

2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



Facultad de Filosofía y Letras
Colegio de Geografía



"EL USO DE FOTOGRAFÍAS AERIAS DIGITALES Y SIG EN LA ACTUALIZACION CARTOGRAFICA DE LA ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO"

T E S I S
Que para obtener el título de:
LICENCIADO EN GEOGRAFIA
p r e s e n t a

JOSE ANTONIO NAVARRETE PACHECO

Director de Tesis: Dr. José Luis Palacio Prieto

México, D. F.

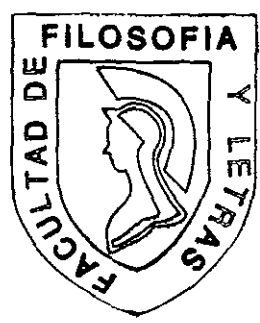
Enero 1999



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

269706

TESIS CON
ALIA DE ORIGEN





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

“EL USO DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES Y SIG
EN LA ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA
DE LA ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

Lic. JOSÉ ANTONIO NAVARRETE PACHECO

DIRECTOR DE TESIS: Dr. JOSÉ LUIS PALACIO PRIETO

A mis Padres:

*Porque no existen las palabras suficientes
para agradecerles todo su apoyo y cariño,
esta es una pequeña muestra de lo que
puedo lograr, gracias a ustedes*

A mis Hermanas:

*Porque su apoyo y esos momentos
que hemos compartido
le han dado a mi vida
una singular felicidad*

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis: a mi cuate el Dr. José Luis Palacio, por su respaldo incondicional, amistad y confianza. A Celia, Arturo y Guadalupe, por soportarme tanto tiempo a su lado (¡más de tres años, que resistencia!!), por su auxilio en los momentos difíciles, y por aquellos instantes de locura colectiva.

Al Ing. Fernando Mercado, de la Gerencia del Lago de Texcoco, por todo el apoyo brindado, así como a Julio y Vicente, por su apoyo en el trabajo de campo. A la comisión Nacional del Agua, por el apoyo económico.

Al Mtro. Armando Peralta, por su orientación en estas nuevas ciencias ocultas (fotografía aérea digital, aerodinámica, plomería y un poco de acrobacia), también por su amistad, confianza y horas de vuelo.

Al Dr. Jorge López Blanco, por aquellas charlas tan formativas, por su paciencia, y sobre todo, por su amistad.

A la Mtra. Laura Luna González y al Dr. Mario Arturo Ortíz, por aceptar ser sinodales de esta tesis.

A la Dra. Teresa Sánchez, por esos jalones de oreja tan oportunos (con todo respeto).

A la Mtra. Concepción Basilio Romero, coordinadora de la biblioteca del Instituto de Geografía, por las facilidades y la ayuda otorgadas; así como a José Cabrera Reyes, José Arturo Hernández Rodríguez, Juan Vargas González y David Velázquez Mancilla, por su ayuda para la consulta del material bibliográfico y cartográfico.

A todos ellos, y más. Gracias.

Antonio

INDICE

	pág.
Introducción	1
La cartografía en México y en la Zona de estudio	3
Objetivos	4
General	4
Particulares	4
Area de estudio	4

CAPÍTULO I

PERCEPCIÓN REMOTA

1.1 Percepción Remota Convencional	6
1.1.1 Imágenes de satélite	6
Características	6
Aplicaciones	7
Limitantes	8
Perspectivas a futuro	9
1.1.2 Fotografías Aéreas	12
Características	12
Aplicaciones	12
Limitaciones	13
Mosaicos no controlados	14
Mosaicos semicontrolados	14
Mosaicos controlados	15
1.2 Percepción Remota Alternativa	16
1.2.1 Videoteledetección	16
Características	16
Ventajas	16
Desventajas	18
Evolución de los sistemas de videoteledetección	20
Videoteledetección en México	31

1.2.2 Fotografía Aérea Digital	34
Antecedentes	34
Formato de la imagen	35
Respuesta radiométrica	35
Resolución	35
Ventajas	36
Limitantes	36
Aplicaciones	37
Fotografía digital en México	37

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales	39
2.2 Construcción de mosaicos	44
2.2.1 Método de sobreposición digital.	44
2.2.2 Método de construcción con cartografía base.	48
2.3 Obtención de puntos GPS de modo diferencial	50
2.4 Cálculo de la distorsión geométrica de los mosaicos	51

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Resultados	55
Comparación del desplazamiento entre mosaicos	60
Fuentes de error	62
Costos	64
3.2 Conclusiones	66
Anexo	
Mosaico no controlado	70
Mosaico semicontrolado	71
Bibliografía	72
Referencias cartográficas	79

EL USO DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS DIGITALES Y SIG EN LA ACTUALIZACIÓN CARTOGRÁFICA DE LA ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO

INTRODUCCIÓN

La construcción de un mapa comienza con la necesidad de representar las relaciones espaciales existentes en un lugar específico (Rabenhorst *et al.*, 1989). Existen múltiples fuentes de información con las cuales se puede generar cartografía, algunas de estas fuentes son datos tabulares, registros históricos y relatos verbales; otra fuente de información es la contenida en mapas existentes, y quizá la fuente de información más utilizada hoy en día: los productos de la percepción remota.

Entre los diferentes productos derivados de la percepción remota utilizados comúnmente en la evaluación de los recursos naturales y culturales se encuentra, en primer lugar, la *fotografía aérea*, muy utilizada y difundida desde hace más de un siglo en un sinnúmero de aplicaciones (ASP, 1960; citado por Palacio, 1995). A partir de 1972, con la puesta en órbita del primer satélite de la serie Landsat, se inicia la generación periódica de imágenes de satélite, lo que proporcionó información tanto del medio físico como del socioeconómico de manera continua. Posteriormente, entraron en operación algunos otros satélites como los Landsat TM, SPOT, NOAA, ERS, IRS, entre otros, los cuales también tienen la facultad de captar intervalos del espectro electromagnético que van desde el visible hasta el Infrarrojo térmico (IrT), pasando por el infrarrojo cercano (Irc) e Infrarrojo medio (Irm).

Tanto las fotografías aéreas como las imágenes de satélite son productos que requieren de un tiempo más o menos considerable antes de llegar a los usuarios finales. Esto es debido a que antes y después de su adquisición requieren ciertos preparativos y procesamiento. En el caso de la fotografía aérea, es necesario después de realizar el plan de vuelo, y la ejecución del mismo, el revelado de la película fotográfica, la reconstrucción de líneas de vuelo, etc. (Falkner, 1995), lo cual puede demandar semanas y hasta meses. Por otro lado, la disponibilidad de las imágenes de satélite está en función del período de cada satélite, llegando a ser éste desde .5 días hasta 26 días, dependiendo del satélite; sin embargo, al anterior lapso hay que agregar el tiempo necesario para procesarlas antes de entregarlas al usuario final. Así, el tiempo necesario para poder obtener una imagen nueva de satélite puede ser de un par de semanas hasta meses, en el caso de algún contratiempo del sistema sensor-receptor (imágenes "rayadas" o "bandeadas") o del estado del tiempo (nubosidad en la escena). En el caso de las imágenes de satélite de archivo, es decir, las que son de tomas anteriores, el lapso de espera puede ser de un par de semanas e incluso menor (Palacio, 1995).

Por otra parte, las imágenes de satélite cuentan con una resolución espacial que tal vez no sea la idónea para ciertos estudios, y la cual varía de acuerdo con el satélite y el sensor que se utilice. En el mejor de los casos, las imágenes de satélite comerciales más comunes en México cuentan con una resolución que oscila entre los 10 y 20 metros (imágenes SPOT), que si bien es útil para ciertos estudios, para otros es insuficiente.

Las principales herramientas de percepción remota utilizadas en la producción cartográfica son las fotografías aéreas en formato analógico y, más recientemente, las imágenes de satélite. Las primeras se pueden obtener tanto de agencias gubernamentales como de agencias privadas, y permiten realizar

mapas a escalas de media a grande. Una de las principales desventajas de éstas es el alto costo que hay que cubrir para su obtención (Cuadro 1). Las imágenes de satélite comúnmente son utilizadas para realizar cartografía a escala mediana y pequeña, debido a su gran cobertura, pero estas presentan el inconveniente relativo de tener una baja resolución espacial (Rabenhorst *et al.*, 1989).

CUADRO 1
COMPARACIÓN DE COSTOS DE PRODUCTOS DIGITALES OBTENIDOS DESDE SATELITE,
FOTOGRAFÍA AÉREA Y TELEDETECCIÓN VIDEOGRÁFICA

Plataforma/ Producto	Area Escena (Km ²)	Resolución (m)	Costo por Escena USD	Costo por Km ² USD	Fuente
Landsat TM	31,450	30 x 30	4,400	0.13	Worldmap (1993) ¹
SPOT Pan.	3,600	10 x 10	3,300	0.91	Worldmap (1993) ¹
Resource F1					
KFA-1000 ^a	6,400	5 x 5	2,400	0.37	Worldmap (1993) ¹
KFA-1000 ^b	30,000	8 x 8	2,400	0.08	Worldmap (1993) ¹
Resource F2					
MK-4 ^c	50,000	20 x 20	1,920	0.03	Worldmap (1993) ¹
MOS-1 ^d	16,650	50 x 50	No disp.		RETEC (s/fecha) ²
JERS-1 ^e	7,425	18 x 24	No disp.		RETEC (s/fecha) ²
Foto aérea	Variable	0.2 - 0.8	-----	23.30	Peralta (1992) ³
Video	Variable	0.8 - 3.5	-----	0.33 a 0.70	Peralta (1992) ³

^aCámara para obtener Fotografía Satelital Digitizada (FSD) en tierra (con 2 bandas espectrales, producto ruso, comercializado por un consorcio USA/UK/Rusia). ^bFSD (Fotografía Satelital Digitizada, con 3 bandas espectrales). ^cFSD (Fotografía Satelital Digitizada, con 8 bandas espectrales). ^dMarine Observation Satellite-1 (satélite japonés). ^eJapanese Earth Resources Satellite-1. ¹Worldmap (1993). ²RETEC=Remote Sensing Technology Center of Japan (s/fecha). ³Peralta *et al.*, 1992:7

Fuente: López Blanco, Jorge. (1995). "Imágenes Digitales en Video en Evaluaciones del terreno" en el VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Memorias. p. 147

Tratando de evitar los anteriores inconvenientes de las herramientas de percepción remota convencionales, algunos grupos comenzaron a utilizar cámaras de video y más recientemente, cámaras de fotografía digital, montadas en una plataforma aérea, dando origen a una creciente variedad de técnicas para la obtención y procesamiento de imágenes de percepción remota. Los desarrollos logrados en México en estos campos son significativos (López Blanco, 1994; López Blanco, 1996; López Blanco, 1997; Palacio y López Blanco, 1994; Palacio *et al.*, 1996; Palacio, 1997; Peralta *et al.*, 1992).

Una de las principales ventajas de la fotografía digital es la posibilidad de obtener un producto en formato digital directamente, el cual está listo para ser procesado por computadora en tiempo casi real para el usuario final; en el caso del video, la señal electrónica puede ser procesada y convertida en formato digital de manera rápida, para su posterior procesamiento por computadora. Además, el equipo de videografía es portátil, adaptable y fácil de usar. El audio que acompaña al video es otro atributo útil, permitiendo anotaciones en vuelo. Así mismo, el alto número de imágenes (30 imágenes/seg.) ofrece una redundancia de información que es útil en caso de un desperfecto del equipo (Everitt, 1988).

A la utilización y procesamiento de imágenes de video y fotografía digital se le ha dado el nombre de *videoteledetección*. Inicialmente, a la utilización de imágenes de video como herramienta de percepción remota se le dió el nombre de *videografía*, pero la definición de esta palabra abarca otras actividades que no están relacionadas con la captación de información de percepción remota, por lo que se cree más

conveniente utilizar la palabra *videoteledetección* para describir la adquisición, el procesamiento y la aplicación de video como herramienta de percepción remota en el contexto de una determinada aplicación. Una de las cualidades más útiles de esta tecnología es que al poder obtener productos en tiempo casi real, pueden realizarse importantes estudios en los cuales se requiere de una acción inmediata, como por ejemplo, desastres naturales, planes de evacuación, etc. Habitualmente, dentro del concepto de videoteledetección se incluye a la Fotografía Digital (King, 1993), ya que tanto la utilización de equipos de video y cámaras de fotografía digital, cuenta con similares ventajas sobre las herramientas de percepción remota convencionales, siendo una de las principales diferencias entre éstas, la calidad de los productos finales (resolución temporal, espacial, espectral y radiométrica), así como el formato, entre otros, siendo mejores los obtenidos con las cámaras de fotografía digital.

El creciente interés en la videoteledetección ha originado que se abrieran foros especializados en el tema y sus aplicaciones. En el 11° Taller Bienal de Fotografía Aérea en Color, realizado en Weslaco, Texas, E.U. en 1987, se decidió agregar el término de videografía al siguiente taller por primera vez, a raíz de la cantidad de trabajos sobre videoteledetección recibidos para este taller (*11th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography, 1987*). Posteriormente, se realizó el primer taller especializado en videoteledetección, también en Terre Haute, Indiana (*First Workshop on Videography, 1988*), y actualmente, la videoteledetección es el tema central de esta serie de talleres, como lo demuestra el título del último taller realizado en Weslaco, Texas (*Videography and Color Photography in Resource Assessment*); el organismo impulsor de estos talleres es la Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*).

En estos talleres se han expuesto las crecientes aplicaciones de la videoteledetección, llegando a campos tan diversos como la agricultura, los riesgos naturales y antrópicos, el manejo de recursos naturales, entre muchos otros.

La Cartografía en México y en la Zona de Estudio

La cartografía de México tiene un gran rezago, debido a múltiples factores, entre los cuales se encuentra el alto costo que hay que cubrir para poder actualizar la cartografía de zonas específicas, y la falta de un presupuesto suficiente.

El territorio nacional está cubierto totalmente con cartografía topográfica en distintas escalas (entre 1:1,000,000 y 1:50,000), no así otros aspectos como vegetación, uso del suelo, y otros, lo que resulta en una carencia de información para una gran cantidad de estudios, por lo que para enmendar esta falta de información, en ocasiones hay que invertir considerables cantidades de recursos.

Como sucede con amplias regiones del país, la cartografía de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco sufre también un notable rezago. Los mapas más recientes disponibles corresponden a 1983-1985 (cartas E14A21 y E14A31, respectivamente, editadas por el INEGI) en escala 1:50,000 y a mayores escalas se incrementa su antigüedad (cartas de 1977 en escala 1:10,000). También existen de la zona fotomapas a escala 1:10,000 (Texcoco, 4 cartas de 1982) en las cuales la Zona Federal sólo es cubierta en un 10% aproximadamente, y un Atlas General del Estado de México editado por el Gobierno del

Estado en 1993, compuesto por fotografías aéreas a diferentes escalas, en donde la Zona Federal es abarcada por más de 5 fotografías en escalas de 1:70,000 a 1:20,000 aproximadamente.

Los inconvenientes anteriores, han hecho que las autoridades de la Zona Federal del Ex-lago de Texcoco busquen alternativas para contar con cartografía actualizada, con las cuales puedan satisfacer sus necesidades de información, para poder manejar los distintos problemas que se dan en la Zona Federal y su cuenca tributaria (erosión, azolve de canales, incendios forestales, invasión de tierras, uso del suelo, etc.), y supervisar los trabajos que se hacen para contrarrestar los efectos perjudiciales de los problemas anteriormente mencionados (plan de reforestación, construcción de lagos y plantas tratadoras de aguas residuales, entre muchos otros).

Esta tesis es parte de un convenio suscrito por el Instituto de Geografía de la UNAM con La Gerencia del Lago de Texcoco titulado ESTUDIO VIDEOGRÁFICO DE LA ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO. El objetivo central de dicho estudio fue la adquisición de imágenes de video e imágenes digitales para diferentes fines, entre otros, la evaluación de las tareas de conservación de suelo, agua y vegetación en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco y su cuenca tributaria oriental. El proyecto referido representa el mayor esfuerzo de adquisición de fotografía digital y video realizado a nivel mundial (Palacio *et al*, 1997).

OBJETIVOS

GENERAL

- ☞ Desarrollar y aplicar métodos y herramientas alternativas de percepción remota y de actualización cartográfica.

PARTICULARES

- ☞ Diseñar y evaluar métodos para la construcción sistemática y rápida de mosaicos digitales no controlados y semicontrolados para la actualización cartográfica
- ☞ Elaborar mosaicos fotográficos mediante el uso de programas de procesamiento de imágenes digitales.
- ☞ Satisfacer la necesidad de cartografía actualizada de la Gerencia del Ex-Lago de Texcoco.

Área de estudio

La Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco está ubicada al noreste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y ocupa sólo una porción de lo que era el vaso del Lago de Texcoco; colinda con 6 entidades municipales las cuales son: Acolman, Atenco, Chimalhuacán, Ecatepec, Nezahualcóyotl y Texcoco.

El Lago de Texcoco ha sido desde siempre el cuerpo de agua más importante del Valle de México, siendo una parte fundamental del sistema y funcionamiento hidrológico de la cuenca (Cruickshank, 1995). Como tal, al desecarse, dio lugar a una serie de tensiones ambientales que desembocaron en un serio deterioro ecológico, como son la desertificación e intensa salinización de los terrenos ocupados y circundantes y la creación de un foco de insalubridad que llegó a representar un grave peligro para la salud de la población de la ZMCM y de los municipios conurbados del Estado de México.

En tal sentido, Texcoco ha sido escenario, causa y efecto de graves problemas en todo el Valle. Para tratar de aminorar los efectos nocivos de la zona, en la administración del Lic. Luis Echeverría Álvarez, la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) se dio a la tarea de realizar un estudio sobre las condiciones hidrológicas y ecológicas del lago. Tras de analizar sus antecedentes se formuló el *Plan Texcoco*, en el que se estableció una serie de programas, acciones, proyectos y obras de rescate para hacer a esta región productiva y mucho menos perjudicial para la población. Al desaparecer esa dependencia, el Plan fue continuado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), quedando finalmente a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA), organismo desconcentrado de dicha Secretaría (Cruickshank, 1995).

Debido a la amplitud y diversidad de acciones y obras que implica el *Proyecto Lago de Texcoco*, éste fue dividido en tres etapas:

En la primera se consideró llevar a cabo obras urgentes de infraestructura hidráulica y de cobertura vegetal con el principal fin de mitigar la acción perjudicial de las tolvaneras que afectaban a la Ciudad de México y municipios conurbados. Otra de las medidas a tomar fue el encauzamiento, control y regulación de los ríos de la Compañía y de Churubusco para evitar inundaciones en diversas áreas del Valle y en la Ciudad de México, y del control de los once ríos de la vertiente montañosa del oriente para evitar inundaciones en numerosos pueblos y tierras de cultivo. Para lograr lo anterior se formaron cinco lagos, cuyo espejo de agua tiene una extensión de 1700 ha, creando con éstos un microclima más favorable para el desarrollo de ciertas especies vegetales y animales en la zona.

La segunda etapa consiste básicamente en afianzar la primera, aprovechando los avances de esta última se impulsa la creación de zonas boscosas, criaderos de caballos, se estimula la actividad piscícola, la creación de zonas recreativas así como deportivas (acuáticas y atléticas).

La última etapa la constituyen la operación, conservación y seguimiento de los trabajos relacionados con el manejo de la cuenca montañosa, lagos, canales, plantas de tratamiento y caminos construidos.

Por último, se estudia la posibilidad de construir una macroplanta de tratamiento de todas las aguas residuales del área metropolitana.

En la actualidad, para poder alcanzar las metas planteadas en las diferentes etapas del *Proyecto Lago de Texcoco*, es esencial contar con fuentes de información geográfica para la evaluación y manejo de recursos naturales, y es preciso que esta información tenga el nivel de detalle espacial y temporal lo más cercano a la realidad.

CAPÍTULO I PERCEPCIÓN REMOTA

Puede definirse como *Percepción Remota* a la serie de herramientas y técnicas que se utilizan tanto para extraer información del espectro electromagnético de objetos distantes, como para procesar dicha información en el contexto de una determinada aplicación (Chuvieco, 1990; Falkner, 1995).

Los cartógrafos contemporáneos y muchos otros investigadores utilizan información colectada con una variedad de instrumentos conocidos como sensores remotos. Los instrumentos y las formas con que se obtiene la información son muy variados, pero prácticamente todos estos extraen la información del espectro electromagnético (Falkner, 1995). Un sensor remoto es un instrumento que capta información de lugares distantes. Para diversos estudios se emplean varios segmentos del espectro electromagnético a la vez (ultravioleta, luz visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo térmico, radar, etc.) con el fin de obtener información especializada. En estudios fotogramétricos, planimétricos y/o topográficos habitualmente se utiliza únicamente el rango visible del espectro electromagnético (Falkner, 1995).

1.1 Percepción Remota Convencional

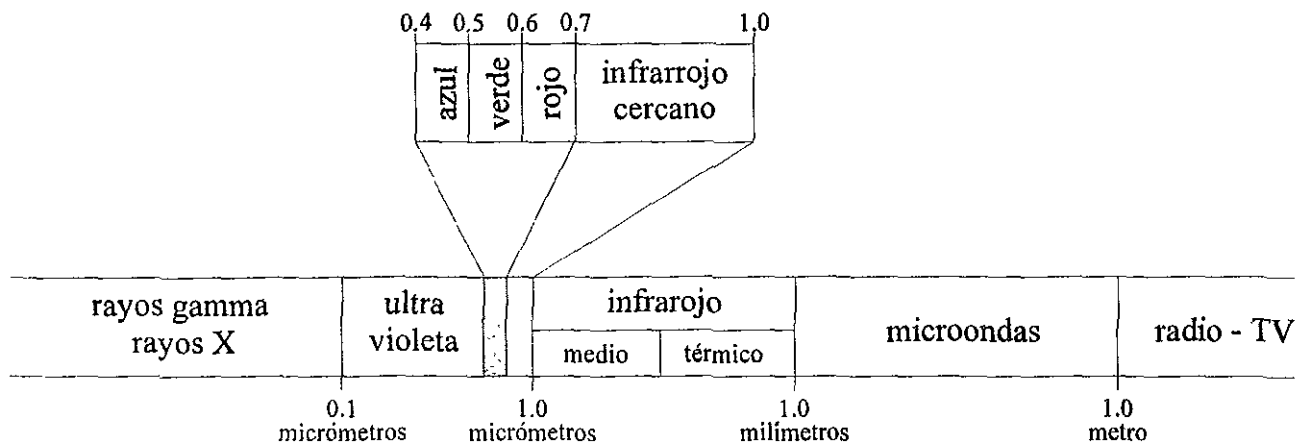
1.1.1 Imágenes de Satélite

Cada porción de la superficie de la Tierra recibe radiación solar la cual es absorbida o reflejada en distintas longitudes de onda, algunas de estas invisibles al ojo humano. Cada objeto en la superficie de la Tierra refleja longitudes de onda específicas denominadas *firmas espectrales*, las cuales pueden ser captadas por sensores ubicados en satélites (Falkner, 1995).

Las imágenes de satélite están en formato *raster*, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles (*picture element*), en donde cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia. Por ejemplo, si la resolución de la imagen es 30 metros, cada píxel muestra un área en la superficie terrestre de 30 x 30 metros (900 m²), es decir, que la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900 m² será promediada para darle su valor digital al píxel. La información contenida en cada píxel está en formato digital, normalmente 8 bit ($2^8 = 256$) en una imagen en blanco y negro, en donde el 0 es negro, 255 es blanco y hay 254 distintos tonos de gris intermedios. Estas imágenes, al estar en formato digital, pueden ser procesadas por computadora.

En una imagen a color hay tres bandas (azul, verde y roja, 8 bits por canal; 24 bits ó $2^{24} = 16,777,216$ colores), cada banda muestra la reflectancia de un objeto en determinadas áreas del espectro electromagnético; de la misma forma los satélites colectan información en bandas espectrales que van principalmente del visible al infrarrojo (ver Figura 1).

Figura 1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO
micrómetros



Fuente: Aerial Mapping, Methods and applications. (Falkner, 1995)

Actualmente las imágenes más utilizadas en México, provienen de tres series de satélites, los cuales circundan la Tierra en órbitas helio-sincrónicas: LANDSAT (Estadounidense), SPOT (Francés) y NOAA (Estadounidense); teniendo cada uno de los anteriores características distintivas (Cuadro 2).

CUADRO 2
CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES SATÉLITES UTILIZADOS EN PR

	Cobertura (Km)	Resolución (metros)	Período (días)	Bandas Espectrales
Landsat - MSS	180 x 180	80	16.0	4
Landsat - TM	180 x 180	30**	16.0	7
SPOT	60 x 60*	20***	26.0	3 y pancromática
NOAA	3000 x 3000	1100-5000	0.5	5

*SPOT Pan.

**120 metros en la banda térmica

***10 metros en la banda pancromática

Fuente: Aerial Mapping, Methods and applications (Falkner, 1995).

Las imágenes de satélite en formato digital son especialmente útiles en estudios que estén inmersos en el contexto de un sistema de información geográfica (SIG; Falkner, 1995). Las aplicaciones que tienen las imágenes de satélite son muy variadas y están en función de las características de cada satélite. Las imágenes de los satélites Landsat TM son empleadas para estudios tales como: inventarios de vegetación (Rosenholm, 1993), estudios agrícolas (Haack *et al.*, 1994), estudios de impacto ambiental (Chatterjee *et al.*, 1994), estudios de áreas salinizadas (Ibañez *et al.*, 1998), monitoreo de turbidez en cuerpos de agua (Gonca, 1995), entre muchos otros; y al contar con una banda térmica se pueden hacer estudios de temperatura superficial. Además, al contar con cuatro bandas en el infrarrojo (1 Ir cercano, 2 Ir medio y 1 térmico), se pueden hacer estudios más detallados de vegetación y suelos.

Las aplicaciones de las imágenes de los satélites SPOT son muy variadas, ya que al tener mayor resolución se pueden apreciar objetos que con otras imágenes sería imposible ver; algunas de las

aplicaciones de estas imágenes se refieren a estudios de uso del suelo y vegetación (Rosenholm, 1993), cartografía de asentamientos rurales (Makhanya, 1993), entre otros. Esta serie de satélites solo tiene una banda en el infrarrojo cercano. Otra de las ventajas muy importante es que estos satélites pueden hacer tomas de una órbita adyacente, por lo que se pueden obtener estereopares, muy útiles para interpretación y obtención de datos topográficos para la creación de curvas de nivel con una equidistancia de 10 a 20 metros (Falkner, 1995).

Las imágenes de las dos series de satélites anteriores se reciben con un período de tiempo que es relativamente largo, pero el cual es adecuado para los estudios que se realizan con estas imágenes. En contraste, las imágenes de la serie NOAA, captadas por el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) se obtienen con mayor frecuencia (0.5 días), y se utilizan para monitorear fenómenos atmosféricos y oceánicos (Padilla *et al.*, 1996; Salmerón, 1996), los cuales son generalmente mucho más dinámicos que los que se estudian con las series LANDSAT y SPOT. Pero también son utilizadas para otras aplicaciones, como inventarios de vegetación (Rosenholm, 1993), análisis de índices de vegetación (Bonifaz *et al.*, 1996), para prevención de desastres (Khasilwa, 1993) y para monitoreo de erupciones volcánicas (Acevedo, 1997), entre otras. Estas imágenes tienen una resolución espacial muy baja (1-5 Km), por lo cual no son útiles para aplicaciones que requieren más detalle.

Una de las aplicaciones más extendidas de las imágenes de satélite es la creación de cartografía temática con base en clasificaciones multispectrales (Falkner, 1995), básicamente en dos modalidades: *clasificación no supervisada* y *clasificación supervisada*.

La clasificación no supervisada consiste en formar n número de clases con base en las distintas reflectancias o valores digitales de las imágenes a clasificar y en donde n es el número de clases definido por el usuario, así, la imagen se dividirá en n número de clases, las que posteriormente, con ayuda de cartografía, fotografías aérea o trabajo de campo, podrán ser etiquetadas y reclasificadas, según sea conveniente.

La clasificación supervisada es aquella en la que el usuario tiene más control de la clasificación y consiste en que el usuario selecciona *campos de entrenamiento* en los cuales define la firma espectral representativa de cada clase a crear, y la elección de los campos de entrenamiento debe hacerse con base en un conocimiento previo de la zona, cartografía, fotografías aéreas o trabajo de campo.

Limitantes relativas de las imágenes de satélite

Las imágenes de satélite cuentan con ciertas limitantes relativas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

Altos costos relativos. Este es uno de los factores más importantes que se tienen que considerar para la planificación de un proyecto de estudio. Las imágenes de satélite son relativamente costosas, por lo que algunos grupos de investigación no pueden disponer de ellas, aspecto muy importante en países como México, con recursos limitados o instituciones educativas que no tienen el suficiente apoyo económico. Sin embargo, si se recurre al archivo de imágenes históricas (de archivo) que tienen los proveedores, se pueden obtener imágenes a un costo mucho menor; por ejemplo, una

imagen nueva puede costar entre USD\$5000 y USD\$6000, en cambio, una imagen de archivo puede costar USD\$200.

