 1497-1570.

Schultz, G. A., 1988, "Remote Sensing in Hydrology", Journal of Hydrology, 100: 239-265.

Schultz, G. A., E. C. Barrett, 1989, "Advances in remote sensing for hydrology and water resources management", 150 p. Paris:Technical Documents in Hydrology, International Hydrological Programme, Unesco.

Schmugge, T., 1987, Remote Sensing applications in hydrology, Rev. Geophysics, 25: 148-152.

SCOT Conseil, 1995, "La Percepción Remota y los sistemas de información geográfica", . Embajada de Francia, México. D.F.: INTERFACE: Ciencia y Tecnología de Francia No. 50:23-24.

Sherretz, L. A., D. W. Fulker, 1988, "Unidata : Enabling Universities to Acquire and Analize Scientific Data. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 69, No. 4.

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1958, "Carta de Uso de Suelo" recopilada por el Ing. Jorge L. Tamayo, Esc. 1:100,000., México, D.F.

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Departamento del Distrito Federal, Cuenca Alta del Río Lerma, 1969, Planos de "Aprovechamiento Hidráulico. Pozos perforados en la Cuenca Alta del Río Lerma", México, D.F.

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, Oficina de Estudios Especiales, 1969 y 1970, "Evoluciones piezométricas y del nivel estático durante el período 1969 y 1970", México, D. F.

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1970, "Estudios para llevar agua del río Lerma a la Ciudad de México". México, D.F.

SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1970, "Boletín Hidrométrico", Dirección General de Estudios, Dirección de Hidrología, México, D.F.

SRH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1986, "Plano elaborado por la Residencia General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos". México, D.F.

SPP, Secretaría de Programación y Presupuesto, 1980, "Catálogo de especificaciones cartográficas", 43 p. México, D.F.: Sub. Cartografía Topográfica, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática.

Tromlin, D., B. Rasche, S. Amundson, Hui-lin, 1987, OSUMAP, Metagraphics Software Co.

Unitecnia, S. A., 1996, "Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México". No paginado. México, D.F.: Contrato No. GAS-006-Pro-96 para la Comisión Nacional de Agua.

Véliz, A., T. Puebla, M. Pérez, L. Eagen, O. Novua, 1994, "El estado actual de la Cartografía Temática en Cuba como base para el desarrollo de obras cartográficas complejas", ATLAS REGIONALES Y ESPECIALES, Teoría y Práctica, R. Candeau coord., 115 p. Toluca: Facultad de Geografía, UAEM.