

55



UNAM

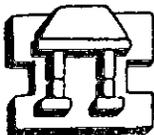
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FES IZTACALA

“APLICACION DE SISTEMAS DE INFORMACION
GEOGRAFICA Y FOTOMOSAICOS SECUENCIALES
DEL LAGO DE PATZCUARO. UN ESTUDIO
RETROSPECTIVO DE MORFOMETRIA LACUSTRE”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
BIOLOGO
PRESENTA
ALBERTO GOMEZ TAGLE CHAVEZ

DIRECTOR
DR. FERNANDO BERNAL BROOKS



IZTACALA

LOS REYES IZTACALA
TLALNEPANTLA, EDO. MEX.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mis Padres
Yolanda y Alberto
grandes maestros y amigos.

A mis hermanas
Pitayita y Paola
Por todo aquello que nos une

A mis maestros
Magnolio (Manuel Elias G.)
Y
Roberto Rico Montiel

A Manzanapple por
Todo lo que vivimos juntos

A mis compañeros de carrera
Por las que nos hechamos y por las que todavía nos faltan

Y muy especialmente a Rosa Laura
Quien tuvo que irse antes que nosotros
En donde quiera que estés Rosi.

AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer patente un muy sincero agradecimiento al Dr. Fernando Bernal-Brooks director de este trabajo por su paciencia, instrucción, confianza, por creer en mi y por aguantarme.

También a los revisores de este trabajo Biol. Mario Chávez Arteaga, Dra. Gloria Vilaclara Fatjó, Dr. Javier Alcocer Durand, M. en C. Daniel Muñoz Iniestra cuyas recomendaciones y correcciones ayudaron a mejorar este trabajo.

A los doctores Luis Miguel Morales Manilla (Moraman) y José Luis Palacio Prieto por sus enseñanzas durante la especialidad en SIG y PR sin las cuales este trabajo hubiera sido imposible y también por aguantarme.

Al equipo SAF 2nd generation por su apoyo y amistad, el Armadillo (Ayotochtle), Chema, Pera y Lore. Por todo lo que me han ayudado a crecer como ser humano.

Al Dr. Manuel Elias G. Por haberme introducido al vasto universo de la limnología.

Al Dr. Roberto Rico Montiel por ser un ejemplo vivo de la ética humana.

CONTENIDO

1. RESUMEN.	4
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1. PERCEPCIÓN REMOTA.	5
2.2. MORFOMETRÍA LACUSTRE Y PERCEPCIÓN REMOTA	8
2.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	9
3. ANTECEDENTES	10
4. OBJETIVOS	13
4.1 OBJETIVO GENERAL.	13
4.2. OBJETIVOS PARTICULARES	13
5. HIPÓTESIS.	13
6. AREA DE ESTUDIO	14
7. MATERIALES Y METODOS	18
7.1. MATERIALES CONVENCIONALES	18
7.2. MATERIALES DIGITALES	18
7.3. EQUIPO	19
7.4. PROGRAMAS	19
7.5 METODOS	20
7.5.1 FOTOINTERPRETACION	20
7.5.2 CREACIÓN DE FOTOMOSAICOS SEMICORREGIDOS	21
7.5.3 GEOREFERENCIACIÓN-RECTIFICACIÓN	23
7.5.4 MANEJO DE ORTOFOTOS	26
7.5.5 IMÁGEN DE SATÉLITE	28
7.5.6 CÁLCULO DE SUPERFICIES Y VARIABLES MORFOMÉTRICAS	28
7.5.5. SECTORES DEL LAGO	30
8. RESULTADOS	31
8.1. MAPAS	31
8.2. AREA TOTAL	31
8.3. AREAS POR SECTORES	38
8.4. OTRAS VARIABLES MORFOMETRICAS	41
9. DISCUSION	42

10. CONCLUSIONES	48
11. RECOMENDACIONES	49
12. REFERENCIAS	50
13. ANEXOS	54
ANEXO 1.	54
ANEXO 2.	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Lago de Pátzcuaro.	15
Figura 2. Climogramas para la caseta Pátzcuaro para dos periodos.	16
Figura 3. Par estereoscópico muestra.	22
Figura 4. Secuencia para la semicorrección de las fotografías.	23
Figura 5. Procedimiento de georreferenciación-rectificación.	25
Figura 6. Dispersión y magnitud del error de georreferenciación.	26
Figura 7. Digitalización de entidades sobre fotomosaicos.	27
Figura 8. Compuestos imagen de satélite y la digitalización en Cartalinx.	29
Figura 9. Puntos y líneas de corte de los sectores.	30
Figura 10. Gráfica de niveles de agua.	42
Figura 11. Cambio de superficie en el Lago de Pátzcuaro 1969-2000.	43
Figura 12. Dispersograma de correlación.	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fotografías aéreas blanco y negro de la zona de estudio	18
Tabla 2. Coordenadas de los puntos utilizados para establecer líneas de corte	30
Tabla 3. Superficies (ha) en el Lago de Pátzcuaro para diferentes años	31
Tabla 4. Superficies por entidad para cada uno de los sectores (1969-2000)	39
Tabla 5. Matriz de cambio relativo	40
Tabla 6. Parámetros morfométricos	41
Tabla 7. Cambio de superficie	44
Tabla 8. Coeficientes de Correlación	45

INDICE DE MAPAS

Mapa 1. Lago de Pátzcuaro 1969.	32
Mapa 2. Lago de Pátzcuaro 1974.	33
Mapa 3. Lago de Pátzcuaro 1986.	34
Mapa 4. Lago de Pátzcuaro 1991.	35
Mapa 5. Lago de Pátzcuaro 1995.	36
Mapa 6. Lago de Pátzcuaro 2000.	37

1. RESUMEN.

El empleo de técnicas SIG (Sistemas de Información Geográfica) y Percepción Remota en diversas disciplinas han permitido postular su aplicabilidad en estudios de morfometría lacustre. En este trabajo se implementó un método para generar fotomosaicos semicorregidos dentro de un ambiente de diseño gráfico y un SIG, así como el empleo de técnicas SIG estándar e imágenes de satélite, con el fin de crear una serie de tiempo (1969-2000) y poder analizar los cambios ocurridos durante este período en la morfometría del lago. Los datos de área obtenidos correlacionan con los de nivel del agua ($r=0.9819$). En 1969 (11,392.22 ha) presenta una menor área que en 1974 (11,873.67 ha) lo cual implica un aumento de tamaño entre 1969 y 1974. A partir de este último al presente la tendencia es a disminuir (2000 con 9,757.23 ha), en paralelo al cambio de nivel. Esto implica una posible relación entre los cambios en la morfometría, las variaciones en los patrones climáticos en una escala regional y la historia de uso de suelo de la cuenca.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. PERCEPCIÓN REMOTA.

El término “Percepción Remota” (PR) se utiliza para designar un conjunto de técnicas y productos que permiten obtener información sobre un objeto o área de estudio sin la necesidad de entrar en contacto directo con él. Existe una amplia gama de productos de percepción remota, que van desde fotografías aéreas hasta imágenes de radar o imágenes satelitales hiperespectrales de alta resolución. La fotografía aérea es la técnica más antigua de percepción remota y se remonta a mediados del siglo XIX cuando De Candolle fotografió la campiña francesa desde un globo. La invención del aeroplano y su uso con fines militares durante la 1ª guerra mundial (1914-1917) permitió el desarrollo de la fotografía aérea siendo entonces utilizada para ubicar posiciones e infraestructura enemiga. Posterior a la guerra, los cuerpos militares de diferentes países desarrollaron técnicas específicas para emplear la fotografía aérea en la creación de mapas detallados del terreno con diversas aplicaciones (Moncayo *et al.*, 1970).

En las fotografías aéreas existen distorsiones creadas por los sistemas ópticos de las cámaras, el desnivel del terreno y el movimiento de la plataforma o soporte de la cámara. La fotogrametría consiste en un conjunto de procedimientos que tiene como fin el corregir o minimizar estas distorsiones y representar el terreno de una forma más objetiva usualmente en forma ortogonal (Wolf, 1974).

Cuando una fotografía aérea ha sido corregida (tratada fotogramétricamente) y proyectada ortogonalmente se denomina ortofotografía.

Dado que las fotografías aéreas cubren una extensión del terreno limitada, obtener información de áreas extensas requiere de varias fotografías adyacentes que abarquen la zona. Cuando estas fotografías se unen se obtiene un fotomosaico, si cada una de las fotografías ha sido corregida la unión de estas se denomina ortofotomosaico, y si este se encuentra además referido a la superficie terrestre mediante algún sistema de coordenadas se le llama ortofotomapa.

La diferencia principal entre fotomosaicos, ortofotomosaicos y ortofotomapas radica en que el primero representa la fuente primaria de información, por lo que las distorsiones no han sido corregidas y la medición de distancias y áreas no se ajusta a la realidad (Herrera, 1983).

La manera más fácil de crear un fotomosaico es tomar un conjunto de fotografías aéreas, recortarlas y luego pegarlas sobre una base (madera, cartón, acrílico, etc.). Mientras que la creación de un ortofotomosaico o un ortofotomapa implica la corrección de cada fotografía empleada antes de crear el mosaico.

Previo al desarrollo de los sistemas fotogramétricos digitales que permiten realizar esta corrección dentro de ambientes de cómputo y tener resultados de alta precisión, la corrección se realizaba mediante aparatos analógicos compuestos de espejos y manivelas (stereosketch, sketchmaster, etc.) (Herrera, 1983). La cartografía mexicana producida antes de la década de 1990 utilizaba sistemas analógicos de primer orden. Es decir, los métodos fotogramétricos empleados permiten la corrección de la mayoría de los errores en la fotografía (Wolf, 1974; Herrera, *Op Cit.*).

Esta corrección fotogramétrica sea analógica o digital muy precisa, tiene un costo elevado. Los sistemas (programas) tienen un precio cercano a los 6,000 dólares. El empleo de estos sistemas solo se justifica con un volumen de trabajo importante como la generación de cartografía regional o diferentes proyectos donde se requiera de cartografía local específica no disponible en el mercado.

Una alternativa al trabajo analógico convencional o a los sistemas digitales de alto costo es el empleo de fotomosaicos semicorregidos digitalmente (Navarrete, 1999). El término semicorregido hace mención a la corrección de las distorsiones fotográficas asociadas al movimiento de la plataforma y hasta cierto punto a los sistemas ópticos. La limitante principal de esos materiales es la complejidad del relieve, no obstante, en terrenos con relieve bajo o plano como lo es un lago la corrección será casi total (caso del área de estudio), por lo que la generación de mapas permitirá la medición de distancias y áreas. Estos fotomosaicos son creados en ambientes digitales utilizando paquetería convencional de bajo costo. Si bien los fotomosaicos semicorregidos no compiten con la calidad de los métodos fotogramétricos digitales, pueden emplearse para generar mapas en ciertas zonas. El bajo costo de los programas hace asequible este método a grupos de investigación con escasos recursos.

Por otra parte las imágenes de satélite en información digital obtenida mediante barredores (escaners) desde satélites en órbita que envían los datos en forma de ondas de radio a estaciones receptoras en tierra quienes decodifican la información y producen una imagen visible. Las imágenes satelitales pueden abarcar grandes áreas geográficas y diferentes partes del espectro electromagnético. En ocasiones un mismo satélite puede tener varios sensores por lo que en general las imágenes son denominadas de acuerdo al sensor que las obtuvo.

El sensor Landsat 7 TM (Mapeador Temático, por sus siglas en inglés) cuenta con 8 bandas. Las tres primeras bandas (1, 2 y 3) corresponden aproximadamente al espectro visible capturando la primera la fracción azul, la segunda la fracción verde y la tercera la porción roja de este. Las bandas 4, 5, 7 y 8 corresponden a fracciones infrarrojas del espectro que van del infrarrojo cercano al lejano. Estas bandas tienen una resolución de 30x30 *m*. La banda 6 corresponde a la fracción infrarroja térmica y tiene una resolución de 60x60 *m* que es diferente a las demás. Generalmente solo se trabajan 7 bandas en estudios con este tipo de imágenes a reserva de que la porción térmica sea requerida.

Un dispositivo de vídeo convencional posee tres cañones, uno para cada color básico. Estos son Rojo, Verde y Azul. Convencionalmente se emplean las siglas RGB (de los nombres de los colores en inglés Red, Green, Blue) para denotar una imagen a color creada de esta forma.

Dado que las diferentes bandas del sensor satelital TM corresponden a una porción definida del espectro electromagnético, es factible formar imágenes RGB proyectando en cada cañón una banda diferente. Estas imágenes RGB se denominan compuestos de imagen de satélite o compuestos de falso color.

La combinación de bandas como imágenes RGB permite diferenciar rasgos o estructuras no detectables por el ojo humano o mediante otros métodos de percepción remota como la fotografía aérea (Palacio y Luna, 1994). Ambos medios, imágenes de satélite y fotografías aéreas son denominados percepción remota sin embargo su procesamiento difiere sustancialmente aunque presenta semejanzas p. Ej. georreferenciación-rectificación.

Usualmente las imágenes de satélite se asocian con análisis automatizados a partir de firmas espectrales, por otra parte, la creación de compuestos RGB puede generar imágenes que permitan una interpretación visual. Esta última cuando es realizada por un buen intérprete con conocimiento del

área rinde resultados tan buenos o incluso superiores a los métodos automáticos (Palacio y Luna, 1994). Estos autores sugieren la creación de diferentes compuestos para desplegar la imagen de satélite y definir que combinación de bandas es la mas apropiada para la interpretación visual.

2.2. MORFOMETRÍA LACUSTRE Y PERCEPCIÓN REMOTA

Los lagos localizados en cuencas cerradas o endorreicas varían en nivel y área en función del balance hídrico entre precipitación y evaporación, y la magnitud de las fluctuaciones depende de la contribución relativa del agua subterránea. Por tanto, los cambios de nivel son mucho mayores en lagos de cuencas terminales donde no existen aportaciones significativas por flujos superficiales o mantos freáticos (Fritz *et al.* 1999).

El Lago de Pátzcuaro se encuentra dentro de una de estas cuencas cerradas y no tiene salidas superficiales aparentes (Bradbury, 2000; Gómez-Tagle, 1997). Durante las últimas décadas este cuerpo de agua ha mostrado un descenso de nivel drástico de 2,041 a 2,035 *m.s.n.m.* (Bernal-Brooks, *et al.*, 2001), con un nivel promedio de 2,037.3 *m.s.n.m.* entre 1969 y 2000 (Bernal-Brooks, *com. Pers.*) y aunque su balance hidrológico se encuentran actualmente en discusión (Bernal-Brooks, *et al.*, *Op Cit*; Bernal-Brooks, 2001), es factible suponer que los cambios de nivel originan modificaciones en el área del lago susceptibles de ser analizadas mediante técnicas de percepción remota.

Estas técnicas incluyen la generación de secuencias de imágenes históricas a partir de imágenes de satélite o de fotografías aéreas. Meaden y Kapetsky (1991) describen el uso de técnicas PR en cuerpos de agua continentales y otros autores como Johnson y Cage (1997 en Gómez-Tagle *et Al.* 2001) discuten sus tendencias, uso actual y futuro en la investigación en cuencas.

Por otra parte se tiene que los lagos climáticamente sensibles, se localizan en su mayoría en zonas áridas y semiáridas del planeta, sin embargo frecuentemente se carece de información de campo sobre niveles y áreas. En este sentido los programas mundiales relacionados con el tema hicieron un llamado para realizar estudios hidrológicos dentro de una perspectiva más global mediante el uso de técnicas de percepción remota (Birkett y Mason, 1995). Así, el Laboratorio Mullard de Ciencia Espacial (MSSL, Mullard Space Science Laboratory) desarrolla actualmente una Base de Datos Global de Conservación de Lagos y Cuencas (GLCCD, Global Lake and Catchment Conservation

Database). La medición de áreas y niveles de una serie de lagos climáticamente sensibles involucra el uso de radiómetros satelitales y altímetros de radar respectivamente, con una limitación inherente a la tecnología de análisis de lagos, relativa a una superficie mínima de 100 km².

El estudio de lagos climáticamente sensibles de menores dimensiones a la señalada anteriormente, aporta información valiosa sobre la situación climática regional cuando se cuenta con datos de campo e imágenes de percepción remota, que es mas bien un caso raro. La existencia en México de series de tiempo en archivos de gobierno (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000) facilita la posibilidad de realizar estudios retrospectivos sobre el cambio morfométrico de algunos lagos contenidos en cuencas endorreicas.

Los estudios retrospectivos involucran periodos de tiempos largos (décadas) y por ello las fotografías aéreas en blanco y negro son la única forma de percepción remota existente para algunos periodos. Ejemplos recientes incluyen estudios de cambios de vegetación en las sabanas del sur de África (Hudak y Wessman, 1988), la cuenca del arroyo El Negrito en el suroeste de Nuevo México (Miller, 1999 en Bernal-Brooks et Al. 2001) y el Maquis mediterráneo en el norte de Israel (Kadmon y Harari-Kremer, 1999 en Gómez-Tagle *et Al.*, 2001). Al respecto, la alta resolución espacial requerida para reconocer los límites de los cuerpos de agua y evaluar el cambio en la morfometría de los lagos en el tiempo y sus posibles causas, hace que las fotografías aéreas sean útiles a estos fines.

2.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica o SIG (denominados GIS en la literatura en inglés) son sistemas computarizados que permiten la entrada, almacenamiento, representación, análisis de datos; así como la salida eficiente de información espacial (mapas) y atributos (tablas) (Burrough, 1986 y Valenzuela, 1989), de acuerdo a especificaciones y requerimientos del usuario. La tarea principal de un SIG es servir de apoyo en la toma de decisiones espaciales para el manejo y conservación de recursos (Valenzuela, 1989). Esto implica que tiene como objetivo el transformar datos geográficos en información válida para la toma de decisiones ambientales, utilizando herramientas y modelos analíticos provenientes de diferentes disciplinas (López, 1999).

3. ANTECEDENTES

La zona del lago de Pátzcuaro es de importancia histórica en México como sede del imperio Purhépecha (1,300 D.C.), una de las culturas prehispánicas más relevantes del país. La capital del imperio se estableció en Tzintzuntzan (León-Portilla *et al.* 1974), sitio aledaño al lago junto con otros antiguos centros ceremoniales.

Si bien los estudios de sedimento indican que en la región se ha practicado la agricultura desde hace aproximadamente 6,000 años, es en el periodo Clásico (periodo Purhépecha) donde la tasa de erosión de la cuenca incrementó considerablemente (O'hara, 1991). Los registros indican un incremento en el polen de *Zea* y especies asociadas a cultivos así como de hierro, un elemento particularmente abundante en las arcillas de la zona (Bradbury, 2000).