Resolución espacial relativamente baja. Las imágenes de satélite tienen cierta resolución, la cual puede decirse que es alta, media o baja, según la aplicación que tengan. Es así que, para ciertas aplicaciones, las imágenes de satélite tienen baja resolución, por lo que no pueden captar el detalle requerido por dicha aplicación y se pierde información, es decir, la información se generaliza al poder captar solo objetos que son del mismo tamaño o mayores que las dimensiones del pixel. Las imágenes de satélite son útiles, entre otras aplicaciones, para estudios que no requieran mucho detalle, tales como inventarios de vegetación de grandes áreas, estudios de cambio de uso del suelo, estudio de fenómenos climáticos, entre muchos otros.

Resolución temporal relativamente baja. Al igual que en el punto anterior, con la resolución temporal que tienen las imágenes de satélite se pueden satisfacer las necesidades de ciertos estudios, pero para otros, la resolución temporal es baja o, en otras palabras, inadecuada. La adquisición de las imágenes de satélite está en función del período de cada satélite (Cuadro 2), teniendo algunos una disponibilidad de una imagen cada 26 días, aspecto que las hace poco útiles para captar fenómenos cuya ocurrencia es desconocida, como es el caso de los riesgos naturales como inundaciones, erupciones volcánicas, etc., en relación con la prevención, mitigación de daños y auxilio a la población afectada.

Perspectivas a futuro

Con el constante desarrollo de la tecnología, los sensores de los satélites han aumentado sus capacidades considerablemente, como son, resolución espacial, resolución espectral, entre otras, por lo que tienen en la actualidad un uso muy extenso, y para el futuro presentan perspectivas muy promisorias. En el Cuadro 3 se presentan algunos de los satélites que están en servicio en la actualidad y algunas de sus características, y en el Cuadro 4 se presentan algunos de los satélites que estarán en funcionamiento en un futuro cercano.

CUADRO 3
ALGUNOS DE LOS SATÉLITES ACTUALMENTE EN USO*

Satélite (nombre)	País	Lanzamiento	Sensor(es)	Tipos	Canales	Resolución (metros)
Landsat-5	USA	1984	MSS	Multiespectral	4	82
			TM	Multiespectral	6	30
					1	120
IRS-1A	India	1988	LISS-I	Multiespectral	4	72.5
			LISS-II	Multiespectral	4	36.25
SPOT-2	Francia	1990	HRV	Multiespectral	3	20
				Pancromático	1	10
IRS-1B	India	1991	LISS-I	Multiespectral	4	72.5
			LISS-II	Multiespectral	4	36.25
NOAA-12	USA	1991	AVHRR	Multiespectral	5	1100
ERS-1	ESA	1991	AMI	Radar	1	26
			ATSR	Multiespectral	4	1000

Satélite (nombre)	País	Lanzamiento	Sensor(es)	Tipos	Canales	Resolución (metros)
JERS-1	Japón	1992	SAR	Radar	1	18
			OPS	Multiespectral	7	18 x 24
SPOT-3	France	1993	HRV	Multiespectral	3	20
				Pancromático	1	10
RESURS-01-3	Rusia	1994	MSU-SK	Multiespectral	4	170
					1	600
NOAA-14	USA	1994	AVHRR	Multiespectral	5	1100
IRS-1C	India	1995	WIFs	Multiespectral	2	188
			LISS-III	Multiespectral	3	23
					1	70
Pan	Pancromático	1	5.8			
ERS-2	ESA	1995	AMI	Radar	1	26
			ATSR	Multiespectral	4	1000
RADARSAT	Canadá	1995	SAR	Radar	1	9 - 100
OrbView-2 (SeaStar)	US/ Orbimage	1997	SeaWiFS	Multiespectral	8	1130
IRS-ID	India	1997	WIFS	Multiespectral	2	188
			LISS-III	Multiespectral	3	23
					1	70
Pan	Pancromático	1	5.8			
SPIN-2	US/ Rusia	1997	KVR-1000	Pancromático	1	2
			TK-350	Pancromático	1	10
SPOT-4	Francia	1998	VI	Multiespectral	4	1150
			HRV	Multiespectral	4	20
					Pancromático	1

Fuente: Información proporcionada por el *Remote Sensing Applications Center (RSAC)* 1998.

CUADRO 4
ALGUNOS DE LOS SATÉLITES QUE ESTARÁN EN ÓRBITA
EN EL PERÍODO 1998 - 2004

Satélite (nombre)	País	Lanzamiento	Sensor(es)	Tipos	Canales	Resolución (metros)
NOAA-K	USA	1998	AVHRR	Multiespectral	5	1100
IKONOS	S. Imaging/ EOSAT	1998	Space Imaging	Multiespectral	4	4
				Pancromático	1	1
CBERS	China/Brasil	1998	CCD	Multiespectral	5	20
			IRMSS	Multiespectral	3	80
					1	160
ESO AM-1	US	1998	ASTER	Multiespectral	14	15, 30, 90
			MISR	Multiespectral	4	275
			MODIS	Multiespectral	36	250, 500, 1000
Landsat-7	US	1999+	ETM+	Multiespectral	6	30
					1	60
				Pancromático	1	15

Satélite (nombre)	País	Lanzamiento	Sensor(es)	Tipos	Canales	Resolución (metros)
QuickBird	EarthWatch	1998	Multiespectral	Multiespectral	4	3.2
			Pancromático	Pancromático	1	0.82
EROS-A	West Indian Space, Ltd.	1998	Pancromático	Pancromático	1	1.5
EROS-B1	West Indian Space, Ltd.	1998	Pancromático	Pancromático	1	0.82
IKONOS 2	Space Imaging	1998	Space Imaging	Multiespectral	4	4
				Pancromático	1	1
Resource 21 A, B, C, D	Resource 21	1999-2000	Multiespectral	Multiespectral	5	10, 20
			Cirrus	Multiespectral	1	100+
NOAA-L	US	1999	AVHRR	Multiespectral	5	1100
OrbView-3	Orbimage	1999	OrbView	Multiespectral	4	4
				Pancromático	2	1-2
LightSAR	US	2001	SAR	Radar	4	3 - 100
ADEOS-II	Japón	1999	GLI	Multiespectral	34	250 - 1000
EO-1	US	1999	ALI	Pancromático	1	10
				Multiespectral	6	30
				Hiperespectral	542	30
			LAC	Multiespectral	1	250
ENVISAT-1	ESA	1999	ASAR	Radar	1	30, 150
			MERIS	Multiespectral		
IRS-P5	India/US	1999	Pan	Pancromático	1	2.5
ESO PM-1	US	2000	MODIS	Multiespectral	36	250 - 1000
OrbView-4	Orbimage	2000	OrbView-4	Hiperespectral	280	8
ALOS	Japón	2002	VSAR	Radar	1	10
			AVNIR-2	Multiespectral	4	10
				Pancromático	1	2.5
ARIES	Australia	2000	Aries-1	Pancromático	1	12
				Multiespectral	96	12, 30
HRST	US	2000	HRST/COIS	Multiespectral	210	30
			PIC	Pancromático	1	5
IRS-P6	India/US	2000	LISS IV	Multiespectral	7	6, 23.5
			AwIFS	Multiespectral	3	80
NOAA-M	US	2001	AVHRR	Multiespectral	5	1100
XSTAR	Francia/ Grán Bretaña	2001	XSTAR	Multiespectral	10+	20
SPOT-5	Francia	2001	HRV	Multiespectral	3	10
					1	20
			Pancromático	1	5	
			VI	Multiespectral	4	1150
ESO AM-2	US	2004	LATI	Multiespectral		
			AMISR	Multiespectral		
			AMODIS	Multiespectral		

Fuente: Información proporcionada por el Remote Sensing Applications Center (RSAC) 1998.

En el primero de los cuadros anteriores, puede observarse el acelerado desarrollo de los sensores satelitales, el cual se muestra desde 1984 a la fecha, destacando el número de canales del sensor SeaWiFS (8 canales) y la resolución espacial del sensor KVR-1000 (2 metros), siendo ambos sensores los que cuentan con mayor resolución espectral y espacial, respectivamente. En el segundo cuadro se puede apreciar que, en un futuro cercano, se podrá disponer de imágenes con características notables, como es la utilización de hasta 542 canales (lo que se conoce como imágenes hiper-espectrales), y resoluciones menores a un metro, por lo que se vislumbra para las aplicaciones que utilizan la percepción remota satelital, un importante desarrollo.

1.1.2 Fotografías Aéreas

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

El tipo de película más empleado en fotografía aérea es el film pancromático (blanco y negro), en el cual se recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión. En la película en color, se mezclan distintas capas foto-químicas, cada una de las cuales es sensible a una banda del espectro visible, por lo que la discriminación de los objetos resulta más acertada. Menos conocidas son las fotografías aéreas en película infrarroja, que recogen en tonos de gris la radiación correspondiente al infrarrojo cercano, y en el infrarrojo color, también denominado *falso color*, en donde se desplaza la escala de color natural, situándose entre el verde y el infrarrojo cercano (Chuvieco, 1990; Falkner, 1995).

Las fotografías aéreas tienen un sinnúmero de aplicaciones, y esto es debido en parte, a que pueden tener una gran resolución, la cual está en función de la altura de vuelo; y además, su cualidad estereoscópica es una característica muy útil en estudios para la evaluación del territorio.

Por su gran detalle, las fotografías aéreas son usadas continuamente en estudios topográficos y planimétricos, pero también tienen gran uso en disciplinas variadas al usarlas en fotointerpretación y análisis espaciales. En ocasiones, un tipo en particular de película fotográfica es mejor para un uso en particular.

El costo de la fotografía aérea es mayor si se utiliza película fotográfica en color, especialmente si se requiere de un gran número de impresiones. Sin embargo, hay situaciones en las que el costo extra es justificado con creces por la información complementaria que añade el color.

Las fotografías aéreas son empleadas en muy diversas disciplinas, entre las cuales destacan las siguientes: estudio de procesos geomorfológicos (Jiongxin, 1997; Coe *et al.*, 1997), monitoreo de enfermedades y plagas en las plantas (Ambrosini, 1997), valoración de riesgos naturales (Walsh *et al.*, 1997), cartografía de desastres ecológicos (Glushko *et al.*, 1994), cartografía de usos del suelo rural y urbano (Ventura *et al.*, 1994), entre muchas otras; además, al haber flexibilidad en los periodos de adquisición de las fotografías aéreas, éstas se pueden utilizar para estudios en los que se necesiten

tomas en las que se pueda apreciar cambios, algunos ejemplos son los siguientes: movimiento de glaciares, deslizamiento de rocas, monitoreo de grandes construcciones, distribución y avance de plagas, monitoreo de desmontes y reforestación, cartografía de crecimientos urbanos, monitoreo de flujos, monitoreo de erosión, estimación de daños por desastre, entre muchas otras.

Los costos son uno de los factores determinantes para la realización de un proyecto de investigación; como anteriormente se mencionó, las fotografías aéreas en color son mucho más costosas que las fotografías en escala de grises, y al anterior costo se le suma un costo extra si la película utilizada es infrarroja, y más aún si es a color. El Cuadro 5 muestra los costos relativos de las películas y de algunos otros gastos que hay que cubrir en la obtención y procesamiento de las fotografías aéreas convencionales.

CUADRO 5
COSTOS RELATIVOS DE VARIOS TIPOS DE PELÍCULAS*

Costo	Pan	IR	Color	CIR
Película	1.0	2.0	3.0	3.5
Vuelo	1.0	1.0	1.0	1.0
Procesamiento	1.0	1.0	2.5	2.5
Contactos	1.0	1.0	1.5	2.0

* Se ha tomado como índice los costos para la película pancromática.
Fuente: *Aerial Mapping, Methods and applications.* (Falkner, 1995)

Una de las principales limitantes de la fotografía aérea convencional es su costo, el cual es elevado tanto para su obtención como para su procesamiento. Además, desde el proceso de adquisición hasta la obtención de los contactos pueden pasar desde algunas semanas hasta meses, lo cual podría ser un inconveniente si se requieren las fotografías inmediatamente, para efectos de contingencias o evaluación de riesgos; y si se acelera el proceso e impresión, los costos se elevan aún más.

Al estar las fotografías aéreas en formato analógico, no se pueden integrar directamente con los sistemas de información geográfica, y al tener que "barrerlas" para formar parte de un sistema de información geográfica se invierte más tiempo aún en el proceso; en adición a lo anterior, para poder disponer de fotografías actualizadas se depende de las compañías de aerofotografía, ya que el equipo para la adquisición de las fotos es muy costoso y no cualquier persona o grupo puede contar con su propio equipo de fotografía aérea.

En ocasiones, para ciertas aplicaciones, se requiere poder apreciar áreas mayores a las abarcadas por una fotografía sin perder detalle, para poder lograr esto se construyen mosaicos fotográficos o aerofotomosaicos. Un aerofotomosaico se define como el ensamblaje sistemático de varias aerofotos individuales para formar la imagen fotográfica de una región mayor (Luján, 1991). El mosaico aerofotográfico presenta la apariencia de una gran aerofoto, el cual tendrá un error geométrico equivalente al de las fotografías que lo forman, además, de los errores derivados de la construcción del mismo.

Existen varios tipos de fotomosaicos, los cuales se diferencian principalmente por sus características geométricas, las cuales están determinadas por su método de construcción. Existen tres tipos de fotomosaicos: no controlados, semicontrolados y controlados.

En los mosaicos no controlados y semicontrolados se utilizan únicamente las áreas centrales de las fotografías para reducir su distorsión, principalmente debida a la proyección central derivada del sistema óptico de las cámaras utilizadas para su obtención.

Mosaicos no controlados. La construcción de estos mosaicos es muy sencilla y rápida, y consiste fundamentalmente en unir las áreas centrales de fotografías adyacentes las cuales no tienen ningún tipo de corrección, la unión se lleva a cabo en base a rasgos comunes existentes en las fotos y no se utilizan puntos de control para ajustarlo. Para unir fotos adyacentes se recomienda hacer los cortes guiándose en curvas de nivel, los cortes deben ser proporcionales en ambas fotos (ver Figura 2). Todo este procedimiento se realiza en forma analógica, es decir, con los contactos, pegamento y una base de cierta dureza.

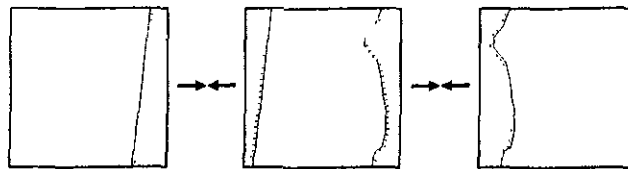


Figura 2. Trazo de las líneas de corte

Este tipo de mosaicos tiene múltiples usos y ventajas, es útil en etapas de planeación en diversas aplicaciones, se utiliza en reconocimientos y delimitación de unidades, por ejemplo, en infraestructura carretera, uso del suelo, asentamientos humanos, red hidrológica, inventarios de recursos, etc. Una de las principales ventajas de éstos mosaicos es su construcción rápida y barata; también se pueden hacer mediciones de distancias y áreas, solo hay que considerar el nivel de precisión que tiene este tipo de mosaicos (Luján, 1991)

Mosaicos semicontrolados. En la construcción de este tipo de mosaicos se utilizan métodos similares a los utilizados en la construcción de mosaicos no controlados, la principal diferencia es que en este caso, se utilizan puntos de control con coordenadas conocidas. Para su construcción se emplean fotografías aéreas sin rectificar, de tal manera que se ajusten lo mejor posible los detalles, utilizando puntos de control planimétrico para fijar la escala (ver Figura 3). Los mosaicos semicontrolados se podrían considerar como un compromiso entre economía y precisión (Wolf, 1983), ya que a un muy bajo costo se obtiene una precisión aceptable (dependiendo de la aplicación).

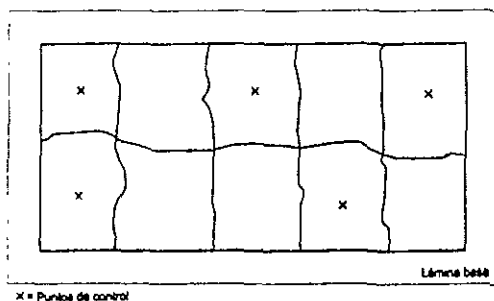


Figura 3. Ensamble y pegado de porciones de aerofotos en la construcción de un mosaico semicontrolado.

x = Puntos de control

La construcción de este tipo de mosaicos se lleva a cabo utilizando puntos de control ubicados en las fotografías a acoplar y ubicados también con su posición relativa en una cuadrícula dibujada en la lámina utilizada como base para la construcción del mosaico, de acuerdo a la escala; y procediendo con el ajuste de los puntos de las fotografías a los puntos de la base se construye el mosaico.

Las aplicaciones de estos mosaicos son muy similares a las que tienen los mosaicos no controlados, considerando como principal diferencia la precisión que pueden tener en las medidas realizadas sobre este, las cuales son de mayor confiabilidad o precisión, ya que para su construcción se utilizó una técnica con mayor control de ajuste.

Mosaicos controlados. El mosaico controlado es el más preciso de los tres tipos de mosaicos que se realizan con aerofotos, se distingue de los dos anteriores en el hecho de que las fotografías utilizadas para su construcción ya han sido georreferidas y rectificadas, es decir, son ortofotos, en las cuales la escala es homogénea para toda la fotografía. Este tipo de mosaicos, al igual que los mosaicos semicontrolados, también utilizan puntos de control, los cuales pueden haber sido obtenidos mediante trabajo de campo, triangulación radial o por aerotriangulación (Wolf, 1983).

La construcción de estos mosaicos es similar a la de los mosaicos semicontrolados: en una lámina base se traza la ubicación relativa de los puntos de control de acuerdo a la escala resultante de las fotografías aéreas a ensamblar, y se trata de ajustar lo más precisamente posible los puntos de control de las fotografías a los puntos de control ubicados en la base y a los detalles de las fotografías adyacentes. Una variante de su construcción es la mencionada por Robinson, en la que se describe como, después de la obtención de las ortofotos, y en base a la escala resultante de éstas, se hace una ampliación o reducción, según sea necesario, de un mapa correspondiente a la cobertura de las aerofotos, y sobre éste se ubican los puntos de control con una gran precisión y las fotos se ajustan en base a los puntos de control y a los detalles apreciables tanto en las aerofotos como en el mapa utilizado como base (Robinson, 1995).

Este tipo de mosaicos es el que acarrea un mayor número de procesamientos antes del acoplamiento de las fotografías aéreas, y por lo tanto, se requiere una inversión mayor de tiempo, trabajo y costos para su obtención.

Las aplicaciones que tienen estos mosaicos son muy similares a las de los dos tipos de mosaicos anteriormente mencionados, la principal diferencia que tienen es su precisión, la cual es mucho mayor al haber homogeneizado la escala de las fotografías antes de su construcción. Tiene múltiples aplicaciones en fotointerpretación y fotogrametría.

Uno de los cuidados especiales que se debe de tener en el momento de la impresión de las fotografías orientadas a la construcción de un mosaico, es que se requiere obtener los tonos de gris homogéneos en todas las fotografías aéreas a utilizar.

Otra de las consideraciones importantes es que las fotografías aéreas deben tener al menos el 60% de sobreposición sobre la línea de vuelo, para que se pueda utilizar únicamente el área central de éstas, esto en con el fin de minimizar la distorsión existente en cada fotografía; en el caso de zonas con

terreno llano la sobreposición puede ser menor, pero en las zonas con relieve accidentado es recomendable que la sobreposición sea mayor.

En el caso de las fotografías utilizadas en la construcción de los mosaicos controlados, en muchos casos no es necesario hacerles cortes para disminuir la distorsión, ya que al haber sido ortocorregidas, las distorsiones provocadas por los movimientos del avión y el desplazamiento del relieve son mínimas o inexistentes (Luján, 1991).

1.2 Percepción remota alternativa

Tratando de evitar los inconvenientes de las herramientas de percepción remota convencionales, algunos grupos comenzaron a utilizar cámaras de video (Meisner, 1985; King *et al.*, 1987; Lulla *et al.*, 1987; Everitt, 1988; Peralta-Fabi, 1992; Palacio *et al.*, 1994) y más recientemente, cámaras de fotografía digital (King, 1993; Mao *et al.*, 1995; Palacio, 1997; Omer, 1997), montadas en una plataforma aérea, dando origen a una creciente variedad de técnicas para la obtención y procesamiento de imágenes de percepción remota.

Los desarrollos logrados en México en estos campos son significativos. Por ejemplo, se han obtenido fotografías digitales con distintas resoluciones y para distintos usos, obtención de video de la línea costera de dos estados completos de la República Mexicana (Chiapas y Oaxaca), y fotografías digitales de las principales comunidades costeras de ambos Estados. Igualmente, se han realizado levantamientos en numerosas localidades, y destaca lo que aparentemente es el mayor levantamiento de que se tenga conocimiento con estas tecnologías (220 000 ha; Palacio, 1997). Parte del cual se utilizó para realizar la presente tesis. Hasta el momento, la superficie cubierta por los diversos levantamientos rebasa los 8,000 Km².

1.2.1 Videoteledetección

Si bien algunos de los primeros antecedentes del uso del video como herramienta de percepción remota datan de finales de los 60's y principios de los 70's, no es hasta comienzos de los 80's cuando se da un sustancial incremento en el interés de usar el video como herramienta de percepción remota. Los avances y el perfeccionamiento del video y la tecnología de procesamiento de imágenes por computadora durante este periodo ayudó considerablemente a estimular el interés en la videoteledetección (Everitt, 1988).

El video posee numerosos atributos que lo hacen atractivo como una herramienta de percepción remota, sin embargo, no es una panacea, y cuenta con las siguientes ventajas y desventajas:

- ✓ Una disponibilidad prácticamente inmediata (*tiempo real*) de las imágenes (resolución temporal). Esta es una de las principales diferencias y ventajas con respecto a las herramientas de percepción remota convencionales, al poder observar en el momento de la toma las imágenes adquiridas sin necesidad de un proceso posterior a su toma, como en el caso del revelado en la fotografía convencional (Everitt, 1988).

- ✓ El costo del equipo es mucho más bajo que el del equipo utilizado en otros sistemas de percepción remota, siendo accesible a un mayor número de personas e instituciones, ya que al poder utilizarse desde cámaras de video de uso doméstico hasta cámaras de uso profesional y especializadas, se puede obtener una información que satisfaga las necesidades particulares de cada usuario (Everitt, 1988; Gausman, 1987).
- ✓ Las cámaras de video tienen mayor sensibilidad espectral que las cámaras de película fotográfica, lo cual permite cubrir un rango más amplio del espectro electromagnético, y así, trabajar con un mayor número de bandas espectrales, que bien pueden competir con las adquiridas por sensores satelitales lo que las hace ideales para su aplicación en percepción remota multiespectral (Meisner, 1985; King, 1993).
- ✓ El equipo de video es portátil, versátil y fácil de usar (Everitt, 1988).
- ✓ Los sistemas de videograbación tienen un costo de operación mucho más bajo que los sistemas fotográficos (Everitt, 1988), debido a que cuando ya se cuenta con el equipo de video, el costo más importante a cubrir es el del vuelo, el cual puede variar de acuerdo a la plataforma utilizada (avioneta, helicóptero, ultraligero, aeromodelos e incluso se han llegado a utilizar globos para elevar el equipo y hacer las tomas (Palacio y López Blanco, 1994). Además, los insumos tienen un costo mucho menor (Cassettes, baterías, etc.).
- ✓ Se pueden ver las imágenes a través de un monitor en el momento de la captura, permitiendo si es necesario, ajustar los controles de la cámara para corregir o mejorar la toma, lo que garantiza el éxito del levantamiento videográfico, aspecto muy importante para asegurar los costos más bajos, al minimizar el tiempo de vuelo (Gausman, 1987). Esta es otra de las principales ventajas y diferencias de la videoteledetección con respecto a la fotografía aérea convencional.
- ✓ El audio es útil para comentarios en vuelo, como por ejemplo, las condiciones del lugar que no se alcanzan a captar en la toma, o información de poblados filmados.
- ✓ El almacenamiento de la información es muy eficiente, ya que con las capacidades de las cintas de video (30 - 120 min.)¹ se logra hacer levantamientos de grandes áreas en un o unos pocos cassettes y con un costo muy bajo.
- ✓ Es útil la redundancia de información como resultado de la alta tasa de captura de imágenes (30 imág./seg.) para minimizar un desperfecto del equipo (Everitt, 1988) o para poder seleccionar imágenes adecuadas en el caso de realizar el levantamiento en plataformas de alta vibración (ej. helicópteros). En adición a lo anterior, la gran redundancia de información ofrece la oportunidad de evaluar la variación de reflectancia como consecuencia de la variación de la incidencia de los rayos solares sobre el terreno (Vlcek, 1988).
- ✓ Alta resolución espacial (en comparación con los barredores satelitales) la cual puede ser controlada de acuerdo a las necesidades de detalle que se tengan, además, utilizando una cámara adicional se

¹ Los tiempos corresponden a los formatos en los que se graba con mejor calidad.

puede hacer una toma con acercamiento para tener una muestra representativa y con mayor resolución que la toma panorámica.

- ✓ Capacidad para separar las imágenes en sus bandas componentes (RGB, CMYK, etc.) con la utilización de programas de procesamiento de imágenes digitales.
- ✓ Gran compatibilidad con los programas utilizados para procesar imágenes de satélite, lo que permite aprovechar toda la infraestructura existente para procesar las imágenes de video.

Con las anteriores características descritas de la videoteledetección, la tecnología de las imágenes de video tiene el suficiente potencial para representar una alternativa a la fotografía aérea tradicional y los barredores satelitales en muchas aplicaciones, ya sea por sus bajos costos o sus mayores capacidades (King, 1993).

Entre las principales limitantes de la videoteledetección se reconocen las siguientes (Everitt, 1988):

- ✗ Baja resolución (en comparación con las cámaras de película fotográfica), debido principalmente, a las restricciones planteadas por los equipos de video y por los formatos de la televisión standard (NTSC y RS170).
- ✗ Distorsión desconocida de las imágenes, ya que la construcción de cámaras y diseño de lentes para las mismas no está estandarizada para estas aplicaciones.
- ✗ Dificultad para el ajuste espectral de la escena, en el caso de utilizar múltiples cámaras.
- ✗ Dificultad de obtener copias de calidad de las imágenes, debido a que para 1988 no había equipo que imprimiera con calidad suficiente las imágenes capturadas, y en ocasiones, lo mejor era tomar fotografías directamente de los monitores.

De las anteriores limitantes, cabe mencionar que del año 1988 a la fecha han habido acelerados cambios, tanto en la fabricación de cámaras de video como en el diseño de equipo de cómputo, dándose principalmente las siguientes modificaciones:

- ✓ Se han creado sistemas de video digital, los cuales tienen una mayor resolución, lo cual permite tener más detalle en las tomas y/o hacer vuelos a mayor altura, permitiendo una mayor cobertura con menos horas de vuelo, y se espera que en el futuro aumente aún más su resolución.
- ✓ Los costos de las cámaras han disminuido debido a la utilización de nuevos materiales y a la miniaturización de componentes electrónicos, siendo accesibles a un mayor número de personas (Faig *et al.*, 1988. Aún vigente).
- ✓ Gracias a los avances en el desarrollo e integración en equipo de cómputo, hoy en día un gran número de computadoras ya tienen la posibilidad de recibir imágenes de video y capturar cuadros de video utilizando pequeñas y económicas interfaces (ej. *Snappy*).

- ✓ El surgimiento e implementación de nuevas tecnologías en las impresoras comerciales ha permitido que se obtengan impresiones de muy alta calidad a bajo costo, llegando a tener resoluciones de más de 1200 puntos por pulgada en película de calidad fotográfica.
- ✓ El costo del vuelo se ha abatido para algunos casos, mediante la utilización de aeronaves más económicas (ej. ultraligero, globos aerostáticos, avión de control remoto, etc.). Además, se pueden realizar levantamientos videográficos desde plataformas aéreas, las cuales están en constante uso para diversos fines, como monitoreo de tránsito vial, reportes noticiosos, vigilancia de instituciones bancarias, etc. con lo cual se puede disminuir los costos, al realizar los levantamientos como actividad adicional simultánea a las anteriores actividades.

Los sistemas de video utilizados en la percepción remota están evolucionando tan rápidamente como lo hacen las nuevas tecnologías, lo cual en el futuro hará más atractiva aún estas herramientas, sin embargo, los actuales usuarios encontrarán a los actuales equipos de videoteledetección muy útiles para una gran variedad de aplicaciones (Everitt, 1988). Esta afirmación fué hecha hace 10 años y aún es totalmente vigente.

Evolución de los sistemas de videoteledetección

Los primeros antecedentes del uso del video para el estudio de la superficie terrestre datan de fines de los 60's y principios de los 70's (Robinove y Skibitzke, 1967; Mozer y Seige, 1971 citados por Palacio, 1995).

A inicios de los 80's, los sensores de las cámaras de video eran de tubo de rayo catódico, el cual podía tener un diámetro de entre 17 y 25 milímetros, y con los cuales se generaban imágenes muy pequeñas en el sensor de la cámara (6.6 x 8.8 mm para el tubo de 17 mm, y 10 x 13 mm para el tubo de 25 mm; Meisner, 1985), el tamaño del tubo catódico en video es, en una analogía, equivalente al tamaño de la película en fotografía, pero debido al proceso de barrido del video (un número constante de líneas barridas por cuadro o *frame*), el utilizar un tubo de rayo catódico de mayor tamaño no significa que proporcione un incremento proporcional en la resolución espacial (Meisner, 1985).

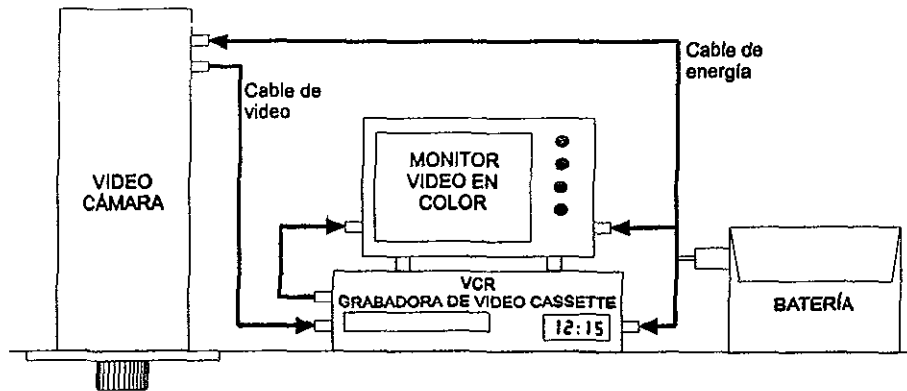


Figura 4. Equipo típico de videoteledetección (basado en Meisner, 1985)

También a principios de los 80's, con los avances en electrónica implementados a las cámaras de video, se empieza a utilizar un *chip* o circuito de silicio con un arreglo de fotosensores, al cual inicialmente se le dan varios nombres: CID (*Charge Injection Device*), MOS (*Metal On Silicon*) y CCD (*Charge Coupled Device*), este último es el que se conserva para dicho dispositivo. El CCD consiste en un arreglo de fotosensores y dispositivos de salida de la señal, ubicados en una placa de silicio. La densidad en el arreglo de los fotosensores va en constante incremento, llegando a ser de 400 x 500 en 1985 (200,000 fotosensores).

Es a mediados de los 80's cuando se da un importante incremento en el interés de algunos grupos por la videoteledetección, existían equipos de video cuyas características técnicas hacían que esta nueva herramienta estuviera un tanto limitada y que en ocasiones no fuera aplicable en estudios donde se requiriera de una mayor resolución. Las cámaras de video en color tenían una resolución de 240 líneas en su eje mayor y las de blanco y negro 300 líneas en su eje mayor, comparados con la resolución de 720 líneas que posee la película fotográfica de 35-mm (Everitt, 1988). Esta baja resolución tiene como principal razón el equipo de grabación (Vlcek, 1988; Everitt, 1988), el cual no tiene la capacidad de aprovechar toda la información que capta el sensor; idealmente, el tubo al vacío que utilizan las cámaras tiene una resolución de 500 líneas, pero la capacidad de las videograbadoras es de 240 líneas

en color, o 300 líneas en blanco y negro. Lo anterior es debido principalmente al standard RS170, el cual define el tamaño de la imagen de video o relación entre altura y ancho de la imagen, la cual normalmente es 3:4, es decir, que la altura de la imagen es $\frac{3}{4}$ del ancho de la imagen. El standard RS170 también define a un cuadro de video o *frame* con 525 líneas horizontales y está compuesto por dos campos, uno tiene las líneas nones y el otro las líneas pares, a este tipo de señal se le llama *señal entrelazada (interlaced signal)*. Veinte líneas de cada campo no son usadas, de tal manera que cada campo queda con 242.5 líneas, dando un total de 485 líneas por cuadro de video. Al hacer una captura de video en movimiento solo se puede utilizar un campo de manera confiable, lo cual disminuye la resolución a 242.5 líneas (Meisner, 1985; Everitt, 1988).

Por sus características (relación entre dimensión horizontal y vertical, y número de líneas), la señal de video puede ser considerada como un formato raster (Meisner, 1985), lo cual facilita su digitización para su posterior procesamiento por computadora e integración a un sistema de información geográfica.

Las cámaras de estado sólido (con CCD) ofrecen importantes ventajas sobre las cámaras de tubo catódico, entre las cuales se encuentran el bajo consumo de energía, permitiendo una autonomía en los vuelos al conservar más tiempo la carga de las baterías, son confiables, compactas, tienen alta resistencia al impacto y una baja distorsión geométrica en las imágenes en comparación con la fotografía, y esto es debido que el sensor de silicio es mucho más estable que la película fotográfica (Meisner, 1985).

Debido al inconveniente de que los sistemas de videograbación no tienen la capacidad de aprovechar en su totalidad la resolución del CCD, algunos investigadores han optado por *digitizar directamente* los cuadros de video directamente a la computadora, en vez de hacerlo del videocasete, aprovechando con esto la resolución del CCD, mejorando grandemente la resolución de los cuadros digitizados (Everitt, 1988).

Mausel (1985), expone los tipos de cámaras disponibles para videoteledetección en ese año, sobresaliendo una cámara con tres tubos de rayos catódicos y una disposición de filtros, prismas y espejos (ver Figura 5), similar a la que algunos satélites utilizan para poder captar la misma imagen en distintas bandas o segmentos del espectro electromagnético, solo que en este caso se utiliza para separar la imagen captada en los tres colores básicos (azul, verde y rojo).

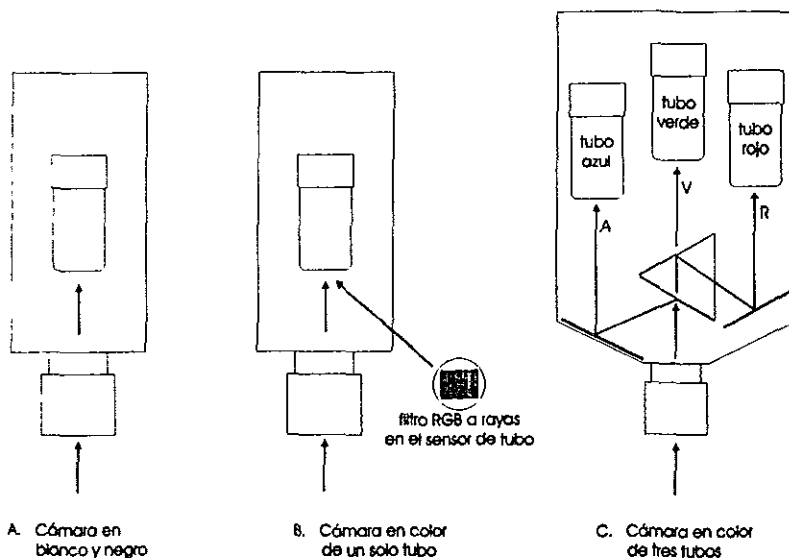


Figura 5. Tipos básicos de video-cámaras (basado en Meisner, 1985).

A la par de los avances de los dispositivos de video, se han desarrollado sistemas de videoteledetección capaces de captar información en varios rangos del espectro electromagnético, en 1985, Edwards J. reporta el uso de una cámara de video a la cual se le ha colocado un filtro para poder captar información en el segmento infrarrojo del espectro electromagnético, con la finalidad de poder evaluar el daño en árboles frutales como consecuencia de una serie de heladas. En este trabajo se remarca la importancia de poder disponer de un producto en tiempo casi real.

También a mediados de los 80's se diseñaron una serie de sistemas de videoteledetección capaces de captar información en varios segmentos del espectro electromagnético, en tres configuraciones básicas, las cuales se ilustran en la Figura 6. El primer modelo consistía en un arreglo de tres o más cámaras con sensores de tubo catódico, cada una con un filtro en la lente de cada cámara; una de las ventajas de esta configuración es su simplicidad, la cual permitía obtener bandas separadas en cada cámara. La principal desventaja de esta configuración es que había que ajustar con gran precisión las características de zoom, paralaje y ajuste de la escena en cada cámara, además, el espacio utilizado por el sistema era mayor al ser tres las cámaras.

La segunda configuración consistía en una cámara con un sensor de tubo catódico y una rueda giratoria la cual contenía filtros que iban desde el visible hasta el infrarrojo; con esta configuración se soluciona el problema de alineación de las cámaras del sistema anterior, además del ajuste de zoom. Sin embargo, aún hay un problema con el ajuste de la escena espectral, ya que al obtener una banda, esta no coincide con las otras debido a que hay un desplazamiento por el retraso de la toma, es decir, que al no ser simultánea la toma de las tres bandas, hay un desplazamiento de cada banda, lo que dificulta construir un compuesto multispectral.

En la tercer configuración, la cámara contiene tres sensores basados en tubo de rayo catódico, cuenta también con un arreglo de prismas, espejos y filtros, los que permiten que cada sensor capte solo cierta radiación; con este sistema se corrigen los anteriores inconvenientes, como era el desplazamiento de la escena, ya que las tres bandas espectrales se adquieren simultáneamente, además, este sistema es el único capaz de producir compuestos multispectrales en tiempo real en un monitor y además, en bandas separadas; el principal inconveniente de este sistema es su costo.

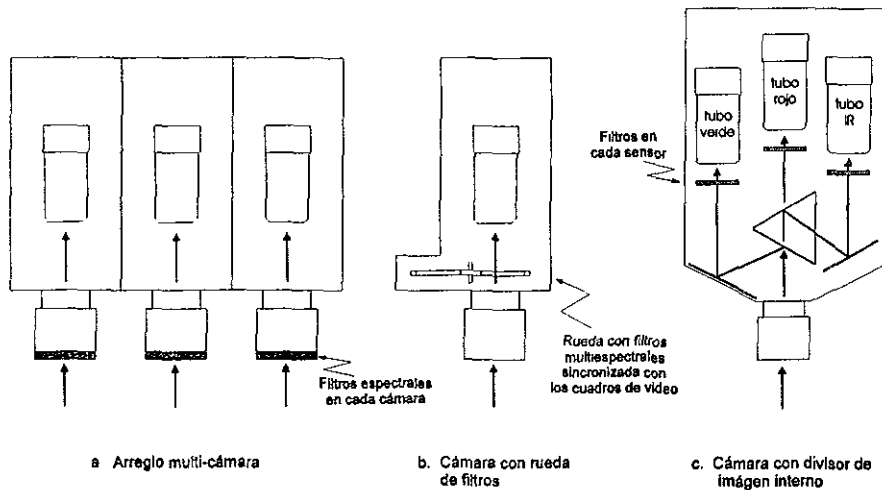


Figura 6. Cámaras de video multispectrales (Meisner, 1985)

Posteriormente, en 1987, en el 11^{er} Taller de Fotografía Aérea en Color y Videoteledetección, celebrado en Weslaco, Texas, se observan trabajos en los que se trata de evaluar las capacidades de las cámaras de video en los rangos del infrarrojo cercano y medio, obteniendo resultados satisfactorios, como los derivados de las pruebas realizadas por Gerbermann, en las que describe como la cámara de video tuvo mejor respuesta espectral que la película fotográfica en el rango del infrarrojo cercano (Gerbermann *et al.*, 1987).

Una gran parte de los trabajos presentados en Weslaco en 1987 tratan del potencial que tiene la videoteledetección multispectral en el ámbito de las ciencias forestales, tanto para la evaluación del estado de los bosques (índices de vegetación) como para detección de plagas y monitoreo de éstas (Myhre *et al.*, 1987; Lulla *et al.*, 1987; King *et al.*, 1987). Otra de las aplicaciones que se le da al video multispectral en el taller de Weslaco es en estudios de suelos (salinidad y humedad) y actividades agrícolas, como monitoreo de plagas (Everitt *et al.*, 1987).

En 1988 se realiza el primer Taller Bienal de Videoteledetección, en el cual se presentan un gran número de trabajos en los cuales se puede apreciar en interés por conocer las características y aplicaciones tanto del equipo utilizado en videoteledetección como de los productos correspondientes. Son de gran interés los artículos en los que se trata de evaluar las características geométricas de las imágenes obtenidas, (Faig *et al.*, 1988; Klimavicz *et al.*, 1988), con lo cual se trata de establecer las capacidades y restricciones de los equipos de videoteledetección para su aplicación en múltiples campos. Uno de los artículos más interesantes presentados en este taller, expuesto por Stephen y Meisner, explica como puede ser un inconveniente localizar la ubicación exacta de una escena de video, si no se tienen referencias precisas en el terreno; y como solución, presentan un sistema de videoteledetección que consiste en la integración de la señal proveniente de un receptor ARNAV R-40 LORAN-C (el cual es el antecesor del sistema GPS) en los cuadros del video que se va capturando, dicha señal contiene una serie de datos que van desde las coordenadas del lugar filmado, la velocidad de la aeronave, la distancia a los puntos de ruta o *waypoint*, entre muchos otros.

El sistema funciona de la siguiente manera: la señal captada por el receptor LORAN es enviada a una computadora portátil (*laptop*), de la cual con un programa de cómputo escrito en GwBasic, se extraen únicamente las coordenadas correspondientes al lugar que se esté filmando en ese momento y se convierten a caracteres *ASCII*, posteriormente, se genera una señal de video con estos caracteres y ésta se envía a una especie de mezcladora de video, en la cual se sobrepone la señal que contiene las coordenadas sobre la señal de video proveniente de la cámara, el resultado es una imagen de video normal, sin perder calidad, con coordenadas de latitud y longitud desplegadas en tiempo real en la parte inferior de la imagen de video (Dewhurst, 1988).

Otro de los artículos expuestos de gran interés en el primer taller de videoteledetección es el presentado por Greene, en el cual expone un sistema de video y una metodología para la actualización de bases digitales de datos cartográficos. Greene considera que existe un "hueco" en la disponibilidad de información adecuada para la actualización cartográfica, preferentemente de escalas grandes, considerando los bordes de ese hueco a las limitaciones de las herramientas convencionales de percepción remota (resolución, costo, disponibilidad temporal, etc.), y que tal hueco puede ser cubierto con sistemas de videoteledetección y programas de fotogrametría digital. Particularmente, Greene presenta un equipo que consiste en una cámara de video con un arreglo de tres CCDs de alta

resolución² y un videograbador que hace la grabación en cintas a alta velocidad, esto es con el fin de aprovechar al máximo la resolución proveniente de la cámara. La metodología expuesta por Greene es la siguiente: del video adquirido se hacen tomas con una tarjeta de captura de video, las imágenes resultantes tienen una resolución de 1024 x 1024 píxeles, posteriormente, las imágenes se corrigen geométricamente en programa de fotogrametría digital, utilizando como referencia el mapa a actualizar, a continuación, con la ayuda de una tableta digitizadora o un lápiz óptico se trazan en pantalla los cambios sobre las imágenes de video capturadas, posteriormente, con la ayuda de una imagen adicional, empleada como par estereoscópico, y con la utilización de un programa de estereo-correlación automática y el mapa base, se crea una ortoimagen, la cual contiene los polígonos de cambios, los que serán introducidos en la base de datos inicial, actualizándola (Greene, 1988).

En 1989 se realiza el 12 Taller Bienal de Fotografía Aérea en Color y Videoteledetección en Sparks, Nevada, en el cual, más del 50% de los trabajos recibidos versaban en algún aspecto de videoteledetección; una gran cantidad de estos trabajos se refieren a la aplicación de la videoteledetección en los campos agrícola y forestal. Los usos que se le han dado a la videoteledetección en el campo agrícola son múltiples, como los realizados por Stutte, en los que trata de evaluar la afectación de campos agrícolas por plagas mediante el uso de un equipo de videoteledetección con capacidad de percibir el espectro infrarrojo y así poder determinar la distribución y el grado de afectación de la plaga (Stutte *et al.*, 1989).

En este 12 Taller Bienal se empieza a integrar la videoteledetección con los Sistemas de Información Geográfica, como es expuesto por Reising *et al.* (1989), el cual expone que una vez que se ha almacenado el video en formato digital o raster, está en condiciones de ser utilizado en los SIG's debido a que cuenta con muchas de las propiedades con las que cuentan las imágenes SPOT o Landsat, y que por lo tanto, toda la infraestructura existente para procesar las imágenes satelitales antes mencionadas puede ser utilizada para el procesamiento de las imágenes de video digitizadas. Reising considera que los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en la herramienta estándar para el estudio y manejo de recursos naturales, y esto es debido a que estos sistemas han ido bajando de precio progresivamente y se han vuelto más "amigables", sin embargo, el "cargar" con información a estos sistemas sigue siendo costoso al depender de la información de las herramientas de percepción remota convencionales; es aquí donde la información proveída por la videoteledetección tiene un gran valor, al poder dotar de información de calidad a los SIG's (multiespectral, detallada, rápida, en formato digital) y a un costo muy bajo. Por ejemplo, una de las ventajas de la videoteledetección expuestas por Reising es que con la esta se puede obtener información multiespectral con más calidad, que con los satélites no es posible debido al velo atmosférico, el cual opaca algunas de las más importantes ondas (en el caso de necesitar bandas muy angostas en el infrarrojo); al tener el video la capacidad de percibir bandas muy angostas en el infrarrojo se pueden hacer clasificaciones de suelos por su contenido mineral y contenido de materia orgánica. Algunos de los procesos a los que pueden ser sometidas las imágenes de video son: georreferenciación con algoritmos diseñados para imágenes de satélite, procesos de mejoramiento de las imágenes (filtrados), técnicas de clasificación multiespectral, tanto supervisadas como no supervisadas, entre muchos otros.

Una de las ventajas más notables de la videoteledetección, además de su disponibilidad en casi tiempo real, es su bajo costo, sin embargo, el costo del vuelo puede ser una limitante para ciertos grupos como

² Las cámaras convencionales de video tienen CCD con una resolución de 500 líneas, los presentados por Greene tienen al rededor de 750 líneas de resolución.

agricultores o instituciones educativas, ya que a veces hay que volar grandes distancias desde la aeropista o aeropuerto más cercanos hasta el lugar donde se requieren hacer las tomas, incrementándose notablemente el costo del vuelo, o en otras ocasiones la disponibilidad de aviones no es la necesaria. Tratando de solucionar este inconveniente, Fouché presenta en el 12 Taller Bienal una serie de aviones a control remoto que utiliza para percepción remota (ver Figura 7), estos aviones están equipados con cámaras de video, un termómetro infrarrojo para poder medir temperaturas en el terreno, una cámara fotográfica reflex y un altímetro (ver Figura 8). Lo interesante de esta configuración es que mientras el avión obtiene fotografías, va filmando el terreno y a la vez filma los paneles del altímetro y del termómetro infrarrojo, y no almacena la señal de video en la cámara, sino que la envía a través de una antena a tierra, donde es grabada y desplegada en tiempo real en un monitor. Esta configuración tiene múltiples ventajas, como es el muy bajo costo del vuelo, una disponibilidad de la información inmediata y en el caso de un desperfecto en vuelo, el avión cuenta con un paracaídas que traerá a tierra tanto al avión como al instrumental en buenas condiciones, además, los aviones a escala utilizados (1/4 de escala) son fáciles de armar o conseguir (Fouché *et al.*, 1989).



Figura 7. Uno de los aviones de control remoto utilizados por Fouché (1989).

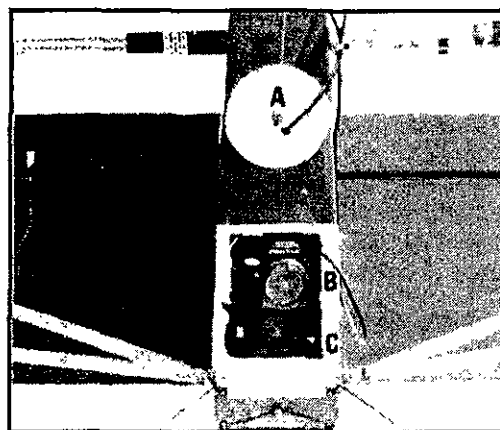


Figura 8. Instrumental a bordo del avión:

- A. Antena omni-direccional
- B. Cámara Reflex de 35 mm.
- C. Cámara de video

El 13^{er} Taller Bienal de Fotografía Aérea en Color es realizado en mayo de 1992, en Orlando, Florida; la participación de los trabajos de videoteledetección ocupa el 60% de los trabajos realizados para este taller; de los 14 trabajos presentados concernientes a videoteledetección, 9 están enfocados de alguna manera al manejo de los recursos naturales, el uso del video multispectral es muy importante en este campo, ya que permite conocer características de la vegetación que con radiación del segmento visible no es posible apreciar; en varios de los trabajos presentados relativos al manejo de los recursos naturales se trata de evaluar el desempeño de las cámaras de video y comparar con imágenes de satélite y fotografías aéreas (Kettler *et al.*, 1992), como es el caso del trabajo expuesto por Everitt *et al.* (1992), en el cual tratan de identificar el manglar negro con imágenes SPOT y video multispectral; para conseguir lo anterior se crean compuestos multispectrales de imágenes de satélite e imágenes de video de un área equivalente, se intenta que las bandas multispectrales de video sean lo más radiométricamente similares a las bandas SPOT. Posteriormente, con ayuda de un sistema de cómputo para clasificación multispectral se seleccionaron las áreas que correspondían al manglar negro de acuerdo a su respuesta espectral de ambas fuentes de información y en los resultados obtenidos se

observó que mientras una de las técnicas mostraba al manglar negro como el 5.8% del total de la imagen, la otra mostraba al manglar como el 7.2% del total de la imagen. Analizando los resultados se puede ver que ambas técnicas son útiles para la identificación de especies vegetales, como es el caso del manglar negro, y la utilización de una u otra técnica estará en función de otras variables, como son la cobertura necesaria, el detalle, los costos, etc. esta última variable también se consideró para el estudio, obteniendo las siguientes cifras³: el área a cubrir tiene 85 Km², un cuarto de imagen SPOT que abarca 900 Km² cuesta alrededor de US\$650; para cartografiar esta área con video multiespectral el costo es de alrededor de US\$145, con mejor resolución (video = 3.5 m, SPOT = 20 m; Everitt *et al.*, 1992).

En este 13^{er} Taller se presenta por vez primera la utilización de una cámara fotográfica digital para la obtención de imágenes aéreas, el funcionamiento de esta cámara esta basado en un chip de silicio (CCD) de 21 mm x 17 mm (horizontal y vertical, respectivamente) con una resolución de 1320 (H) x 1035 (V) fotosensores (1,366 200 fotosensores), el CCD de esta cámara es en blanco y negro y tiene una respuesta espectral en un rango de 400 a 1000 nm, pero tiene un filtro para bloquear el paso del infrarrojo cercano (700 a 1000 nm), esto es con el fin de utilizar solo el visible, debido a que si se capta al mismo tiempo el infrarrojo cercano, la imagen resultante perderá calidad (King *et al.*, 1992). En este trabajo presentado por King, lo que se trata de hacer es poder determinar elevaciones con imágenes digitales utilizando pares estereoscópicos y técnicas fotogramétricas. Una de las principales diferencias entre una cámara de video y la cámara fotográfica presentada por King es que las imágenes se obtienen en formato digital de manera directa y se almacenan en un disco duro; no depender del standard RS170, la resolución de las imágenes puede ser mucho mayor y se desplegarán en monitores para computadora.

Una vez teniendo un par estereoscópico, se seleccionaron puntos de control lo más homogéneamente distribuidos en la superficie de sobreposición con coordenadas X, Y y Z, correspondiendo a cruce de caminos y esquinas de construcciones principalmente. Las coordenadas fueron obtenidas de la proyección de puntos de control cercanos correspondientes a la zona metropolitana de Toronto. Posteriormente, con la ayuda de un programa escrito para análisis fotogramétrico se obtuvo un modelo con las alturas de toda el área de sobreposición con una precisión calculada de entre 2.5 y 3.5 metros (King *et al.*, 1992).

Otra de las diferencias con respecto a las cámaras de video es que las imágenes producidas por esta cámara de fotografía digital no son entrelazadas como las imágenes de video, por lo que se puede obtener imágenes con la misma resolución del CCD.

En el trabajo presentado por King (1992) se exponen importantes consideraciones para adquirir imágenes con un 60% de sobreposición, esto es con el fin de poder tener una superficie para hacer estereoscopia. Una de estas consideraciones es el tiempo que tarda la imagen en guardarse en el disco duro, ya que el tamaño de cada imagen es de 1.3 Mb, demorando el guardado de la misma alrededor de 3.5 segundos por cada imagen⁴, por lo que es necesario calcular la velocidad, altura y resolución requerida para determinada sobreposición (Cuadro 6).

³ Costos relativos a 1989 (Everitt, 1989).

⁴ Tiempo requerido con las velocidades de lectura/escritura de los discos duros disponibles en 1992.

CUADRO 6
PARÁMETROS DE VUELO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DIGITALES,
EJEMPLO PARA TRES DISTINTAS ALTURAS (KING *et al.*, 1992)

Altitud (m)	Cobertura (m) (H x V)	Tamaño del Pixel (m) (resolución)	Intervalo de adquisición (seg.)*
1524	910 x 720	0.69	4.9
3048	1820 x 1430	1.38	9.8
4572	2730 x 2150	2.08	14.7

* Intervalo calculado para una velocidad de 267 Km/h y una distancia focal $f=15$ mm.

Los resultados obtenidos por King demuestran que estas imágenes digitales tienen un gran potencial para la determinación de alturas en el terreno y para la construcción de modelos digitales de elevación (MDE o MDT). Además, al estar la información en todo momento en formato digital, se puede alimentar a un sistema de información geográfica con lo que se puede general cartografía actualizada a escala grande a un bajo costo, en comparación con las fotografías aéreas convencional, y de manera rápida.

En 1993, el 14^{to} Taller Bienal en Fotografía Aérea a Color y Videoteledetección versó en su totalidad a cerca del monitoreo de los recursos naturales, como se había visto la tendencia en los trabajos de talleres anteriores; en este taller, casi el 80% de los trabajos presentados trataron de alguna manera, de la aplicación de sistemas de videoteledetección al monitoreo de los recursos naturales, resaltando principalmente tres trabajos: el primero es presentado por Neale y trata acerca de crear rutinas para automatizar el procesamiento de las imágenes obtenidas con un sistema multispectral de videoteledetección, el primer proceso automatizado es la digitización de las imágenes provenientes de la cámara, esto se logra con la creación de un programa en lenguaje C, el cual ordena a la tarjeta de video que capture una imagen basándose en un código de tiempo, el cual indica el inicio y el final de cada línea de vuelo y las imágenes intermedias a tomar, con esto se adquieren imágenes con la frecuencia necesaria para que estas tengan el 50% de sobreposición necesario para posteriormente construir un mosaico; el siguiente proceso automatizado es la corrección del desplazamiento hacia adelante en las imágenes, provocado por el avance del avión, lo que hace que las imágenes estén borrosas y se observe a los objetos en el terreno con una forma alargada, esto se corrigió con un programa escrito en lenguaje C, este programa usa correlación estadística para comparar pares de pixeles que pueden ser adyacentes si existe un desplazamiento de estos en dirección a la línea de vuelo, el desplazamiento máximo es de 25 pixeles, si el programa encuentra alta correlación entre pixeles, los desplaza hacia adelante, con respecto a la dirección de vuelo, disminuyendo el efecto de desplazamiento en la imagen. El tercer proceso automatizado es la construcción del mosaico, este se logró con un programa escrito también en C el cual busca correlación entre grupos de pixeles en el área de sobreposición de imágenes adyacentes y pega ambas imágenes siempre y cuando el error medio cuadrático de la nueva imagen a crear sea menor a 0.5 pixeles. Esta serie de automatizaciones agiliza tanto el procesamiento de las imágenes de video que 48 de estas imágenes pueden ser procesadas en 30 horas, las cuales manualmente pueden ser procesadas en 90 horas aproximadamente (Neale *et al.*, 1993)

El segundo trabajo sobresaliente, como antecedente para esta tesis, de este 14 Taller es el expuesto por Eggen, en el cual se presenta al video como una herramienta para la verificación y/o corrección de clasificaciones multispectrales creadas con imágenes Landsat. El trabajo se lleva a cabo en México,

con la intervención de la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Departamento de Agricultura y Servicio Forestal de los Estados Unidos. El trabajo consistió en realizar levantamientos aéreos con videoteledetección en las zonas abarcadas por las imágenes Landsat, para apoyar la clasificación espectral que se realizó con ellas. Cada uno de los 5 levantamientos realizados abarcan el 2% de la superficie cubierta por cada una de las 5 imágenes Landsat (ver Figura 9).

Los levantamientos fueron realizados en la mayoría de las ocasiones teniendo el cielo una cobertura de nubes desde un 60 hasta un 100% , por lo que fué necesario hacer vuelos más bajos, lo que demuestra la flexibilidad de la videoteledetección. Otra de las ventajas es que al utilizar un GPS acoplado a la cámara de video, se puede saber en todo momento a que lugar corresponden las imágenes desplegadas en el monitor; además, con la videoteledetección es posible obtener imágenes con alta calidad en condiciones de baja luminosidad. Una de las principales justificaciones para el uso de la videoteledetección es que existen zonas del área de estudio que son inaccesibles para la brigada de tierra, además, los resultados se obtienen rápidamente (Eggen *et al.*, 1993).

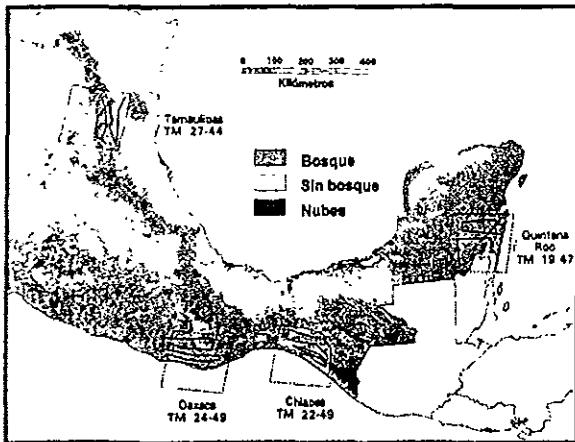


Figura 9. Localización de los transectos realizados con video en las unidades de muestreo abarcadas por las imágenes Landsat, como apoyo a la interpretación de áreas forestadas.