El lago de Pátzcuaro ha sufrido cambios de diversa índole a lo largo del tiempo. Estos incluyen modificaciones en la morfología y en las características del medio acuático. A través de los últimos 48,000 años estos cambios se han debido principalmente a oscilaciones climáticas de escala regional y global. Sin embargo es durante los últimos 800 años la influencia del hombre ha dejado su marca en el lago. Actualmente es difícil distinguir entre los efectos ocasionados directamente por el hombre y aquellos ocasionados por fenómenos climáticos "naturales" (Bradbury, 2000).

En las últimas décadas ha ocurrido en el Lago de Pátzcuaro un cambio de nivel y profundidad. Esto implica posibles cambios morfométricos que a la fecha no han sido cuantificados. Sobre las causas de los cambios en nivel y profundidad existen diferentes posturas. Algunos autores consideran que el fenómeno obedece al azolvamiento del lago por erosión y deforestación de las áreas circundantes (Gómez-Tagle, 1997; Chacón, 1993), o que responde al cambio climático desfavorable que se refleja en un descenso generalizado de los niveles de agua en los lagos de la mesa central de México (Bernal-Brooks y MacCrimmon 2000; Bernal-Brooks *et al.*, 2001; Bernal-Brooks, 2001). Bradbury (*Op Cit*) considera que se debe al efecto sinérgico entre ambos.

El estudio de los cuerpos de agua y sus cambios mediante fotografías aéreas es reciente y los estudios son puntuales. Una de las causas es la falta de aerofotografías de diferentes fechas que permitan construir series de tiempo.

Sin embargo existen diferentes ejemplos de esta aplicación de la fotografía aérea, como se expresa a continuación:

Grimson y Greene (1992) estudiaron, mediante fotografías aéreas de 11 fechas (1935-1980) el cambio de la porción pantanosa del Lago Erie en la delta del río Hurón. Los registros de los niveles de agua del lago complementan el estudio; no realizan corrección de las fotografías, mas bien calculan la escala exacta y realizan mediciones directamente. Los autores reportan una pérdida de 836.4 ha de tierras pantanosas en el periodo estudiado, atribuido a la sucesiva construcción de presas en el curso del río Hurón. Las presas detienen el aporte continuo de sedimentos a las tierras pantanosas que, al carecer del mismo, se vuelven susceptibles a la erosión ocasionada por las olas y las corrientes del lago. Este trabajo marca importantes pautas metodológicas para la construcción de series de tiempo que permitan el estudio de los cambios de superficie y entidades en cuerpos de agua.

Bernal-Brooks y MacCrimmon (2000) estudiaron los cambios en la morfometría del lago Zirahuén ocasionados por la fluctuación en los niveles de agua y el aporte de sedimentos. En este caso, emplean cartas batimétricas, fotografías aéreas y mediciones de campo. La sobreposición digital de las fotografías aéreas permitió cuantificar una pérdida de área de 0.8 km² entre 1974 y 1995. Los resultados indican un cambio en la profundidad de 46 m en 1942 (De Buen, 1943) a 39.4 m en 1995, y una pérdida total en profundidad de 6.6 m. Además los autores detectaron una fluctuación paralela en los niveles de agua de otros lagos en la región (Cuitzeo y Chapala), que revela una influencia climática sobre los lagos regionales.

Navarrete (1999) propone el uso de un programa de aplicación gráfica y un SIG para generar fotomosaicos semicorregidos del exlago de Texcoco. Este autor emplea fotografías aéreas obtenidas por una cámara digital. El SIG es utilizado para calcular los errores y desviaciones asociados al proceso y concluye que es aplicable en terrenos de relieve bajo.

Gómez Tagle *et al.* (2001) propusieron una base metodológica para el estudio del Lago de Pátzcuaro a partir de la utilización de fotografías aéreas escaneadas y cartas topográficas, dentro de un programa de diseño gráfico y un ambiente SIG de manera similar a Navarrete (*Op. Cit*). El resultado fue la obtención de tres productos cartográficos con las siguientes características:

El primer caso incluye diversas entidades presentes en las cartas topográficas (zona de inundación, lago, etc.) con una georreferenciación y rectificación a partir de 86 puntos de control obtenidos de las mismas cartas. Con la digitalización de entidades en seis sectores, el área total calculada de 11,839.93 *ha* incluye un error medio cuadrático (EMC*) total de 24.5m.

El segundo caso incluye fotointerpretación y digitalización sobre un fotomosaico (9 fotografías aéreas secuenciales 1:50,000) con georreferenciación y rectificación sobre los mismos puntos que el caso anterior. El área total estimada, de 11,648.19 *ha*, incluye un EMC total de 19.5m.

El tercer caso se basa en entidades fotointerpretadas y digitalizadas sobre el mismo fotomosaico del caso anterior. Sin embargo, la georreferenciación y rectificación involucra 40 puntos de control determinados directamente en campo mediante una Unidad de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en Inglés; modelo Garmin 45). El área estimada de 11,912.04 *ha* presenta un EMC total de 197.6 *m*.

Las cartas topográficas representan un *control positivo*, ya que fueron generadas con métodos de primer orden (ver introducción). En contraste, en el tercer caso el uso de GPS dio lugar al mayor EMC y un error en la estimación de área. Al parecer la baja recepción de la señal satelital por parte de la unidad GPS en las zonas aledañas al volcán Tareokeri (cuello del lago) sugiere el origen del desplazamiento en el fotomosaico. Esto debido a un posible efecto de sombra orográfica.

En consecuencia el mejor producto cartográfico obtenido fue el segundo ya que permite conocer las superficies con vegetación emergente, vegetación sumergida, áreas libres de vegetación e islas, con un menor EMC, en contraste con la interpretación realizada en las cartas topográficas comerciales que agrupa a la vegetación sumergida y la emergente como zona de inundación.

La diferencia de área entre el primer y el segundo producto es de 191.2 *ha* que corresponde a al 1.6% del área del *control positivo*. Los EMC son aceptables (menores a 25m que corresponde a 0.5 *mm* en la escala original del mapa empleado como control).

* El EMC o RMS en inglés es una medida del error de ubicación de un punto determinado. El EMC total indica el error de ubicación general en el mapa o imagen. El EMC aceptable máximo debe ser 1 pixel para el caso de imágenes o de 0.5 *mm* en las unidades y escala en la carta.

En el trabajo antes mencionado se emplearon puntos definidos para generar los cortes de los sectores del lago. Esto con el fin de proporcionar consistencia que permitan comparar las áreas. En trabajos previos (Chacón,1989; Gómez-Tagle, 1997; Tellez y Motte, 1976) solamente se mencionan los sectores del lago y no se encuentran delimitados mediante coordenadas.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL.

Crear una serie de tiempo cartográfica (mapas) a partir de fotomosaicos digitales e imágenes de satélite que permitan realizar un análisis de los cambios de morfometría lacustre ocurridos en las tres décadas pasadas y su relación con los cambios de nivel del agua registrados.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

4.2.1. Crear fotomosaicos semicorregidos de diferentes fechas para el lago de Pátzcuaro (1969, 1974, 1986, 1991 y 1995).

4.2.2. Para cada fecha de la serie, realizar la fotointerpretación, el análisis y la digitalización de entidades (vegetación emergente, sumergida, islas y zona limnética) con base en el fotomosaico semicorregido.

4.2.3. Realizar la interpretación visual, el análisis y la digitalización de entidades (vegetación emergente, sumergida, islas y zona limnética) con base en la imagen de satélite Landsat 7 2846 del 28 junio 2000.

4.2.4. Analizar los cambios de área en el vaso lacustre como en cada una de las entidades y sectores a lo interno del lago así como los cambios en parámetros morfométricos existentes dentro de las fechas de la serie 1969-2000.

5. HIPÓTESIS.

Para el presente proyecto se plantea la siguiente hipótesis de trabajo:

Los cambios de nivel de agua en el Lago de Pátzcuaro durante las tres décadas pasadas originan cambios en el área del lago que pueden ser analizados mediante técnicas de percepción remota.

6. AREA DE ESTUDIO

De acuerdo con Deevey (1957), Pátzcuaro es el lago “mejor conocido en América Media (México-Panamá)” que, además, “ha sido estudiado en todos sus aspectos”. Con lo anterior, el autor reconoce el trabajo pionero en Biología Acuática realizado por la Estación Limnológica de Pátzcuaro (De Buen 1941, 1944) y el Instituto de Biología (Ancona *et al.*, 1940).

Bernal-Brooks *et al.* (2001) considera que el Lago de Pátzcuaro es el caso de estudio con la mayor cantidad de referencias científicas en lo que respecta al estudio de las aguas continentales en México. Sin embargo, la mayoría de los documentos analizados representan esfuerzos aislados en el tiempo sin una continuidad y planificación de largo plazo. En adición, la aplicación unilateral de metodologías en los estudios limita la obtención de una retrospectiva coherente sobre las condiciones variantes del lago a lo largo de las seis décadas pasadas.

El Lago de Pátzcuaro (Figura 1) se encuentra dentro de una cuenca endorréica de 93,430 ha (Gómez-Tagle, 1997) en el eje volcánico transmexicano, entre los 19°31'41" N, 101°32'25" W y los 19°41'8" N, 101°43'3" W, aproximadamente. Está ubicado 50 km al sudoeste de la ciudad de Morelia, la capital del estado. Políticamente la cuenca se encuentra en el estado de Michoacán y abarca porciones de los municipios de Pátzcuaro, Quiroga, Villa Escalante, Nahuatzen e Ihuatzio.

La estación 16087 del Sistema Meteorológico Nacional reporta temperatura media de 15.8° a 16.7° C (en un periodo de 20 años), precipitación de 566.5 a 1,653.8 mm (Chacón y Múzquiz, 1997) y evaporación de 1,351 a 1,810 mm. (SMN, 1995). Dado que algunas variables climáticas para la zona fluctúan dentro de ciclos (Chacón y Múzquiz, *op. Cit.*) el clima puede ser clasificado de distintas formas para diferentes periodos.

En el periodo 1921-1944 es del tipo Cb(w2)(w)b(e)g; subhúmedo templado con lluvias en verano e invierno seco, el cociente promedio P/T (precipitación/temperatura) es mas de 55.3 (en este periodo de 63.8) el porcentaje de precipitación invernal es menor al 5%, la temperatura media anual entre 12 y 18° C, con un verano caliente pero con una oscilación térmica anual extrema (7-14°C), y

marcha tipo Ganges; con el mes mas caliente del año antes del solsticio de verano (figura 2a) (Chacón y Múzquiz, 1997).

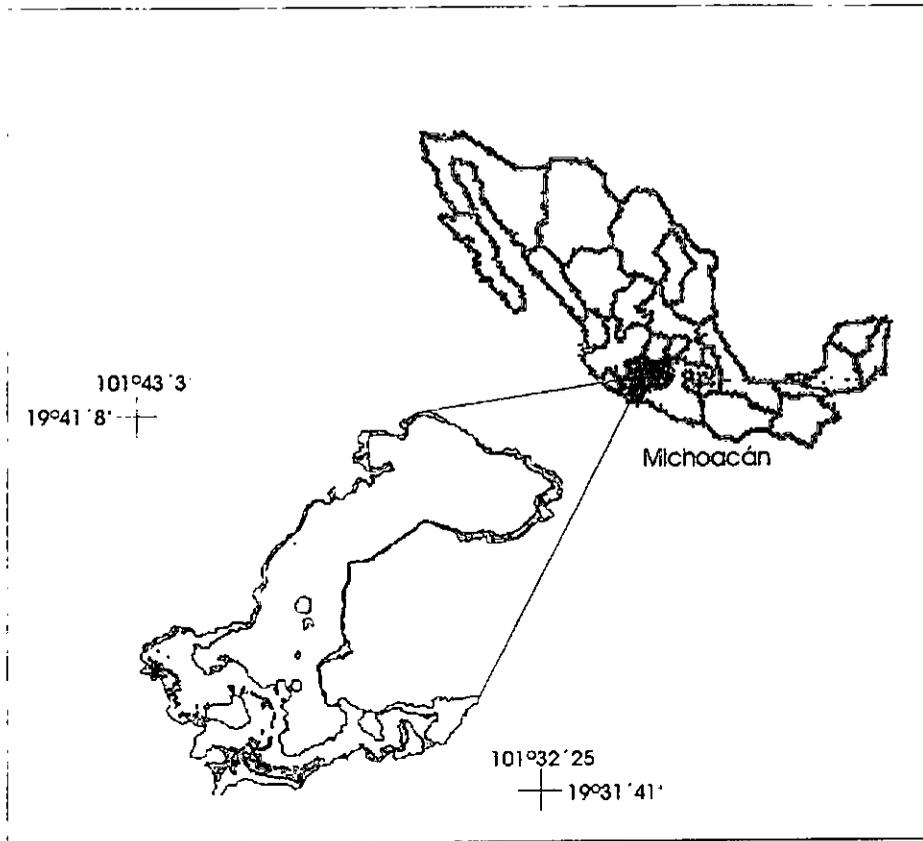


Figura 1. Ubicación del Lago de Patzcuaro

Para el período 1970-1986 su fórmula es la siguiente $Cb(w2)(w)b(i')g$ indicando un clima subhúmedo templado con la misma distribución de precipitación y temperatura que el período anterior pero donde el cociente promedio P/T se encuentra por debajo de 55.3 (en este período de 55.2) y con una oscilación térmica anual baja ($5-7^{\circ}C$), la marcha es también tipo Ganges con el mes mas caliente del año antes del solsticio de verano (figura 2b) (Chacón y Múzquiz, *op. Cit*).

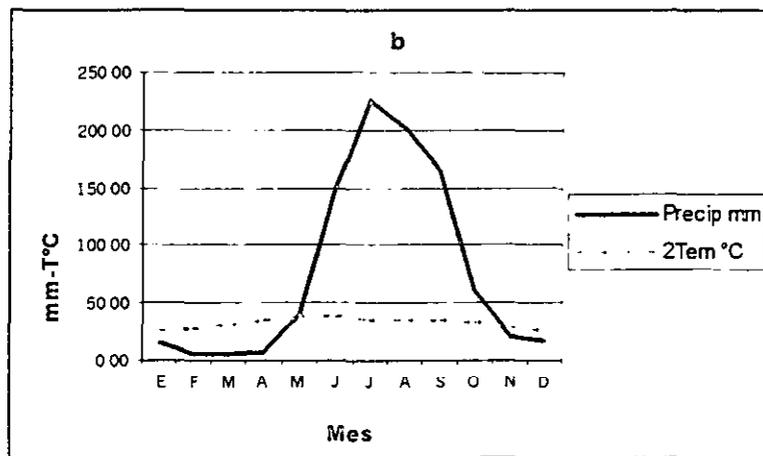
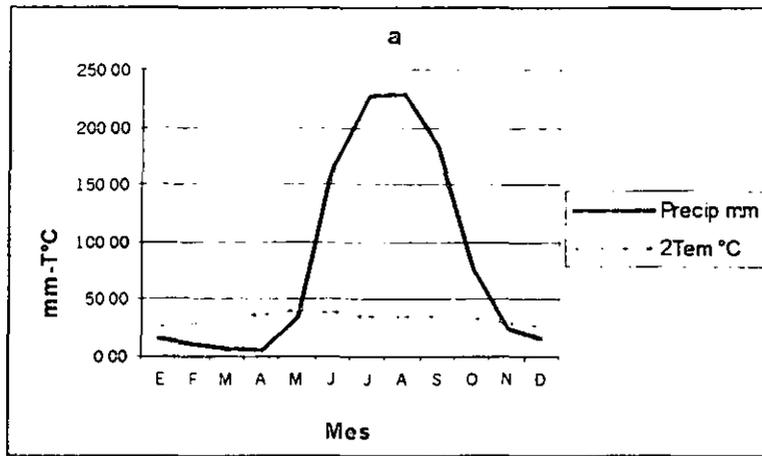


Figura 2. Climogramas para la caseta Pátzcuaro para dos periodos; a) 1921-1944 y b) 1970-1986.

Las fluctuaciones de nivel del lago van de 2035 a los 2041 *m.s.n.m.* en el periodo 1939-2000 (Bernal-Brook, 2001). El área máxima detectada es de aproximadamente 116 km^2 (Gómez-Tagle *et Al.*, 2001) y no cuenta con salidas superficiales evidentes (Chacón, 1993; Bernal-Brooks, 2001; Bradbury, 2000).

El origen del lago se remonta al terciario o cuaternario (Tamayo and West, 1964; Demant, 1975), cuando los eventos volcánicos y tectónicos cortaron el flujo de un tributario ancestral del Río Lerma creando una cuenca cerrada y el lago (De Buen, 1944a; Barbour, 1973). De Buen (1941, 1944b), Osorio-Tafall (1941, 1944) y Deevey (1957) lo describen como un lago somero de tipo tropical a excepción de su régimen térmico. El Lago de Pátzcuaro muestra similitud con otros lagos de

la zona templada de Norteamérica en cuanto al tipo de elementos bióticos (Osorio-Tafall, 1944; Hutchinson *et al.*, 1956).

Los materiales geológicos son principalmente rocas volcánicas, mayoritariamente basalto en las partes altas que rodean al lago, mientras que sedimentos coluviales, fluviales y lacustres caracterizan las partes bajas (Chacón, 1993). Gómez-Tagle (1997) menciona que los principales tipos de suelo en la cuenca son andosoles (generalmente por arriba de los 2,150 *m.s.n.m.*), luvisoles, acrisoles, litosoles en las partes altas y medias de la cuenca, en las partes bajas hay una pequeña zona con suelos de características vérticas mientras que los suelos de origen gleyico dominan las zonas saturadas o temporalmente inundadas cercanas al lago.

En la cuenca existen suelos enterrados (luvisoles o acrisoles) bajo una capa de diferente espesor, de suelo derivado de ceniza volcánica (ando). El espesor máximo documentado de esta capa es de 6 m y la presencia de capas ácricas o lúvicas en algunos sitios se debe a la total remoción del ando por erosión. Esta presenta rangos que van de 2.76 a 432 *ton/ha/año*, la mayor proporción de la cuenca presenta un valor de 28 *ton/ha/año* (Gómez-Tagle, 1997).