Fuente: Eggen, S. *et al.* (1993). "Acquisition of Airborne Videography of Mexico for Verification of FAO Forest Resources Assessment Landsat Interpretations".

El tercer trabajo que sobresale de este 14^{to} Taller es el presentado por King, en el cual hace una revisión de los sistemas de percepción remota alternativa basados en cámaras fotográficas digitales. King considera que las cámaras fotográficas de estado sólido son la siguiente generación de sensores remotos a bajo costo. Una de las principales desventajas de los equipos de videoteledetección es su baja resolución, dicha desventaja es superada por las cámaras de fotografía digital, las cuales, al no tener las restricciones de los estándares de las señales de televisión, pueden aprovecharse de manera más eficiente la resolución del sensor o CCD (King, 1993). En este trabajo, King presenta tres modelos de cámaras de fotografía digital, teniendo éstas las características indicadas en el Cuadro 7.

CUADRO 7
CARACTERÍSTICAS DE CÁMARAS DE FOTOGRAFÍA DIGITAL
(KING, 1993)

Cámara	Resolución (H x V)	Tamaño del Sensor (mm)	Almacenamiento
Kodak Megaplust 1.4	1317 x 1035	8.98 x 7.04	disco duro aparte
Kodak DCS	1280 x 1024	21 x 17	disco duro aparte
Kodak DCS200	1524 x 1012	13.7 x 9.1	disco duro en cámara

De los anteriores modelos de cámaras, la Kodak DCS200 es la única que almacena las imágenes en un disco duro ubicado en un compartimiento en la parte posterior de la cámara, las otras cámaras necesitan de un dispositivo por separado en el cual puedan ir guardando en disco duro las imágenes adquiridas, aumentando el peso y el volumen del equipo, aspecto muy importante si se tienen limitaciones de espacio o capacidad de carga en el momento de hacer el vuelo. En la actualidad, la cámara DCS200 ya no se construye, pero ha heredado algunas de sus características más importantes, como el uso de discos duros en el cuerpo de la cámara, a modelos más recientes (DCS420, 460, 520, entre otros).

En los últimos cinco años ha habido un avance significativo en el desarrollo de los sistemas de videoteledetección, desarrollo que se ha visto coronado con logros como la obtención de sistemas de video totalmente digitales (desde la adquisición del video hasta la grabación del mismo). Estos sistemas de video digital (*DV*) tienen marcadas ventajas sobre los sistemas de video analógico, esto es debido a múltiples factores, entre los que se encuentran los siguientes⁵:

Resolución del sensor (CCD). Los CCD se han desarrollado de manera acelerada, debido a múltiples factores como son la miniaturización de componentes electrónicos y la utilización de nuevos materiales, las resoluciones de estos dispositivos han aumentado notablemente: en 1985 se contaba con CCDs de 400 x 500 fotosensores (200 000 fotosensores, Meisner, 1985), en la actualidad las cámaras de video digital tienen CCDs con hasta 570 000 fotosensores (JVC, 1996), de los cuales se utilizan aproximadamente 330 000, contándose con un incremento en el número de los fotosensores del 65%. Lo cual redundo de manera notable en la resolución de las imágenes obtenidas.

Formato de grabación. La señal digital del CCD se guarda en cintas especiales en formato digital, por lo que prácticamente no pierde calidad, además, a diferencia de las cámaras de video analógico, se puede grabar tanto las imágenes como el código de tiempo y el audio en pistas separadas (ver Figura 10), con lo que se puede disponer de la fecha y el código de tiempo sin que sea necesario tenerlo desplegado en la pantalla en el momento de la grabación o reproducción del video, característica importante, ya que a menudo es necesario utilizar la información de toda la imagen. Además, la pista de audio puede ser utilizada para la grabación de información de gran importancia, como es la señal proveniente de un GPS, con lo cual podemos saber la ubicación de las tomas de video sin necesidad de perder información en las imágenes.

⁵ Las características descritas están en base a la cámara de video digital GR-DV1 fabricada por JVC, 1996.

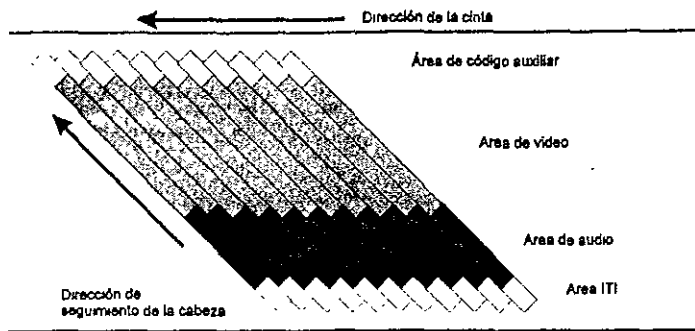


Figura 10. En las cámaras de video digital, la señal de video, el audio y el código de tiempo se almacenan en lugares separados (JVC, 1996).

Algoritmos de compresión muy eficientes. Las cámaras de video digital generan una gran cantidad de información, en gran parte, debido a la alta resolución de las imágenes que producen, por lo que es necesario comprimir esa información antes de guardarla en la cinta (ver Figura 11), en la actualidad hay cámaras de video que cuentan con algoritmos de compresión muy eficientes, teniendo relaciones de compresión de 25 megabytes por segundo.

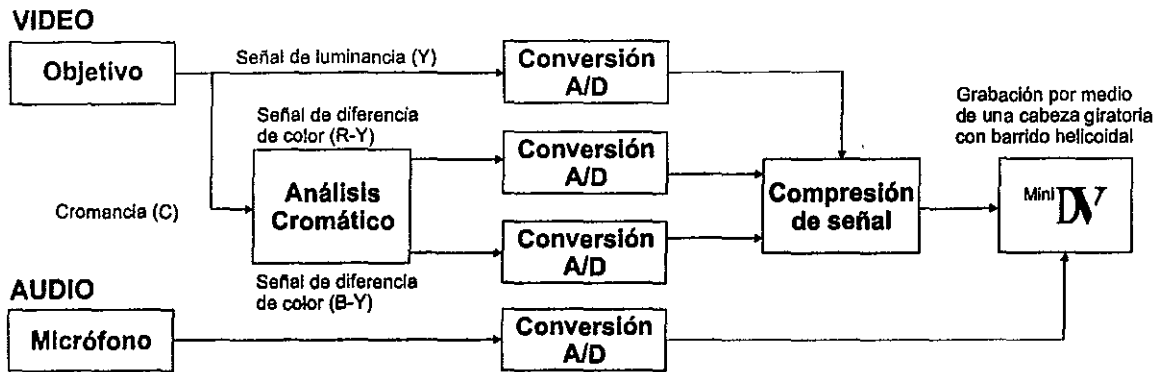


Figura 11. Proceso que siguen las señales luminosa y de audio hasta ser grabada en la cinta digital, los datos grabados en la cinta son digitales, pero la salida es analógica (JVC, 1996).

Miniaturización y alta integración electrónica. Al producirse componentes electrónicos de tamaño muy reducido, se tiene la posibilidad de integrar en equipos compactos una gran cantidad de funciones y programas internos que permiten el mejoramiento de la toma, entre otras ventajas, como es el uso de estabilizadores digitales de la imagen, los cuales ayudan a obtener imágenes adecuadas si la cámara es utilizada en una plataforma de alta vibración (helicóptero, aeromodelo, etc.).

Diseño más compacto y ligero. Como consecuencia de la miniaturización y alta integración electrónica, los equipos de video digital son aún más compactos que los equipos de video analógico, aspecto que presenta una ventaja si el equipo es utilizado en aeronaves con espacio interior limitado o en aeromodelos, en los cuales la capacidad de carga es reducida.

Con las anteriores características, las cámaras de video digital son una alternativa a las limitaciones planteadas por los equipos de video analógico, aumentando aún más las crecientes aplicaciones de la videoteledetección.

Videoteledetección en México

El desarrollo de sistemas de video destinados a ser utilizados como herramienta de percepción remota en México ha tenido lugar principalmente en el contexto académico, sobresaliendo el trabajo realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México (Palacio, 1997).

Los primeros antecedentes de la utilización del video como herramienta de percepción remota en México datan de 1988. Peralta-Fabi *et al.* (1988) presentaron el diseño de una serie de aviones piloteados a control remoto, los cuales estaban equipados con cámaras de video y que serían utilizados para obtener imágenes de video aéreas a bajo costo. Los aviones fueron diseñados en cooperación con el Instituto Politécnico Nacional (IPN), pero la falta de financiamiento detuvo el proyecto en sus fases finales. Importantes avances en el diseño de los aviones fueron conseguidos mediante la colaboración establecida entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y universidades rusas y ucranianas. El principal logro de esta acción conjunta es el diseño, construcción y operación de un pequeño avión piloteado a control remoto, el cual transportaba un número de cámaras de video multispectral, magnetómetros y otros dispositivos de percepción remota. Este grupo realizó los primeros levantamientos videográficos multispectrales y georreferenciados en México, estando al nivel de los mejores en el mundo, por su calidad e innovación.

Aunque el diseño del anterior sistema trataba principalmente de desarrollar sistemas de teledetección basados en cámaras de video y demostrar la utilidad de estos como herramienta de percepción remota, se logró mostrar también su aplicabilidad en diversos campos como son: agricultura, detección de plagas y enfermedades en las plantas, desarrollo urbano, entre otros (Peralta-Fabi *et al.*, 1988).

Con el desarrollo del anterior sistema de videoteledetección se realizaron pruebas con video multispectral con la finalidad de poder realizar clasificaciones multispectrales, además, se consiguió almacenar la señal proveniente de un GPS en la pista de audio de las videocintas, esto con el fin de poder georreferenciar las imágenes captadas por la cámara.

En 1991, Palacio (1994) y López Blanco (1992; 1994), del Instituto de Geografía de la UNAM, utilizaron una cámara de video (formato 8 mm), y la suspendieron de un globo aerostático, el cual controlaron por medio de cables, a una altura de alrededor de 250 m. sobre el terreno, obteniendo imágenes de video con resolución de 4 a 15 cm, esto se hizo con el fin de poder contar con imágenes multitemporales recientes de la erosión en cárcavas en el municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo; estas imágenes permitieron estudiar el fenómeno con gran detalle a un costo muy bajo y de manera rápida.

En la 3^{er} Reunión Nacional SELPER-México, Peralta *et al.* (1992), presentaron un equipo de video capaz de captar información en el rango infrarrojo térmico, el cual utilizaron para identificar "islas" de calor en la ciudad, provocadas por actividad industrial, entre otros factores. La utilización de este equipo tenía la finalidad de modelar flujos convectivos y transporte predictivo de contaminantes en zonas urbanas y periféricas.

En 1993, el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó algunos estudios experimentales de manera conjunta con el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, los principales logros de estos trabajos

incluyen la evaluación del grado de contaminación en áreas costeras, evaluación de cultivos y estudios urbanos mediante el uso de equipo de videoteledetección.

Posteriormente, López Blanco (1993), presenta en la Reunión Conjunta SELPER-AMESIGE un trabajo en el que expone un método para definir la magnitud de la distorsión de las imágenes de video obtenidas con una cámara convencional con el fin de cuantificar rasgos en el terreno. Los resultados de este trabajo son importantes debido a que al conocerse las distorsiones existentes en las imágenes de video generadas se puede apreciar de manera más precisa las capacidades y limitaciones que tiene el video para ser utilizado en ciertos aplicaciones.

Peralta-Fabi *et al.* (1995), del Instituto de Ingeniería, propone el uso de cámaras de video que registren la radiación infrarroja termal para el monitoreo de actividad volcánica. A partir de 1995 se empezó a realizar una gran cantidad de vuelos sobre el volcán Popocatépetl, en estos vuelos se han utilizado cámaras de video infrarrojo termal para monitorear posibles calentamientos del edificio volcánico. Este monitoreo es realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en conjunción con el Instituto de Geofísica, también de la UNAM, y el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED).

Después, Palacio *et al.* (1996), presentaron un trabajo en el cual se utilizó equipo de video para reconocer los efectos del huracán Roxanne en la geomorfología costera del estado de Campeche, México. En dicho trabajo se utilizaron 2 cámaras de video, las cuales desde un helicóptero, captaron los daños provocados a la infraestructura carretera y poblados, con lo que se generó un inventario de daños. Los daños fueron ubicados y cartografiados y con la interpretación geomorfológica se delimitaron áreas sujetas a riesgos en futuros eventos naturales.

En 1996, en la 7ª Reunión Nacional SELPER-México, se presentaron tres trabajos en los cuales se exponían algunas de las aplicaciones de la videoteledetección, en el primero, presentado por Cortés (1996), se exponen los avances en la generación automática de mosaicos de imágenes videográficas, los cuales se hacen utilizando técnicas tradicionales de fotogrametría aplicadas a fotografías aéreas convencionales, aunque el desarrollo es válido para imágenes aéreas de video.

En el segundo trabajo expuesto, López Blanco (1996) presenta cinco ejemplos de aplicación de la videoteledetección: el primero se refiere a la evaluación del avance de la erosión acelerada de suelos (1991-1992). El segundo corresponde al estudio de la inestabilidad del material acumulado en un área de explotación de mineral de hierro, en Colima (noviembre de 1993). El tercero se refiere al registro de imágenes de embalses de bordos, con una cámara sostenida en un globo, en Acambay, México, para relacionar las propiedades de las imágenes con respecto a las variables medidas directamente (febrero-marzo de 1995). El cuarto estudio corresponde con una evaluación del uso actual del suelo, a partir de un mosaico digital corregido en Tecoyo, Montaña de Guerrero (octubre 1995). El quinto ejemplo muestra el uso de imágenes digitales de video y fotografía aérea en color, para la caracterización geomorfológica de cuencas hidrográficas experimentales, en Chamela, Jalisco (octubre de 1995 y junio de 1996).

El tercer trabajo presentado en esta 7ª Reunión es el expuesto por Sorani *et al.* (1996), se expone la utilidad de las imágenes de video como apoyo para la verificación y/o corrección de clasificaciones multiespectrales no supervisadas, exponiendo como resultado que esta metodología original incrementa

la precisión de la clasificación con respecto a otros métodos, reduciendo costos y tiempos de interpretación.

Posteriormente, Palacio (1997) presenta el uso de imágenes de video como herramienta para la actualización de cartografía urbana, en cuyo proyecto tuve la oportunidad de participar. En este trabajo se describe el uso de imágenes de video con fines de cartografía en áreas urbanas. Se seleccionaron imágenes de video de la ciudad de Manzanillo, en el Estado de Colima, mismas que se digitizaron y se corrigieron geoméricamente en el contexto de un sistema de información geográfica (SIG, *ILWIS*), a partir de su ajuste a un mapa topográfico de escala grande (1:10,000). Los resultados muestran la utilidad de las imágenes de video corregidas para la actualización de cartografía en áreas urbanas. Se hace énfasis en su aplicación urbana debido a la cantidad de rasgos y detalles que permiten su control con fines de corrección, condiciones no siempre presentes en otras áreas.

Otra institución, aparte de las ya mencionadas, es el Instituto de Ecología de la UNAM, en el cual también se han utilizado equipos de video como herramienta alterna de percepción remota. El sistema consiste en 2 videocámaras en color con distinta distancia focal cada una, esto es con el fin de obtener una imagen panorámica del lugar sobrevolado y otra imagen con acercamiento, la cual tiene más detalle, para ser usada como muestra de la toma panorámica. También se utiliza un receptor GPS para poder georreferenciar las imágenes adquiridas y para posteriormente sincronizar la imagen panorámica con la imagen con acercamiento mediante el código de tiempo generado por el GPS. En esta institución se utiliza el video principalmente para estudios de impacto ambiental, planeación de uso del suelo, así como para verificar clasificaciones multispectrales de imágenes de satélite. Las imágenes de video proveen de información con un alto grado de precisión y son consideradas como un importante complemento del trabajo de campo y en algunos casos, un sustituto del mismo, disminuyendo tiempos y costos (Palacio, 1997).

Desde mediados de 1996, el Instituto de Geografía de la UNAM ha contado con equipo de videoteledetección, el cual está compuesto principalmente por 2 cámaras de video digital (*DV*), un receptor GPS de doce canales, interfaces de captura de video y equipo especialmente diseñado, además de una cámara de fotografía digital de alta resolución (ver Figura 12).

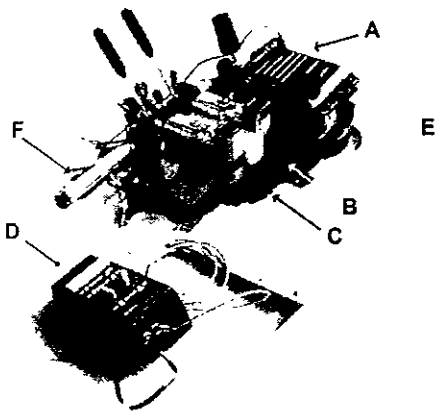


Figura 12. Una de las configuraciones del sistema de percepción remota del Instituto de Geografía de la UNAM. Esta configuración es usada principalmente en avionetas que cuentan con un orificio en la parte inferior de las mismas. Algunas partes del sistema son:

- | | |
|----------------------------------|----------------------|
| A. Cámara de Fotografía Digital. | D. Intervalómetro |
| B. Cámara DV (toma panorámica) | E. Base de fijación |
| C. Cámara DV (toma con zoom) | F. Brazos de trípode |

Las cámaras de video digital, como ya se mencionó, tienen múltiples ventajas sobre los equipos de video analógico, una de estas ventajas es el escaso volumen y peso que tienen, por lo que son ideales

para ser utilizadas en aeromodelos; además de contar con programas internos que mejoran la adquisición del video, como es el caso del uso de estabilizadores digitales de imagen. El pasado mes de agosto del año en curso, se llevó a cabo una prueba para adquirir imágenes de video digital desde un aeromodelo construido por el IPN, siendo la prueba un éxito, la importancia de esta prueba consiste en que al poder utilizar aeromodelos para la adquisición de video, se disminuyen notablemente los costos, ya que el costo del vuelo es el mayor gasto en la adquisición de estas imágenes (ver Figura 13).

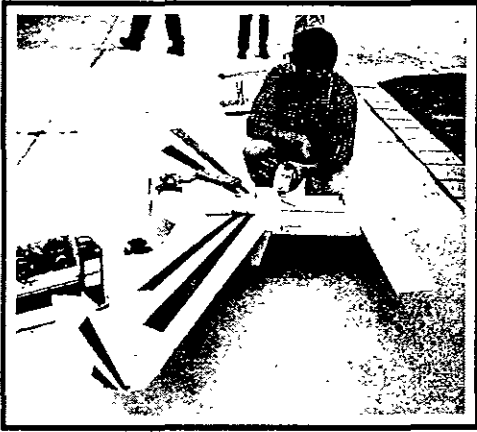


Figura 13. Uno de los aeromodelos diseñados por el IPN en el cual se montó una cámara de video digital del Instituto de Geografía de la UNAM.

Otras instituciones de investigación, en menor escala, han utilizado el video para casos específicos de estudio. En muchos de los casos, el video obtenido desde aeroplanos, incluyendo imágenes oblicuas, ha sido utilizado como un material de referencia para estudios de vegetación y deterioro de los hábitats. Los costos involucrados, en comparación con la fotografía aérea convencional, representan la principal razón por la que se use el video.

Fuera del ámbito académico, algunas compañías privadas han comenzado a utilizar el video como herramienta de percepción remota. Los equipos utilizados incluyen videocámaras en color e infrarrojas e interfaces GPS; las plataformas utilizadas son helicópteros y aeroplanos, y entre las principales aplicaciones están la detección de plagas y enfermedades en las plantas, estudios de impacto ambiental, inventarios forestales y estudios urbanos (Palacio, 1997).

1.2.2 Fotografía Aérea Digital

A partir de 1988, con los avances en la miniaturización, la utilización de nuevos materiales y avances en electrónica, fué posible crear cámaras de fotografía digital, las cuales cuentan con uno o varios sensores de estado sólido o CCD, el cual consiste en un arreglo de fotosensores y dispositivos de salida de la señal, ubicados en una placa de silicio (ver Figura 14). Inicialmente, las cámaras de fotografía digital (CFD) contaban con sensores superiores a los 1024 x 1024 fotosensores, con lo cual proveían dos o tres veces más resolución que las cámaras de video standard, y esto es debido principalmente a que estas cámaras no dependen del standard RS170, y por lo tanto, la resolución de las imágenes puede ser mucho mayor y se pueden desplegar en monitores de computadora (King, 1993).

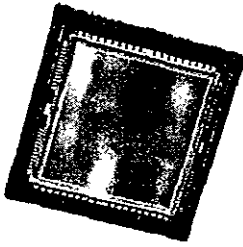


Figura 14. *Charge Coupled Device*

Las CFD, a diferencia de las cámaras de video, producen cuadros completos, es decir, que la totalidad de filas y columnas que componen a la imagen son captadas al mismo tiempo (la palabra cuadro o *frame* es utilizada para diferenciar a las imágenes producidas por las cámaras de fotografía digital, de las imágenes producidas por las cámaras de video, las cuales son producidas por barrido; King, 1993). Las cámaras de fotografía digital representan una alternativa a las limitaciones que tienen las cámaras de video, algunas de sus características son las siguientes:

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

Las CFD regularmente tienen sensores con densidades superiores a los 1024 x 1024 fotosensores (ej. DCS420 de Kodak con 1524 x 1012 fotosensores); algunas cámaras sobrepasan los 2048 x 2048 fotosensores (ej. Photometrics KAF-4200, Dalsa CA-D9, Kodak Megaplug 4.2, Kodak DCS 460), y ya están en el mercado cámaras con 4096 x 4096 fotosensores.

En las cámaras de fotografía digital, la información producida por cada fotosensor es destinada para crear un solo pixel de la imagen a formar, debido a que *no* se remuestrea la información para producir una imagen, teniendo la información la mayor calidad posible.

La producción de imágenes y la tasa de transferencia son a menudo flexibles y controladas por computadora; algunos sensores de 1024 x 1024 fotosensores son diseñados para producir señales analógicas o digitales compatibles con la televisión de alta resolución (HDTV) a razón de 25 a 30 cuadros por segundo (King, 1993).

Respuesta Radiométrica. Es la capacidad del sensor de detectar cierto rango de radiación electromagnética y generar con esta una señal eléctrica.

Usualmente, los pixeles o fotosensores de los CCD captan 8-bit de información por canal, pero ya están disponibles cámaras que captan 10, 12 y 16-bit de información por canal RGB.

La sensibilidad espectral de estas cámaras es la típica de los sensores basados en chip de silicio, la cual va de 400 nm a 1100 nm, con su sensibilidad máxima en el infrarrojo cercano entre los 700 nm y los 800 nm.

Otras cámaras de fotografía digital han sido desarrolladas utilizando sensores de distintos materiales con el fin de poder captar información en el infrarrojo medio e infrarrojo térmico. Sensores con aleaciones como: PtSi, PbSe, PbS y InSb, son comunes para la captación de radiación en el rango de 1-5 μm , mientras que la aleación HgCdTe es comúnmente utilizada para la captación de radiación infrarroja termal. Estos sensores regularmente tienen una baja resolución (formatos de 128 x 128 a 640 x 640), y tienen un costo mucho mayor (por lo general superior a US\$ 40,000).

Resolución. La resolución de las cámaras de fotografía digital con aproximadamente 1024 x 1024 fotosensores es cerca de tres veces mayor que la del video analógico, lo cual representa una de las ventajas de este tipo de cámaras sobre el video.

Los sensores de las cámaras de fotografía digitales son capaces de percibir radiación electromagnética que va de 400 nm a 1100 nm, sin embargo, los sensores de estas cámaras tienen un filtro que bloquea la radiación infrarroja, dejando pasar solo el visible (400 nm - 700 nm); si no se utilizara este filtro, la resolución de las imágenes adquiridas se degradaría (King, 1993). Si se necesitara captar la información del infrarrojo cercano, lo conveniente sería utilizar una cámara aparte para este fin.

Sensores con más de 4000 x 4000 píxeles tienen una resolución cercana a la que tiene la fotografía de 9" x 9". Estos sensores han sido utilizados para *scanear* fotografías aéreas para ser utilizadas en formato digital en estaciones de trabajo (King, 1993).

Con estas cámaras es posible alcanzar resoluciones en el terreno que van de 10 cm a 10 m, dependiendo del formato del sensor, la distancia focal y la altitud (ej. de 300 a 11000 m); la altitud determina la cobertura de las imágenes, la cual va de cientos de m² hasta más de 10 Km².

Las cámaras de fotografía digital, al estar basado su funcionamiento en un sensor de estado sólido, tienen ventajas y desventajas similares a las que tienen las cámaras de video de estado sólido sobre la fotografía aérea convencional (King, 1993), entre éstas se reconocen: mayor sensibilidad radiométrica, la cual produce un mayor contraste en las imágenes obtenidas; amplia respuesta espectral; gran estabilidad geométrica por parte del sensor (no hay película que se ondula, caso de las cámaras de fotografía convencionales); capacidad de observar las imágenes en el vuelo (tiempo real); obtención de las imágenes en formato digital de manera directa, el cual es más adecuado para ser procesado en computadora, tanto para mejoramiento radiométrico como para el análisis cualitativo y cuantitativo de la información contenida en la imagen.

Las ventajas que tienen las cámaras de fotografía digital sobre las cámaras de video de estado sólido incluyen: mucho mayor resolución (hasta 300% más), tasa de captura de imágenes flexible, gran precisión radiométrica y obtención en formato digital de manera directa.

Las cámaras de fotografía digital cuentan con las siguientes ventajas sobre los sofisticados barredores lineales de los satélites: una exposición bidimensional estable, resultando en una corrección geométrica simple y análisis fotogramétricos usando técnicas e infraestructura actualmente utilizadas por las fotografías aéreas convencionales; disponibilidad de las imágenes en casi tiempo real (King, 1993).

Además, agregándole a las anteriores ventajas los bajos costos de adquisición y de operación de los equipos, la capacidad en algunos modelos de cámaras (Kodak DCS) de grabar hasta 3 minutos de audio digital en cada imagen adquirida y capacidad de generar imágenes con hasta 48 bits de información por píxel.

Una de las limitaciones que tenían al inicio las cámaras de fotografía digital, era que mientras el sensor de la cámara tuviera mayor resolución, las imágenes resultantes tendrían un tamaño proporcional; así, si una cámara tiene un sensor de 1024 x 1024 píxeles con una sensibilidad radiométrica de 8 bits,

producirá archivos de aproximadamente 1 Mbyte, y si tiene un sensor de 4000 x 4000 píxeles con una sensibilidad radiométrica de 16 bits, producirá archivos de aproximadamente 32 Mbytes cada uno (King, 1993). Sin embargo, los avances en la capacidad de almacenamiento de los nuevos discos duros y la velocidad de procesamiento de las computadoras actuales, hacen que esta desventaja no lo sea más.

Las aplicaciones de las CFD pueden ser tan vastas como las existentes para la fotografía aérea convencional, los barredores satelitales y las cámaras de video. Una de las aplicaciones que se le ha dado a esta tecnología es en la producción semiautomática de Modelos Digitales de Elevación (King, 1995), en donde, con la utilización de técnicas tradicionales de fotogrametría y la integración de sistemas de posicionamiento global (GPS), se ha logrado la obtención de MDE de manera rápida y con gran precisión.

Otro de los usos que se le han dado a las cámaras de fotografía digital es en la discriminación de zonas urbanas y suburbanas (Chen, 1995), para la evaluación de daños forestales por incendios (Greenfield *et al.*, 1997; Omer, 1997), estudios de suelos (Mausel *et al.*, 1997; Mausel *et al.*, 1997); erosión, uso del suelo y vegetación y actualización cartográfica de zonas urbanas (Palacio, 1997), entre muchas otras aplicaciones. Y esto es debido a que las cámaras de fotografía digital tienen el potencial para representar una alternativa a la fotografía aérea convencional, los barredores lineales y los equipos de videoteledetección en muchas aplicaciones, ya sea por sus bajos costos o por sus mayores aptitudes. En palabras de King (1993), las cámaras de fotografía digital son consideradas “la siguiente generación de sensores remotos a bajo costo”.

Fotografía Digital en México

Al igual que la utilización de los equipos de videoteledetección, la utilización y desarrollo de sistemas de percepción remota basados en cámaras de fotografía digital en México, se ha desarrollado principalmente en el contexto académico, y básicamente, en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (Palacio, 1997).

En el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México se ha desarrollado un sistema de percepción remota basado en dos cámaras de video digital (DV), una cámara de fotografía digital (Kodak DCS-420 Color), un receptor de GPS y equipo adicional especialmente diseñado (intervalómetros, bases de montaje, entre otros; Peralta *et al.*, 1997).

Con este equipo se han realizado levantamientos aerofotográficos y aerovideográficos, uno de estos es el realizado para la Comisión Nacional del Agua, en el cual se levantaron alrededor de 220 000 hectáreas, el cual fué mencionado anteriormente; esto con el fin de poder continuar con las acciones de manejo de distritos de riego y conservación de recursos como suelo, agua y vegetación. En este proyecto, la percepción remota basada en imágenes de video y fotografía digital fue considerada como la principal fuente de información visual detallada (Palacio, 1997).

En este levantamiento, fueron obtenidas 540 fotografías digitales (1524 x 1012 píxeles), las cuales fueron tomadas en un rango de alturas sobre el terreno que va de 2,200 a 4,000 metros. Cada una de las fotografías cubre un área de aproximadamente 4.5 x 3 Km² y tienen una sobreposición del 60%, la cual fue considerada para estereoscopia y fotointerpretación.

Un programa comercial para procesamiento y manipulación de imágenes digitales (*Adobe Photoshop ver. 3.0.5*) fue utilizado para mejorar y preparar las imágenes para impresión, la cual se llevó a cabo con una impresora Epson *Stylus XL*, teniendo ésta una resolución de 720 dpi, y las impresiones se realizaron en papel tamaño carta (21.5 x 27.9 cm).

Otra de las aplicaciones que se le dieron a las imágenes obtenidas en el anterior levantamiento es para actualizar la cartografía de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco, mediante el desarrollo de un método para la construcción sistemática y rápida de un mosaico semicontrolado, y cuyo desarrollo es el objetivo principal de esta tesis.

Otro de los proyectos realizados con este equipo se llevó a cabo en áreas rurales circunvecinas de la Ciudad de México con el fin de evaluar el uso del suelo y vegetación. Cerca de 160,000 ha fueron levantadas en esta ocasión, y un mosaico está siendo preparado basándose en un programa de cómputo diseñado especialmente para este propósito (Palacio, 1997).

El uso de las CFD es menos accesible para compañías privadas, esto es debido principalmente a los costos de las cámaras, aún así, se sabe de una compañía privada que actualmente ofrece servicios de fotografía digital con cámaras similares a las utilizada en la UNAM. Se conoce que el estado de Guanajuato está interesado en levantar con estos sistemas la totalidad de su territorio.

Posteriormente, se han realizado otros levantamientos tanto videográficos como con fotografía digital de algunas zonas del país, como es el caso de la zona costera de los estados de Chiapas y Oaxaca, en donde se realizaron una serie de vuelos para obtener imágenes de video digital de toda la línea de costa, y además, fotografiar los asentamientos presentes a lo largo de ésta.

Otros de los levantamientos fué realizado en la reserva de los Tuxtlas, la cual está a cargo de la UNAM, este levantamiento se realizó con la finalidad de poder observar el estado en que se encontraba la reserva, descubriendo que ésta tiene múltiples invasiones en su perímetro.

Con las anteriores aplicaciones de la fotografía aérea digital se observa que esta herramienta tiene gran potencial para desarrollarse en México, al crecer la demanda de información actualizada para trabajos tan importantes como la delimitación de zonas de riesgo; claro ejemplo de lo anterior es la utilización de imágenes de video y fotografía aérea digital que fueron obtenidas por el Instituto de Geografía y que están siendo usadas por de autoridades de la delegación Cuajimalpa con el fin de minimizar los riesgos de deslaves en las barrancas de esa delegación.



CAPÍTULO II MATERIALES Y METODOS

Tanto para la obtención como para el procesamiento de las fotografías digitales, y construcción de los mosaicos, se utilizaron técnicas y métodos novedosos, que no han sido utilizados en México como herramienta alternativa de percepción remota. Los materiales utilizados y métodos empleados se describen a continuación.

2.1 Materiales

Las fotografías digitales utilizadas para la construcción de los mosaicos se obtuvieron el 17 de febrero de 1997 a una altura aproximada de 4,000 metros sobre el terreno, las líneas de vuelo tuvieron una orientación Norte-Sur, para la adquisición de estas fotografías digitales se utilizó una cámara Kodak DCS420, la cual cuenta con las siguientes características:



Figura 15. Cámara Kodak DCS420.

La cámara DCS420 (ver Figura 15) consiste en la modificación de la cámara Nikon modelo N90s; con dicha modificación, la cual es realizada por Kodak, esta cámara en vez de utilizar película fotográfica de 35mm, tiene un chip de silicio o CCD ubicado en lo que sería el plano de la película, y tiene una interfaz especial que sustituye a la tapa convencional de la cámara, en la cual se puede insertar un pequeño disco duro de computadora el cual sirve para almacenar las imágenes adquiridas por la cámara, teniendo los discos utilizados una capacidad de almacenamiento de 340 Mb o 203 imágenes digitales. Esta es una de las características notables de esta cámara, ya que los modelos anteriores diseñados por Kodak necesitaban de equipo adicional para poder almacenar las imágenes (Kodak Megaplug y Kodak DCS200), y al poder integrar el dispositivo de almacenamiento a la cámara, esta es más portátil.

La cámara cuenta con un CCD con más de un millón y medio de fotosensores en un arreglo de 1524 x 1012 pixeles; el CCD tiene una sensibilidad espectral que va de los 400 nm a 1100 nm, pero para que no capte el espectro infrarrojo por razones ya antes mencionadas, tiene un filtro que permite el paso únicamente de la porción visible del espectro electromagnético (400 nm a 700 nm), permitiendo así capturar imágenes en el rango visible; la sensibilidad radiométrica del CCD permite captar imágenes con 12 bits por canal (color de 36 bits de profundidad), permitiendo la generación de imágenes con millones de colores (color verdadero).

Esta cámara permite la utilización de todos los tipos de lentes que normalmente acepta la cámara Nikon N90s, por lo que existe una gran variedad de configuraciones ópticas posibles. Además, esta cámara cuenta con todas las funciones con que cuenta la cámara N90s, como son: autoenfoco, control automático de exposición, múltiples programas internos, así como el registro electrónico de los datos de

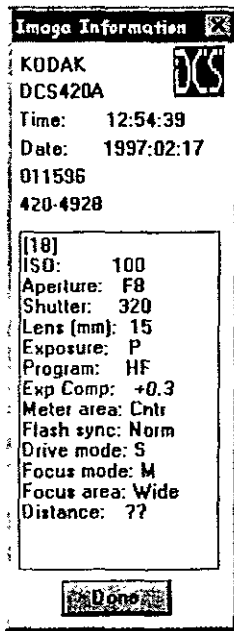


Figura 16. Parámetros presentados por el programa de la cámara DCS420.

exposición (velocidad y diafragma), distancia focal del lente y parámetros de operación (ver Figura 16). Esta característica es muy útil debido a que permite saber la configuración de la cámara en el momento preciso de la adquisición de cada una de las imágenes.

Además, en esta interfaz para computadora personal también viene incluida una batería que alimenta no solo a la cámara, sino también al disco duro en donde se almacenan las imágenes adquiridas. Con la capacidad de la batería se pueden tomar hasta 800 imágenes, pero este número disminuye al utilizar la cámara en vuelos, en donde al disminuir la temperatura, la batería pierde carga rápidamente, por lo que es necesario proveerle de energía adicional por medio de un cable conectado a un adaptador que viene incluido con la cámara.

Otra de las características de esta cámara es que tiene una capacidad de capturar una imagen cada 2.8 segundos aproximadamente, este tiempo es necesario para permitir al disco duro almacenar la imagen adquirida, sin embargo, también cuenta con un módulo de memoria interno que permite tomar 5 imágenes en ráfaga en un lapso de 2.5 segundos, lo que permite captar fenómenos que suceden muy rápidamente, como aludes o erupciones volcánicas; después de la ráfaga, las imágenes pueden ser adquiridas después de alrededor de 8 a 10 segundos, esto es para permitir al módulo de memoria descargar las imágenes al disco duro, y después de esto, se pueden adquirir otra vez las imágenes cada 2.8 segundos de manera normal.

En adición a lo anterior, esta cámara tiene un micrófono interconstruido, con el cual se puede grabar hasta 3 minutos de audio con cada imagen, el audio puede ser útil para ubicar las imágenes con coordenadas, o bien, para narrar la escena o rasgos del terreno que no sean abarcados por la imagen, pero que estén alrededor de la toma. Sin embargo, si se graban los tres minutos de audio de cada imagen, se utilizaría 1.5 Mb adicionales de espacio en disco por cada imagen, por lo que solo se podrían almacenar alrededor de 100 imágenes con audio en un disco duro de 340 Mb.

Las dimensiones de la cámara DCS420 son las siguientes: 170 mm x 114 mm x 208 mm, y pesa 1.70 Kg, siendo ésta muy compacta y ligera, y no se necesita de un adiestramiento especializado para su uso, ya que básicamente es el mismo que una cámara de 35mm reflex.

La cámara cuenta con una interfaz SCSI con la cual, mediante una computadora, se pueden ajustar parámetros internos de la cámara, como son: hora, fecha, actualización del programa interno, entre otros; además, con esta interfaz y una computadora, ya sea una PC o una laptop, se pueden controlar la adquisición de fotografías y ver las imágenes capturadas desplegadas en un monitor en el mismo momento de su adquisición, con lo cual puede verificarse el éxito del levantamiento de manera inmediata.

Debido al reducido tamaño del sensor (9.3 mm x 14.0 mm), el cual introduce un factor de 2.5 en la distancia focal de los lentes, un lente super gran angular de 14 mm fué utilizado. Con esta combinación (tamaño del sensor-lente) se obtiene un ángulo de visión similar al de una cámara de 35 mm con un lente sencillo, ayudando a hacer vuelos a grandes alturas al permitir una cobertura razonable por

imagen, reduciendo así el número de líneas de vuelo necesarias para cubrir un área. La distorsión del lente es relativamente baja, debido al hecho de que solamente la parte central de la imagen es utilizada por el sensor (Palacio, 1997).

Las imágenes obtenidas con esta cámara tienen por dimensiones 1524 columnas por 1012 filas, son almacenadas inicialmente en formato comprimido en el disco duro de la cámara, midiendo cada una de ellas 1.57 Mb; para su utilización es necesario descomprimirlas con un programa diseñado por Kodak (DCSxxx ASPI o Kodak DCS400/EOS·DCS/NC2000). Como se mencionó anteriormente, el CCD de la cámara tiene una sensibilidad radiométrica de 12 bits por canal, es así que las imágenes comprimidas tienen información en 36 bits por pixel, pero al ser descomprimidas, el programa permite escoger si se descomprimen con 8 bits o con 12 bits por canal, midiendo 4.41 Mb con 8 bits por canal y 8.83 Mb con 12 bits por canal; la diferencia entre una imagen con 8 bits por canal y otra con 12 bits por canal radica en que la imagen con 12 bits por canal tiene más colores y se acerca más a la realidad. Sin embargo, debido a que no hay programas comercialmente disponibles para manipular y procesar imágenes con más de 8 bits por canal, es conveniente utilizar 24 bits por pixel (16,777,216 colores por pixel), que por otra parte, proporcionan una calidad de color adecuada para todas las necesidades.

Las imágenes adquiridas están en formato digital y pueden ser manipuladas en computadora de manera inmediata; tienen una resolución en el terreno aproximadamente de 3 m por pixel.

El área cubierta con fotografías digitales corresponde a la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco y la cuenca tributaria oriental, y tiene una extensión aproximada de 210,000 ha; para cubrir esta superficie con fotografía digital, fué necesario trazar 13 líneas de vuelo, las cuales fueron voladas a alturas que varían de 2200 a 4000 metros sobre el terreno, la porción de la Zona Federal es abarcada por las líneas 10, 11, 12 y 13, con aproximadamente 45 fotografías digitales, y se adquirieron a una altura aproximada de 4000 metros sobre el terreno.

Este fué el primer levantamiento que realizó el Instituto de Geografía con este tipo de cámaras, por lo que se presentaron algunos contratiempos no previstos, uno de los cuales fue que, debido a la baja temperatura, la cámara dejó de operar por un pequeño lapso, el cual fué suficiente para omitir la captura de 6 a 7 fotografías digitales, quedando una parte del terreno sin cubrir, correspondiente a una porción de la línea 12 de vuelo. Además, otra zona quedó sin cubrir, debido a que en el momento del vuelo no se conocían los límites precisos de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco.

Esta falta de información fué cubierta con 4 fotografías aéreas pancromáticas convencionales (formato 23 x 23 cm) en escala 1:30,000, las que fueron adquiridas en el mismo momento que las fotografías digitales. Las fotografías aéreas convencionales fueron *digitizadas* ópticamente a una resolución similar a la de las fotografías digitales; esta resolución fué calculada de la siguiente manera: se localizaron ciertos detalles del terreno en las fotografías aéreas digitales directamente en la pantalla de la computadora, y se localizaron estos mismos detalles en las fotografías aéreas convencionales, posteriormente, con la ayuda de un comando de *Adobe Photoshop*, se midió la cantidad de píxeles existente entre estos detalles en la fotografía digital, y se midió también, la distancia en cm existente entre estos mismos detalles en las fotografías aéreas convencionales, obteniendo así la relación: *cantidad de píxeles por unidad de medida*, la cual es requerida por el programa de digitización para el barrido de las fotos. Esta relación se calculó para cada una de las 4 fotografías aéreas convencionales a *barrer*.

El equipo utilizado para el procesamiento de las imágenes y construcción de los mosaicos es una computadora personal con procesador Pentium II con 266 MHz de velocidad, 128 Mb en RAM, disco duro de 3.2 gigabytes y 2 Mb en video. Esta configuración fue la adecuada debido a que el programa utilizado para el procesamiento de las imágenes y construcción de los mosaicos utiliza toda la memoria RAM con el fin de realizar los procesos más rápidamente, y además, maneja archivos temporales grandes; por ejemplo, para manipular una imagen de 50 Mb, es necesario un archivo temporal de aproximadamente 325 Mb.

Para la digitización de las fotografías aéreas convencionales y los mapas a utilizar, se empleó un scanner de cama plana *Acer 610 Plus* tamaño legal (210 mm x 297 mm), el cual tiene una resolución óptica de 600 x 600 dpi, puede captar y producir imágenes con hasta 30 bits por pixel y es de un solo paso, lo cual permite *barrer* imágenes con alta resolución de manera rápida.

Los mapas utilizados para la construcción del segundo mosaico son mapas topográficos editados por el INEGI a escala 1:50,000, y tienen las siguientes claves: E14A21-Texcoco (INEGI, 1983), E14A31-Chalco (INEGI, 1985), E14A39-Cd. de México (CETENAL, 1977) y E14A49-Milpa Alta (CETENAL, 1977).

Para la impresión de los mosaicos a escala 1:20,000 se utilizó un graficador o *plotter* marca *Hewlett Packard* modelo *750c Plus*, el cual cuenta con una resolución de impresión de 300 dpi en color. Para la impresión de los mosaicos a escala 1:50 000 se utilizó una impresora marca *Epson* modelo *Stylus XL*, la cual cuenta con una resolución de 720 dpi en color.

También se utilizaron dos receptores GPS Garmin, modelo SRVY-II, con la finalidad de poder hacer GPS diferencial, los receptores son de 8 canales y tienen la posibilidad de poder configurarse como *base* o como *field* o campo, lo que permite, si se tienen dos receptores funcionando al mismo tiempo, corregir las lecturas del receptor de campo de modo diferencial con un post-procesamiento en gabinete; además, la memoria de estos receptores es suficiente para almacenar alrededor de 80,000 lecturas, que si se hiciera una cada segundo, serían alrededor de 22 horas de información. Estos receptores permiten identificar los puntos o lecturas adquiridas con caracteres alfanuméricos, por lo que la información es más fácil de manejar. Estos receptores tienen un programa especial basado en computadora personal, con el cual se pueden procesar los datos obtenidos, y es compatible con hojas de cálculo, procesadores de textos y sistemas de información geográfica, ya que los datos resultantes están en código ASCII⁶.

Para el desarrollo de esta tesis se utilizaron distintos programas de cómputo, el primer programa es *Adobe Photoshop ver 3.0.5*. Este programa se utilizó con el fin de procesar las imágenes obtenidas, para ello, el programa tiene una gran cantidad de filtros y programas internos con los cuales se puede filtrar y procesar imágenes digitales. Otra de las aplicaciones de este programa fue para construir los mosaicos; se escogió debido a que los algoritmos utilizados para el procesamiento de las imágenes son de gran calidad; por ejemplo, al girar una imagen.

⁶ Un acrónimo para American Standard Code for Information Interchange (Código estándar americano para el intercambio de información). Un estándar que asigna un número binario único a cada carácter de texto y a cada carácter de control.

Se hicieron pruebas para construir mosaicos con otros programas, como *CorelDraw! 5.0*, pero la calidad de los procesamientos no fue satisfactoria. En la Figura 17 se puede comparar la calidad del proceso de giro de *Adobe Photoshop* con respecto a *CorelDraw!*.

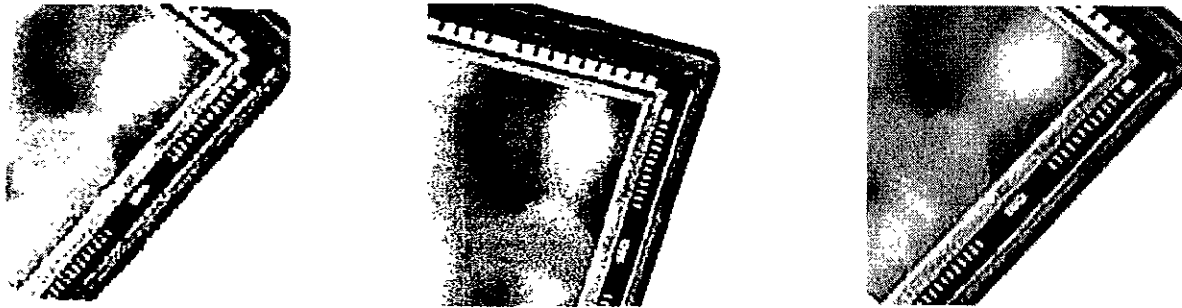


Imagen rotada en *CorelDraw 5.0*

Imagen original

Imagen rotada en *Adobe Photoshop*

Figura 17. En las imágenes se puede apreciar que *Adobe Photoshop* permite girar las imágenes con mayor calidad que *CorelDraw!*.

En la prueba anterior se pone como ejemplo el giro de una imagen debido a que es uno de los procesos necesarios a los que se somete a las imágenes para la construcción de un mosaico.

Otra de las capacidades de *Adobe Photoshop* es el manejo de imágenes por capas, lo que permite sobreponer imágenes con mucho mayor precisión que otros programas, al poder tornar semitransparente a la imagen superior, y poder sobreponer los detalles comunes de la imagen superior sobre los de la imagen inferior con bastante precisión.

El siguiente programa utilizado es el correspondiente al procesamiento de los datos adquiridos por los receptores GPS, el programa es el *PC100S2 ver. 3.03* (Garmin, 1995), y tiene la capacidad de corregir los datos de campo en base a los datos obtenidos por el GPS de referencia o base, además, puede desplegar en un sistema de coordenadas los puntos adquiridos para saber su ubicación relativa y medir distancias en base a las coordenadas. Este programa permite utilizar los datos procesados en otros programas, como hojas de cálculo, sistemas de información geográfica, programas estadísticos, procesadores de texto, entre otros.

El tercer programa utilizado fué un sistema de información geográfica denominado *ILWIS⁷ ver. 2.1 for Windows* (ITC, 1998); este programa fué utilizado principalmente por su capacidad de medir la distorsión existente en una imagen. En base a los puntos GPS adquiridos en modo diferencial, con este programa se trató de evaluar la distorsión resultante con los dos distintos métodos para la construcción sistemática y rápida de un mosaico.

⁷ Integrated Land and Water Information System.

2.2 Construcción de Mosaicos

En ocasiones, para ciertas aplicaciones, se requiere poder apreciar áreas mayores a las abarcadas por una fotografía sin perder detalle, para poder lograr esto se construyen mosaicos fotográficos o aerofotomosaicos. Un aerofotomosaico se define como el ensamblaje sistemático de varias aerofotos individuales para formar la imagen fotográfica de una región mayor (Luján, 1991). Como se vio en el capítulo anterior, la construcción de mosaicos con fotografías aéreas convencionales, es una práctica muy común y muy útil para una gran cantidad de disciplinas y aplicaciones, pero ciertas limitantes, como los costos y la disponibilidad, limita el uso de las fotografías aéreas convencionales, por lo que se ha visto la necesidad de utilizar materiales y métodos alternativos para la construcción de mosaicos. A continuación se describen dos métodos empleados para la construcción de mosaicos mediante el uso de fotografías aéreas digitales.

2.2.1 Método de sobreposición digital

Este método consiste básicamente en la sobreposición de imágenes digitales sin corregir, una a una, sobre un fondo en blanco. Este procedimiento es similar al descrito en la construcción de mosaicos no controlados, con la principal diferencia de que en este caso, todo el proceso es digital.

Para la construcción de este mosaico se utilizaron aproximadamente 45 fotografías aéreas digitales de 4 distintas líneas de vuelo. Inicialmente, se hizo una impresión en miniatura y en blanco y negro de cada una de las imágenes (10 cm x 6.6 cm) con el fin de reconstruir las líneas de vuelo, y en la parte posterior de cada miniatura se anotó el nombre del archivo correspondiente a la fotografía impresa; posteriormente, con la ayuda de estas líneas de vuelo, se organizaron los archivos en subdirectorios por líneas de vuelo; además, se ubicaron los puntos centrales de cada una de las imágenes en mapas topográficos escala 1:50 000, con la finalidad de obtener las coordenadas del punto central de cada una de las fotos y obtener un índice de fotos. Teniendo el índice de fotos, se procedió a seleccionar aquellas que cubrieran la superficie de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco y se dió inicio al procesamiento de dichas imágenes.

Los procesamientos digitales que tuvieron las imágenes utilizadas son los siguientes:

Ajuste del histograma: Para el ajuste del histograma de las imágenes, se utilizó el comando *niveles automáticos* del programa *Adobe Photoshop*. El comando *Niveles automáticos* define los píxeles más claros y más oscuros en cada canal como blanco y negro y ajusta proporcionalmente los valores de los píxeles intermedios. El objetivo principal de esto es uniformizar o estandarizar los valores de los píxeles en todas las imágenes. De este modo, los valores de reflectancia de los objetos presentes en las imágenes son comparables, y es posible realizar mosaicos con brillo y contraste adecuados, realizar comparaciones, clasificaciones espectrales y determinar con certeza, la naturaleza de los tipos de objetos observados, aún cuando se encuentran en diferentes imágenes. Este comando corrige, además, los valores de color y tono.

En general, el comando *Niveles automáticos* da buenos resultados cuando sólo se necesita un simple ajuste de contraste y tono en una imagen con una distribución regular de los valores de píxeles. La corrección automática de los tonos distribuye de nuevo los valores de los píxeles sólo según los puntos

blanco y negro y no ofrece el control más preciso que se puede conseguir usando Niveles o Curvas. Sin embargo, en este caso, este comando fué suficiente como un pre-procesamiento de las imágenes.

Enfoque: Para identificar mejor los objetos y rasgos contenidos en las imágenes, es posible aplicar un filtrado, mediante el cual se pueda aumentar la definición o nitidez de éstas; para esto, se utilizó el comando *enfocar más* con el cual se aumentó la nitidez de las imágenes (ver Figura 18). Este comando realiza un filtrado *pasa altas* (enfatisa las frecuencias altas de la imagen, es decir, los bordes y los objetos pequeños) por medio de una matriz de convolución.



Imagen A

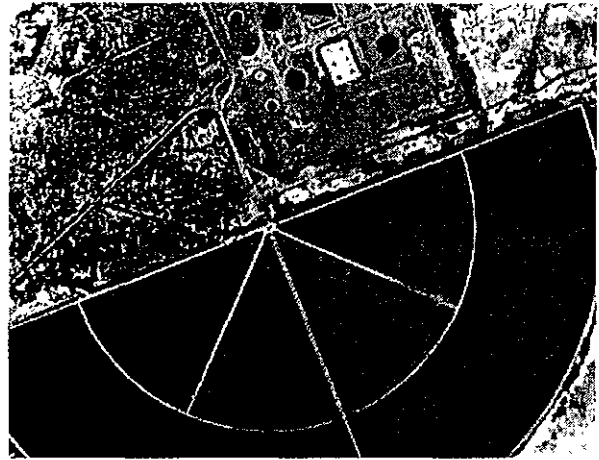


Imagen B

Figura 18. En estas dos imágenes se puede apreciar el efecto del filtro “enfocar más” del programa *Adobe Photoshop*: la imagen A tiene la definición normal que se obtiene con la cámara, la imagen B ha sido procesada con el filtro antes mencionado, siendo notoria la diferencia de nitidez.

Después de procesar las imágenes, se procedió a la construcción del mosaico. Para la creación de éste en el programa *Adobe Photoshop*, es necesario crear un archivo vacío en el cual se irán agregando las imágenes una a una, este archivo en blanco debe tener las dimensiones necesarias para abarcar todo el mosaico. Lo anterior es importante, ya que si las dimensiones son mal calculadas, agregar más espacio al mosaico es un proceso laborioso.

Para crear el archivo en blanco en el cual se construiría el mosaico, se calculó el espacio necesario contando las líneas de vuelo a utilizar, las imágenes por línea de vuelo, las dimensiones de cada imagen y la sobreposición entre éstas. Con esto, se creó un archivo vacío con las siguientes características: 7200 líneas, 4750 columnas, 24 bits por pixel y una resolución equivalente a la de las imágenes a utilizar (96 píxeles por pulgada). Cuando se crea un archivo vacío para construir un mosaico, es recomendable que sobre espacio, ya que es más fácil quitar el espacio sobrante al terminar el mosaico, que agregar espacio para poder acabar el mosaico.

Tratando de minimizar la distorsión existente en las imágenes, se utilizó únicamente la porción central de las mismas, es decir, que de los 1524 x 1012 píxeles que constituyen la imagen, solo se utilizaron 1150 x 750 píxeles; estas dimensiones fueron las ideales para utilizar únicamente el área central de las imágenes y conservar un área de sobreposición entre las imágenes adyacentes. El proceso de cortado del centro de las imágenes se realizó creando en *Adobe Photoshop* una máscara de corte, la cual

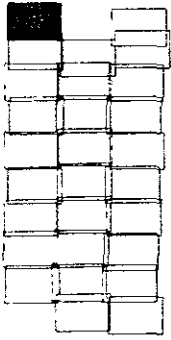


Figura 19. Inicio del mosaico no controlado

cortaría exactamente la misma porción central de cada una de las imágenes de manera rápida. El corte de esta área central de las imágenes se realizó justamente antes de agregar cada una de éstas al mosaico.

Una vez que se tenía el archivo vacío para la construcción del mosaico, se eligió una imagen, la cual sería la base para la construcción de todo el mosaico, se dice que sería la base ya que esta imagen es la que daría la pauta a seguir para el acomodo de las demás imágenes; para esto, se seleccionó la imagen que constituía el extremo superior izquierdo de lo que sería el mosaico (la imagen más septentrional de la línea 13), esto con el fin de realizar la construcción del mismo de la manera más ordenada posible (ver Figura 19).

Antes de la colocación de la imagen seleccionada, en el archivo vacío, esta fue filtrada y enfocada, tratando de que los colores y tonos contenidos en ésta, fueran lo más cercanos a la realidad.

Debido a que la orientación de las líneas de vuelo es Norte-Sur, las imágenes correspondientes a las líneas pares aparecen invertidas, y las imágenes de las líneas nones aparecen correctamente orientadas con el norte.

Una vez colocada la primera imagen, se agregó la siguiente imagen de la línea de vuelo, la cual era adyacente a la primera. Como ya se mencionó, el programa *Adobe Photoshop* tiene la capacidad de manipular varias imágenes en capas, por lo cual, aunque dos imágenes se superpongan, la información de la(s) imagen(es) subyacente(s) no se pierde. De esta manera, la primer imagen colocada en el mosaico es manejada como una capa y la segunda imagen como otra capa, y así sucesivamente.

Al poder tener las imágenes en capas separadas, se pueden cambiar los atributos de cada una de ellas por separado, lo que facilita la construcción de los mosaicos. Así, la segunda imagen se puede manipular rotándola, escalándola, filtrándola o procesándola por separado. Se pueden manipular otros atributos de las imágenes, como es el grado de transparencia; esta característica permite sobreponer los detalles comunes existentes tanto en la imagen inferior como los existentes en la imagen superior de manera bastante precisa (ver Figura 20).

Una vez que se colocan todas las imágenes de la línea primer línea de vuelo (en este caso la 13), se procedió a colocar la primer imagen de la siguiente línea de vuelo, pero debido a que estas imágenes están invertidas, antes de colocarlas, se les da un giro de 180° , con el fin de orientarlas con el norte; y después de esto, se procede a colocarlas y manipularlas como se explicó anteriormente. Sin embargo, como se mencionó antes, al haber una falta de imágenes digitales en la línea de vuelo 12, fue necesario utilizar fotografías aéreas convencionales, las cuales fueron digitizadas, y ya estando en formato digital, se manipularon de la misma manera que las fotografías aéreas digitales.

Una vez que se han unido todas las imágenes de las 4 líneas de vuelo, se procedió a eliminar el espacio sobrante del archivo en blanco original, resultando un archivo de 6800 líneas x 4550 columnas de 130 Mbytes, este gran tamaño es debido principalmente a que cada capa contiene toda la información de cada una de las imágenes; habiendo así igual número de capas que de imágenes. Para disminuir el

tamaño del archivo, se pueden acoplar las capas. Una imagen acoplada contiene sólo un fondo y ninguna capa, por lo que el tamaño de archivo se reduce considerablemente.