Respecto a la hidrología, la cuenca tiene una densidad de drenaje que va de 0.52 *km/km²* (subcuenca de Pátzcuaro) a 1.35 *km/km²* (subcuenca Napizaro) siendo el promedio de 1.152 *km/km²*. El radio de bifurcación para 1° y 2° orden va de 3.33 (subcuenca Sn. Andrés Tziróndaro) a 7.0 (subcuenca Pátzcuaro) con un promedio general de 4.41 (Gómez-Tagle, *op. Cit.*). Esto implica que la mayor densidad de drenaje de la cuenca se encuentra en sitios en proceso de erosión. El hecho de que en esta cuenca la mayoría de los arroyos sean intermitentes (solo hay un afluente perenne, canal Chapultepec) significa que su red aporta gran cantidad de material hacia el lago durante las tormentas torrenciales características en la zona. Físicamente la cuenca del lago de Pátzcuaro y sus subcuencas presentan un daño severo, la erosión presente en la cuenca requiere de acciones con enfoque ecológico-económico fundamentado ya que las obras realizadas hasta el momento han tenido resultados poco alentadores (Gómez-Tagle, *op. Cit.*).

7. MATERIALES Y METODOS

7.1. MATERIALES CONVENCIONALES

- Cartas topográficas INEGI (1977a y 1977b) escala 1:50,000 E14A21 (Cherán) y E14A22 (Pátzcuaro) obtenidas por métodos fotogramétricos de primer orden a partir de fotografías de 1974.
- Carta E14A22 (Pátzcuaro) 2ª edición (1998) creada a partir de las aerofotografías escala 1:75,000 de 1995 (INEGI, 1998).
- Tabla 1 Fotografías aéreas blanco y negro de la zona de estudio de diferentes años y escalas:

Año del vuelo	Escala	Instancia	No Fotos para fotointerpretación	No. Fotos para fotomosaico
1969	1:20,000	INEGI-COFOM	26	23
1974	1:75,000	INEGI	12	6
1986	1:30,000	Mex. Aerofotos	23	19
1990-91 ¹	1:25,000	INEGI-COFOM	38	25
1995	1:75,000	INEGI	12	-

Tabla 1

7.2. MATERIALES DIGITALES

- Ortofotos comerciales con escala 1:20,000 y una resolución espacial de 2 m, mismas que abarcan una sexta parte de una carta topográfica 1:50,000 (INEGI, 1999). Siendo E14A21f para la carta Cherán y E14A22 a, b y d para la carta Pátzcuaro.
- Conjuntos vectoriales digitales actualizados a 1995 de las cartas E14A21 y E14A22 1:50,000 donde se incluyeron los temas; curvas de nivel, hidrología polígonos, hidrología lineal, vías de transporte.

¹ Se utilizan y mencionan como 1991, aunque una parte de las fotografías empleadas fueron tomadas en dos fechas muy cercanas entre sí en los meses de diciembre de 1990 y enero 1991.

- Modelo de elevación de terreno generado *ex-profeso* mediante Interpolación de redes Triangulares Irregulares (TIN) con resolución de 30 m (Gómez-Tagle y Zepeda, en preparación).
- Imagen de satélite Landsat 7 2846 del 28 junio 2000.

7.3. EQUIPO

- Estereoscopio de espejos Wild Heerbrug.
- Estereoscopio de campo.
- Computadora Pentium III 650 MHz, IBM compatible con monitor SVGA.
- Ratón Alaska III plus de alta precisión.
- Escáner de cama plana y lámpara fluorescente Scanport SQ4800.
- Impresora de inyección de tinta Hewlett Packard DeskJet 890c

7.4. PROGRAMAS

- Programa especializado en procesamiento gráfico y diseño; Adobe Photoshop V. 5.0
- Sistema de información geográfica: Idrisi 32 V2.0
- Programa de construcción de mapas: Cartalinx V1.2

7.5 METODOS

7.5.1 FOTOINTERPRETACION

La fotointerpretación convencional² de fotografías aéreas (estereoscopio de espejos) permitió definir las diferentes entidades en el lago:

1. Vegetación Emergente
2. Vegetación Sumergida
3. Area limnética o libre de vegetación.
4. Islas

Los criterios para definir las distintas entidades radican en propiedades inherentes a la fotografía como; color, textura y distribución (Avila, 1982; Moncayo *et al.*, 1970; Hudak y Wessman, 1998 y Guerra, 1980) con una adaptación para las condiciones y objetivos de este trabajo.

La impresión de luz registrada en una fotografía aérea como una emulsión fotosensible desde una plataforma a distancia sobre el terreno involucra diferentes tonalidades que corresponden a objetos determinados con colores semejantes o equivalentes dentro de una escala de grises. Las texturas se forman al existir tonos diferentes adyacentes que dan un patrón repetido y constante dentro de ciertos intervalos y que, al verse estereoscópicamente (tercera dimensión), proporcionen al ojo humano la sensación de pequeñas variaciones en el relieve asociadas con la alternancia de tonos (Moncayo *et al.*, 1970; Guerra, 1980)

La textura y el contexto fueron definitivos para el reconocimiento de entidades. De acuerdo a los principios arriba mencionados, la vegetación emergente presenta muy diversos tonos que van desde gris pálido hasta negro y una textura de rugosa a media. Se ubica a la orilla de lago, islas y en porciones inundadas.

La vegetación sumergida, por encontrarse bajo el agua una textura lisa y tonos generalmente oscuros, así como un patrón circular característico en el caso de tonos medios.

² La descripción gráfica de las metodologías (diagramas de flujo) se encuentran en los anexos.

El área limnética considera las porciones del espejo del lago carentes de vegetación aparente aún cuando pudieran ser consideradas como litorales por la posición. Las Islas fueron definidas como aquellas superficies de tierra que sobresalen del espejo del lago.

En ocasiones, el empleo de pseudoestereoscopia permitió distinguir con mayor precisión las entidades y los límites entre estas. Esta técnica consiste en invertir los fotogramas para generar una visión en la que los rasgos que en realidad sobresalen del terreno aparezcan como depresiones.

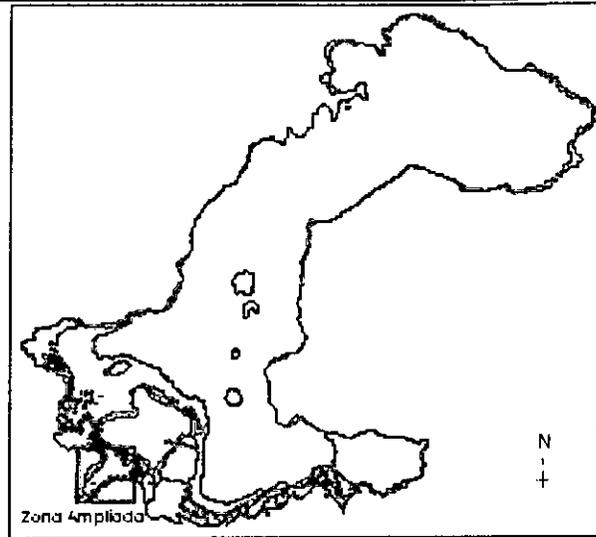
La figura 3 muestra un par estereoscópico para ejemplificar el proceso de fotointerpretación.

7.5.2 CREACIÓN DE FOTOMOSAICOS SEMICORREGIDOS

Las cartas topográficas (papel) 1:50,000 fueron convertidas a información digital mediante un escáner, a fin de facilitar su manejo por computadora. Un paquete de aplicación gráfica (Adobe Photoshop V5.0) permitió la unión de cartas para crear una imagen compuesta donde aparece todo el lago.

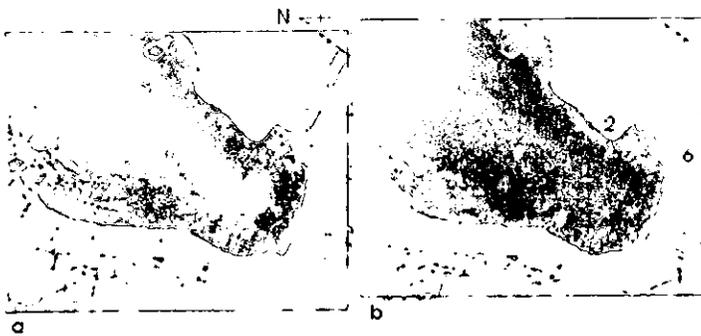
Al igual que las cartas, las fotografías aéreas (papel) fueron escaneadas para facilitar su manejo.

Las fotografías aéreas en versión digital dieron lugar a la obtención de los fotomosaicos semicorregidos mediante la técnica desarrollada previamente para este fin (Gómez-Tagle *et al.*, 2001). Por este procedimiento, las cartas topográficas escaneadas sirven de patrón o imagen de fondo para la sobreposición y ajuste de las aerofotografías. La Figura 4 ilustra la secuencia: (a) una porción del compuesto de las cartas topográficas donde se insertará una fotografía. (b) creación de una capa extra e inserción de la aerofotografía sobre el mapa. (c) transparentación de la fotografía al 47% y reubicación de la misma mediante coincidencia de rasgos (sin modificación interna de la foto). (d) ajuste de la fotografía con diversos tipos de modificación p, Ej. Rotación, cambio de escala total o en un sentido, corrimiento direccional (skew) y distorsión libre direccional. En este recuadro se muestra una modificación de la fotografía estirada de una esquina, misma que adquiere mayor distorsión en relación al resto de la imagen. (e) una vez que la fotografía ha sido ajustada a un nivel satisfactorio, se quita la transparentación y se procede a incluir otra fotografía para su ajuste y así sucesivamente hasta completar el fotomosaico.



Lago de Patzún: 1991

Par estereoscópico muestra



En el par estereoscópico pueden distinguirse diversas entidades:

- 1.- Carretera
- 2.- Límite del lago
- 3.- Vegetación emergente
- 4.- Vegetación Sumergida
- 5.- Zona de secado de chuspa
- 6.- Límites de parcelas

Las diferentes clases de vegetación se infieren en parte por los tonos pero mayoritariamente por las texturas. La VE presenta una textura granular y rugosa de tonos variados, mientras que la VS tiene una textura lisa y tonos oscuros.

Este par estereoscópico está formado por dos porciones de las fotografías 12 (a) y 13 (b) de la línea de vuelo 55, noviembre 1990. Las porciones fueron escaneadas con 600 DPI y tienen un tamaño aproximado 1.1x de los originales

Figura 3. Par estereoscópico muestra.

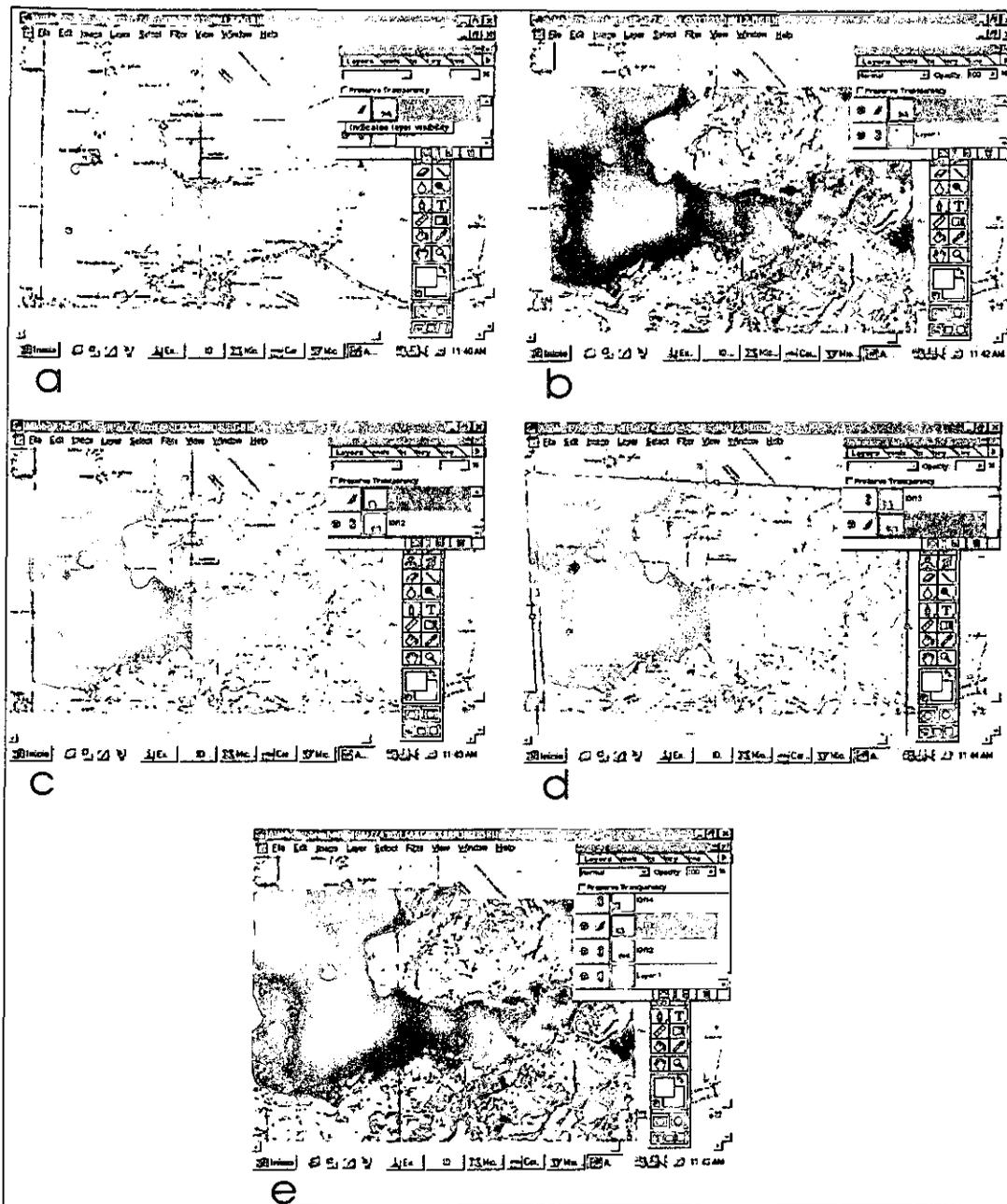


Figura 4. Secuencia para la semicorrección de las fotografías y creación del fotomosaico.

7.5.3 GEOREFERENCIACIÓN-RECTIFICACIÓN

Una vez obtenidos los fotomosaicos ajustados de diversas fechas, procedió la georeferenciación y rectificación del mapa compuesto y posteriormente de cada fotomosaico dentro de un ambiente SIG. En la figura 5 se muestra el procedimiento. Dado que el fotomosaico se ajustó sobre el mapa, ambos tienen las mismas coordenadas arbitrarias asignadas por el programa de

aplicación gráfica³ (figura 5 a y b). Se ubicaron 326 puntos de control en los cruces de las coordenadas UTM de las cartas que corresponden a una malla cuadrícula de 1000x1000 *m* (figura 5c). En cada uno de estos cruces se marca un punto.

El módulo de rectificación y corrección geométrica de Idrisi32 (*RESAMPLE*), utiliza para corregir una imagen o conjunto vectorial, un archivo de texto ASCII compuesto por dos pares de coordenadas para cada punto. El primer par de coordenadas corresponde a las coordenadas arbitrarias de Adobe Photoshop y el segundo par a las coordenadas reales obtenidas de los puntos de control del compuesto de las cartas topográficas. El módulo obtiene a partir de estos puntos una ecuación que describe la relación matemática entre los dos sistemas de coordenadas, y la utiliza para asignar la nueva ubicación y las nuevas coordenadas a cada pixel (Eastman, 1999). Este módulo también provee información del error de posición asociado a cada punto de muestreo y el error total para la imagen (Error Medio Cuadrático EMC).

En el procesamiento y corrección de imágenes se recomienda que el EMC total no sea mayor a un pixel (Palacio y Luna, 1994) o del equivalente a 0.5 *mm* en la cartografía original (Eastman, 1999). En este caso el EMC establecido como límite fue de 25 *m*, ya que la escala original de las cartas utilizadas es 1:50,000 donde 1 *mm* equivale a 50 *m*. La distancia real medible en las cartas es de 0.5 *mm* o 25 *m*. El módulo fue corrido con 256 puntos inicialmente ya que es el límite máximo de puntos que permite utilizar el módulo. La eliminación de puntos fue realizada al azar quedando 256 de 326.

Después de correr el módulo *RESAMPLE* mediante “vecino más cercano” cuadrático (que genera una ecuación de 2° grado donde la ubicación de cada pixel se calcula a partir de las coordenadas del punto de muestreo más cercano a éste) se obtuvo un EMC de 6.5 pixeles o 50.05m. Este resultado obligó a eliminar puntos con EMC muy altos y recalcular los valores. Finalmente después de 24 iteraciones, utilizando 232 puntos de control y el criterio de Eastman (*op. Cit.*) se obtuvo un EMC total de 1.70 pixeles que se encuentra ligeramente por encima de lo empleado por Palacio y Luna (1994) y equivale a 13.14 *m*. Así, la georreferenciación-rectificación contempla un error total menor al predefinido como aceptable (25 *m*).

³ Adobe Photoshop crea un sistema de coordenadas basado en el número de columnas y renglones que tiene la imagen que va de izquierda a derecha y de arriba abajo.

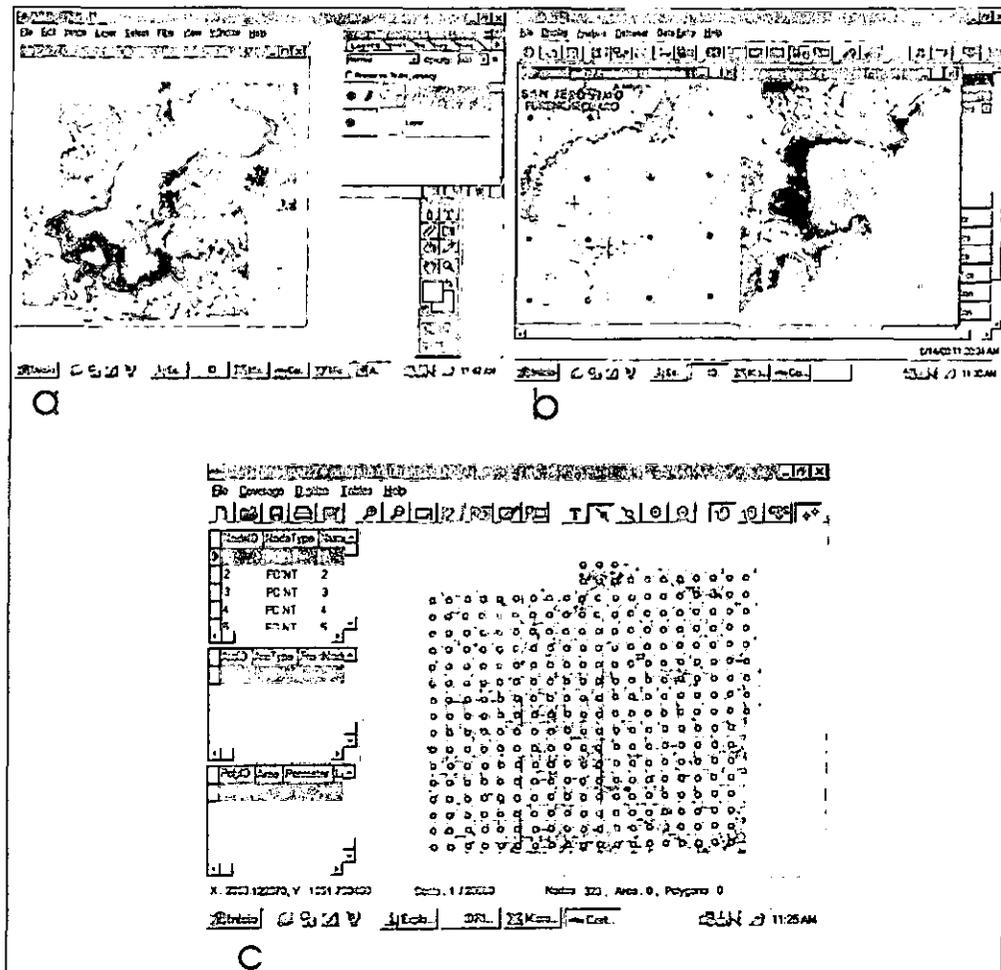


Figura 5. Procedimiento de georreferenciación-rectificación; (a) fotomosaico ajustado para 1974, (b) acercamiento a la península de San. Andrés Tzirondaro, (c) ubicación de los 326 puntos de control.