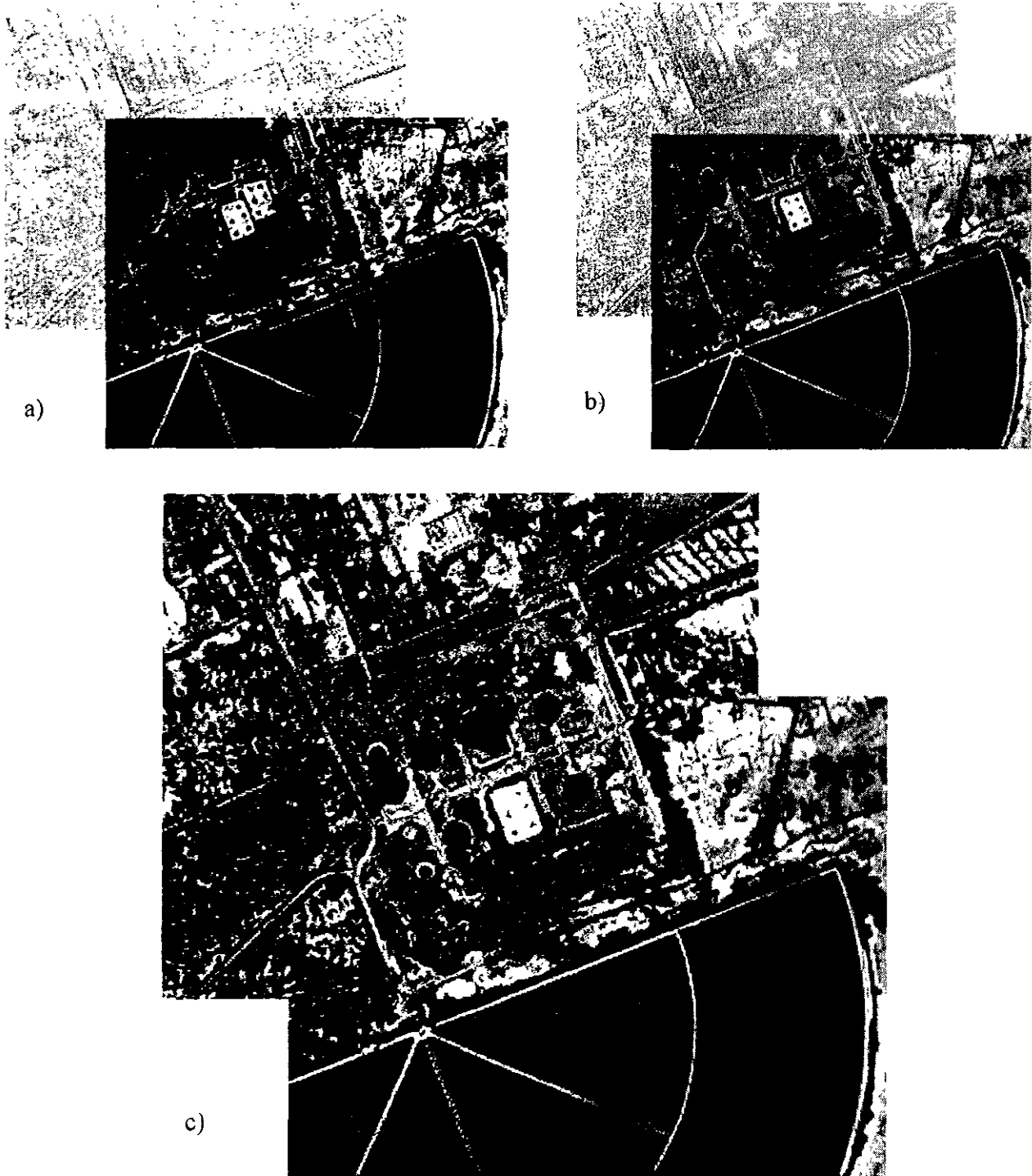


Figura 20. En esta figura se aprecia el proceso para la sobreposición de 2 fotos, en la imagen a) se observa que la foto superior es semitransparente, y a través de ella se distinguen los detalles de la foto subyacente, los cuales no coinciden con los de la superior, es por eso que se ven dobles; en b) se aprecia que los detalles de ambas imágenes coinciden, pero aún está semitransparente la foto superior, y en la c) se observan las dos imágenes, ya sobrepuestas y 100% opacas, y no se distingue la unión entre ambas.

En la mayoría de los casos, no es conveniente acoplar un archivo hasta estar absolutamente seguro de que no se necesita cambiar más las capas individuales, ya que si la imagen es acoplada, no se puede manipular imágenes por separado dentro del mismo archivo.

Al acoplar las capas del mosaico, el archivo redujo su tamaño de 130 Mbytes a 89 Mbytes, con el cual es más fácil manipularlo.

2.2.2 Método de construcción con cartografía base

Este método consiste esencialmente, en el ensamblaje de fotografías digitales sin corregir, las cuales son acopladas en base a la localización de rasgos del terreno, existente tanto en las imágenes como en la base cartográfica, por lo que se puede considerar al producto resultante de este método como un mosaico semicontrolado.

La preparación de los materiales para la construcción de este mosaico es similar a la del mosaico anterior, la principal diferencia radica en que para la construcción de este mosaico, en vez de hacer simplemente la sobreposición digital de las imágenes en base a los rasgos comunes que tengan éstas, se utiliza cartografía base, la cual nos permite colocar más precisamente las imágenes a acoplar, ya que la sobreposición de las imágenes no solo se da entre imágenes, sino también entre los detalles existentes en la cartografía.

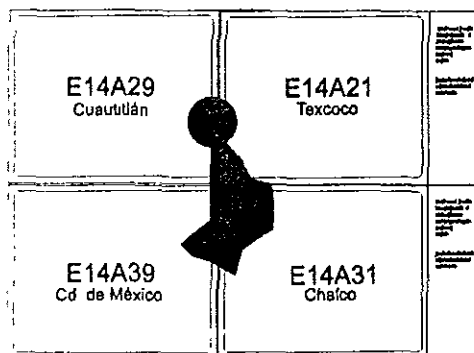


Figura 21. Ubicación de la ZFELT

Posteriormente al procesamiento de las fotografías digitales, como ya se describió en el punto anterior, se digitizaron 4 cartas topográficas de manera parcial, ya que la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco (ZFELT) coincide con la intersección de cuatro cartas topográficas en escala 1:50,000 editadas por el INEGI (ver Figura 21). La resolución a la que fueron digitizadas estas cartas fué calculada de manera similar a como fue calculada para la digitización de las fotografías aéreas convencionales: se encontró la relación existente entre la cantidad de píxeles de las imágenes por unidad de medida del mapa. Posteriormente a la digitización, las porciones de las cartas fueron acopladas

digitalmente para crear un solo mapa de la Zona Federal, esto se logró gracias al sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), el cual permitió unir con precisión la cuatro porciones de las cartas digitizadas, al permitir encontrar una gran cantidad de rasgos continuos entre las cartas (cuadrícula UTM).

Una vez que se tuvo el archivo digital con el mapa completo de la Zona Federal, éste se utilizó como fondo para ir acoplando, una a una, las fotografías digitales. La principal diferencia con respecto a la construcción del mosaico anterior es que, al contarse con una base cartográfica, se pueden ir colocando las imágenes de manera precisa sobre los rasgos distinguibles, de manera que al colocar cada una de las imágenes, éstas se manipularán lo necesario para ajustarlas a la base cartográfica, siendo este ajuste relativamente constante, a diferencia del ajuste requerido por las imágenes del mosaico construido por sobreposición digital, el cual se iba incrementando a medida que se avanzaba con la construcción del

mosaico, por lo que es probable que la precisión de este mosaico, construido con base cartográfica sea mejor que el construido por sobreposición digital.

La construcción de este mosaico dió inicio con la ubicación de rasgos del terreno existentes tanto en las fotografías como en la base cartográfica, una vez que se tuvieron ubicados los rasgos del terreno y las fotografías aéreas correspondientes, se procedió a acoplarlas sobre la base cartográfica, pero surgió un inconveniente: con la construcción del mosaico anterior, los archivos de la cartografía y el archivo temporal que se utiliza para la construcción del mosaico, el espacio disponible en disco se redujo tanto, que no fué posible realizar el mosaico conservando las imágenes en capas, por lo que se recurrió a otras de las características del programa en el cual se estaba construyendo el mosaico.

Para solucionar el anterior inconveniente, se utilizó el módulo *Retoque Rápido* del programa *Adobe Photoshop*, el cual permite abrir una parte de un archivo grande, modificar esa sección del archivo original, y actualizar esa misma sección en el archivo origen (*guardar mascara rápida*), de esa manera, al abrir el archivo original, éste ya cuenta con las modificaciones realizadas a la sección seleccionada. Este módulo es útil en situaciones en las que ciertas limitantes, como espacio en disco, RAM del sistema o velocidad del procesador, no permiten la ejecución de ciertas acciones o comandos.

Trabajar con archivos con el módulo *Retoque Rápido* puede disminuir de forma importante el tiempo que se tarda en abrir y procesar archivos grandes. Para poder utilizar un archivo en el módulo *Retoque Rápido*, es necesario que el archivo este en formato Scitex CT o TIFF no comprimido.

De esta manera, una vez teniendo el archivo con la base cartográfica, se procedió a convertirlo en formato Scitex CT, con el fin de poder utilizarlo en el módulo *Retoque Rápido*.

Es importante que, al colocar cada una de las fotografías digitales sobre la base cartográfica, estas se ajusten lo más precisamente posible, ya que una vez acopladas y guardada la mascara rápida, no se podrán mover de nuevo las imágenes acopladas, pues quedan fundidas con la base cartográfica.

Antes de iniciar con el acoplamiento de las fotografías digitales, se buscó en ellas rasgos distintivos del terreno, los cuales también aparecieran en la base cartográfica, esto se hizo con el fin de poder seleccionar algunas imágenes para ser utilizadas como *imágenes de control*; se les dió el anterior nombre a las fotografías que contuvieran detalles precisos del terreno, y que aparecieran en la base cartográfica, con lo cual fué posible colocarlas sobre la base cartográfica con gran precisión.

En el momento de la colocación de la primer fotografía digital sobre la cartografía base, se ajustaron los niveles de color, tono y brillo de la imagen, lo mejor posible, con el fin de que, al agregar más imágenes, estas se ajustaran hasta que tuvieran colores, tonos y brillo similares a los de la primer imagen colocada; esto con el fin de poder dar una apariencia de continuidad al mosaico, sin que se aprecien los bordes de las imágenes individuales.

En este caso, al contar con cartografía base, la cual tiene una distorsión geométrica casi inexistente, no se cortaron los centros de las imágenes, es decir, se utilizaron las imágenes completas, ya que las imágenes, al ajustarlas a la base cartográfica lo más precisamente posible, se espera que tengan una distorsión geométrica similar a la de la base cartográfica.

Con el anterior procedimiento, se colocaron alrededor de 30 fotografías digitales sobre la base cartográfica, las cuales se ajustaron con la mejor precisión posible, rotándolas, escalándolas, sesgándolas, y en algunos casos, deformándolas lo necesario.

Por las distintas características del terreno (grandes áreas con cuerpos de agua, suelo desnudo y pastizales), en una importante cantidad de fotografías, no fué posible identificar suficientes rasgos del terreno que estuvieran también presentes en la base cartográfica, por lo que su colocación en el mosaico se basó, principalmente, en las imágenes de control, y en segundo término, en los detalles que se pudieron apreciar de la base cartográfica.

Como se mencionó anteriormente, al existir una falta de fotografías digitales, se utilizaron fotografías aéreas convencionales, las cuales fueron digitizadas a una resolución similar a la de la base cartográfica, y se acoplaron de la misma manera que las fotografías aéreas digitales, siendo utilizadas algunas de las fotografías aéreas convencionales digitizadas como imágenes de control.

Una vez que se tuvo el mosaico completo, se procedió a cortar el espacio sobrante del mismo, el cual no contenía información, resultando un archivo de 3500 columnas x 6526 líneas y 65.3 Mb.

2.3 Obtención de puntos GPS de modo diferencial

Para poder medir la distorsión existente en los mosaicos construidos, es necesario conocer las coordenadas de ciertos puntos en el terreno lo más precisamente posible, y que estos puntos sean identificables en los mosaicos, esto se puede lograr de varias maneras, una es mediante la utilización de cartografía a escala media a grande, en la cual se puedan distinguir puntos que estén presentes también en los mosaicos; sin embargo, en este caso no se contó con cartografía adecuada para obtener dichos puntos, por lo que fué necesario la adquisición de puntos GPS de modo diferencial, el cual es uno de los métodos para saber la posición, con cierta precisión, de un lugar en la superficie de la Tierra.

El sistema GPS consiste en una constelación de 24 satélites, puestos en funcionamiento por el ejército de los Estados Unidos, los cuales están transmitiendo una señal de manera continua, con la cual, mediante triangulación y cálculos de tiempo, se puede conocer la posición de un lugar sobre la superficie de la Tierra. Sin embargo, el ejército de los Estados Unidos, por motivos de seguridad, agrega un error a la señal (*disponibilidad selectiva*), el cual hace que las posiciones se desplacen algunas decenas y hasta más de cien metros. Este error se puede minimizar significativamente procesando y corrigiendo las lecturas del receptor con el método diferencial.

Una de las maneras de realizar un levantamiento GPS de modo diferencial consiste en el uso de dos o más receptores GPS, los cuales deben tener lecturas o modos de recepción compatibles entre sí; al menos uno de los receptores debe estar ubicado en un punto en el cual se conozcan sus coordenadas X, Y y Z, y los receptores, tanto el de la estación base como los de campo, deben estar captando la señal de los satélites al mismo tiempo. Así, se puede conocer el error existente en las lecturas de la estación base en un momento determinado, por medio de la comparación de las mismas con las coordenadas conocidas del lugar, y pudiéndose aplicar una corrección a las lecturas de los receptores de campo.

Para la obtención de puntos GPS se utilizaron dos receptores Garmin, modelo SRVY-II, los cuales tienen la capacidad de guardar aproximadamente 80,000 lecturas cada uno, además, se pueden configurar como unidad de campo o unidad base, por lo que pueden ser utilizados para captar la señal de los satélites GPS de manera simultánea, con la finalidad de poder conocer el error de la señal GPS en un determinado momento, y así poder corregir las lecturas de la unidad de campo. Según el fabricante, estos receptores GPS pueden tener una precisión de entre 3 y 10 metros (Garmin, 1993), post-procesando la señal, para corregir la *disponibilidad selectiva*.

La planeación del levantamiento de los puntos GPS se llevó a cabo en base a los detalles perceptibles en los mosaicos, seleccionando lugares lo más puntualmente posible, como intersección de caminos, esquinas de construcciones, puentes y esquinas de embarcaderos.

El levantamiento de los puntos GPS se llevó a cabo como se señala en el Cuadro 8.

CUADRO 8. ADQUISICIÓN DE PUNTOS GPS

Levantamiento	Fecha	Puntos adquiridos
1	27 - 6 - 98	5
2	1 - 7 - 98	8
3	2 - 7 - 98	13

Dando un total de 26 puntos. Cada punto consistió de 420 lecturas (una cada segundo durante 7 minutos), teniendo en todo momento, la señal de 8 satélites, con calidad de señal de 7 a 9 (0 mala - 9 buena), y un mínimo de 5 satélites con señal por arriba de 7 en todo momento.

Una vez teniendo las lecturas de los 26 puntos y de la base, se descargaron los archivos en una PC, y mediante el uso del programa *PC100S2*, se procedió a calcular el error de los datos obtenidos por la estación base, por medio de su comparación con las coordenadas conocidas de la misma; al hacer esto, se generó un archivo de corrección, el cual, al aplicarlo a cada uno de los archivos de campo adquiridos, se obtuvieron los archivos corregidos de cada punto, estos archivos contienen las coordenadas de 360 lecturas en promedio por cada punto (85% de las lecturas originales), y además, un centroide, el cual lo calcula el programa, obteniendo así las coordenadas de cada punto (X, Y y Z).

2.4 Cálculo de la Distorsión Geométrica en los Mosaicos

El cálculo se llevó a cabo en un Sistema de Información Geográfica denominado *ILWIS* (ITC, 1998), el cual tiene un módulo de georreferenciación y corrección geométrica.

Los mosaicos se importaron a *ILWIS* y una vez estando en el sistema, se procedió a ubicar uno a uno, los puntos GPS sobre los rasgos del terreno correspondientes. Se seleccionó el método de transformación⁸ *affine*, cuyo algoritmo se presenta a continuación:

⁸ Transformación en *ILWIS*, es la relación entre filas y columnas, y las coordenadas XY de los puntos a ser usados en el cálculo.

$$\text{Columnas} = a_{11}X + a_{12}Y + b_1$$

$$\text{Filas} = a_{12}X + a_{22}Y + b_2$$

La transformación *affine* es una función de primer orden, que requiere de un mínimo de 3 puntos de control. El orden de esta transformación es suficiente, si se remuestrea la imagen, para realizar cambios en la escala de los ejes X y Y, además de rotar la imagen. Para poder utilizar este método de transformación, es necesario tener un mínimo de 3 puntos, sin embargo, mientras más puntos se utilicen, mayor será la calidad de la transformación. La ubicación de los puntos se muestra en la Figura 22, en la cual también se indica el límite de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco.



Figura 22. Ubicación de puntos GPS sobre un mosaico. Los números corresponden al identificador proporcionado por el editor de georreferencia en ILWIS.

	X	Y	Row	Col	Active	DRow	DCol
1	498733 000	2162961 00	1179	1078	True	12.16	2.77
2	498724 000	2162320 00	1378	1073	True	8.98	1.56
3	500819 000	2162369 00	1365	1706	True	10.44	4.60
4	500767 000	2161265 00	1704	1690	True	1.25	6.43
5	498671 000	2159026 00	2414	1030	True	6.09	-1.28
6	520728 000	2158972 00	2413	1666	True	-12.96	-1.89
7	501912 000	2158971 00	2405	2030	True	-21.85	-4.37
8	502811 000	2158932 00	2413	2314	False	-26.60	1.42
9	499316 000	2157478 00	2890	1227	True	-6.48	-1.49
10	500681 000	2157473 00	2888	1646	True	-10.73	-4.98
11	501878 000	2157441 00	2900	2015	True	-9.41	-6.44
12	503390 000	2157510 00	2880	2494	True	-8.39	4.45
13	498498 000	2154686 00	3780	978	True	3.30	7.10
14	502714 000	2154380 00	3878	2264	True	2.71	-11.39
15	498975 000	2152364 00	4508	1117	True	-1.31	2.11
16	503158 000	2153372 00	4194	2411	True	0.56	-0.23
17	497735 000	2151577 00	4751	731	True	-5.93	1.16
18	499912 000	2152101 00	4593	1408	True	0.28	3.50
19	497240 000	2150144 00	5202	565	True	-6.66	-9.36
20	499955 000	2150441 00	5121	1420	True	4.68	4.80
21	500560 000	2150675 00	5048	1608	True	5.19	5.17
22	501165 000	2150903 00	4977	1795	True	5.80	4.54
23	503157 000	2150938 00	4968	2409	True	6.86	1.91
24	505100 000	2153312 00	4220	3017	True	6.69	4.76
25	500671 000	2155661 00	3473	1633	True	2.76	-12.04
26	503342 000	2156040 00	3358	2471	True	5.98	-1.38

Figura 23. Al ingresar los puntos GPS, se calculan otros valores de los mismos, como el desplazamiento en X y Y de cada uno de los puntos (columnas DCol y DRow, respectivamente), así como el Error Medio Cuadrático o Sigma.

Al colocar los puntos sobre el mosaico, también se introducen las coordenadas de cada uno de ellos en una tabla (ver Figura 23), y al hacerlo, se obtienen otros valores, como son: *Row*, *Col*, *Active*, *DRow* y *DCol*.

En las columnas X y Y, están contenidas las coordenadas de cada uno de los puntos GPS, las cuales están en UTM; en las columnas *Row* y *Col* están contenidas las coordenadas de los puntos con respecto a un origen, el cual es la esquina superior izquierda del mosaico, y las unidades expresadas son pixeles; en la columna *Active* se expresa si el punto está activo o no, es decir, que si fué considerado o no para el cálculo del *Sigma*, siendo *True* afirmativo y *False* Negativo; y las columnas *Drow* y *Dcol* muestran la diferencia entre los valores *Row* y *Col* calculados (con respecto a un sistema coordenado) y los valores *Row* y *Col* actuales, en pixeles; es decir, muestran la diferencia en pixeles que existe entre donde están los puntos y donde deberían estar.

Al colocar el 4^{to} punto, se obtiene un valor de *Sigma*, el cual indica la precisión con que fueron ubicados los puntos GPS. *Sigma*, que también es conocido como Error Medio Cuadrático, es la desviación estándar calculada de la diferencia entre las coordenadas de los puntos digitizados y las posiciones correctas de los mismos con respecto a un sistema de coordenadas, y está en pixeles. *Sigma* es calculado con la siguiente ecuación:

$$\sqrt{(\Sigma(Drow^2) + \Sigma(Dcol^2) / ((n - df) * 2))}$$

En donde:

- DRow son los valores en la columna DRow.
- DCol son los valores en la columna DCol.
- n es el número de puntos activos, utilizados para el cálculo de *Sigma*.
- (n - df) * 2 son los grados de libertad, el cual es el número de puntos requeridos para determinada transformación.

Una vez que fueron ubicados los 26 puntos en ambos mosaicos, se obtuvieron datos como desplazamiento en X y Y de cada punto y *sigma*, los cuales son analizados en el siguiente capítulo con el fin de comparar los dos métodos utilizados para la construcción de mosaicos, entre otras variables.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Desde el momento de la construcción de los mosaicos, fue evidente que el mosaico no controlado tenía mayor distorsión. En el momento de empalmar las fotografías digitales en éste mosaico, era necesario escalarlas y manipularlas cada vez más, conforme se avanzaba en la construcción del mismo, para poderlas ajustar adecuadamente, a diferencia del mosaico con cartografía base, en el cual el ajuste de las imágenes tuvo regularmente el mismo grado de dificultad, no importando que tan avanzada fuera la construcción del mosaico, ni la ubicación de las fotografías digitales.

Una vez terminados los mosaicos, a simple vista se puede observar que el mosaico construido por sobreposición digital tiene una distorsión que parece partir del ángulo superior izquierdo, en el cual se inició el mosaico, y se extiende hacia abajo, sobre la misma línea de vuelo, y hacia la derecha, sobre las líneas de vuelo contiguas (ver Figura 24). Esta distorsión consiste en que los objetos aparecen alargados en uno de sus ejes. Un ejemplo de esto es la Figura 25, en la cual se puede ver la distorsión antes mencionada.

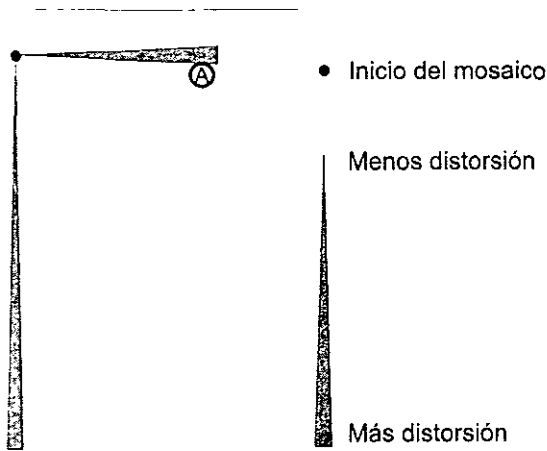


Figura 24. En esta figura se esquematiza la distribución de la distorsión y su proporción en el mosaico construido por sobreposición digital. La letra A encerrada en un círculo marca la posición de las imágenes de la Figura 25.

Figura 25. La imagen 1 muestra un detalle circular del terreno como es en realidad, la imagen 2, ya en el mosaico, muestra el mismo detalle, pero distorsionado en su eje X.

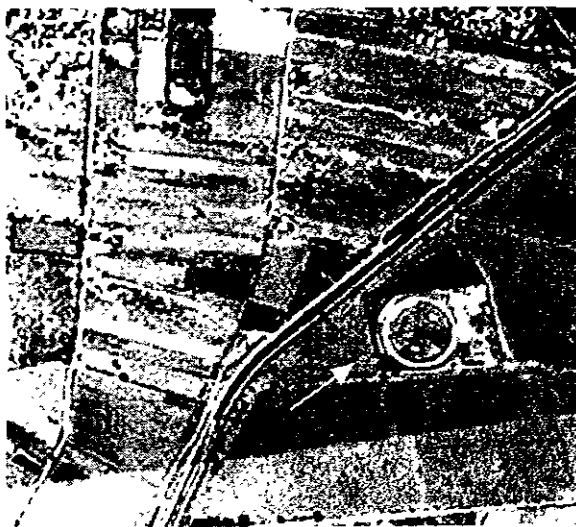


Imagen 1

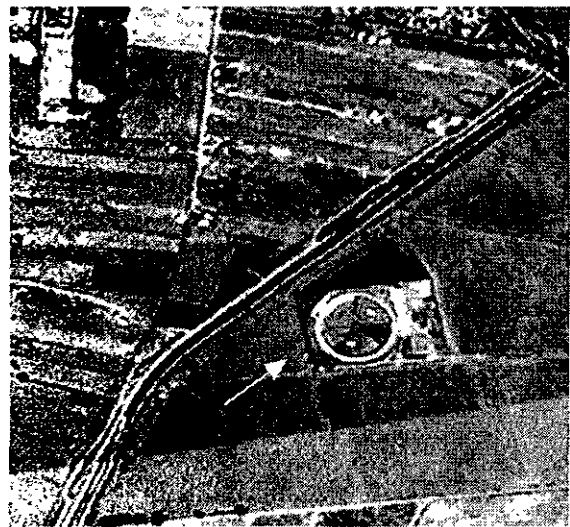


Imagen 2

En el caso del mosaico construido con cartografía base o semicontrolado, a simple vista no se observa ningún rasgo que delatara una distorsión de consideración aparente.

Al trabajar con los mosaicos en el SIG *ILWIS*, y utilizar los puntos GPS obtenidos para calcular la distorsión en los mismos, se obtuvieron las cifras mostradas en las tablas 1 y 2.

Mosaico no controlado (construido por sobreposición digital):

Punto	X	Y	Row	Col	Active	DRow	DCol
1	498793	2162981	1145	856	True	-3.59	40.35
2	498784	2162920	1355	872	True	-9.68	31.78
3	500819	2162369	1264	1550	True	-6.84	-16.57
4	500787	2161265	1643	1575	True	-1.41	-20.83
5	498671	2159026	2486	957	True	8.33	14.4
6	500728	2158972	2419	1655	True	1.33	-26.29
7	501912	2158971	2372	2061	False	-1.01	-44.17
8	502811	2158932	2348	2411	True	-3.97	-17.68
9	499316	2157478	2983	1238	True	8.81	-2.62
10	500681	2157473	2930	1704	True	6.01	-25.46
11	501878	2157441	2895	2125	True	5.73	-34.34
12	503390	2157510	2818	2705	True	9.42	7.4
13	498498	2154686	3959	1078	True	13.99	9.14
14	502714	2154380	3878	2595	True	-11.77	3.67
15	498975	2152364	4696	1341	True	-12.42	0.71
16	503158	2153372	4212	2806	True	1.83	12.02
17	497735	2151577	5019	943	True	-1.44	12.47
18	499912	2152101	4752	1685	True	-9.33	-2.12
19	497240	2150144	5332	828	True	10.43	12.53
20	499955	2150441	5318	1782	True	-2.42	-12.49
21	500560	2150675	5214	1967	True	-2.87	-13.91
22	501165	2150903	5113	2172	True	-3.93	-15.8
23	503157	2150938	5026	2901	True	-3.44	1.84
24	500671	2155661	3529	1778	True	-5.25	-28.45
25	505100	2153312	4162	3548	True	5.44	56.24
26	503342	2156040	3312	2756	True	6.82	11.84

Tabla 1. Se observa en las columnas DCol y DRow, el desplazamiento en X y Y, respectivamente, de cada uno de los puntos.

Mosaico semicontrolado (construido con cartografía base):

Punto	X	Y	Row	Col	Active	DRow	DCol
1	498793	2162981	1179	1078	True	12.16	2.77
2	498784	2162320	1378	1073	True	8.98	1.56
3	500819	2162369	1365	1706	True	10.44	4.6
4	500787	2161265	1704	1690	True	1.25	6.43
5	498671	2159026	2414	1030	True	6.09	-1.28
6	500728	2158972	2413	1668	True	-12.96	-1.69
7	501912	2158971	2405	2030	True	-21.85	-4.37
8	502811	2158932	2413	2314	False	-26.6	1.42
9	499316	2157478	2890	1227	True	-6.48	-1.49
10	500681	2157473	2888	1646	True	-10.73	-4.98
11	501878	2157441	2900	2015	True	-9.41	-6.44
12	503390	2157510	2880	2494	True	-8.39	4.45
13	498498	2154686	3780	978	True	3.3	7.1
14	502714	2154380	3878	2264	True	2.71	-11.39
15	498975	2152364	4508	1117	True	-1.31	2.11
16	503158	2153372	4194	2411	True	0.56	-0.23
17	497735	2151577	4751	731	True	-5.93	1.16
18	499912	2152101	4593	1408	True	0.28	3.5
19	497240	2150144	5202	565	True	-6.66	-9.36
20	499955	2150441	5121	1420	True	4.68	4.8
21	500560	2150675	5048	1608	True	5.19	5.17
22	501165	2150903	4977	1795	True	5.8	4.54
23	503157	2150938	4968	2409	True	6.86	1.91
24	505100	2153312	4220	3017	True	6.69	4.76
25	500671	2155661	3473	1633	True	2.76	-12.04
26	503342	2156040	3358	2471	True	5.96	-1.38

Tabla 2. Se observa en las columnas DCol y DRow, el desplazamiento en X y Y, respectivamente, de cada uno de los puntos.

En las tablas 1 y 2 se observan, aparte de los desplazamientos existentes en cada uno de los mosaicos, los puntos inactivos en cada mosaico, los cuales presentaban el mayor desplazamiento en alguno de sus ejes.

CUADRO 9. ERROR MEDIO CUADRÁTICO

Transformación	Error Medio Cuadrático			
	Mosaico no controlado		Mosaico semicontrolado	
	pixeles	metros	pixeles	metros
Affine	17.133	49.0004	7.339	23.4848

Resolución Mosaico no controlado: 2.86 metros.

Resolución Mosaico semicontrolado: 3.20 metros.

La resolución de los mosaicos no es igual, debido principalmente a que, al estar en formato raster, si se alargan o estiran (caso del mosaico no controlado), ocuparán más pixeles, simulando que se tiene una mayor resolución, cuando en realidad se está distorsionando los mosaicos (Figura 26)

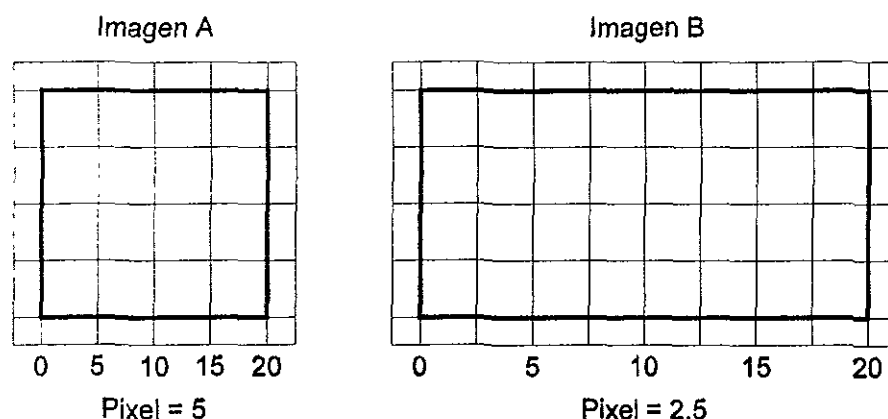


Figura 26. Al ser estirado, el cuadro de la izquierda es forzado a ocupar más pixeles, por lo que su resolución aparenta ser mayor.

En las tablas 1 y 2, se observan los desplazamientos que hay por eje en cada uno de los puntos, las cifras que aparecen en las columnas Drow y Dcol muestran en pixeles, la distancia a la que se encuentran los puntos de donde se deberían encontrar. Considerando que el origen es la esquina superior izquierda, si en Drow los valores son negativos, significa que el punto correcto se encuentra hacia el sur y viceversa. En el caso de la columna Dcol, si los valores son negativos, significa que el punto correcto se encuentra al este y viceversa. El Cuadro 9 muestra el Error Medio Cuadrático de cada mosaico, se puede apreciar en las figuras 1 y 2 que en cada mosaico se desactivó un punto, debido a presentaban valores extremos de desplazamiento (mosaico no controlado - punto 7, mosaico controlado - punto 8). Las cifras del Cuadro 9 fueron calculas sin considerar los puntos antes mencionados.

Con los datos contenidos en las columnas Drow y Dcol de las tablas 1 y 2, fué posible crear 4 mapas mediante la interpolación de los valores de desplazamiento en X y Y de cada punto (ver Figura 28), esto con la finalidad de poder observar de manera espacial el desplazamiento existente en los mosaicos; en estos mapas se muestra de manera gráfica el desplazamiento que tienen los puntos de cada mosaico en cada uno de sus ejes. Además, en cada uno de estos mapas se incluye un gráfico, en el cual están representadas las superficies por rango de desplazamiento que componen al mapa. Para la obtención de estos mapas, no fueron considerados los puntos con desplazamiento extremo antes mencionados.

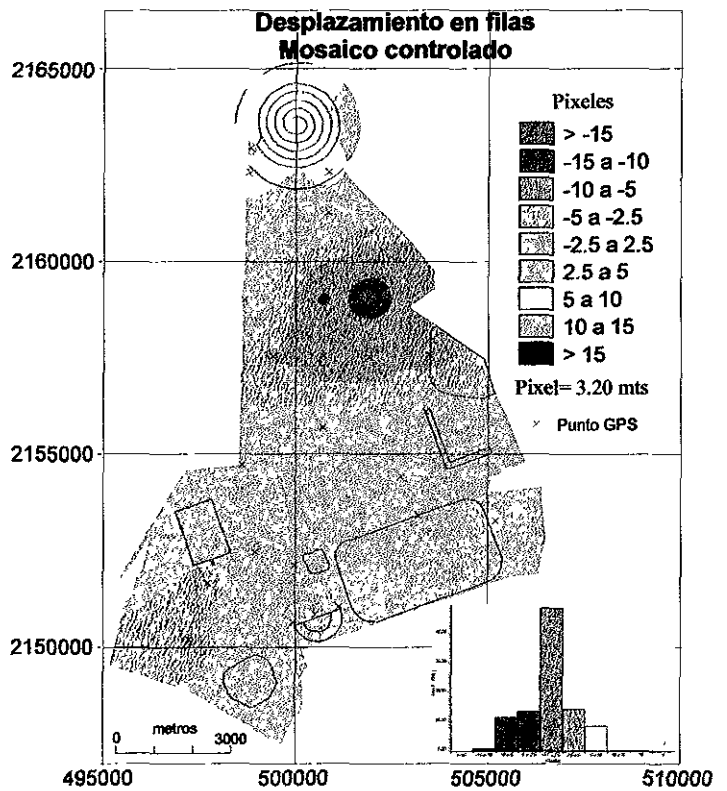
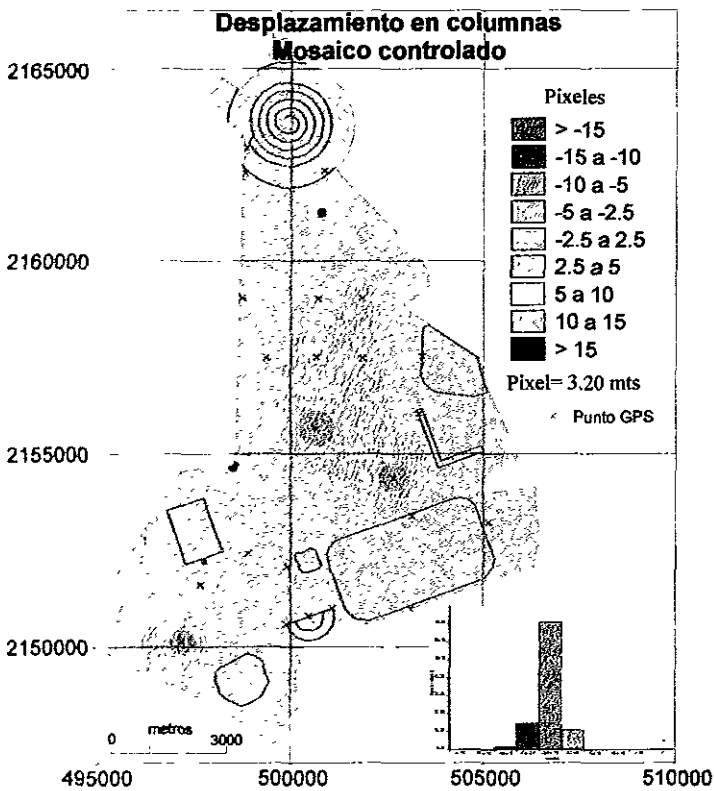
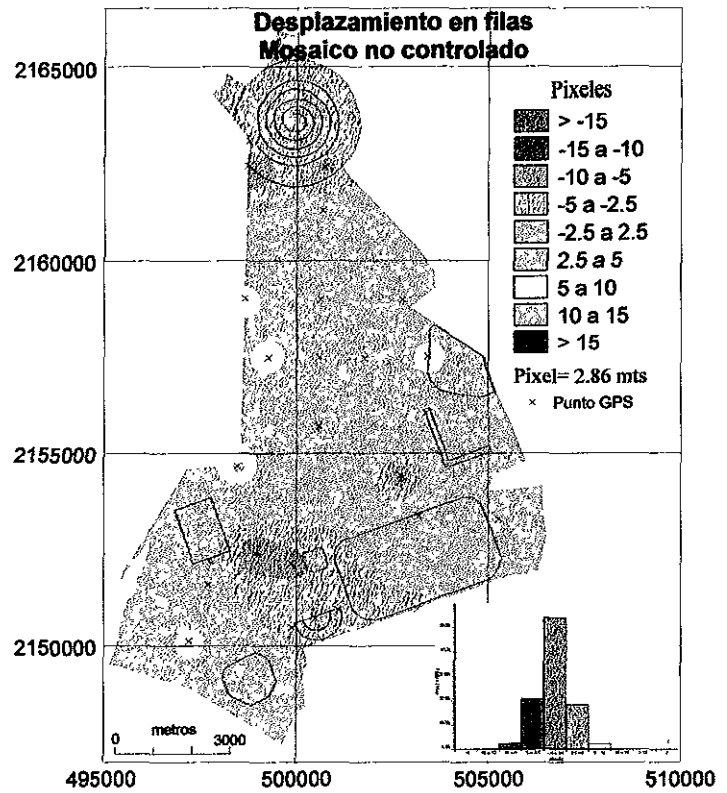
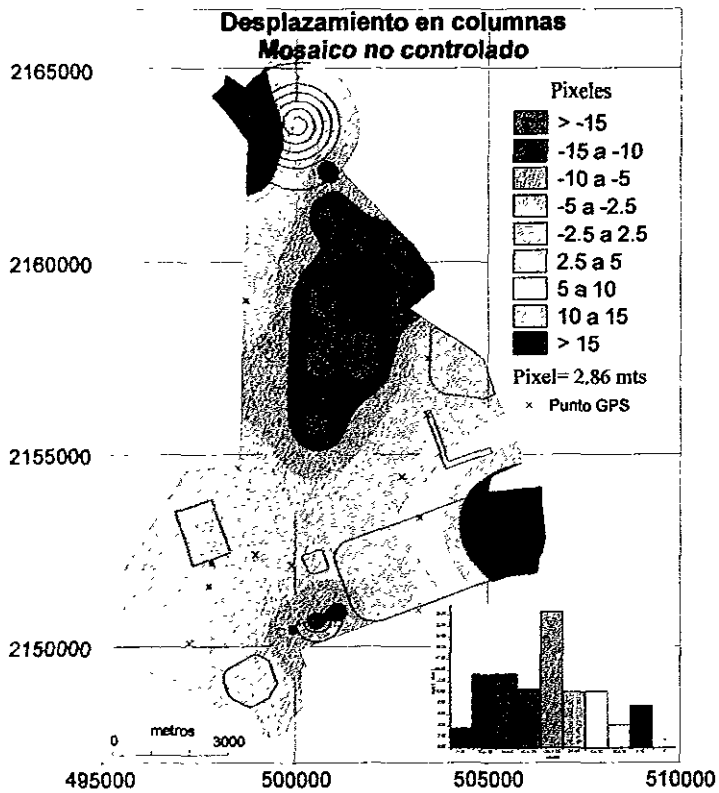
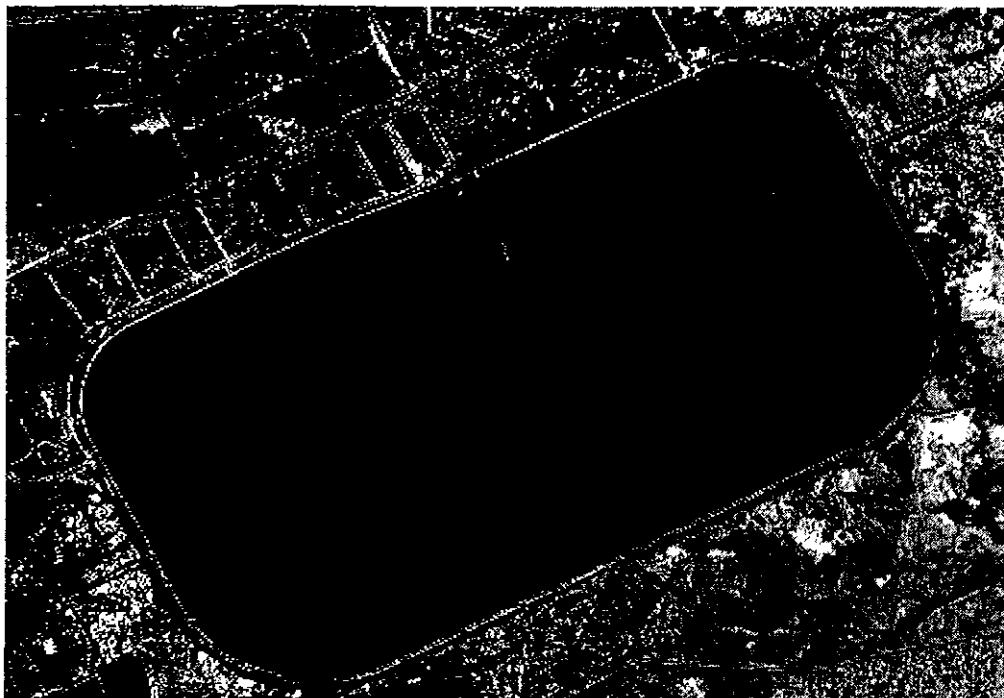
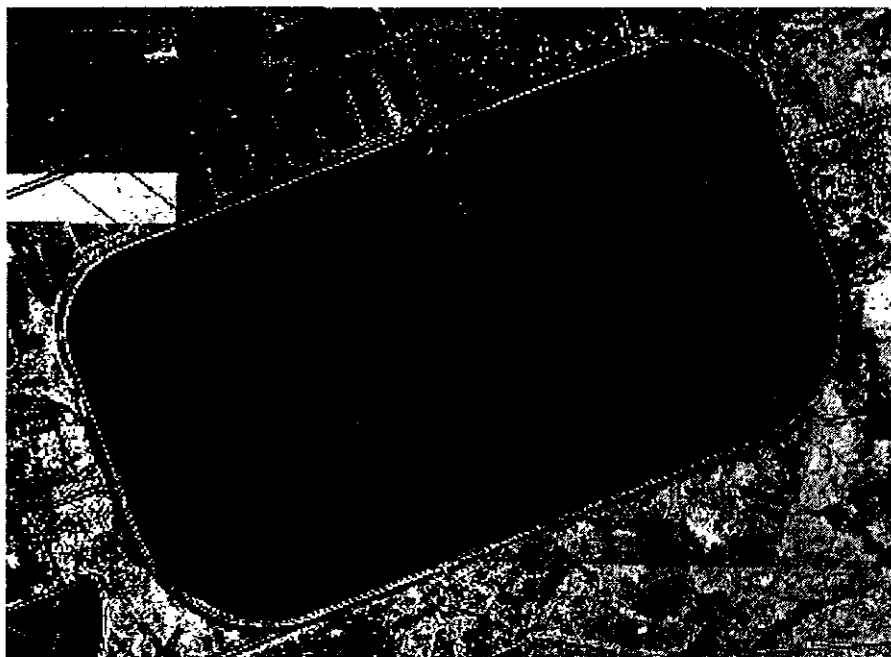


Fig. 27. Mapas de desplazamiento en los ejes X y Y de cada uno de los mosaicos contruidos, los puntos y valores utilizados de los mismos están referidos en las figuras 26 y 27. Para la construcción de estos mapas, NO se consideraron los puntos no activos de cada mosaico.

Fig. 28. Se aprecia la distorsión existente en el mosaico construido por sobreposición digital, en el cual los objetos aparecen alargados en el eje X.



Mosaico no controlado (construido por sobreposición digital)



Mosaico semicontrolado (construido con cartografía base)

Es importante considerar que, al obtener estos mapas por interpolación, se tiene gran incertidumbre en las áreas con desplazamiento calculado por interpolación, por lo que es necesario observar el valor de los puntos cercanos a determinadas áreas y además, referirse a las tablas correspondientes, para conocer los valores respectivos de cada punto.

Comparación de desplazamiento entre mosaicos

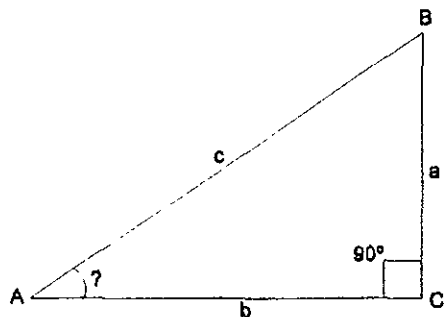
a) **Desplazamiento en columnas.** Se puede observar que el desplazamiento en columnas de los puntos del mosaico no controlado llega a ser en el extremo Este del mosaico de más de 15 píxeles (> 45 metros, y hasta 160 metros en el punto 25), lo cual explica que el lago Nabor Carrillo aparezca en este mosaico más alargado de lo que es en realidad (ver Figura 29). Este gran desplazamiento es debido principalmente a la acumulación de errores, es por esto que el mayor desplazamiento se encuentra en la parte opuesta al punto donde se inició el mosaico. También se aprecia en la parte central del mapa de desplazamiento de este mosaico, una zona con gran desplazamiento, la cual corresponde a la parte en donde se utilizó fotografía aérea convencional.

Es muy probable que este desplazamiento se deba a lo siguiente: en la construcción de este mosaico, las imágenes fueron manipuladas para ajustarlas hasta que los detalles del terreno que aparecen en los bordes de cada imagen coincidieran lo mejor posible con los detalles existentes en las imágenes adyacentes, sin tomar en cuenta la distorsión existente al interior de la imagen. En el caso de la utilización de las fotografías aéreas convencionales, 4 de estas sustituyeron a aproximadamente 11 fotografías aéreas digitales, debido a que cubría cada una de éstas un área mayor; de esta manera, el área al interior de estas fotografías tiene la distorsión original de las mismas, pudiendo al ser mayor esta área, provocar un mayor desplazamiento en los puntos; además de que estas fotografías convencionales cuentan con propiedades geométricas distintas a las de las fotografías digitales. En el caso del mapa de desplazamiento del mosaico semicontrolado, se puede observar que el desplazamiento en columnas existente en los puntos es muy bajo (de -2.5 a 2.5 píxeles, en la mayor parte del mapa), lo cual es debido principalmente a que en este caso, además de ajustar los bordes de las imágenes con los bordes de las adyacentes, se trató de ajustar en lo posible, los detalles existentes al interior de las imágenes con los detalles que aparecían en la cartografía base. Aún así, en este mosaico también se presenta el mayor desplazamiento en la porción en la cual fueron utilizadas fotografías aéreas convencionales (desplazamiento de -2.5 a -5 píxeles).

b) **Desplazamiento en filas.** En el caso del desplazamiento en filas de los mosaicos, se puede observar que en el mosaico no controlado existe un desplazamiento moderado (de -2.5 a 5 píxeles en aproximadamente el 85% del mosaico), lo cual indica que al hacer la construcción del mosaico, la acumulación de error es mucho menor, en comparación con el error acumulado en las columnas. La distorsión acumulada en el eje Y es media (de hasta ± 10 píxeles). Por parte del mosaico semicontrolado, se puede apreciar que el área con desplazamiento mínimo (de -2.5 a 2.5) es un poco menor que la del mosaico no controlado, esto se da principalmente en la mitad sur del mapa, y esto se da aquí debido principalmente, a que en esta parte se contaba con los suficientes rasgos del terreno, para poder hacer el mejor ajuste posible de las fotografías aéreas digitales sobre el fondo cartográfico; sin embargo, en la parte media de la mitad norte del mapa, se puede apreciar un punto con error extremo (> -15 píxeles), el cual es debido principalmente a dos razones: 1. Corresponde al área en la cual fueron utilizadas fotografías aéreas convencionales, las cuales cuentan con otra escala,

así como distintas características geométricas. 2. En esta área no existían rasgos cartográficos que se pudieran utilizar para el ajuste de las imágenes sobre el fondo cartográfico.

Con la finalidad de poder simplificar los resultados anteriormente explicados, se realizaron cálculos para obtener el desplazamiento total y el rumbo del mismo, de cada uno de los puntos utilizados en ambos mapas. Los resultados de estos cálculos fueron obtenidos mediante la aplicación del Teorema de Pitágoras para obtener el desplazamiento total, y se utilizó la función trigonométrica Tangente para obtener el rumbo (ver Figura 29).



En donde:

a= Drow b= Dcol A= Punto real B= Punto calculado
 c= Desplazamiento total
 ?= Rumbo

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$? = \tan^{-1} \frac{a}{b}$$

Figura 29. Cálculos realizados para la obtención del desplazamiento total y el rumbo del mismo.

Con los cálculos anteriores se obtuvieron los cuadros 10 y 11, en los cuales se puede apreciar el desplazamiento lineal en pixeles y metros, de cada punto calculado, y además, el rumbo del mismo por cada punto de los dos mosaicos. En los rectángulos se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos

CUADRO 10. MOSAICO NO CONTROLADO

Punto	X	Y	Row	Col	Active	Drow	Dcol	Total (Pix)	Total (metros)	Rumbo
1	498793	2182981	1145	858	True	-3.59	40.35	40.51	115.86	85° NE
2	498784	2182320	1355	872	True	-9.68	31.78	33.22	95.01	73° NE
3	500819	2182389	1284	1550	True	-6.84	-16.57	17.93	51.27	68° NW
4	500767	2181285	1643	1575	True	-1.41	-20.83	20.88	59.71	66° NW
5	498871	2159026	2488	957	True	8.33	14.4	16.64	47.58	60° SE
6	500728	2158972	2419	1655	True	1.33	-26.29	26.32	75.29	87° SW
7	501912	2158971	2372	2081	False					
8	502811	2158932	2348	2411	True	-3.97	-17.68	18.12	51.82	77° NW
9	499318	2157478	2983	1238	True	8.81	-2.62	9.19	26.29	17° SW
10	500681	2157473	2830	1704	True	6.01	-25.46	26.16	74.82	77° SW
11	501878	2157441	2895	2125	True	5.73	-34.34	34.81	99.57	81° SW
12	503390	2157510	2818	2705	True	9.42	7.4	11.98	34.26	38° SE
13	498498	2154888	3959	1078	True	13.99	9.14	16.71	47.79	33° SE
14	502714	2154380	3878	2595	True	-11.77	3.87	12.33	35.26	17° NE
15	498975	2152384	4696	1341	True	-12.42	0.71	12.44	35.58	3° NE
16	503158	2153372	4212	2806	True	1.83	12.02	12.16	34.77	82° SE
17	497735	2151577	5018	943	True	-1.44	12.47	12.55	35.90	83° NE
18	499912	2162101	4752	1685	True	-9.33	-2.12	9.57	27.38	13° NW
19	497240	2150144	5532	828	True	10.43	12.53	16.30	46.63	50° SE
20	499955	2150441	5316	1762	True	-2.42	-12.49	12.72	36.39	79° NW
21	500560	2150875	5214	1967	True	-2.87	-13.91	14.16	40.51	79° NW
22	501185	2150903	5113	2172	True	-3.93	-15.6	16.09	46.01	78° NW
23	503157	2150938	5028	2901	True	-3.44	1.84	3.90	11.16	28° NE
24	500671	2155681	3529	1778	True	-5.25	-26.45	26.97	77.12	79° NW
25	505100	2153312	4182	3548	True	5.44	56.24	56.50	161.60	84° SE
26	503342	2156040	3312	2756	True	6.82	11.84	13.66	39.08	60° SE
Promedio								19.67	56.27	

CUADRO 11. MOSAICO SEMICONTROLADO

Punto	X	Y	Row	Col	Active	Drow	Dcol	Total (Plx)	Total (metros)	Rumbo
1	498793	2162961	1179	1078	True	12.16	2.77	12.47	35.67	13° SE
2	498784	2162320	1378	1073	True	8.98	1.56	9.11	28.07	10° SE
3	500819	2162369	1365	1706	True	10.44	4.8	11.41	32.63	24° SE
4	500787	2161265	1704	1690	True	1.25	6.43	6.55	18.73	79° SE
5	498671	2159026	2414	1030	True	6.09	-1.28	6.22	17.80	12° SW
6	500728	2158972	2413	1666	True	-12.96	-1.89	13.10	37.46	8° NW
7	501912	2158971	2405	2030	True	-21.85	-4.37	22.26	63.73	11° NW
8	502811	2158932	2413	2314	False					
9	499316	2157478	2890	1227	True	-6.48	-1.49	6.65	19.02	13° NW
10	500681	2157473	2888	1646	True	-10.73	-4.98	11.83	33.83	25° NW
11	501878	2157441	2900	2015	True	-9.41	-6.44	11.40	32.61	34° NW
12	503390	2157510	2880	2494	True	-9.39	4.45	9.50	27.16	28° NE
13	498498	2154688	3780	978	True	3.3	7.1	7.83	22.39	65° SE
14	502714	2154380	3878	2264	True	2.71	-11.39	11.71	33.48	77° SW
15	498975	2152364	4508	1117	True	-1.31	2.11	2.48	7.10	72° NE
16	503158	2153372	4194	2411	True	0.56	-0.23	0.61	1.73	22° SW
17	497735	2151577	4751	731	True	-5.93	1.16	6.04	17.28	11° NE
18	499912	2152101	4593	1408	True	0.28	3.5	3.51	10.04	85° SE
19	497240	2150144	5202	565	True	-6.66	-9.38	11.49	32.85	55° NW
20	499955	2150441	5121	1420	True	4.68	4.8	6.70	19.17	46° SE
21	500560	2150675	5048	1608	True	5.19	5.17	7.33	20.95	45° SE
22	501165	2150903	4977	1795	True	5.8	4.54	7.37	21.07	38° SE
23	503157	2150938	4968	2409	True	6.86	1.91	7.12	20.37	16° SE
24	500671	2155661	3473	1633	True	2.76	-12.04	12.35	35.33	77° SW
25	505100	2153312	4220	3017	True	6.69	4.76	8.21	23.48	35° SE
26	503342	2156040	3358	2471	True	5.98	-1.38	6.14	17.55	13° SW
Promedio								8.78	25.10	

Con lo anterior se comprobó que el mosaico construido por sobreposición digital, tiene más distorsión que el mosaico construido con cartografía base.

Al ser necesario manipular más las imágenes en el mosaico no controlado, debido a la acumulación de errores en el montaje de éstas, fue necesario invertir más tiempo en su construcción (28 horas), lo cual es un incremento del 40% con respecto al tiempo empleado para la construcción del mosaico semicontrolado (20 horas), aspecto muy importante, si se requiere del mosaico para actividades como evaluación de daños, construcción de planes de evacuación, entre otros, en los que un par de horas más podrían significar la diferencia.

Las distorsiones y errores contenidos en los mosaicos, no solo se deben a su construcción, sino también a otras condiciones, entre las cuales cabe mencionar las siguientes fuentes de error:

- En la construcción se puede incurrir en errores como la acumulación de desplazamientos, como es el caso del mosaico no controlado, en donde se llegan a tener desplazamientos de hasta 160 metros. Otro de los errores que se pueden producir en esta etapa es que, si existen elevaciones en el terreno, al no estar corregidas geoméricamente las imágenes, los desplazamientos que produce el relieve son de consideración.
- La utilización de Fotografías Aéreas Convencionales para compensar la falta de Fotografías Aéreas Digitales, da origen a un error, al tener las primeras, características geométricas diferentes a las de las segundas, ya que fueron adquiridas utilizando sistemas ópticos distintos, fueron obtenidas con película fotográfica la cual puede no haberse ajustado de manera adecuada al plano de imagen de la cámara, y además, fueron *barridas* para poder ser utilizadas en la construcción de los mosaicos, lo cual introduce a su vez, error en los archivos de las fotografías aéreas convencionales, ya que al ser

barridas las fotos y ser más grandes que el plano del barredor , éstas no ajustaron apropiadamente en el plano del barredor (foto = 23 cm / plano del barredor = 21.5 cm).

- La cartografía utilizada, en el caso del mosaico semicontrolado, para la colocación de las imágenes, fue a escala 1: 50,000, editada por el INEGI, pero en esta cartografía existe una incertidumbre de alrededor de 25 metros (López Blanco, com. per.), los que hace que, al ajustar las imágenes a los rasgos que aparecen en ésta, tengan similar error al que contiene dicha cartografía.
- Por su antigüedad y uso extensivo, las cartas utilizadas estaban maltratadas, y en los centros de venta de INEGI, la edición de estas cartas está agotada, por lo que no fue posible conseguir cartografía en mejor estado. Debido a las características antes mencionadas de la cartografía, en el momento de ser *barridas*, no se logró eliminar por completo las ondulaciones que presentaban las cartas, lo que provoca una distorsión en el archivo resultante, la cual se calcula de alrededor de 10 metros; ésta se obtuvo georrefiriendo la imagen obtenida por el *barrido* de las cartas. Además, como se mencionó anteriormente, la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco coincide con la intersección de 4 cartas a escala 1: 50,000, por los que para poder obtener el mapa base de la Zona Federal completa, fué necesario armar un mosaico con las cuatro secciones correspondientes de las cuatro cartas, tarea que fue difícil, debido a que tres de las cuatro cartas eran ediciones de distintos años, y los detalles que podían ser utilizados para mejorar la unión entre cartas, eran representados con distinta simbología, y en algunos casos, los detalles de una carta no existían en la carta adyacente.
- A pesar de que el levantamiento de puntos GPS se hizo de modo diferencial, existe una incertidumbre de entre 3 y 10 metros en cada punto (Garmin, 1993), y quizá más. Esto es debido a la precisión alcanzada por los receptores GPS, los cuales, por sus características, no tiene la capacidad de generar lecturas con mejor precisión.
- La ubicación de los puntos GPS tiene una certidumbre de alrededor de 3 metros, esto es debido a que, independientemente de que se hagan acercamientos para lograr la colocación de los puntos de manera precisa, si el rasgo de referencia aparece entre dos pixeles, el punto es colocado por el sistema en el centro de uno de los dos pixeles, quedando desplazado de su ubicación original (ver Figura 30)

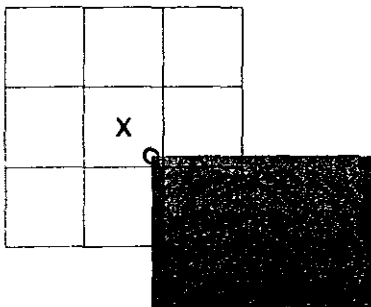


Figura 30. En este ejemplo, la esquina superior izquierda del rectángulo gris es considerada un rasgo en el terreno (o), que sirve para localizar un punto GPS, sin embargo, el sistema adjudica las coordenadas al centro del píxel más cercano (x).