Las diferencias de error de posición para cada uno de los 232 puntos de muestreo (figura 6) corresponde al tamaño y color de los círculos. La acumulación de error en la porción central corresponde a la línea de unión entre las dos cartas para formar el compuesto y es un error que al ser minimizado resulta despreciable para los fines de georeferenciación-rectificación de los fotomosaicos.

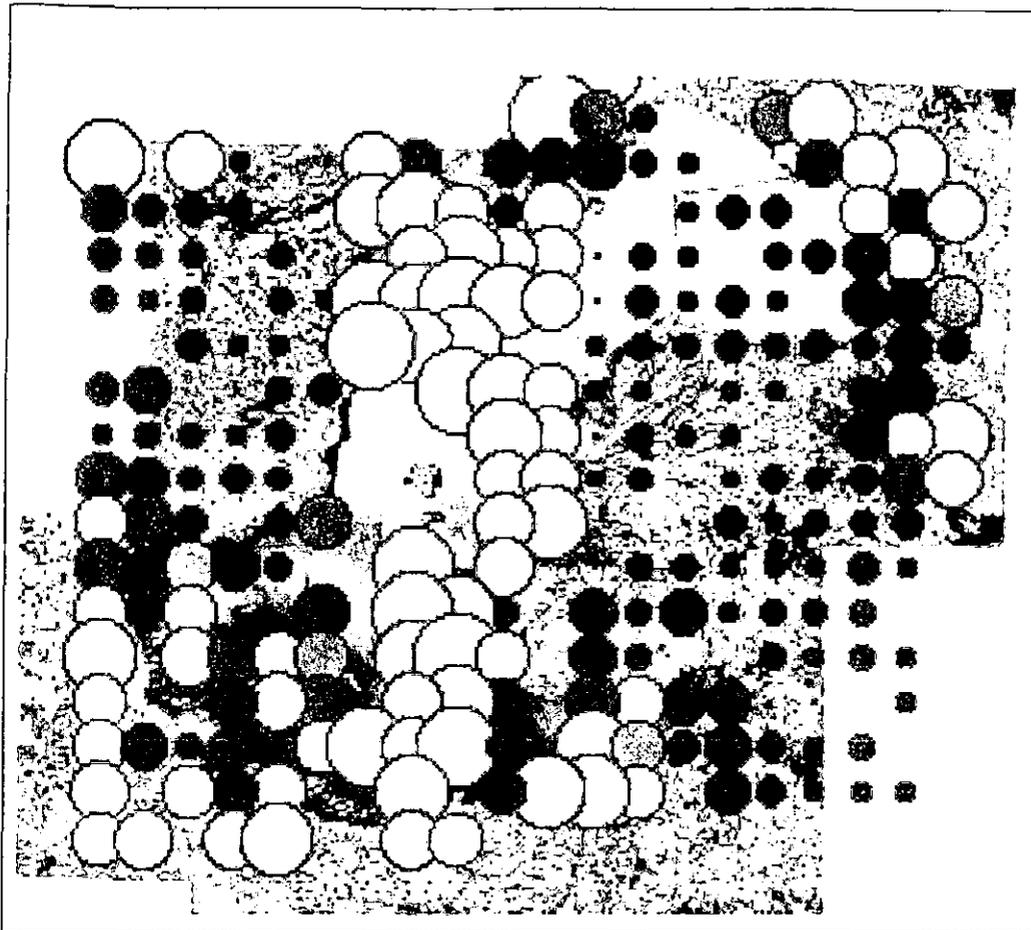


Figura 6. Los puntos con mayor error están representados por círculos grandes y rojos, mientras que los de menor error están señalados como círculos más pequeños y azules.

Después de tener el fotomosaico georreferenciado en el SIG para cada fecha, la digitalización de cada una de las entidades prosiguió dentro de un programa de construcción de mapas (Cartalinx V1.2). En la figura 7 se presenta parte de este proceso para las zonas aledañas a la península de Sn. Andrés Tziróndaro.

7.5.4 MANEJO DE ORTOFOTOS

La adquisición de las ortofotos digitales (1995) del INEGI (ver materiales digitales) permitió ahorrar pasos y trabajar con información rectificada por métodos de primer orden y georeferenciada. Es decir, un fue necesario pasar por el proceso de generación del fotomosaico semicorregido para esta fecha.

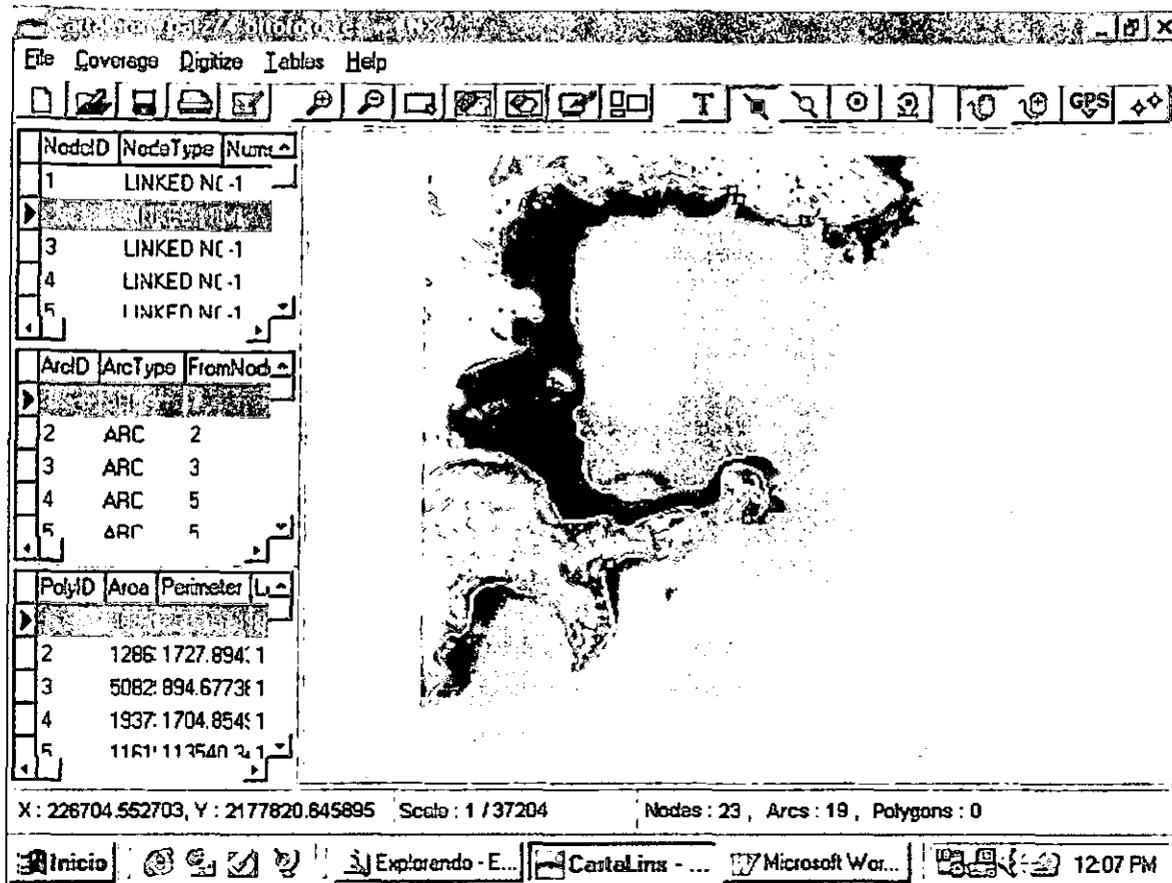


Figura 7. Generación de vectores delimitando las diferentes entidades del fottomosaico utilizando como apoyo los pares estereoscópicos para cada fecha y siguiendo las características de tono y textura definidas previamente para las entidades.

Las ortofotos en formato original BIL fueron importadas al formato ráster de Idrisi donde se cambió el sistema de referencia (original ITRF92 a NAD27 14Q anexo 2). Los ortofotos presentaron un error de origen que consistió en una desviación de 13,625 m en la coordenada Y sujeta a corrección. El ajuste correspondiente involucra los conjuntos vectoriales digitales de las cartas E14A21 y E14A22 como patrón base de coordenadas (ver materiales). Tras la corrección, las ortofotos fueron concatenadas (unidas dentro del SIG) y incorporadas a Cartalinx para la digitalización en la misma forma que ocurrió para los fottomosaicos semicorregidos.

7.5.5 IMÁGEN DE SATÉLITE

En el presente trabajo la imagen de satélite del sensor Landsat 7 TM 2846 tomada el 28 de junio del 2000 en formato .LAN (formato nativo del paquete ERDAS) fue importada al Idrisi32. La porción de la imagen correspondiente al área de estudio se recortó y la georeferenciación procedió de acuerdo a los mismos pasos descritos para los fotomosaicos. En este procedimiento se emplearon 120 puntos de control y se obtuvo un EMC de 0.856 píxeles ó 25.7 *m*. Siendo menor que el máximo aceptable 1 píxel o 30 *m* (Eastman, 1999; Palacio y Luna, 1994).

Diferentes compuestos de falso color fueron creados y se realizó una salida a campo para reconocer las entidades representadas por los diferentes tonos en ellos. El compuesto que permitió mayor diferenciación entre las entidades reconocidas en campo fue el 174. La digitalización de las entidades se llevó acabo en Cartalinx de la misma forma que con los fotomosaicos y ortofotos empleando dicho compuesto y la información de campo.

En la figura 8 se muestra el recorte de la imagen utilizado en dos compuestos distintos A compuesto 174 y B compuesto 257. En C se puede ver la porción del lago en proceso de digitalización. En el recuadro D se aprecia un detalle de la digitalización sobre la imagen de satélite en la zona sur del lago.

Una vez digitalizadas las entidades en la imagen de satélite se pasó la información al SIG mediante la exportación directa de Cartalinx a Idrisi32.

7.5.6 CÁLCULO DE SUPERFICIES Y VARIABLES MORFOMÉTRICAS

Los mapas digitalizados en Cartalinx (vectoriales) fueron convertidos a formato raster⁴ con una resolución de 7 m.

Las variables morfométricas (Wetzel, 1981; Torres y García, 1995) fueron calculadas utilizando los mapas digitales dentro del ambiente SIG. Estas variables son: Perímetro en *km* (*L*), área

⁴ El SIG empleado solamente puede realizar operaciones con información en formato raster (Eastman, 1999).

en km^2 (A), desarrollo litoral (D_L) (adimensional), longitud máxima (km) (I), longitud máxima efectiva (km) (L_f), ancho máximo (km) (b), ancho medio (km) (b).

Los módulos empleados fueron AREA, PERIM, y la digitalización de transectos directamente sobre los mapas digitales.

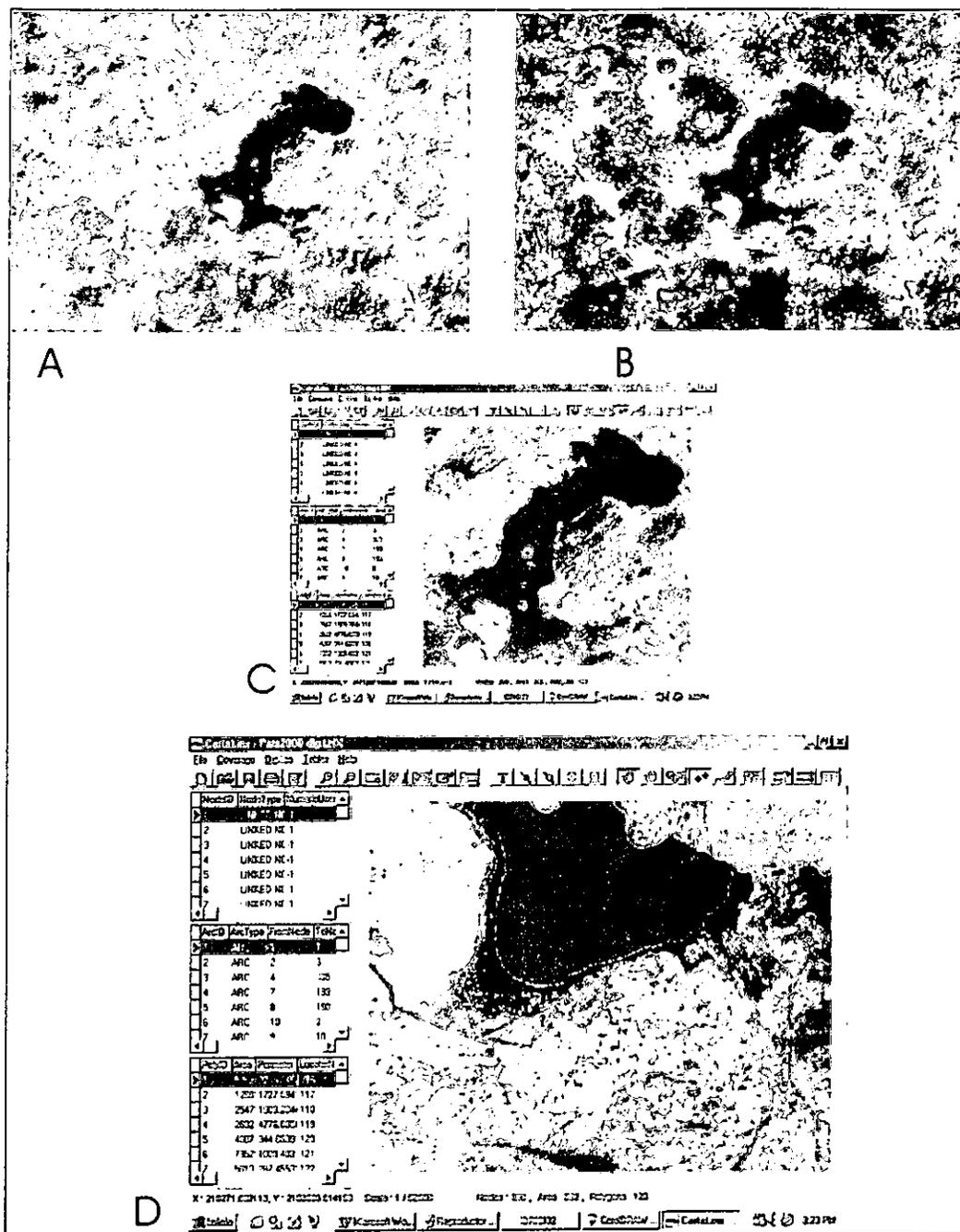


Figura 8. Dos compuestos de la imagen de satélite y la digitalización en Cartalinx

7.5.5. SECTORES DEL LAGO

Se definieron 6 sectores del lago como unidades discretas, no obstante otros autores se refieren a las distintas partes del lago como senos (De Buen, 1940; Chacón, 1993). La creación de estas unidades discretas se realizó utilizando puntos estables con coordenadas definidas. La tabla 2 muestra las coordenadas empleadas y la figura 9 las líneas de corte y los sectores generados.

Punto	NAD27 14Q		Coord Geográficas	
	UTM X	UTM Y	Longitud W	Latitud N
1	225.042	2.175.109	101° 37' 20.886	19° 39' 14.248
2	227.497	2.173.621	101° 35' 55.887	19° 38' 27.098
3	219.753	2.171.741	101° 40' 20.493	19° 37' 22.12
4	224.469	2.169.139	101° 37' 37.383	19° 35' 59.944
5	219.763	2.169.224	101° 40' 18.803	19° 36' 0.315
6	219.007	2.164.857	101° 40' 42.391	19° 33' 38.038
7	217.176	2.164.303	101° 41' 44.862	19° 33' 19.084
8	219.730	2.161.641	101° 40' 15.857	19° 31' 53.87
9	221.931	2.166.043	101° 39' 2.756	19° 34' 18.037
10	223.365	2.165.453	101° 38' 13.292	19° 33' 59.58

Tabla 2. Coordenadas de los puntos utilizados para establecer líneas de corte

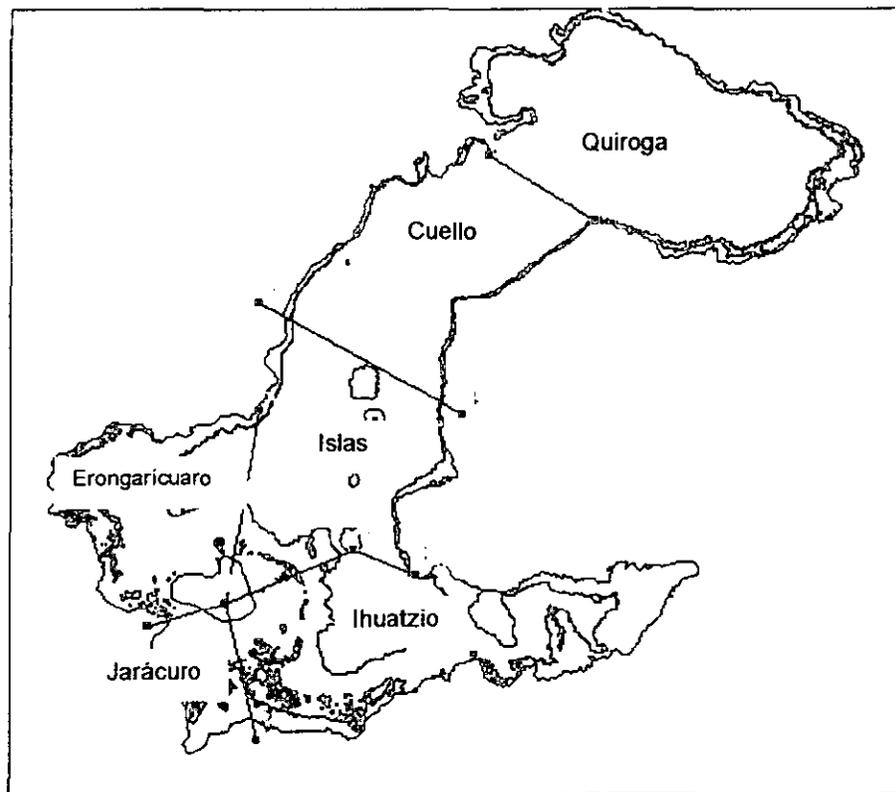


Figura 9. Puntos y líneas de corte de los sectores.

8. RESULTADOS

8.1. MAPAS

El uso de ortofotomosaicos semicorregidos e imágenes de satélite dentro de un ambiente SIG permitió generar seis mapas, (uno por fecha) con las entidades respectivas; (mapas 1-6).

8.2. AREA TOTAL

La máxima superficie del lago registrada corresponde a 1974 (11.873.67 *ha*) y la mínima a 2000 (9.757.23 *ha*). El área total del lago muestra una tendencia general a disminuir en el tiempo, sin embargo 1974 tiene un área mayor a 1969 (11,873.67 y 11,392.22 *ha* respectivamente). Este es el único periodo de la serie analizada en donde el área total incrementa de una fecha a otra (tabla 3).

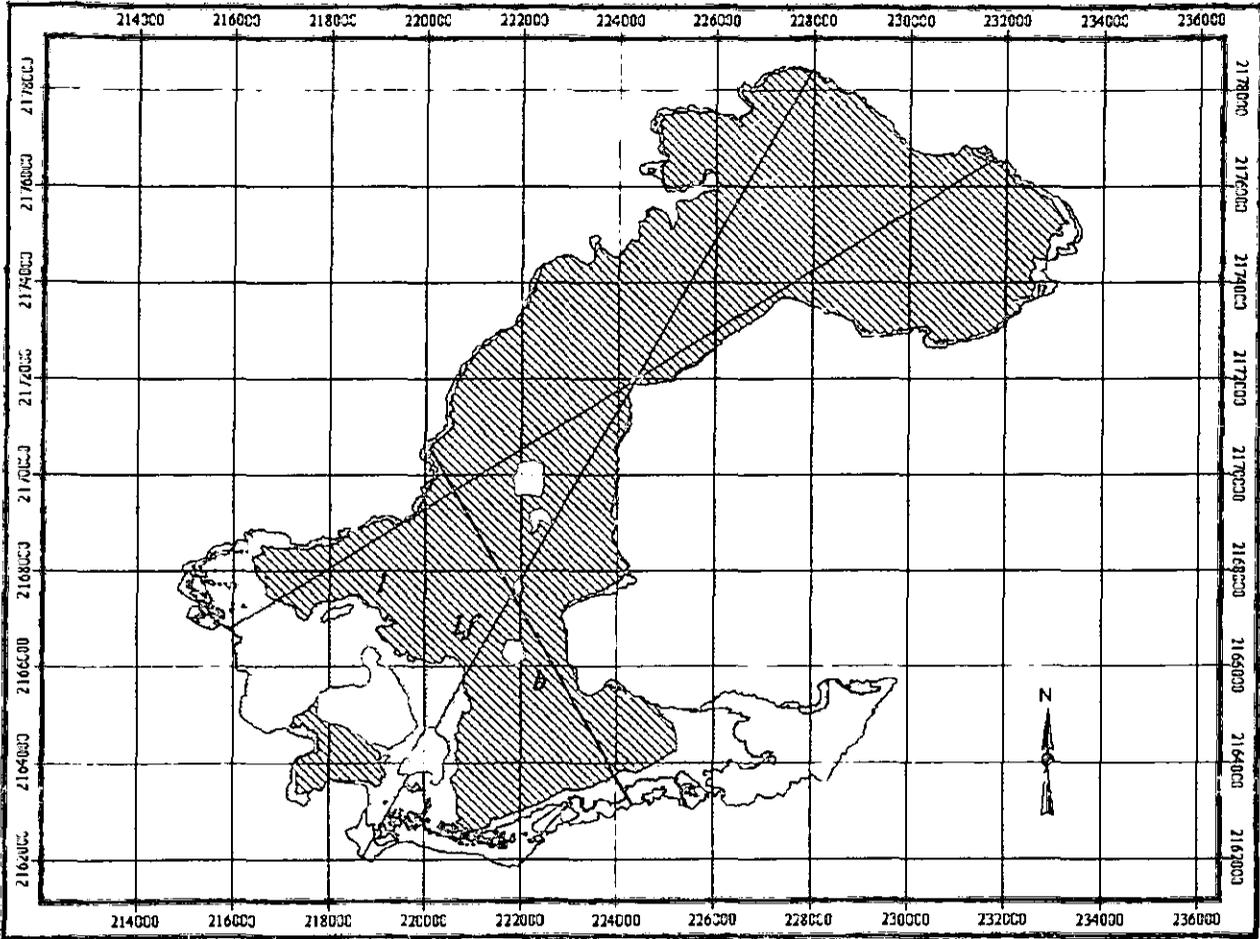
La porción acuática (área limnética, vegetación emergente y sumergida) muestra un patrón semejante al área total, con la mayor superficie en 1974 (11,606.16 *ha*) y la menor en 2000 (8,905.35 *ha*). El área limnética tiene su valor máximo en 1969 (8,114.38 *ha*) y el mínimo en 1974 (7,103.65 *ha*). Entre 1969 y 1974 esta entidad disminuye, para incrementar en 1986, disminuye otra vez en 1991 e incrementa nuevamente en 1995 para finalmente disminuir en 2000 (tabla 3).

Entidad	Año					
	1969	1974	1986	1991	1995	2000
Vegetación Emergente	937.44	1,168.31	1,038.14	1,214.35	769.41	849.77
Vegetación Sumergida	1,943.34	3,334.21	1,961.33	1,115.03	1,053.15	838.22
Limnético	8,114.38	7,103.65	7,499.66	7,459.46	7,529.20	7,217.84
Islas	397.06	267.5	483.58	615.3	716.84	851.4
Total Acuático	10,995.16	11,606.17	10,499.13	9,788.84	9,351.76	8,905.83
Total	11,392.22	11,873.67	10,982.71	10,404.14	10,068.60	9,757.23

Tabla 3. Superficies (*ha*) en el Lago de Pátzcuaro para diferentes años.

Las islas por su parte muestran una tendencia inversa a la superficie total y el total acuático, en donde la menor superficie se presenta en 1974 (267.5 *ha*) y la mayor en 2000 (851.4 *ha*). En 1969 la superficie con islas era de 397.06 *ha*, que se redujo en 1974. De esta fecha al 2000 la superficie de esta entidad incrementa. La vegetación sumergida presenta un comportamiento semejante a la superficie total y total acuática donde las superficies mas altas se presentan en 1974 (tabla 3) y la tendencia general es a disminuir.

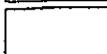
Lago de Pátzcuaro 1969



Escala gráfica



Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

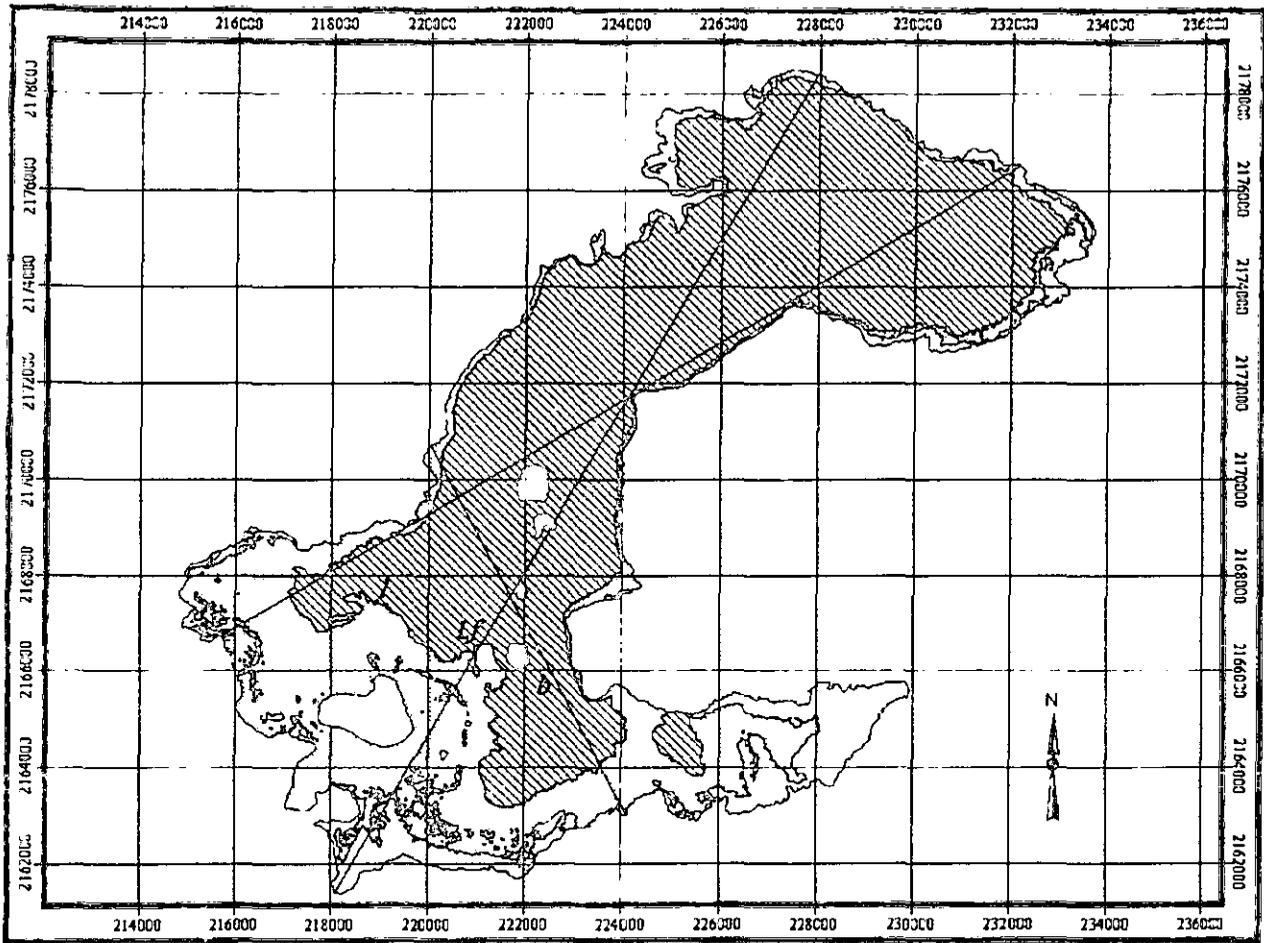
lf = Long. max. ef.

l = Long. max.

b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

Lago de Pátzcuaro 1974

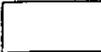
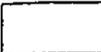


Escala gráfica

2 0 2 4 6 Kilometers



Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

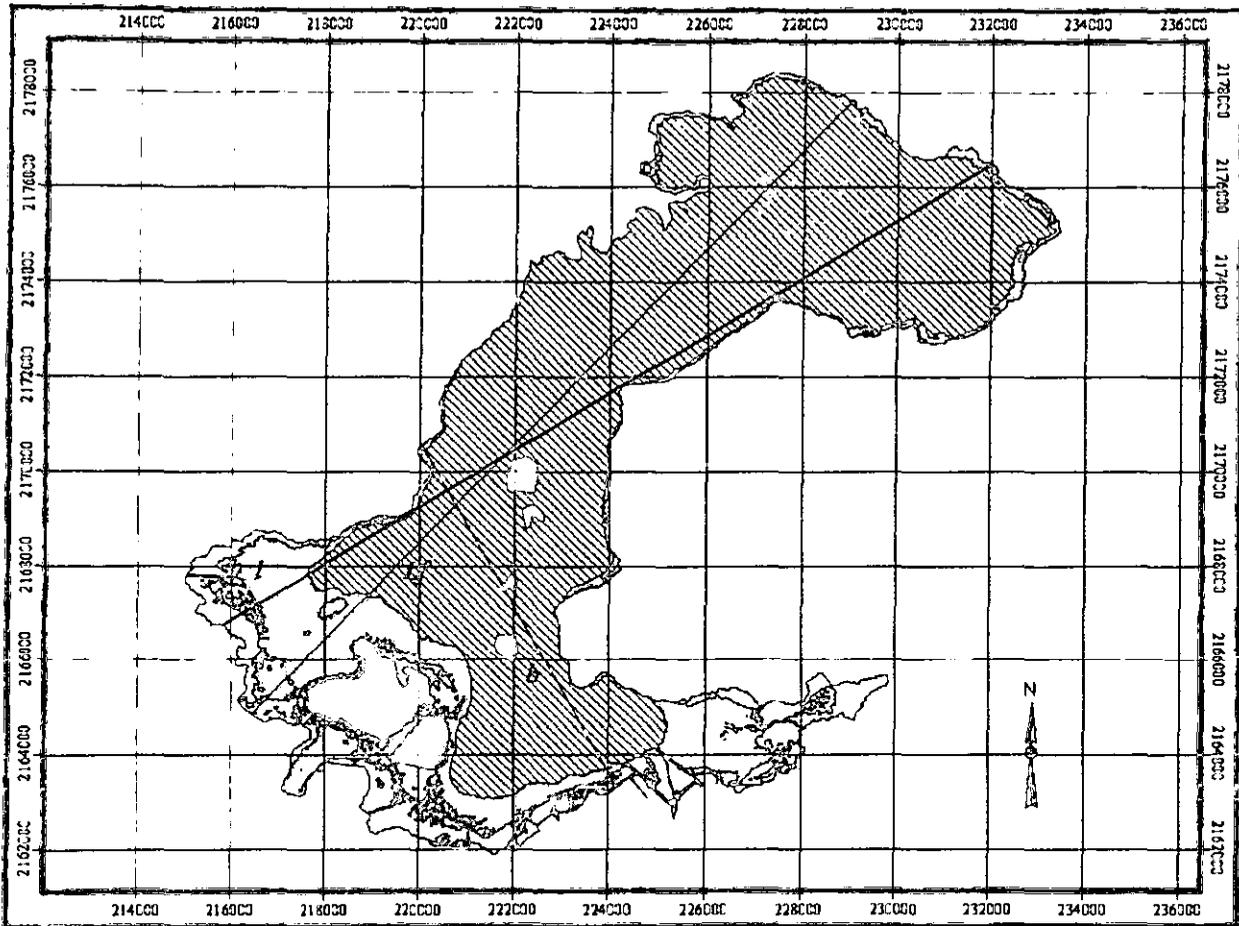
L_f = Long. max. ef.

l = Long. max.

b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

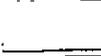
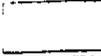
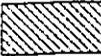
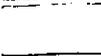
Lago de Pátzcuaro 1986



Escala gráfica



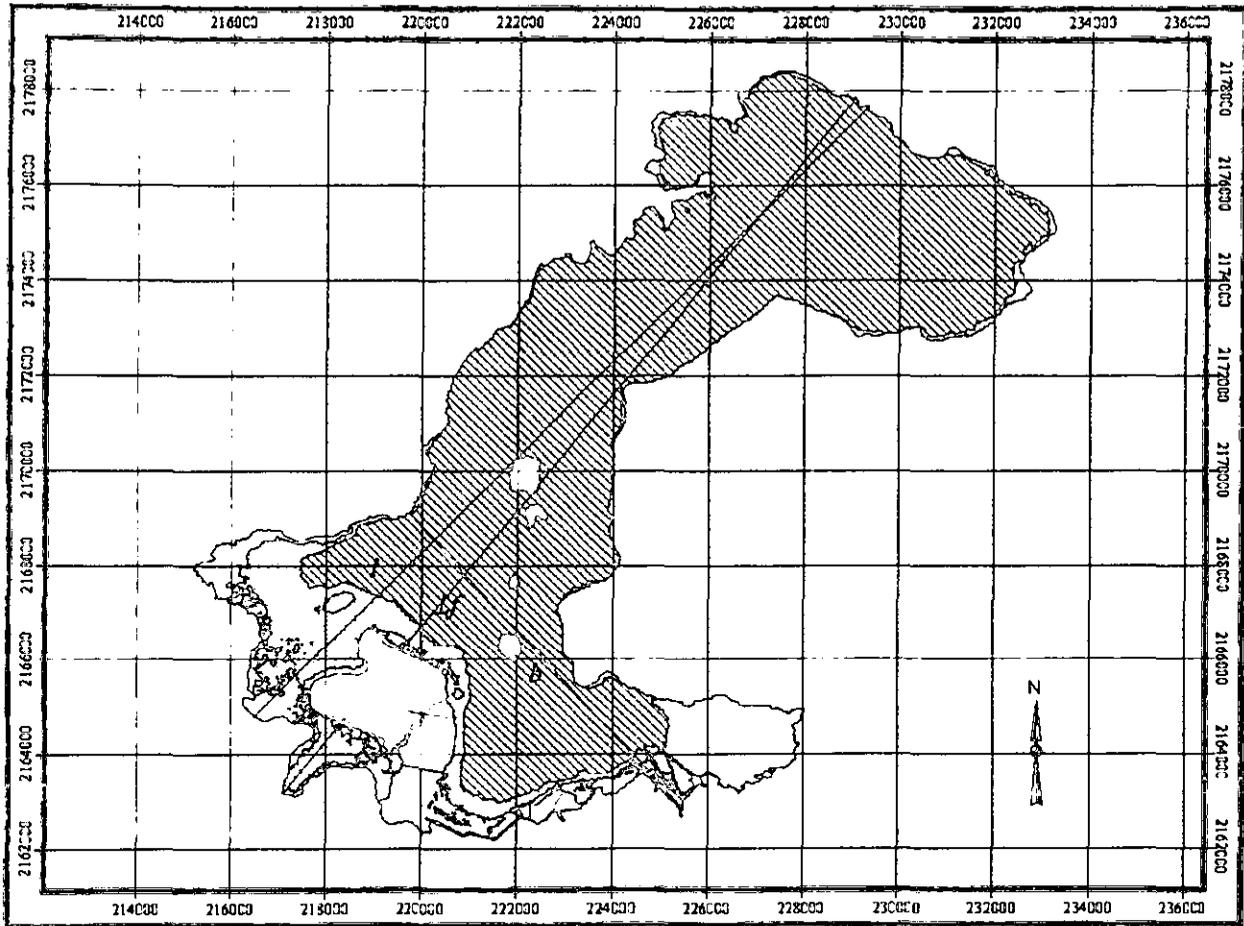
Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

L_f = Long. max. cf.
 l = Long. max.
 b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

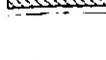
Lago de Pátzcuaro 1991



Escala gráfica



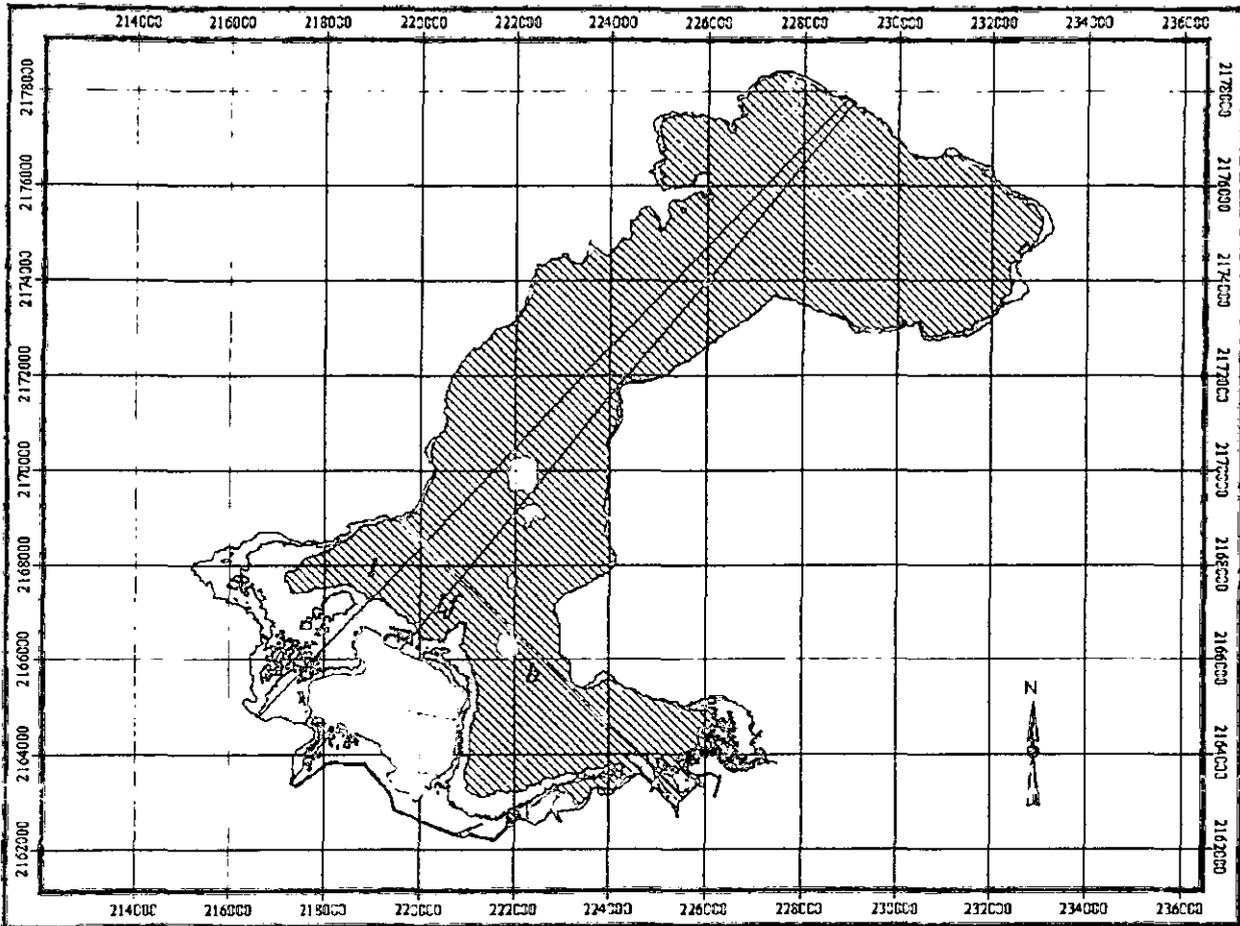
Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

L_f = Long. max. ef.
 l = Long. max.
 b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

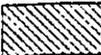
Lago de Pátzcuaro 1995



Escala gráfica



Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

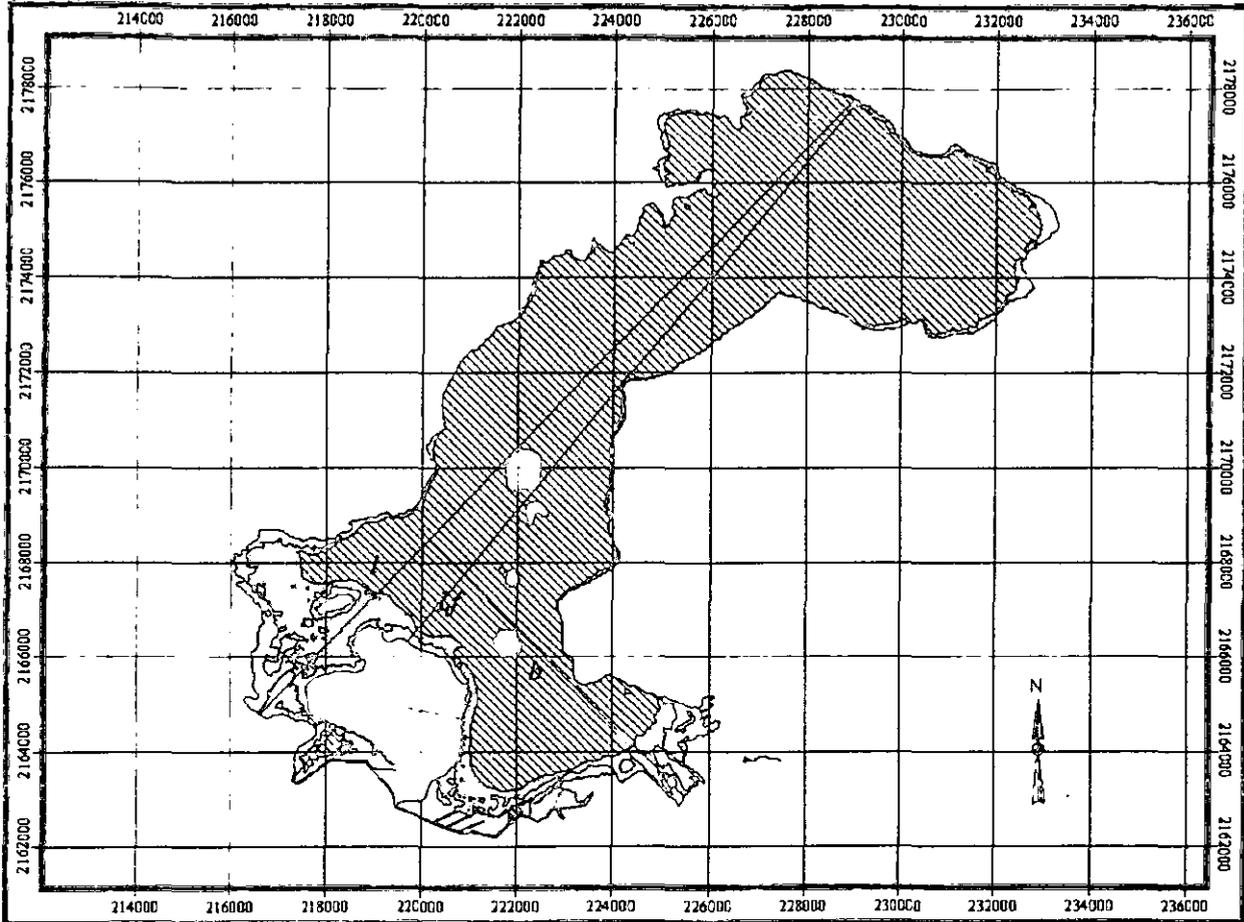
L_f = Long. max. ef.

l = Long. max.

b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Fotointerpretación y análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

Lago de Pátzcuaro 2000



Escala gráfica



Leyenda

-  Veg Emergente
-  Veg Sumergida
-  Limnetico
-  Islas

L_f = Long. max. ef.
 l = Long. max.
 b = Ancho max.

Proyección: UTM
 Esferoide: Clarke 1866
 Datum: NAD27 (México)
 Elaboró: A. Gómez-Tagle Ch.
 Método: Interpretación
 de imagen de satélite y
 análisis en SIG.
 Escala 1: 111,561
 Fecha: marzo-2001
 Reticula: 2000 m

8.3. AREAS POR SECTORES

El sector con mayor superficie en la serie analizada es Quiroga y el de menor es Jarácuaro (ver figura 9). La mayor superficie para cada sector se alcanza en 1974 mientras que la menor en el 2000 (tabla 4). En el periodo 1969-1974 la mayoría de las entidades aumentan casi para todos los sectores del lago a excepción de el área limnética y las islas que se reducen. En el sector Jarácuaro el área limnética desaparece (156.3 *ha* 1969 a 0.00 *ha* 1974).

Entre 1974 y 1986 las entidades vegetación sumergida, acuático y vegetación emergente se reducen casi para todos los sectores. Por el contrario el área limnética y las islas incrementan en superficie. Contrario al patrón general, el sector Erongarícuaro incrementa su área de vegetación emergente de 173.6 *ha* a 325.26 *ha* y reduce su área limnética de 287.25 *ha* a 232.58 *ha*.

Las superficies con vegetación sumergida, y acuática disminuyeron entre 1986 y 1991 en todos los sectores. Las islas incrementan en todos los sectores y en general la superficie limnética también, excepto en los sectores Cuello y Quiroga. La vegetación emergente muestra una tendencia general a disminuir sin embargo en los sectores Ihuatzio y Quiroga aumenta, de 596.57 a 706.23 *ha* (Ihuatzio) y de 15.64 a 87.99 *ha* (Quiroga). Para los sectores Quiroga y Cuello el área limnética disminuye de 930.14 a 927.01 *ha* para el primero y de 1,936.02 a 1,859.37 *ha* para el segundo.

El área con islas incrementa, mientras que la superficie con islas decrementa para todos los sectores en el periodo 1991-1995. La vegetación emergente y sumergida se comportan de manera opuesta. Cuando la primera aumenta en los sectores Erongarícuaro y Jarácuaro la segunda disminuye y mientras que en los sectores Ihuatzio, Quiroga, Cuello e Islas la superficie de vegetación sumergida incrementa, la vegetación emergente se reduce (tabla 4). El área limnética aumenta para los sectores Erongarícuaro e Ihuatzio y se reduce para Quiroga, Cuello e Islas.

En el último periodo 1995-2000 el área de las islas sube y el área acuática baja para todos los sectores. La superficie con vegetación emergente decrece en Erongarícuaro y Jarácuaro e incrementa en Ihuatzio, Quiroga, Cuello e Islas. En los sectores Erongarícuaro, Jarácuaro y Cuello la Vegetación sumergida aumenta y en Ihuatzio, Quiroga e Islas disminuye. En cuanto a la superficie limnética, decrece para todos los sectores excepto Jarácuaro (0.00 a 47.27 *ha*) (tabla 4).

Superficies por entidad para cada uno de los sectores en las diferentes fechas (1969-2000)						
1969						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	1,379.880	43.770	868.520	467.590	126.970	1,506.850
Jarácuaro	301.190	51.100	93.790	156.300	18.350	319.540
Ihuatzio	2,434.120	755.190	678.410	1,000.520	132.070	2,566.190
Quiroga	3,110.750	87.380	100.880	2,922.490	0.000	3,110.750
Cuello	1,911.780	0.000	39.200	1,872.580	0.000	1,911.780
Islas	1,857.220	0.000	162.320	1,694.900	119.670	1,976.890
Total	10,994.940	937.440	1,943.120	8,114.380	397.060	11,392.000

1974						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	1,475.130	91.790	1,096.090	287.250	100.030	1,575.160
Jarácuaro	428.570	173.600	254.970	0.000	14.960	443.530
Ihuatzio	2,620.040	679.150	1,292.800	648.090	42.730	2,662.770
Quiroga	3,224.390	208.150	265.130	2,751.110	0.000	3,224.390
Cuello	1,986.010	2.950	95.590	1,887.470	0.310	1,986.320
Islas	1,871.810	12.670	329.410	1,529.730	109.470	1,981.280
Total	11,605.950	1,168.310	3,333.990	7,103.650	267.500	11,873.450

1986						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	1,286.620	325.260	728.780	232.580	140.010	1,426.630
Jarácuaro	231.720	103.820	127.900	0.000	15.700	247.420
Ihuatzio	2,202.820	569.570	703.110	930.140	175.630	2,378.450
Quiroga	3,020.750	15.640	187.590	2,817.520	0.260	3,021.010
Cuello	1,959.990	0.000	23.970	1,936.020	0.000	1,959.990
Islas	1,797.230	23.850	189.980	1,583.400	151.980	1,949.210
Total	10,499.130	1,038.140	1,961.330	7,499.660	483.580	10,982.710

1991						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	1,144.700	301.620	600.280	242.800	158.660	1,303.360
Jarácuaro	211.740	95.660	116.080	0.000	14.510	226.250
Ihuatzio	1,870.810	706.230	237.570	927.010	244.180	2,114.990
Quiroga	2,961.010	87.990	41.370	2,831.650	0.600	2,961.610
Cuello	1,872.090	0.000	12.720	1,859.370	0.000	1,872.090
Islas	1,728.490	22.850	107.010	1,598.630	197.350	1,925.840
Total	9,788.840	1,214.350	1,115.030	7,459.460	615.300	10,404.140

Tabla 4. Los totales por entidad, sector y general se encuentran en negritas (continúa)

1995						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	1,089.450	373.72	460.15	255.58	166.3	1,255.750
Jarácuaro	149.610	124.76	24.85	0.00	24.56	174.170
Ihuatzio	1,609.290	196.9	346.64	1065.75	325.73	1,935.020
Quiroga	2,924.680	55.81	78.95	2789.92	0.6	2,925.280
Cuello	1,865.250	0.00	16.33	1848.92	0.00	1,865.250
Islas	1,713.480	18.22	126.23	1569.03	199.65	1,913.130
Total	9,351.760	769.410	1,053.150	7,529.200	716.840	10,068.600

2000						
Sectores	Acuático	V. Emergente	V. Sumergida	Limnético	Islas	Total
Erongaricuaro	968.85	310.27	416.36	242.22	200.92	1,169.77
Jarácuaro	132.97	75.11	10.59	47.27	41.2	174.17
Ihuatzio	1,359.19	318.2	280.22	760.77	361.64	1,720.83
Quiroga	2,906.74	99.91	46.85	2,759.98	0.6	2,907.34
Cuello	1,866.20	1.99	20.05	1,844.16	0.68	1,866.88
Islas	1,671.88	44.29	64.15	1,563.44	246.36	1,918.24
Total	8,905.83	849.77	838.22	7,217.84	851.4	9,757.23

Tabla 4 (continuación). Los totales por entidad, sector y general se encuentran en negritas.

Se creó una matriz de cambio relativo por sector (tabla 5), esta matriz muestra el cambio de un sector dentro los distintos periodos y la importancia de ese sector en el cambio total del periodo.

Como se mencionó antes, entre 1969 y 1974 hay un incremento de área para todos los sectores del lago. Este incremento tiene mayor importancia en el sector Jarácuaro donde se presenta el 25.75 % de todo el cambio en el lago, mientras que el sector islas es el que presenta menor cambio.

Para el resto de los periodos el cambio de mayor importancia se localiza en el sector Ihuatzio. El de menor importancia varía de acuerdo al periodo siendo para 1974-1986 el Cuello, 1986-1991 Jarácuaro, 1991-1995 Cuello y para el periodo 1995-2000 Jarácuaro, este último no presenta cambio. Esta matriz permite visualizar la existencia de un cambio diferencial en los sectores del lago.

Matriz de Cambio Relativo por sector					
Sectores/periodo	1969-1974	1974-1986	1986-1991	1991-1995	1995-2000
Erongaricuaro	0.1419	0.1667	0.2131	0.1419	0.2761
Jarácuaro	0.2575	0.2202	<i>0.0366</i>	0.1552	<i>0.0000</i>
Ihuatzio	0.2006	0.3192	0.4554	0.5364	0.6879
Quiroga	0.2360	0.2283	0.1027	0.1083	0.0576
Cuello	0.1548	<i>0.0296</i>	0.1519	<i>0.0204</i>	0.0052
Islas	<i>0.0091</i>	0.0360	0.0404	0.0379	0.0164

Tabla 5. Matriz de cambio relativo, los números en negritas indican el sector con mayor cambio dentro del periodo y en *italicas* el menor.

Este cambio diferencial resulta mas evidente en la porción sur del lago (mapas 1-6). Especificamente en la parte oriental del sector Ihuatzio, la porción occidental del sector Erongaricuaru y el sector Jarácuaro donde la isla mas grande del lago ha incrementado su tamaño.

8.4. OTRAS VARIABLES MORFOMETRICAS

En 1969 y 1974 (mapas 1 y 2 respectivamente) los ejes de longitud máxima (l), longitud máxima efectiva (L_f) y ancho máximo (b) se encuentran en posiciones muy semejantes. El eje l va de SW-NE, el eje L_f tiene una dirección SSW-NNE. El eje b es en ambas fechas adyacente a la isla Tecuena y presenta una dirección SW-NW.

En el mapa 3 correspondiente a 1986 ocurre un cambio de posición de los ejes. Mientras que l y b se mantienen casi constantes respecto a las dos fechas anteriores, el eje L_f cambia de lugar de la porción sur de la isla Yunuen a la parte norte de la isla Pacanda.

Para la siguiente fecha (1991) (mapa 4) existe otro cambio drástico en los ejes l se mueve hacia el sur y se hace más paralelo a L_f el cual se dirige por la parte media de la isla de Jarácuaro. El eje b se mueve hacia el sur ahora adyacente a la parte norte de la isla Janitzio.

Para las últimas dos fechas (1995 mapa 5 y 2000 mapa 6), la tendencia en los ejes es similar a 1991 pero con reducción de longitud y ligeros cambios de posición.

En la tabla 6 se presentan los cambios en las variables morfométricas. En general los máximos valores se presentan en 1974 a excepción del desarrollo litoral que tiene su valor mas alto en 1995 (3.31) y el mas bajo en 2000 (2.97).

Variables Morfométricas						
Variable/Año	1969	1974	1986	1991	1995	2000
L (km)	118.98	125.12	118.9	110.6	117.88	104.16
D_L (km)	3.14	3.24	3.2	3.06	3.31	2.97
l (km)	18.64	19.15	18.93	18.19	18.01	17.97
L_f (km)	18.87	19.7	18.93	18.91	18.6	18.55
b (km)	8.71	8.72	8.36	8.47	8.47	8.41
b' (km)	6.11	6.2	5.8	5.72	5.59	5.43

Tabla 6. Parámetros morfométricos para diferentes fechas L (perímetro), D_L (desarrollo litoral), l (longitud máxima), L_f (longitud máxima efectiva), b (ancho máximo), b' (ancho medio).

9. DISCUSION

El análisis de las superficies mostró que el cambio en la porción sur del lago involucra una pérdida mayor de superficie acuática que las partes norte y media del lago (sectores Quiroga y Cuello). En el sector Quiroga la superficie total cambió de 3,110.750 (1969) a 2,907.34 (2000), una reducción de 203.41 *ha* en 31 años. En el sector "Cuello" la reducción 1,911.780 (1969) a 1,866.88 (2000) significa una pérdida de 45 *ha*. En la tabla 3 pueden verse con detalle las superficies. Esto indica que el lago se modifica de forma diferencial, hay sectores que cambian mas que otros debido entre otras cosas a la conformación del vaso lacustre.

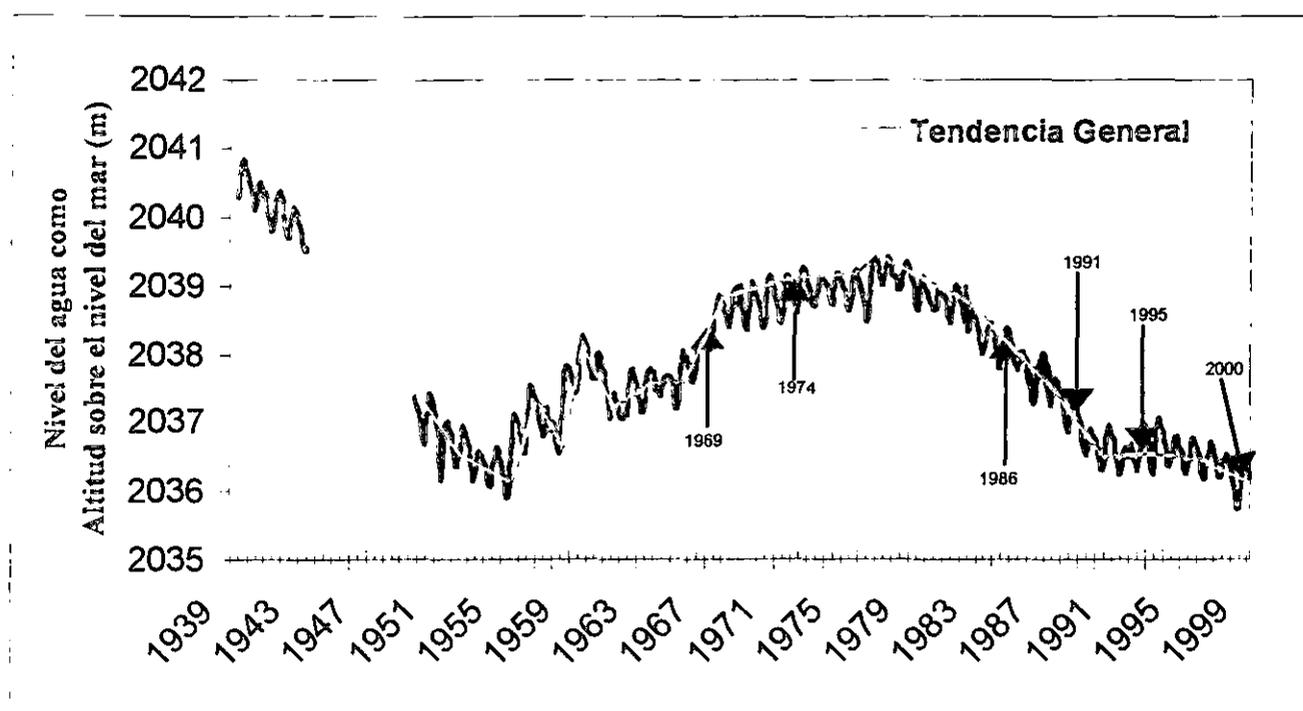


Figura 10. Las flechas indican los años incluidos en el presente estudio (Modificado de Bernal-Brooks et al., 2001).

Los resultados indican un aumento de superficie en el lago entre 1969-1974 así como un incremento de vegetación emergente como sumergida. En la vegetación sumergida este incremento fue de 1,390.7 *ha* o 71.5 % de la vegetación sumergida en 1969. De forma paralela el registro de niveles de agua indica un nivel máximo en 1969 (figura 10) sin embargo la superficie máxima registrada a partir de aerofotos corresponde a 1974 (11,392 *ha*) encontrándose por arriba de las de 1969 (11,392 *ha*) y 1986 (10,982.71 *ha*).

El lago de Pátzcuaro se encuentra sometido a cambios de nivel estacionales y a largo plazo. Estos cambios de nivel están asociados a las variaciones climáticas a lo largo del año y a variaciones regionales (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000) que sugieren un efecto climático regional. Williams (1993) menciona que la existencia de niveles bajos de agua, superficie y volúmenes en cuerpos de agua con cuencas cerradas obedecen a cambios en las condiciones climáticas, esto se ve constatado al encontrar fluctuaciones paralelas en los lagos de Cuitzeo y Chapala en el Centro de México. La zona del lago de Pátzcuaro ha sufrido cambios climáticos recientes que incluyen reducción en la precipitación y cambio en las constantes térmicas (Chacón y Múzquiz, 1997).

Los cambios en superficie pueden registrados entre 1969-2000 pueden apreciarse en la figura 11, donde se muestra una comparación de las superficies para cada una de las fechas incluidas en el presente estudio. Al comparar la serie de niveles (figura 10) y la de superficies (figura 11) puede verse que las tendencias generales siguen un patrón semejante.

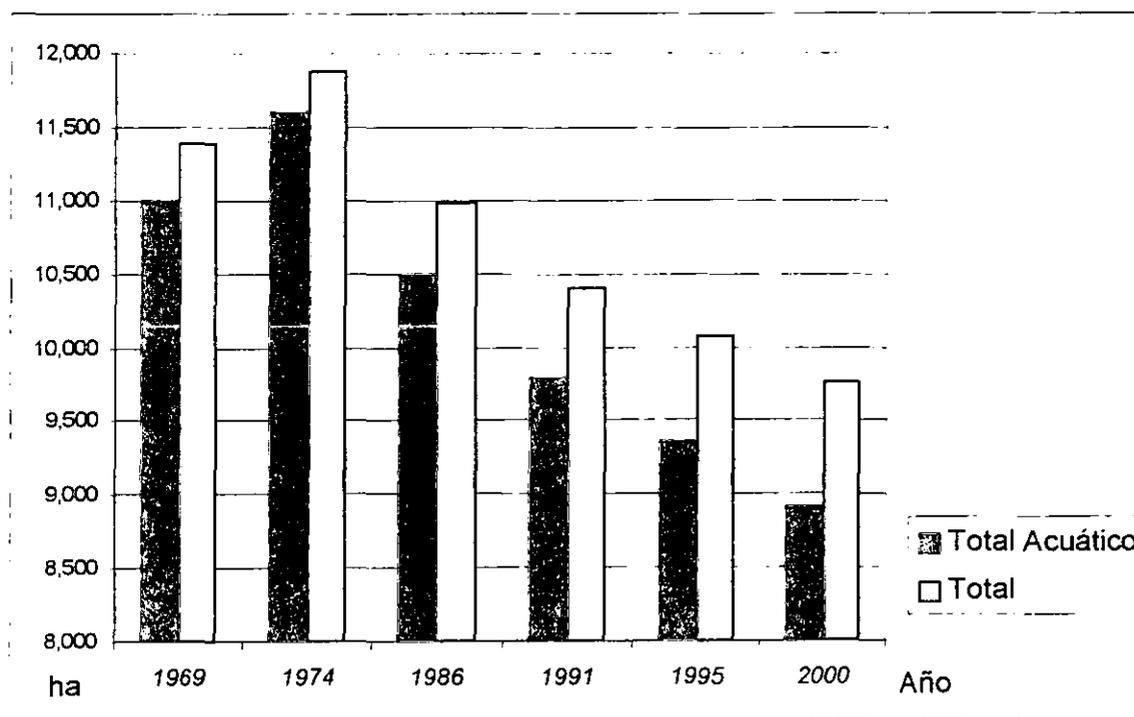


Figura 11. Cambio de superficie en el Lago de Pátzcuaro 1969-2000.

Por otra parte la matriz de tasa de cambio del área total en el tiempo⁵ (tabla 7), evidencia las variaciones en la velocidad de cambio en el área total del lago de Pátzcuaro. El periodo entre 1969 y 1974 se presenta un cambio positivo, un incremento en superficie promedio de 96.29 hectáreas por año. A partir de 1974 el cambio siempre es negativo. Hay una pérdida de área, sin embargo esta pérdida tiene ritmos diferentes en los periodos presentados, siendo el de 1986-1991 el que presenta la mayor velocidad y el de 1995-2000 el de menor. Esto implica que la variación no es de forma lineal y simple ya que el vaso lacustre no posee una configuración cónica donde los cambios serán proporcionales sino corresponde a la morfometría particular de este..

Tasas de cambio en los intervalos de tiempo					
	1969-1974	1974-1986	1986-1991	1991-1995	1995-2000
ha/año	96.29	-74.25	-115.71	-83.88	-62.27

Tabla 7. Cambio de superficie en los intervalos de tiempo, números en negrita indican pérdida de área en hectáreas por año.

Los cambios en la velocidad de cambio de la superficie se corresponden con los datos de nivel de agua (figura 9). La pendiente de a línea de tendencia general entre 1969-1974 es positiva indicando una ganancia, entre 1974 y 1986 continúa siendo positiva hasta 1979, a partir de ese punto se vuelve negativa implicando una reducción en el nivel. En la matriz de tasa de cambio el intervalo 1986-1991 es el de mayor pérdida, de igual forma la pendiente de la tendencia general de los niveles presenta su pendiente negativa mas pronunciada en este periodo. Posteriormente cambia abruptamente en la parte media de las sección comprendida entre 1991 y 1995 (1992-1993) pasando a ser casi una horizontal al final de este periodo. Entre 1995 y 2000 la pendiente de tendencia general del nivel de agua vuelve a incrementar pero sigue siendo menor que en el intervalo 1986-1991.

Empleando los datos⁶ (1969-2000) de superficie y nivel se realizó un análisis de correlación esta resultado altamente significativa (tabla 8).

⁵ Se comparan la superficie de una fecha con la de la fecha inmediata siguiente para generar una tasa de cambio en el periodo comprendido entre dichas fechas.

⁶ Para 1969-1995 se empleó el nivel medio por año. para 2000 se empleó el nivel mas próximo al día de toma (28 junio 2000) 2035.430 msnm.

Matriz de correlación			
	<i>Nivel (m.s.n.m.)</i>	<i>Total Acuático (ha)</i>	<i>Total (ha)</i>
<i>Nivel (m.s.n.m.)</i>	1		
<i>Total Acuático (ha)</i>	0.9824	1	
<i>Total (ha)</i>	0.9819	0.9997	1

Tabla 8. Coeficientes de Correlación entre los niveles y las áreas para 5 fechas, ($p < 0.5$).

Los números muestran una correlación altamente significativa entre el nivel del agua y el área ocupada por el lago para esa fecha. Dada la alta correlación encontrada, se llevó a cabo una regresión entre las áreas y los niveles (figura 12). El coeficiente de regresión para estas variables fue mayor a 0.96, lo cual indica un buen ajuste al modelo. Esta regresión solamente se realizó para las superficie total y total acuática, ya que el patrón de coincidencia no se refleja en las entidades correspondientes a la vegetación.

Los cambios en la vegetación parecen no ser determinados exclusivamente por el cambio de nivel y la morfometría del vaso lacustre tiene relevancia. Mientras mas baja el nivel del agua las zonas marginales son mas estrechas facilitando que las zonas de poca profundidad sean colonizadas por vegetación sumergida si existe buena transparencia, mientras que las porciones litorales lo serán pero por vegetación emergente.

La evolución de lagos (Wetzel, 1985) contempla un cambio en el nivel trófico que de ser oligotrófico inicialmente pasa a mesotrófico en la edad media del cuerpo de agua para que al final alcance la eutrofia o hipereutrofia previa a la desecación total. Esta evolución se da en tiempo geológico, sin embargo las actividades humanas pueden acelerar el proceso (Bradbury, 2000). De forma paralela a estos cambios existen también cambios en la vegetación de los cuerpos de agua. La vegetación sumergida esta asociada a lagos con buena transparencia que generalmente son poco productivos (oligotróficos), la vegetación emergente enraizada se encuentra presente en cuerpos de agua con mayor cantidad de nutrientes (meso u oligotróficos) donde la erosión de la cuenca haya generado la presencia de un sustrato favorable. La dominancia de vegetación emergente en un cuerpo de agua acelera su desecación y se relaciona con la presencia de grandes cantidades de nutrientes provenientes de la cuenca, los cuales se ven incrementados con la incorporación de materia orgánica generada por las plantas, al mismo tiempo estas facilitan la deposición de sedimento.

Dado que la vegetación sumergida es dependiente de la penetración de la luz solar, la reducción de la transparencia en el agua limitará su crecimiento. El incremento en el nivel entre 1969 y 1974 (tablas 3 y 4, mapas 1 y 2) involucró una inundación de áreas someras en la periferia adecuadas para la proliferación de la vegetación. La expansión de la vegetación sumergida pudo deberse a que existía la transparencia adecuada además del cambio de nivel.

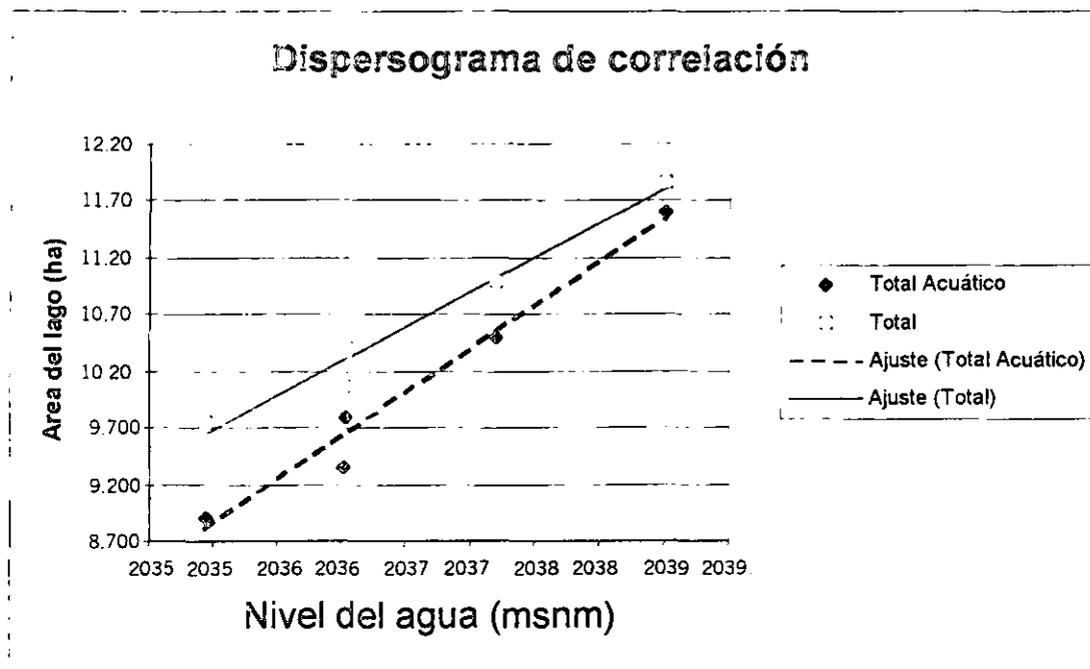


Figura 12. Relación entre nivel del agua y área del lago entre 1969-2000. (el coeficiente de determinación de 0.96423 corresponde a una ecuación del tipo $y = b + mx$ donde y es el área total del lago; x el nivel medio del agua para un año dado; b es el intercepto al eje y , y m es la pendiente o tasa de cambio. $b = -1,152,079.247$ y $m = 570.764$).

La turbidez del lago ha aumentado en las últimas décadas (Bernal-Brooks, 2001) de forma que la vegetación sumergida tiende a reducirse. El incremento en nutrientes (cambio de nivel trófico del lago, actualmente eutrófico-hipereutrófico) y el descenso del nivel el lago favorecen que las zonas litorales y la parte sur (con poca profundidad) sean colonizadas por vegetación emergente (cambios 1974-2000). (tablas 3 y 4, mapas 2, 3, 4, 5 y 6).

Quizá la aportación mas grande de este trabajo no es el afirmar que en efecto el lago está perdiendo superficie. Sino el haber hecho posible la cuantificación de áreas de forma precisa para

diferentes fechas, en especial para 1969 cuando el lago tenía un nivel menor que en 1974. Varios autores mencionan las fluctuaciones de nivel del lago en el corto y el largo plazo (Watts y Bradbury, 1982; O'hara, 1991), además de comentar el que aparentemente no hay evidencia de que el lago se haya secado por completo o haya tenido una tendencia clara a la desecación durante los últimos 48,000 años de su existencia conocida (Bradbury, 2000).

Los datos generados en este trabajo permiten vislumbrar la relación de los cambios morfológicos y los cambios de nivel en el tiempo, al tiempo que apoyan la hipótesis de que el lago presenta ciclos de cambio de nivel relacionados con el balance hídrico y la erosión de la cuenca asociados a ciclos climáticos regionales y cambio de uso del suelo. En este último caso se considera que es necesario realizar más investigación que permita conocer los mecanismos de acarreo y deposición de sedimento en el lago así como aquellos que determinan su distribución a lo interno, dado que los estudios paleolimnológicos mencionan una tasa de sedimentación menor a 1 *mm/año* (O'Hara, 1991) y se sabe que la cuenca tiene rangos de erosión que van de 2.76 a 432 *ton ha/año* donde la mayor proporción de la cuenca presenta un valor de 28 *ton ha/año* (Gómez-Tagle, 1997).

10. CONCLUSIONES

La metodología empleada permitió analizar la morfometría del lago en diferentes épocas y así calcular las superficies total, por sectores, entidades y otras variables morfométricas del lago.

El área total muestra un máximo en 1974 (11,873 *ha*) y una disminución en fechas posteriores.

Las propiedades morfométricas del lago tienden a cambiar en el tiempo, especialmente la orientación y longitud de los ejes l , L_f , b y el desarrollo litoral D_L .

Aun cuando, en general, el lago pierde área en imágenes posteriores a 1974, la metodología permitió establecer variaciones en área acordes a los cambios de nivel en el lago.

En 1969 el lago de Pátzcuaro presentaba un nivel inferior a 1974, y la disminución de áreas a partir de esta última fecha se encuentra registrada en materiales de percepción remota.

El empleo de esta metodología ha permitido establecer las magnitudes y órdenes de cambio en las superficies del lago de Pátzcuaro en una forma que permite establecer correlaciones con los cambios de nivel.

La cuantificación de área permitió la realización de análisis de correlación con un $r=0.982$ para el total acuático y $r=0.999$ para el área total respecto al nivel de agua.

El análisis de regresión entre la superficie y nivel del agua con un $n=5$ y $r^2=0.964$ permitió la generación de un modelo simple que describe este cambio en el intervalo que va de 1969 a 2000.

11. RECOMENDACIONES

1. Si bien el modelo generado en este trabajo ajusta para una parte de los registros y proporciona una aproximación de la relación existente entre el cambio de nivel de agua en el lago y la superficie, deberán incluirse más fechas para poder tener una mejor representación del fenómeno.
2. Se recomienda el seguimiento del cambio en el lago mediante imágenes satelitales SPOT o LANDSAT TM, así como el análisis de una serie aerofotográfica correspondiente a la década de 1940 que no pudo ser incluida en este proyecto por no haber sido localizada.
3. La realización de un estudio detallado sobre balance hídrico donde incluya la erosión y depositación para la cuenca y el lago en una base anual.
4. La generación de un modelo batimétrico digital de alta precisión y su inclusión dentro de un MDE de la zona, que permita incorporar la información cartográfica creada en este proyecto y la base de datos de cambio de niveles del lago, a fin de crear escenarios virtuales para otras fechas.
5. La elaboración de un modelo de funcionamiento hidáulico del vaso lacustre a partir de los cambios obtenidos de la información de áreas, batimetría y las variables climáticas.
6. Elaboración de un modelo de funcionamiento de la cuenca que integre el funcionamiento hidráulico del vaso y las información hidrológica, climatológica, de uso del suelo y de erosión de la cuenca.

12. REFERENCIAS

- AVILA, R. R., 1982. Notas de Fotogrametría y Fotointerpretación. INIF, 50 pp.
- ANCONA, I., M.A. Batalla, E. Caballero, C.C. Hoffman, R. Llamas, R. Martín del Campo, I. Ochoterena, E. Rioja, J. Roca, A. Sámano, C. Vega & F. Villagrán, 1940. Prospecto biológico del lago de Pátzcuaro. An. Inst. Biól. (Méx.), 11: 415-503.
- BARBOUR, C.D., 1973. A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): a species flock from the Mexican plateau. COPEIA 3: 553-556
- BERNAL-BROOKS, F.W. 1998. The Lakes of Michoacan: a brief history and alternative point of view. Freshwater Forum 10: 10-34.
- BERNAL-BROOKS, F.W. 2001. La limnología del Lago de Pátzcuaro: una visión alternativa a conceptos fundamentales. Tesis de doctorado. UNAM.
- BERNAL-BROOKS, F.W. and MacCrimmon, H.R. 2000. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. In: M. Munawar, S. Lawrence, I. F. Munawar y D. Malley (eds.). Aquatic Ecosystems of Mexico: Status & Scope. Backhuys. The Netherlands.
- BERNAL-BROOKS, F.W., Gómez-Tagle R. A y J. Alcocer D. 2001. Lake Patzcuaro (Mexico): a Controversy about the Ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. In Hydrobiologia.
- BIRKETT, C.M. and Mason, I.A. 1995. A new global lakes database for a remote sensing programme studying climatically sensitive large lakes. J. of Great Lakes Research 21 (3): 307-318
- BRADBURY, J. P. 2000. Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, Mexico for the past 48,000 years: impact of climate and man. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 163: 69-95
- CHACON, T.A. 1993. El Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Bosquejo de un Lago Amenazado. Ed. Universitaria. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

CHACON, T.A. y E. Múzquiz. 1997. Climatic trends, water balance and lake Pátzcuaro. a tropical high altitude lake. *Quaternaty International*. Vol. 43/44: 43-51

DEEVEY, E.S. 1957. Limnological studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Transaction of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 39: 213-328.

DE BUEN, F., 1941. Las variaciones físicas y químicas de las aguas del lago de Pátzcuaro desde octubre de 1939 a marzo de 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* 7: 1-25.

DE BUEN, F., 1944a. Limnobiología de Pátzcuaro. *Anales del Instituto de Biología (México)* 15: 261-312.

DE BUEN, F., 1944b. Los lagos michoacanos. II. El lago de Pátzcuaro. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 5: 99-125.

DEMANT, A., 1975. Les quatre provinces volcaniques du Mexique, relations avec l'évolution geodynamique, depuis le Cretace, II. Les deux provinces occidentales. *C.R. Acad. Sc.*, 280: 1437-1440.

EASTMAN, R. 1999. *Guide to GIS and Image Processing* Vol. 1. Clark Labs. 193 pp.

FRITZ, S.C., Cumming, B.F., Gasse, F. y K. Laird. 1999. In: Stoermer, E.F. y J.P. Smol (eds.). *The Diatoms. Applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press. Cambridge. 41-72.

GARCÍA, E. 1984. *Modificaciones al Sistema de Clasificación de Köppen (para adaptarlo a la República Mexicana)*. 4ª Ed. Enriqueta García de Miranda, Offset Larios. México.

GÓMEZ-TAGLE, Ch. A., F. W. Bernal-Brooks, J. Alcocer. 2001. Sensitivity of Mexican water bodies to Regional Climatic Change: Three study alternatives applied to remote sensed data of lake Pátzcuaro. In *Hydrobiologia*.

GÓMEZ-TAGLE, Ch. A., H. Zepeda Castro. *Generación de Modelos Digitales de Elevación a partir de curvas de nivel: comparación de algoritmos incorporados en cuatro paquetes SIG*. En preparación.

GÓMEZ-TAGLE, R. A., 1997. Levantamiento Agrológico Forestal de la Cuenca de Pátzcuaro, Mich. Y diagnóstico de posibilidades de recuperación y desarrollo, mediante sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Fac. Ciencias. UNAM. 130 pp.

GRIMSON, J.L. y Greene R.G. 1992. Use of Aerial Photographs to Measure the Historical Areal Extent of lake Erie Coastal Wetlands. *Photogrametic Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58, No. 9: 1355-1360. En Herrera y H.B.E. 1995. *Aplicaciones en Técnicas de Percepción Remota*. Vol. II. UACH. Boletín Técnico Num. 28: 9-18.

GUERRA, P. F. 1980. *Fotogeología*. Fac. Ingeniería. UNAM. 337 pp.

HERRERA, H.B. 1983. *Elementos de Fotogrametría uso de Materiales Aerofotográficos*. UACH. Texcoco Edo. Mex. México. 173 pp.

HUDAK, A.T. and C.A. Wessman. 1998. Textural analysis of historical aerial photography to characterize woody plant encroachment in South African Savanna. *Remote Sens. Environ.* 66: 317-330.

HUTCHINSON, G. E., Patrick, R. & E.S. Deevey, 1956. Sediments of Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America* 67: 1491-1504.

INEGI, 1977a. Carta Topográfica E14A22 (Pátzcuaro) escala 1:50,000. 1ª Edición.

INEGI, 1977b. Carta Topográfica E14A21 (Cherán) escala 1:50,000. 1ª Edición.

INEGI, 1998. Carta Topográfica E14A22 (Pátzcuaro) escala 1:50,000. 2ª Edición.

INEGI, 1999. *Productos Geográficos Digitales*. CD-Demostrativo.

LEON-PORTILLA, M., 1974. *Historia de México*. Tomo II. Salvat Ed. México.

LOPEZ, G. M. E. 1999. Cambio de uso del suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia. Tesis de Maestría. Fac. Biol. UMSNH. 134 pp.

MEADEN, G.J. y Kapetsky, J.M. 1992. Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. *FAO Technical Report no. 318*. 266 pp.

MONCAYO, R. F., F. Estrada E., C. Pérez Romero. 1970. *Manual para uso de Fotografías Aéreas en Dasonomía*. Dirección Gral. Inventario Nacional Forestal. México, D.F. 120 pp.

NAVARRETE, P. J. A. 1999. El uso de fotografías aéreas digitales y SIG en la actualización cartográfica de la zona federal del ex-lago de Texcoco. Tesis de licenciado en Geografía, Fac. de Filosofía y Letras, UNAM. 79 pp.

O'HARA, S.L., 1991. Late Holocene environmental change in the basin of lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. PhD thesis, Oxford University.

OSORIO-TAFALL, B.F., 1941. Materiales para el estudio del microplancton del lago de Pátzcuaro (México). Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (México) 2 (2-3): 331-384.

OSORIO-TAFALL, B.F., 1944. Biodinámica del lago de Pátzcuaro. I. Ensayo de interpretación de sus relaciones tróficas. Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. 5 (3-4): 197-227

PALACIO, P. J. L y L. Luna G. 1994. Clasificación espectral automática vs. Clasificación visual: un ejemplo al sur de la Ciudad de México. Investigaciones Geográficas Boletín. 29: 25-40

SMN. 1995. Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) CD Rom. Caseta 16087 1922-1986.

TAMAYO, J.L. & R.C. West, 1964. The hidrology of Middle America. In: Wauchope, R. & R.C. West (eds), Handbook of Middle America Indians, I. University of Texas, Austin.

TORRES, O.R. y García C.J.L. 1995. Introducción al Manejo de Datos Limnológicos. UAM, Unidad Iztapalapa. México, D.F. 130 pp.

TELLEZ, R. C. y Motte G. O. 1976. Estudio plactológico preliminar del lago de Pátzcuaro, Mich. México. Dirección General de Acuacultura, Departamento de Pesca: 1799-1836.

VALENZUELA, C.R.1989. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands. 45 pp.

WATTS, W. y J.P. Bradbury. 1982. Paleoecological studies al Lake Patzcuaro on the west-central Mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. Quaternary Res. 17: 56-70.

WETZEL, R.G. 1981. Limnología. Ed. Omega, Barcelona España.

WOLF, R., 1974. Elements of Photogrammetry (2 ed.), McGraw-Hill Inc., New York.

13. ANEXOS

ANEXO 1.

Diagramas de flujo metodológicos.

Diagrama de flujo que ilustra la metodología empleada para el procesamiento de fotografías aéreas.

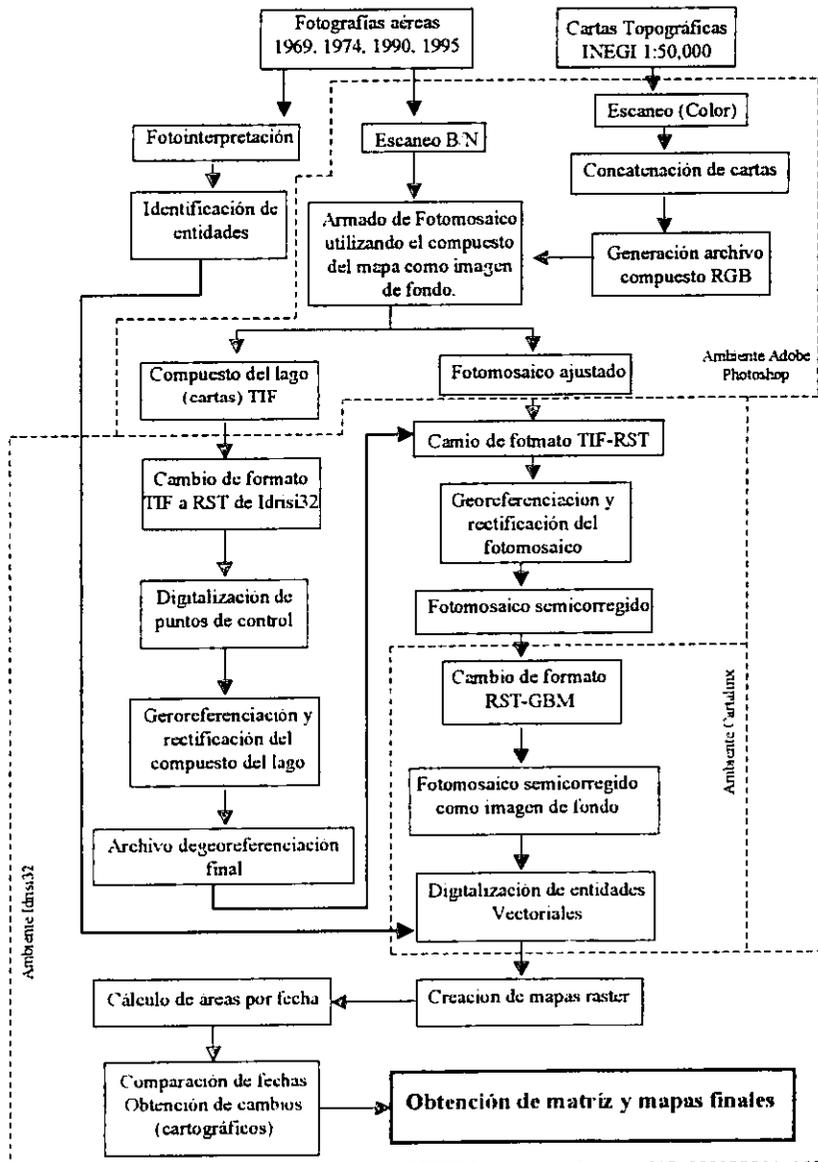
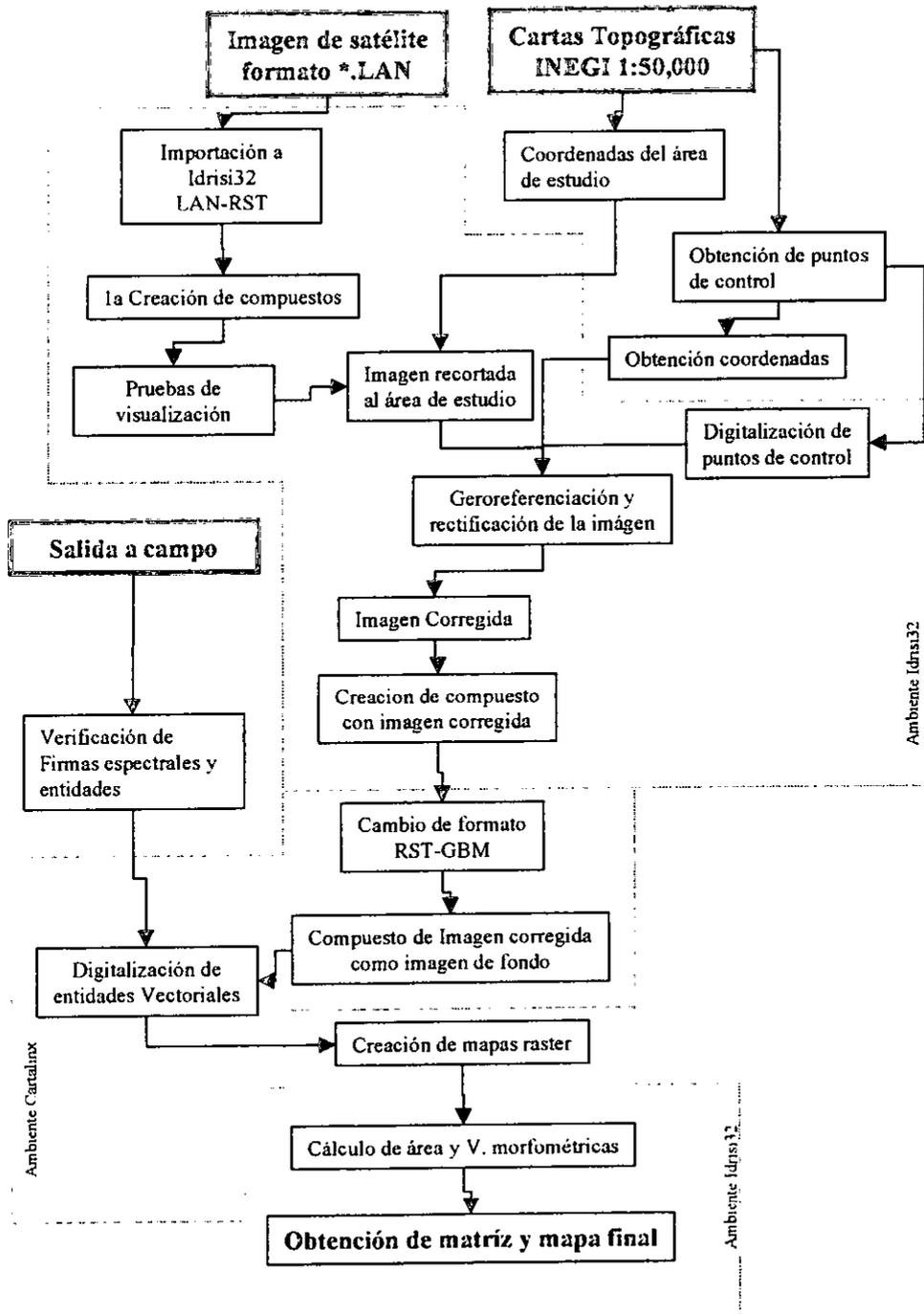


Diagrama de flujo que ilustra la metodología empleada para el procesamiento de la imagen de satélite



ANEXO 2.

Estructura y parámetros de los datum (sistemas de referencia) empleados;

Parámetros del sistema de referencia ITRF92 para la zona 14Q, no incluido en Idrisi32 y proporcionado por INEGI Michoacán.

```
ref. system : ITRF92
projection  : Transverse Mercator
datum      : ITRF92
delta WGS84 : 0 0 0
ellipsoid   : GRS 80
major s-ax : 6378137.000
minor s-ax  : 6356752.500
origin long : -99
origin lat  : 0
origin X    : 500000
origin Y    : 0
scale fac   : 0.9996
units       : m
parameters  : 0
```

Parámetros del sistema de referencia NAD27 para la zona 14, incluido en Idrisi32 como US27TM14.REF

```
ref. system : Universal Transverse Mercator Zone 14
projection  : Transverse Mercator
datum      : NAD27
delta WGS84 : -8 160 176
ellipsoid   : Clarke 1866
major s-ax  : 6378206.40
minor s-ax  : 6356583.80
origin long : -99
origin lat  : 0
origin X    : 500000
origin Y    : 0
scale fac   : 0.9996
units       : m
parameters  : 0
```