- Los valores presentes en el espacio existente entre los puntos GPS, son obtenidos por interpolación, sin embargo, éstos no son lo suficientemente confiables, debido a que se requiere de una mayor densidad de puntos para poder ser más confiables. Además, es necesario contar con más puntos GPS y no ser considerados en la interpolación, con el fin de poder ser utilizados posteriormente en la comprobación de los valores obtenidos por la misma.

Como se puede ver, existen múltiples diferencias entre los dos mosaicos construidos, lo cual puede verse claramente en el Cuadro 12.

CUADRO 12. COMPARACIÓN DE MOSAICOS

	Mosaico no controlado	Mosaico semicontrolado
Tiempo de elaboración	28 hrs.	20 hrs.
Error Medio Cuadrático	17.1 pixeles 49.0 metros	7.3 pixeles 23.5 metros
¿Se tiene control de la distorsión al interior de las imágenes?	No	Sí
¿Se controla el desplazamiento en la colocación de las imágenes?	No	Sí
En el momento de la construcción, ¿se obtiene la orientación del mosaico?	No	Sí

Los costos involucrados en la obtención de las imágenes y la construcción de estos mosaicos son los siguientes:

CUADRO 13. COSTOS DE LOS MOSAICOS

Concepto	Costo
Equipo de cómputo	\$ 17 000
Hora de vuelo = \$ 6 000	\$ 6 000 x 2 horas = \$ 12 000
Discos ópticos para almacenamiento de la información (2)	\$25 x 2 = \$ 50
Tiempo invertido:	
Mosaico no controlado	20 horas = \$ 4 000
Mosaico semicontrolado	28 horas = \$ 5 600
hora = \$ 200	
Subtotal (sin cámara digital)	\$ 38 650
Cámara digital DCS420	\$100 000
Total (con cámara digital)	\$ 138 650

Se puede observar que, una vez contando con la cámara digital, el costo del vuelo es el mayor precio a cubrir, pero aún con la cámara, resulta mucho más económico que un levantamiento aerofotográfico con cámaras y película convencionales.

Con la finalidad de poder apreciar las dimensiones del desplazamiento en los mosaicos impresos, las cifras del Error Medio Cuadrático, equivalentes a medidas en los mosaicos impresos, son presentadas en el Cuadro 14.

CUADRO 14. EQUIVALENTE DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO EN LOS MOSAICOS IMPRESOS

Escala de la impresión	Mosaico	Sigma	Equivalente en la impresión
1:50,000	No controlado	50 m.	1 mm
1:50 000	Semicontrolado	23.5 m.	0.47 mm
1:20 000	No controlado	50 m.	2.5 mm
1:20 000	Semicontrolado	23.5 m.	1.18 mm

El conocer el error presente en los mosaicos representa una gran ventaja sobre otras fuentes de información cartográfica producidas por otras dependencias, las cuales no indican la inexactitud en sus productos, lo que hace a estas imágenes y métodos una herramienta alternativa con alto potencial para muchas aplicaciones.

Finalmente, se presenta el Cuadro 15, en el cual están indicadas las analogías entre la fotografía aérea convencional y la fotografía aérea digital, con las cuales se pueden apreciar claramente, las ventajas de una sobre la otra.

CUADRO 15. COMPARACIÓN ENTRE FOTOGRAFÍA CONVENCIONAL Y FOTOGRAFÍA DIGITAL

Característica	Fotografía convencional	Fotografía digital
Captura de información	Emulsión en película fotográfica	Fotosensores en dispositivos de estado sólido CCDs
Almacenamiento de información	Película fotográfica	Medios magnéticos, ópticos o de estado sólido (RAM)
Manipulación de información	Procesamiento químico y óptico	Procesamiento digital
Transmisión de información	Correo, servicios de mensajería, fax	Líneas telefónicas (módem), redes computacionales, telecomunicaciones
Impresión de la información	Impresiones fotográficas	Impresiones termales, de inyección de tinta, láser, y electrofotográficas

Fuente: Basado en Lillesand (1994)

CONCLUSIONES

Los resultados anteriormente expuestos, indican que las Fotografías Aéreas Digitales pueden ser consideradas como una herramienta efectiva para la actualización cartográfica, principalmente a escalas grandes y medias (con resoluciones que van de 15 cm a 5 metros por pixel, dependiendo de la altura de vuelo y el sistema sensor-óptico utilizado, principalmente).

En este caso de estudio, hubo condiciones idóneas para la realización de los mosaicos, como es el desnivel existente en la zona (5 m.), por lo cual se puede considerar como una zona llana, siendo la distorsión inducida por el relieve prácticamente nula.

Las condiciones tanto para la obtención de puntos de control, como para calcular la precisión de los mosaicos, no fueron las más convenientes; la primera, porque no se contó con los suficientes rasgos, tanto en el terreno como en la cartografía existente, como para poder obtener puntos suficientes para cubrir de manera adecuada el área abarcada por los mosaicos ($\pm 200 \text{ Km}^2$), por lo que se dejaron áreas sin cubrimiento; así como la precisión alcanzada por los receptores GPS utilizados, la cual no permitió calcular con mayor exactitud los desplazamientos existentes en los mosaicos.

La segunda condición adversa fue que, para la construcción del mosaico semicontrolado, las condiciones y antigüedad de la cartografía, hicieron que su construcción no fuera lo suficientemente precisa como se hubiera deseado, esto es debido por una parte, a la distinta antigüedad de las cartas, lo cual introdujo cierto error en la construcción del mosaico, además de que, al estar maltratadas, al ser *barridas*, se generó el fondo cartográfico con un cierto error, el cual fué heredado al mosaico resultante, construido en base a los rasgos existentes en la cartografía. Además, al no contarse con cartografía a escala grande lo suficientemente actual, fué necesario utilizar cartografía 1:50 000, la cual no se considera como óptima para la resolución con la que cuentan los mosaicos. En un caso más favorable, la cartografía a utilizar para la construcción de mosaicos con imágenes de esta resolución, debe de ser aproximadamente de entre 1:10 000 y 1:20 000.

Por lo anterior, se puede decir que, en condiciones más favorables, el mosaico semicontrolado debe de tener un error medio cuadrático mucho menor al que presenta en este caso, con respecto al mosaico no controlado.

Se ha demostrado que el método de construcción del mosaico con cartografía base, tiene cualidades superiores a las del mosaico construido solo por sobreposición digital de las imágenes, por lo que, en el caso de contar con cartografía adecuada, es recomendable construir el mosaico utilizando dicha cartografía. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, en México existen grandes zonas, de las cuales no existe cartografía con las características adecuadas (actualidad, escala, etc.), para ser utilizada para la construcción de un mosaico semicontrolado, por lo que la finalidad del mosaico podría ser para crear cartografía inédita; siendo una buena alternativa para estos casos la construcción del mosaico no controlado.

Con los valores contenidos en el Cuadro 14, se puede observar que la precisión obtenida con los mosaicos, es suficiente para aplicaciones en las que no se requieran de medidas de gran exactitud, a escalas medias (1:50 000, 1:20 000 y hasta 1:10 000). Estas aplicaciones incluyen, entre otras, la

evaluación de daños, planeación y seguimiento de obras, actualización cartográfica, así como estudios de ciencias de la Tierra (geomorfológicos, geológicos, ambientales, etc.)

Observando los aciertos e inconvenientes encontrados en la construcción de estos mosaicos, se puede decir que estos métodos de actualización cartográfica serán totalmente efectivos en casos en los que se cuente con características ideales para la construcción de los mismos, como las que se encuentran en la mayoría de las zonas urbanas o suburbanas (escaso desnivel del terreno, gran cantidad de rasgos identificables tanto en las imágenes obtenidas como en el terreno, existencia de cartografía, etc.), pero aún si no se cuenta con estas condiciones, se pueden obtener productos con una precisión de calidad conocida, como lo muestra el mosaico no controlado, lo cual representa una ventaja sobre la cartografía producida por compañías o dependencias, en la cual, regularmente, no se incluye la exactitud alcanzada en la elaboración de la misma.

Algunas de las principales ventajas de estos nuevos métodos se derivan de sus características (Cuadro 15), y son: la adquisición de imágenes en tiempo casi real, que al estar en formato digital, permiten que puedan ser procesadas y utilizadas para la construcción de un mosaico en solo horas, después de su adquisición. Los bajos costos invertidos en su adquisición y construcción, permiten que estén al alcance de muchos grupos con presupuesto limitado. Los productos obtenidos están totalmente en formato digital, por los que se pueden hacer las impresiones necesarias de los mosaicos, sin necesidad de estar construyendo una y otra vez, las copias requeridas. Además, son totalmente compatibles con sistemas de información geográfica, programas de diseño asistido por computadora (CAD) aplicados a la producción de cartografía (cartografía automatizada), programas de procesamiento de imágenes digitales, y en general, gran parte de las herramientas que se están utilizando actualmente para estudios multidisciplinarios.

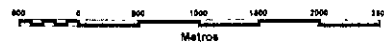
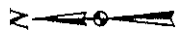
Entre las principales limitantes de estos métodos se encuentran: la necesidad de contar con un equipo de cómputo relativamente poderoso, para poder realizar la construcción de los mosaicos en el menor tiempo posible; la relativa baja resolución de las imágenes obtenidas, con respecto a las fotografías aéreas convencionales, la cual está en función de la resolución del CCD, esta desventaja disminuye día a día, al desarrollarse CCDs con mayor resolución, llegando a ser en la actualidad, comparables a la de la película fotográfica de 35mm. La construcción de este tipo de mosaicos de alta resolución requiere de grandes capacidades de almacenamiento y transferencia, las cuales están siendo satisfechas con la creación de discos duros de varios gigabytes, la utilización de soportes ópticos (CD) y la creación de dispositivos para el respaldo y manejo de grandes volúmenes de información (*Zip, Jazz, cintas DAT, SeaQuest, etc.*).

Además, estas imágenes pueden ser utilizadas para múltiples aplicaciones, aparte de la actualización cartográfica, como en el caso de las disciplinas que hacen uso de la fotointerpretación, o aquellas que aprovechan sus características métricas para obtener productos como MDTs por medio de correlación automática, o para obtener puntos por aerotriangulación, entre otros.

Como se mencionó anteriormente, la construcción de mosaicos es un compromiso entre economía y precisión, en un ambiente en el cual no existe cartografía detallada actualizada, y en el cual, aún cuando no se invierta una gran cantidad de recursos, se pueden obtener precisiones satisfactorias para una gran cantidad de aplicaciones.

Estas herramientas han llamado la atención de múltiples grupos en México (dependencias gubernamentales, grupos académicos, compañías particulares), los cuales empiezan a ver el gran potencial que tienen, por lo que se vislumbra para el futuro un acelerado desarrollo de las mismas, los sistemas afines y sus aplicaciones.

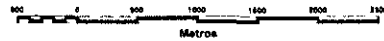
ANEXO



**MOSAICO DIGITAL SEMICONTROLADO
ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO**
(Fotografía Aérea Digital, Diciembre 1996)

Elaborado por:

José Antonio Navarrete Pacheco



**MOSAICO DIGITAL NO CONTROLADO
ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO**
(Fotografía Aérea Digital, Diciembre 1986)

Elaborado por:
José Antonio Navarrete Pacheco
Para la:
GERENCIA REGIONAL DE AGUAS
DEL VALLE DE MEXICO

SIMBOLOGIA	
	Autopista Peñon - Texcoco
	Caminos Principales
	Límite Zona Federal

BIBLIOGRAFÍA

- ☞ Acevedo, P. (1997). "Descripción de Erupciones Volcánicas Mediante Percepción Remota Satelital AVHRR-NOAA". Boletín SELPER-México, 42 :26-35
- ☞ Adobe Systems (1995). "Adobe Photoshop", archivo de ayuda del programa.
- ☞ Ambrosini, I. (1997). "Monitoring Diseases of Chestnut Stands by Small Format Aerial Photography". Geocarto International. Vol. 12 No. 3. pp. 41-46
- ☞ Bonifaz, R., Macías, L. (1996). "Análisis del NDVI a lo Largo del Período Febrero-Septiembre de 1996 en la Selva Maya, con Imágenes AVHRR". VII Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Chatterjee, R., Bannerjee, D., Jibanananda, R., Bhattacharya, A. (1994) "Landsat TM Data Processing Techniques for Identifying and Delineating Environmental Impacts of Coal Mining". ITC Journal, 2 :155-161
- ☞ Chen, W., Mausel, P. (1995). "Discrimination of Urban/Suburban Features Using Computer Analyzed Digital Camera Data". 15th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in Resource Assessment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 288-295
- ☞ Chuvieco, Emilio. (1990). "Fundamentos de Teledetección Espacial". Ed. Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España. 1990. pp. 25-28, 98-103.
- ☞ Corel Corporation (1994). "Corel Draw! 5.0", archivo de ayuda del programa.
- ☞ Coe, J., Glancy, P., Whitney, J. (1997). "Volumetric Analysis and Hydrologic Characterization of a Modern Debris Flow Near Yucca Mountain, Nevada". Elsevier, Geomorphology. Vol. 20, Nos. 1-2. pp. 11-28
- ☞ Cortés, Alfredo. (1996). "Avances en la Generación Automática de Mosaicos de Imágenes Videográficas". 7^a Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Cruickshank G., Gerardo. (1995). "Proyecto Lago de Texcoco" Rescate Hidroecológico. Comisión Nacional del Agua, México.
- ☞ Dewhurst S. and Meisner D. (1988). "Real-Time Integration of LORAN Locational Coordinates with Airborne Video Data". First Workshop on Videography. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 78-80
- ☞ Edwards, G. (1985). "Spectral Sliced Video for the Detection of Stress and Disease". Tenth Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Ann Arbor, Michigan. pp. 81-85

- ☞ Eggen, S., Jacobs D., Flores A. (1993). "Acquisition of Airborne Videography of Mexico for Verification of FAO Forest Resources Assessment Landsat Interpretations". 14th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography for Resource Monitoring. ASPRS. Logan, Utah. pp. 135-142

- ☞ Everitt, J.H., Gerbermann, A., Escobar, D. (1987). "Detecting Saline Soils with Video Imagery". Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography In the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 318

- ☞ Everitt, J.H. (1988). "Introduction to Videography: Historical Overview, Relation to Remote Sensing, Advantages, Disadvantages". First Workshop on Videography. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp.1-4

- ☞ Everitt, J., Escobar, D., Judd, F., Davis, M. (1992). "Evaluation of SPOT Satellite and Airborne Video Imagery for Distinguishing Black Mangrove". Thirteenth Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences and Related Fields. Orlando, Florida, USA. pp. 169-172

- ☞ Everitt, J.H. and Escobar, D.E. (1992). "Airborne video systems for real-time assessment of rangelands". Geocarto International, Hong Kong.

- ☞ Faig, W and Shih T. (1988). "An Investigation into the Metric Characteristics for a Video-based Image Processing System". First Workshop on Videography. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 111-112

- ☞ Falkner, Edgar. (1995) "Aerial Mapping, methods and applications". Ed. LEWIS. Boca Raton, Florida, USA. pp. 207-209

- ☞ Fouché, P., Booyesen, N. (1989). "Remotely Piloted Aircraft for low Altitude Aerial Surveillance in Agriculture". 12th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography, ASPRS. Sparks, Nevada. pp. 277-284

- ☞ Garmin (1993). "Owner's Manual" Manual del usuario del receptor GPS SRVY II. GARMIN, Lenexa, KS, USA. p. 1-4

- ☞ Garmin (1993). "User's Manual" Manual del usuario del programa PC100S2, del receptor GPS SRVY II. GARMIN, Lenexa, KS, USA. pp. 8-1 a 8-3

- ☞ Gausman, H. (1987). "Photographic and Video Dramas of Remote Sensing With Plants as Thespians". 11th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography, ASPRS. Weslaco, Texas. pp.10-13

- ☞ Gerbermann, A., Wiegand, C., Richardson, A., Rodríguez, R. (1987), "Diurnal Soil Reflectance in the 450- to 2150- nm Interval as Related to Photographic and Video Sensing". Eleventh Biennial

Workshop on Color Aerial Photography and Videography In the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 188-189

- ☞ Glushko, E., Tikunov, V. (1994). "Aerial and Space Survey Methods for Mapping of Ecological Disaster Regions in C.I.S. (Former USSR)". *Geocarto International*. Vol. 9. No. 4. pp. 71-80.
- ☞ Gonca, H. (1995). "Landsat TM Monitoring of Turbid Water Quality in the Strait of Stanbul (Bosphorus) and the Golden Horn". *ITC Journal*, 1 :38-41
- ☞ Greene, H. Roger. (1988). "Application of a High Resolution Video Image System to the Updating of Digital Cartographic Databases". *First Workshop on Videography*. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 136-140
- ☞ Greenfield, P., Maus, P. (1997). "The Use of Color Infrared Digital Imagery for Burned Area Emergency Rehabilitation". *16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment*. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 7-15
- ☞ Haack, B., Jampoler, S. (1994). "Agricultural Classification Comparisons Using Landsat Thematic Mapper Data". *ITC Journal*, 2 :113-118
- ☞ Ibañez, G., Salinas G., Lund, M., Maldonado, F. (1998). "Análisis de Áreas Salinizadas del Valle de Tulum, Mediante el Uso de Imágenes Landsat TM". *Boletín SELPER-México*, 44 :15-27
- ☞ ITC (1997). "ILWIS 2.1, User's Guide". Manual del usuario del programa. Eschede, The Netherlands. pp. 67,217,223.
- ☞ ITC (1998), "ILWIS 2.1" archivo de ayuda del programa.
- ☞ Jiongxin, Xu. (1997), "Study of Sedimentation Zones in a Large Sand-bed Brained River: An Example from The Hanjiang River in China". *Elsevier, Geomorphology*. Vol. 21, No. 2. pp. 153-162
- ☞ JVC, (1996). Manual de Instrucciones de la cámara de video digital GR-DV1. Japón. pp. 6-8, 70-72
- ☞ Khasilwa, W. (1993). "Operational Aplication of Satellite Remote Sensing in an Early Warning System in East African Countries". *ITC Journal*, 3 :261-274
- ☞ Kettler, D., Escobar, D. (1992). "Insights Into Interpretability Differences Between Color Infrared Photography and Color Infrared Video Data". *13th Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences and Related Fields*. ASPRS. Orlando, Florida. USA. pp. 199-202
- ☞ King, D.J., Vleck, J., Yuan, X. (1987). "A 4-Camera Video Sensor: Its Performance and Applications with Special Regards to Forestry". *Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography In the Plant Sciences and Related Fields*. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 291-292

- ☐ King, D.J., Walsh, P., Ciuffreda, F. (1992). "Elevation Determination Using Airborne Digital Frame Camera Imagery". 13th Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences and Related Fields. Orlando, Florida. USA. pp. 147-156
- ☐ King, D.J. (1993). "Digital Frame Cameras: The Next Generations of Low Cost Remote Sensors". 14th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography for Resource Monitoring. ASPRS. Logan, Utah. pp. 19-26
- ☐ King, D.J. (1995). "Comparison of Elevation Modelling Using Scanned Air Photos and Airborne Digital Camera Imagery: A Case Study in Natural Terrain". 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 280-287
- ☐ Klimavicz, J., Baker, J. (1988). "Geometric Modeling of Conventional Video Imagery". First Workshop on Videography. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 115-124
- ☐ Lévesque, J., King D.J. (1995). "The Use of Airborne Digital Camera Image Semivariance in the Evaluation of Forest Damage at an Acid Mine Site". 15th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in Resource Assessment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 270-278
- ☐ Lillesand, Thomas. (1994) "Remote Sensing and Image Interpretation". Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 114, 120
- ☐ López Blanco, Jorge. (1992). "Procesamiento de Imágenes Multitemporales de Video Obtenidas desde un Globo Aerostático para la Evaluación de la Erosión en Cárcavas". Boletín SELPER-México, 24: 5-24
- ☐ López Blanco, Jorge. (1993). "Determinación de la Distorsión en Imágenes de Video Causada por el Sistema Óptico de la Cámara: Un Paso Previo a la Corrección Geométrica". Reunión Conjunta SELPER-AMESIGE, Resúmenes. Cuernavaca, Morelos.
- ☐ López Blanco, Jorge. (1994). "Imágenes Digitales de Video en Evaluación del Terreno". Boletín SELPER-México, 24: 5-26
- ☐ López Blanco, Jorge. (1995). "Imágenes Digitales en Video en Evaluaciones del terreno" en el VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Memorias. p. 147
- ☐ López Blanco, Jorge. (1996). "Teledetección Videográfica para la Obtención de Información Detallada del Medio Ambiente". 7^a Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☐ López, J., Sorani, V., Peralta, A. (1997). "Fotografías Aéreas Digitales y Videografía, una nueva alternativa para la evaluación de recursos naturales", VIII Reunión Nacional Selper-México, sep. 25-26, Michoacán, México. Resúmenes.

- ☐ Lulla, K., Mausel, P., Skelton, D., Kramber, W. (1987). "An Evaluation of Video-Band Based Vegetation and Indices". Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography In the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 270-271
- ☐ Luján, Concepción A. (1991). "Fotogrametría, principios básicos". Ed. Colección Textos Universitarios, Universidad Autónoma de Chihuahua. pp. 125-132
- ☐ Makhanya, E. (1993). "The Use of SPOT Images for Mapping Rural Settlements and Land Degradation in the Less Developed Areas of South África". ITC Journal, 3 :276-280
- ☐ Mao, C., Kettler, D. (1995). "Digital CCD Cameras for Airborne Remote Sensing". 15th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in Resource Assessment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 1-11
- ☐ Mason, S., Rüther H., Smit J. (1997). "Investigation of the Kodak DCS460 Digital Camera for Small-area Mapping". Elsevier, Photogrammetry & Remote Sensing. ISPRS. Vol. 52, No. 5 pp. 202-214
- ☐ Mausel, P., Wilson, J., Venungopal, G. (1997). "The Use of High Spatial Resolution Multispectral Digital Camera Data in Soil Applications". 16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 245-258
- ☐ Mausel, P., Diaz, N., Wiseman, D. (1997). "Deteremination of Optimal Spatial Resolution for Selected Soil Applications Using Multispectral Digital Camera Data". 16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 260-274
- ☐ Meisner, Douglas E. (1985). "Fundamentals of Airborne Video Remote Sensing". Tenth Biennial Workshop on Color Aerial Photography in the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Ann Arbor, Michigan. pp. 55-71
- ☐ Myhre, R., Munson, A., Meisner, D., Dewhurst, S. (1987). "Assesment of a Color-Infrared Aerial Video System for Forest Insect Detection and Evaluation". Eleventh Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography In the Plant Sciences and Related Fields. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 244-246
- ☐ Neale, C., Kuiper, J., Tabet, K. (1993), "Image Enhancement and Processing Automation Routines for Digital Multispectral Video Imagery". 14th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography for Resource Monitoring. ASPRS. Logan, Utah. pp. 29-35
- ☐ Neale, C. M. U., Vest K., O'Neill M. (1995). "Monitoring Streambank erosion Using Multispectral Video Imagery in a GIS". 15th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in Resource Assessment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 210-222

- ☞ Omer, J. (1997). "Digital Infrared Camera Used for Damage Detection of Eastern Forests". 16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 17-19
- ☞ Padilla, A., Sorani, V., Gaviño, J., Gómez, G. (1996) "Medición de Temperatura Superficial del Mar al Sur del Golfo de México con Imágenes AVHRR". VII Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Palacio, J., López, J. (1994). "Using Video Imagery for Gully Erosion Evaluation". Zeitschrift für Geomorphologie N. F.. Stuttgart. 38 :33-43
- ☞ Palacio, J. (1995). "Videografía: fundamentos y aplicaciones". Instituto de Geografía, UNAM. México. pp. 2-10.
- ☞ Palacio, J., Garrido, A., Hernández, J., Ortiz, M. (1996). "Efectos del huracán Roxanne en la Geomorfología costera del Estado de Campeche". IV Reunión Nacional de Geomorfología, Sociedad Mexicana de Geomorfología, resúmenes, p. 61.
- ☞ Palacio, J. (1997). "Anexo Términos de Referencia" correspondiente al documento ESTUDIO VIDEOGRÁFICO DE LA ZONA FEDERAL DEL EX-LAGO DE TEXCOCO, UNAM-CNA, México.
- ☞ Palacio, J. (1997). "El Uso de Imágenes de Video como Herramienta Potencial para la Actualización de Cartografía Urbana". Boletín SELPER-México, 43 :22-27.
- ☞ Palacio Prieto, J. L., Peralta Higuera A. y Luna González, L. (1997). "Video Remote Sensing and Digital Photography in Mexico; Overview and Present Status". 16th Biennial Workshop on Videography and Color Photography in Resource Assessment. ASPRS. Weslaco, Texas. pp. 300-307
- ☞ Peralta-Fabi, R., Peralta, A., Prado, J., Vicente, E., López, H., Navarrete, M., Weckman, O., Rodríguez, R. (1988). "Diseño Conceptual y Preliminar de una Aeronave Automática para Percepción Remota", Boletín SELPER-México, *resúmenes*.
- ☞ Peralta-Fabi, R., Peralta, A., Prado, J., Herrera, E., Palacio, W., Peralta, J. (1995). "Algunas Observaciones Multiespectrales de la Actividad Volcánica del Popocatepetl", 1994-1995. Boletín SELPER-México, 28-29 :4-15.
- ☞ Peralta, R., Peralta, A., Prado, J., Díaz, C. (1992). "Teledetección Térmica de Islas de Calor en Zonas Urbanas", 3^{er} Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Peralta, A., Sorani, V., Palacio, J. (1997). "Levantamientos Aéreos Digitales para estudios del territorio en México: desarrollo y casos de aplicación", VIII Reunión Nacional Selper-México, sep. 25-26, Michoacán, México. *resúmenes*.

- ☞ Rabenhorst, D. Thomas, et al. (1989) "Applied Cartography" Source Materials for Mapmaking, Ed. Merrill Publishing Company. USA. pp.
- ☞ Reising, P., Lydiard, S. (1989). "Integration of Videography with GIS Systems for Environmental Studies and Natural Resource Management". 12th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography, ASPRS. Sparks, Nevada. pp. 136-138.
- ☞ Robinson A. (1995). "Elements of Cartography". Ed. Wiley & Sons, USA. pp. 218-219.
- ☞ Rosenholm, D. (1993). "Land Use and Vegetation Mapping by Satellite: SSC Satellitbild Experiences, 1987-1993". ITC Journal, 3 :251-259
- ☞ Salmerón, O. (1996). "Observación de una Zona de Surgencia en las Costas de Jalisco". VII Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Sorani, V., Bojórquez, L. (1996). "Clasificación no Supervisada de Imágenes de Satélite con Apoyo de Aerovideografía". 7^a Reunión Nacional SELPER-México, resúmenes.
- ☞ Stutte, C., Stutte, G. (1989), "Quantification of Field Crop Stress Areas Using Videography". 12th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography, ASPRS. Sparks, Nevada. pp. 88-92
- ☞ Ventura, S., Harris, P. (1994). "A comparison of Classification Techniques and Data Sources for Urban Land Use Mapping". Geocarto International. Vol. 9, No. 3. pp. 5-14
- ☞ Vlcek, J. (1988). "Nature of Video Image". First Workshop on Videography. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 5-12
- ☞ Walsh, S., Butler, D. (1997). "Morphometric and Multispectral Image Analysis of Debris Flows for Natural Hazard Assessment". Geocarto International. Vol. 12, No. 1. pp. 59-70
- ☞ Wiegand, C., Escobar, D., Lingle, S. (1993). "Detecting Growth variations and Salt Stress in Sugarcane Using Videography". 14th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography for Resource Monitoring. ASPRS. Logan, Utah. pp. 185-192
- ☞ Wolf, Paul R. (1983). "Elements of Photogrammetry". Ed. Mc. Graw Hill. USA. pp. 211-224
- ☞ Wood, E., Tappan, G., Jacobs, D. (1995). "Monitoring Senegal's Natural Resources Using Airborne Videography". 15th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography in Resource Assesment. ASPRS. Terre Haute, Indiana. pp. 315-320

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

- ✘ Carta Topográfica E14B21 "Texcoco", escala 1:50 000, Editada por el INEGI, 1983.
- ✘ Carta Topográfica E14B31 "Chalco", escala 1:50 000, Editada por el INEGI, 1985.
- ✘ Carta Topográfica E14A29 "Cuautitlán", escala 1:50 000, Editada por el CETENAL, 1977.
- ✘ Carta Topográfica E14A39 "Ciudad de México", escala 1:50 000, Editada por el CETENAL, 1977.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA