

**CORRECCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DE SEGMENTOS DIGITIZADOS
DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS APLICANDO UN SIG, PARA LA
DETERMINACIÓN DEL USO DEL SUELO
EN LA SIERRA DE QUETZALTEPEC, MÉXICO***

Jorge López Blanco**
Ivonne Valdez Muciño**
Jesús Ugalde Rivera**

Resumen

Se presenta la aplicación de un método fotogramétrico, dentro de un ambiente SIG, para la corrección de la posición de las coordenadas de segmentos digitizados de fotografías aéreas. La deformación que se corrige con este método es la causada por *proyección central* y por el efecto del relieve. Se determinó el centro de toma de cada fotografía con relación a sus coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) y a sus ángulos de rotación (w, ϕ, κ). Los resultados de procesar las fotografías del área permitieron generar un mapa de unidades de uso del suelo para 1989. Los errores medios cuadráticos totales por fotografía van de 14.6 a 40.2 m. La información se procesó en un SIG instalado en computadora personal.

Palabras clave: Corrección fotogramétrica, SIG, uso del suelo, Quetzaltepec, México.

Summary

The application of a photogrammetric method, in a GIS environment, to correct the position of segment's coordinates digitized on near vertical aerial photos, is presented. The distortions corrected with the method are caused by relief displacement and central projection. The photo exposure station was determined according to coordinates (X_0, Y_0, Z_0) and rotation angles (w, ϕ, κ). The results of processing 16 aerial photographs led us to generate a map of land use units for 1989. The total root mean square error per photo goes from 14.6 to 40.2 m. The information was processed in a GIS installed in a personal computer.

Key words: Photogrammetric Correction, GIS Environment, Land Use, Quetzaltepec, Mexico.

1. Introducción y antecedentes

La potencialidad del uso e interpretación de las fotografías aéreas generadas en diferentes resoluciones espectrales y espaciales es muy amplia en los estudios del medio ambiente, natural y social. La fotointerpretación forma parte del conjunto de técnicas y tecnologías que genéricamente son conocidas con los términos percepción remota o teledetección. Es también un conjunto de procedimientos que permiten extraer, describir y explicar, información de objetos y fenómenos plasmados en imágenes.

* Recibido: 26 de septiembre de 1995.

** Instituto de Geografía, UNAM, México.

Un problema fundamental que se presenta cuando se fotointerpretan fotografías aéreas verticales, con fines de evaluación de aspectos del medio ambiente y de los recursos naturales, es la dificultad para transferir a un mapa, de una manera geoméricamente correcta y precisa, los rasgos trazados sobre las fotografías (líneas, puntos y superficies).

Tradicionalmente, el problema se ha solucionado con diferentes precisiones y exactitudes, de dos maneras diferentes (véase CIAF, 1970; ZEISS, 1972; Wolf, 1974; Luján, 1991; Lillesand y Kiefer, 1994). El primer método, el menos preciso y más laborioso, es el de transferir *visualmente* los rasgos trazados en las fotografías, a los mapas correspondientes. La principal dificultad de este método es que, dependiendo de la experiencia del que transfiere, los detalles usados como referencia para realizar dicha transferencia, así como la calidad de la información en documentos, mapas y fotos, se obtienen resultados diferentes.

Debido a la subjetividad involucrada en este método, el conjunto de errores, la falta de experiencia y las equivocaciones, puede dar resultados con muy bajas exactitudes, por lo cual es necesario *calibrar* con rasgos conocidos, identificados en un mapa a escala detallada. Un factor fundamental para tener menores exactitudes en la transferencia de los rasgos fotointerpretados a los mapas, es la deformación ocasionada por el efecto del relieve y es muy difícil, aun para los fotointérpretes más experimentados, transferir adecuadamente rasgos lineales en un área con relieve abrupto.

Existe otro procedimiento para la solución del problema planteado, es con el uso de un equipo óptico-mecánico (de *tercer orden* o poco aproximado) que se basa en una serie de prismas que permiten observar simultáneamente los rasgos simbolizados en un mapa con respecto a la imagen proyectada a partir de la fotografía empleada.

Al equipo óptico-mecánico, que se utiliza normalmente para dichos fines, se le conoce genéricamente como *Transferoscopio* (*Zoom Transfer Scope*) o bien el *Stereosketch*, nombres asignados por las empresas fabricantes que los producen. Estos instrumentos funcionan de acuerdo con la sobreposición óptica de información obtenida de las fotografías aéreas con respecto a la cartografía topográfica y temática; es decir, con la ayuda de prismas colocados en los instrumentos mencionados es posible revisar, simultáneamente, la información de la fotografía como la correspondiente del mapa, permitiendo así la transferencia de rasgos a una base cartográfica ortogonal.

Los resultados pueden tener un grado bajo de exactitud dependiendo del área, lo abrupto del terreno y la experiencia del usuario. El principio se basa en que es posible transferir rasgos de áreas pequeñas de las fotografías aéreas, ajustando, con relación a escala, azimuth e inclinación, los rasgos de dicha fotografía, con respecto a su posición geoméricamente correcta dada por una imagen del mapa de esa misma área de transferencia.

Las precisiones alcanzadas con este procedimiento normalmente no se registran ni se reportan en la literatura especializada. De igual manera, las empresas que venden el equipo mencionado no refieren el orden de exactitud que se puede alcanzar (Bausch y Lomb, s/f). A la corrección que es posible hacer con este equipo se le conoce en términos técnicos como de *tercer orden*, es decir, de poca aproximación. La mayor parte de este tipo de equipos permite corregir los desplazamientos por la *proyección central* de la fotografía y no los desplazamientos por relieve.

Existe una tercera forma de realizar la transferencia mencionada, la cual se utilizó en este trabajo. Ésta se realiza mediante un procedimiento fotogramétrico conocido como de *resección fotogramétrica* aplicando las *ecuaciones de colinealidad tridimensional* para establecer los seis parámetros que definen la orientación *exterior o absoluta* del centro de toma de cada fotografía aérea y la posterior corrección de cada uno de los puntos que conforman los segmentos fotointerpretados (véase antecedentes de este trabajo en López Blanco *et al.*, 1995). Para la aplicación de la corrección fotogramétrica mencionada se realizó la integración y manejo de la información dentro de un sistema de información geográfica (SIG).

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de aplicar un método de corrección fotogramétrica, a la posición de los segmentos fotointerpretados y digitizados de fotografías aéreas, para la creación de un mapa de unidades de uso del suelo del área de Quetzaltepec, Estado de México, actualizado para 1989, procesando la información dentro de un SIG.

2. Área en estudio

El piedemonte de la Sierra de Quetzaltepec fue hasta hace poco tiempo un sitio de gran riqueza natural. El aumento de población y la apropiación intensiva de los recursos naturales han propiciado diversos cambios en el uso del suelo. Esta área se localiza en la porción centro-oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano. Su localización específica es en la vertiente oriental de la Cuenca de México, en el área occidental de la Sierra Nevada (**Figura 1**). Limita al norte con el poblado de Tequesquihuac y al sur con el de Coatepec. Sus coordenadas extremas están entre los 19°22' y 19°30' de latitud norte y entre los 98°39' y 98°50' de longitud oeste. El área considerada para la corrección fotogramétrica de los segmentos fotointerpretados tiene una superficie de 76.4 km².

Limita al este con el Parque Nacional Zoquiapan y al oeste con un corredor urbano-comercial que forma parte del área metropolitana, conurbada a la Ciudad de México (Valdez, 1996). Tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperaturas que van de los 12 °C en diciembre y enero, a los 18 °C en junio. Sus valores altitudinales oscilan entre los 2 500 msnm, en el piedemonte, hasta los 3 900 msnm en el Cerro Yeloxóchitl, al noroeste del Volcán Telapón.

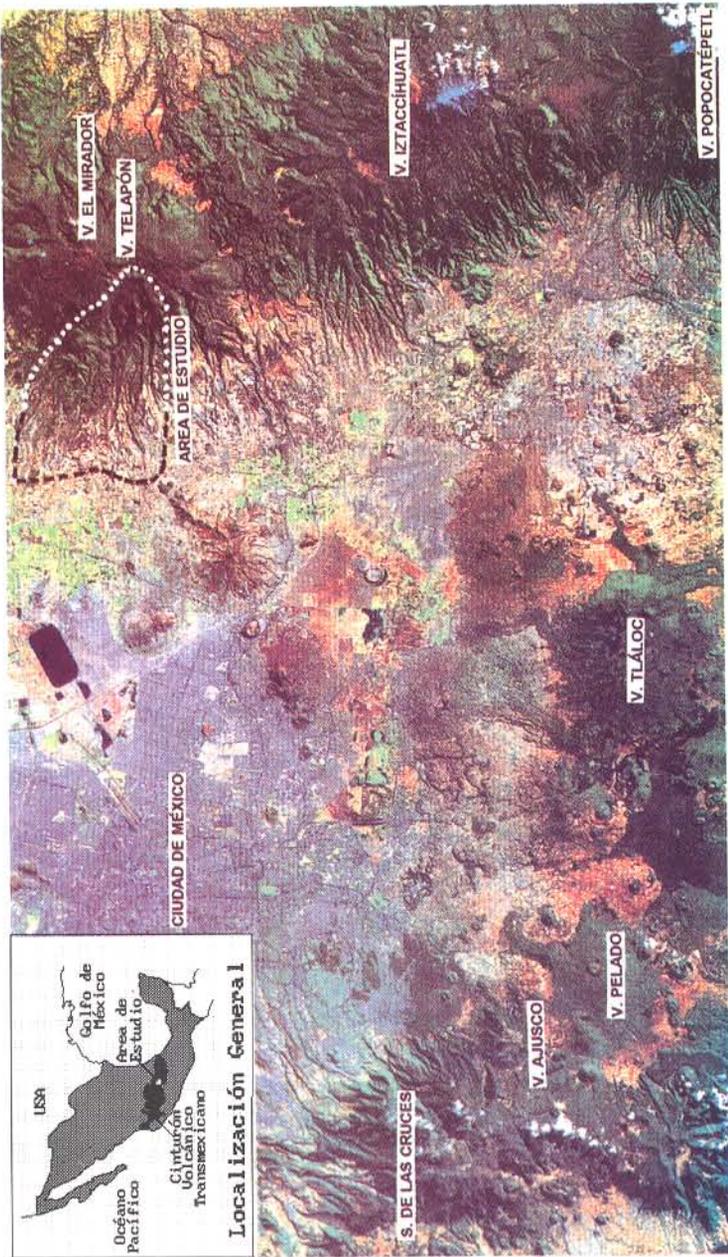


Figura 1. Localización del área en estudio, Quetzaltepec, Estado de México.

Los elementos litológicos de superficie tienen su origen en la actividad volcánica que se presentó desde el final del terciario y durante el cuaternario. La vegetación se caracteriza por asociaciones de bosques de *Pinus* y *Quercus*. Los principales tipos de suelo, por superficie, son andosoles, feozem y cambisoles. El relieve endógeno del área es de laderas montañosas de edificios volcánicos formados por flujos lávicos cuaternarios principalmente (escarpes y superficies cumbrales cubiertas de piroclastos). Otra porción importante del área tiene su origen a partir de los procesos exógenos que han originado el modelado del relieve, resultando en piedemontes, barrancos y pequeñas planicies aluviales.

3. Materiales y método

Los materiales cartográficos y fotográficos empleados en este estudio son los que se muestran en la **tabla 1**. La metodología aplicada tiene como base fundamental el análisis y procesamiento de la información cartográfica, tabular y de fotografías aéreas, a partir de un sistema de información geográfica (SIG). El SIG empleado es el *Integrated Land and Water Information System (ILWIS)* versión 1.41 (ITC, 1993 y 1994). La metodología se ha sintetizado en el diagrama respectivo mostrado en la **figura 2**. Las fases principales del proceso se explican en los párrafos siguientes.

A partir de la carta de uso de suelo y vegetación de INEGI (1983b) generada con fotos de 1970, se digitizaron en el SIG las unidades que servirían para relacionar los usos del suelo de 1970 con respecto a los de 1989. Para estas unidades se crearon sus polígonos y el mapa correspondiente en formato de celdas, con una resolución espacial de 25 m por lado.

Tabla 1. Materiales utilizados en este estudio

Material	Nombre	Clave	Escala	Fuente
Mapa Topográfico	Chalco	E13B31	1:50 000	INEGI,1983a
M.Uso S.y Veget.	Chalco	E13B31	1:50 000	INEGI,1983b ¹
Fotomapa	Coatlinchán	E13B31B	1:20 000	INEGI,1983c
Fotomapa	Sta.Catarina	E13B31C	1:20 000	INEGI,1983d
Fotog. Aéreas	Volcanes	Mayo 1989	1:19 000	SECTE,1989a ²
Fotog. Aéreas	Chalco	Mayo 1989	1:21 500	SECTE,1989b ³
Ortofoto	Texcoco	Hoja 127	1:20 000	SECTE,1983

¹Realizado con fotos de 1970. ² Fotos 14-17 Línea 8, 12-19 Línea 9, 8-16 Línea 10. ³ Fotos 8-13 Línea 6, 10-15 Línea 7.

En la **figura 3** se han señalado las claves y coberturas de terreno de cada una de las 16 fotografías aéreas que se utilizaron en este trabajo, en las cuales se digitizaron los límites de unidades de uso del suelo y vegetación. Estas unidades fueron fotointerpretadas para realizar comparaciones con las unidades delimitadas en la cartografía de INEGI del mismo tema,

realizada con fotografías de 1970 (escala 1:50 000).

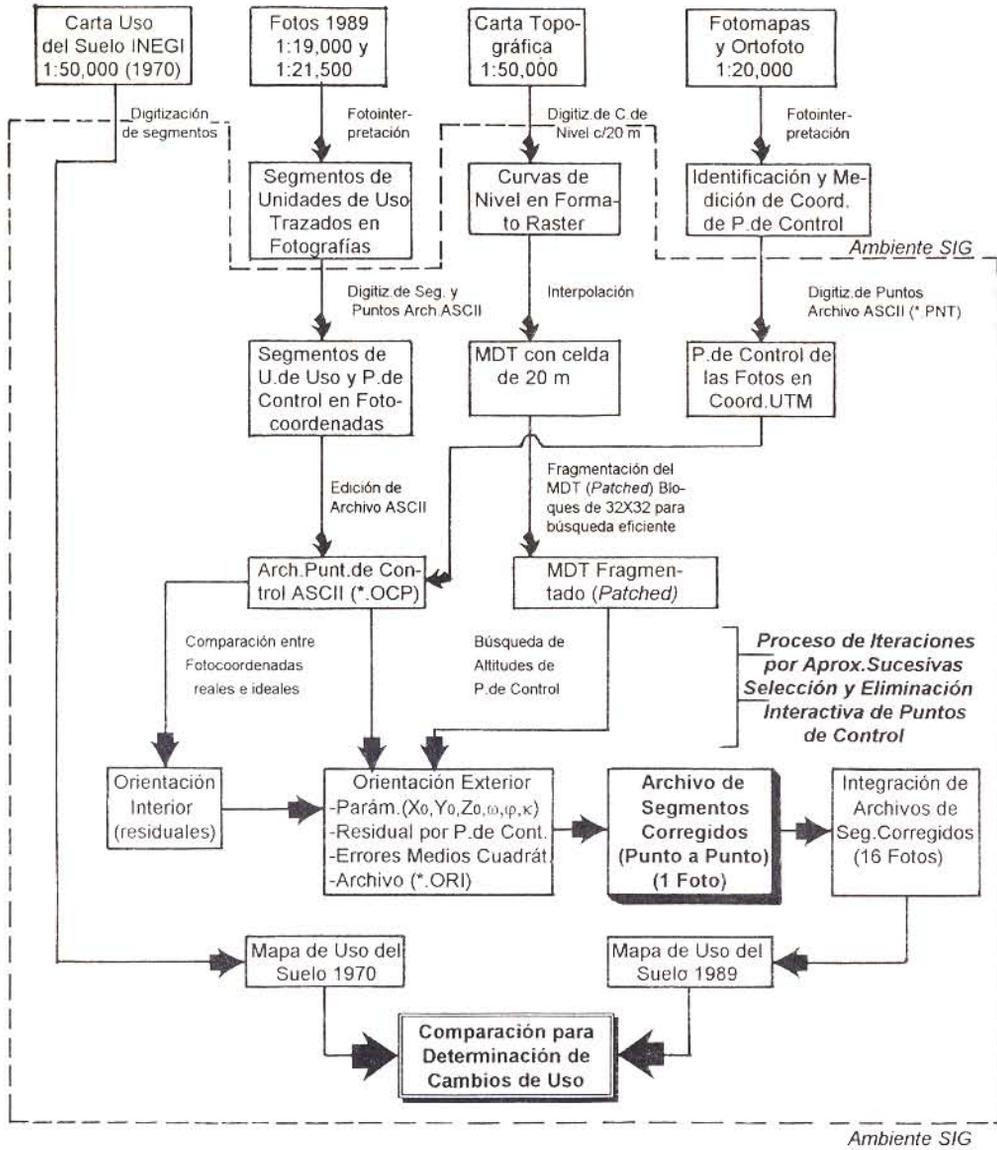


Figura 2. Esquema metodológico para la corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas en un ambiente SIG, para la determinación de cambios en el uso del suelo.

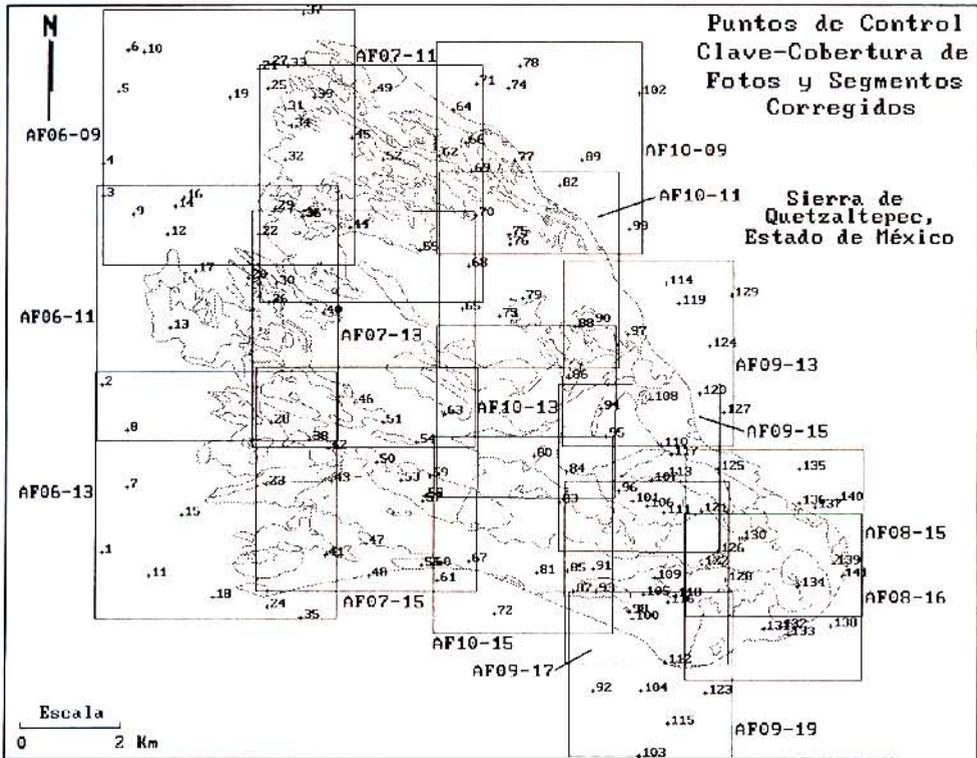


Figura 3. Cobertura de las 16 fotos empleadas en el estudio. Como fondo los segmentos corregidos que delimitan las unidades de uso del suelo para 1989. También se señalan la posición e identificador de los puntos de control.

3.1 Trazo de límites de unidades de uso del suelo sobre las fotografías aéreas de 1989

Para la identificación y delimitación de las unidades de uso del suelo de 1989, se emplearon, durante el proceso de fotointerpretación, las *claves* comunes para ello como tono, textura, dimensión, posición, etc. (Lillesand y Kiefer, 1994). Para la determinación de las áreas de uso del suelo para 1989 se emplearon fotografías aéreas con dos escalas diferentes. Las primeras, a escala 1:19 000, cubren el área del piedemonte y parte de las laderas de montaña. Las segundas, a escala 1:21 500, comprenden las laderas de montaña, principalmente.

Se realizó un reconocimiento e identificación de los rasgos de unidades de uso, clasificándolas con clases similares a las que utilizó el INEGI. Como un aspecto importante para dar posibilidades de hacer comparaciones entre la información de uso del suelo de las dos fechas mencionadas, se consideró que en la cartografía de INEGI se han representado, de forma generalizada y sobrestimando el área de algunas clases de uso. El ejemplo más característico es en la delimitación de las áreas de erosión y de reforestación, en las cuales se agrupan áreas de diferentes intensidades de esos procesos (Ugalde, en prep.).

3.2 Digitización de los rasgos de las fotos y preparación del archivo de puntos de control

Se midieron las distancias entre las cuatro marcas fiduciales de las fotografías, con una exactitud de al menos una décima de milímetro. Estas distancias permitieron establecer un promedio para determinar las coordenadas *ideales* entre las marcas mencionadas; en este caso para las fotografías de este estudio resultó una distancia media de 21.19 cm, es decir, 2 119 décimas de mm. Estas son las unidades que requiere el programa *Monoplot* de ILWIS para procesar adecuadamente la información. Tal exactitud es necesaria para digitizar rasgos sobre las fotografías mencionadas. En este caso el origen arbitrario elegido está en la esquina inferior izquierda de las fotografías (esquina SW con $X=1$ y $Y=1$).

El sistema de coordenadas que se empleó para asignar posición a las cuatro marcas fiduciales (referencias para establecer la *orientación interior* durante el proceso de corrección) correspondieron a los siguientes valores (en décimas de mm): Punto 1 ($x=1$, $y=1$, esquina del cuadrante suroeste, véanse **figuras 4 y 5**), Punto 2 ($x=2120$, $y=1$, cuadrante sureste), Punto 3 ($x=1$, $y=2120$, cuadrante noroeste) y Punto 4 ($x=2120$, $y=2120$, cuadrante noreste).

Se colocó cada fotografía, con los rasgos fotointerpretados, sobre la tableta digitizadora (**Foto 1**). Dentro del programa de digitización de ILWIS (*Digitize*), se les asignó a cada uno de los puntos de control de las marcas fiduciales, sus valores correspondientes. Después, en el submódulo de digitización de puntos (*Points*), se generó un archivo en formato *ASCII* para cada fotografía, el cual contiene las coordenadas fotográficas en décimas de mm, tanto de las marcas fiduciales, como de los puntos de control de la imagen misma (**Figura 4**). En la **tabla 2** se muestra un ejemplo para la foto *AF06-13*.

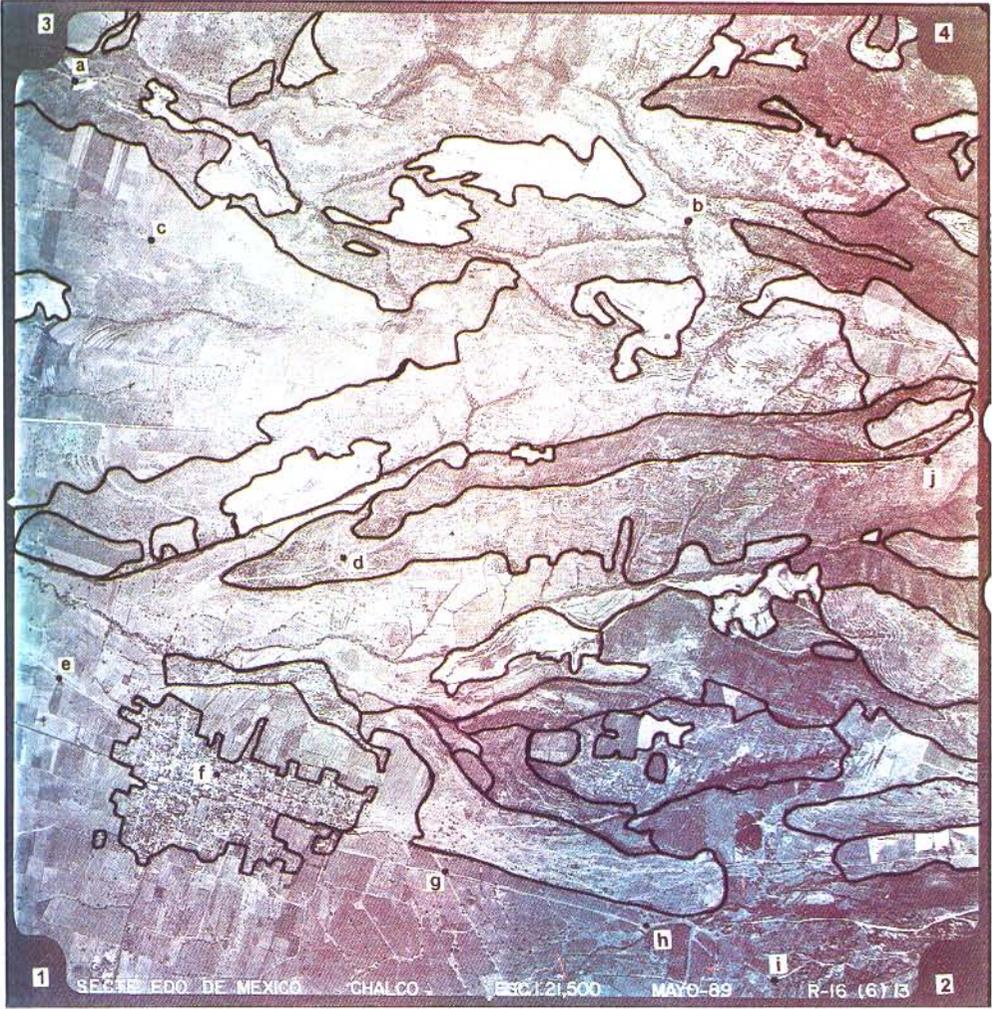


Figura 4. Segmentos que delimitan las unidades de uso del suelo trazados con fotointerpretación en la Foto AF06-13 (a escala 1:21,500, SECTE, 1989).

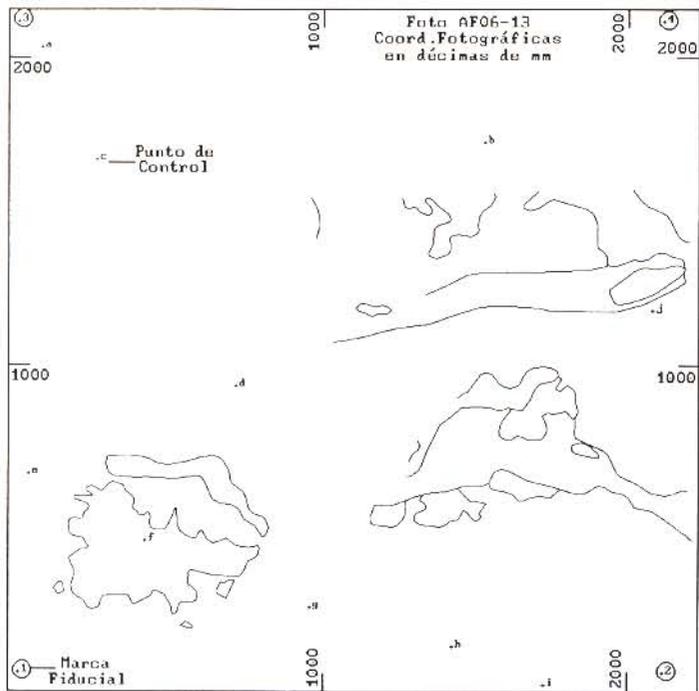


Figura 5. Valores de fotocoordenadas y segmentos digitizados de la fotografía AF06-13.

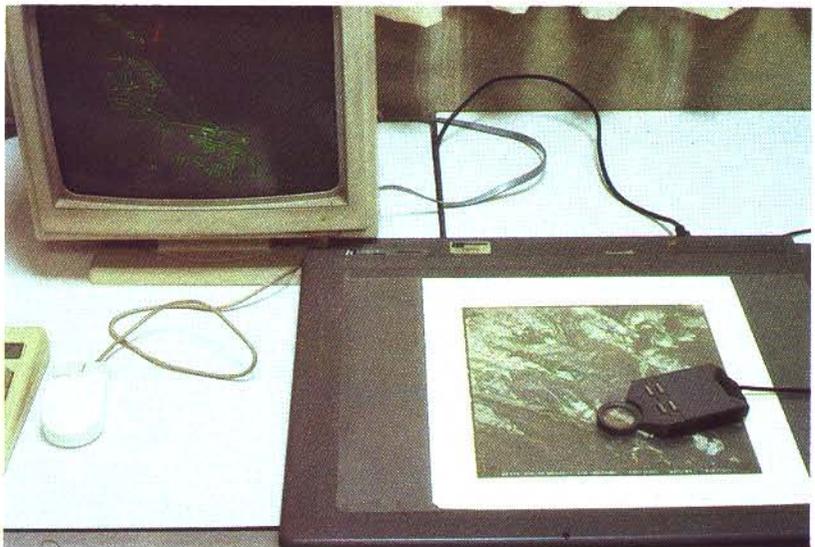


Foto 1. Asignación de coordenadas fotográficas, digitización de segmentos fotointerpretados y su despliegue en el SIG.

Tabla 2. Digitización de las marcas fiduciales y los puntos de control de la foto AF06-13

x	y	Nombre
1	1	1
2120	1	2
1	2121	3
2120	2119	4
77	2035	a
1534	1725	b
262	1670	c
715	933	d
34	649	e
420	430	f
959	213	g
1428	85	h
1731	-40	i
2085	1180	j

Nota: x y y están en décimas de mm. 1 a 4 son las marcas fiduciales. De a hasta j son los puntos de control. La localización de los puntos está en las **figuras 4 y 5**.

En un paso previo (**Figura 2**) se midieron las coordenadas UTM de los puntos de control de cada fotografía; además, se creó un archivo en formato ASCII para integrar tanto los valores de coordenadas fotográficas de los puntos de control, como los de coordenadas reales en UTM. Este archivo tiene extensión *.OCP (véase ejemplo en la **Tabla 3**).

3.3 Identificación y medición de las coordenadas reales (UTM) de los puntos de control

Se ubicaron en promedio 13 puntos de control por fotografía aérea procesada, los cuales fueron, en general, sitios que podían ser identificados con cierta facilidad. Algunos de ellos, sobre todo los situados en las porciones montañosas de la Sierra de Quetzaltepec, fue difícil ubicarlos con certeza, debido a la carencia de rasgos claros en las fotos, a causa de su homogeneidad de textura y tono ocasionada por las masas de bosque cerrado y la carencia de rasgos naturales y culturales que fuesen discernibles.

Durante la búsqueda de los puntos de control fue necesario, en muchos casos, utilizar el modelo estereoscópico para tener mayor certeza de su ubicación sobre las fotografías. Se tomaron como referencia de coordenadas reales (UTM), a los mapas topográfico y de uso del suelo (escala 1:50 000) y los fotomapas y ortofoto (escala 1:20 000).

Tabla 3. Archivo de la foto AF06-13 para realizar el proceso de *orientación interior y exterior*

Marca Fiduc	X(Real 1/10 mm)	Y(Real 1/10 mm)	X(Ideal m)	Y(Ideal m)	Uso	ID
1	1	1	0.000000	0.000000	1	SW
2	2120	1	0.211900	0.000000	1	SE
3	1	2121	0.000000	0.211900	1	NW
4	2120	2119	0.211900	0.211900	1	NE

Punto Cont.	X(Fotog) 1/10 mm	Y(Fotog) 1/10 mm	X(UTM) m	Y(UTM) m	Uso
a	77	2035	515340.00	2146800.00	1
b	1534	1725	518530.00	2146110.00	-1
c	262	1670	515830.00	2145967.00	-1
d	715	933	516870.00	2144410.00	1
e	34	649	515330.00	2143723.00	-1
f	420	430	516250.00	2143290.00	-1
g	959	213	517450.00	2142890.00	1
h	1428	85	518450.00	2142701.00	1
i	1731	-40	519070.00	2142495.00	1
j	2085	1180	519634.00	2145038.00	1

Nota: En la columna *Uso* del 2do. bloque se señalan con 1 los puntos que se tomaron para realizar el proceso y con -1, los rechazados. El primer bloque de datos se utiliza en la *orientación interior*, el segundo en la *exterior*.

3.4 Digitización de curvas de nivel y creación del modelo digital del terreno (MDT)

Antes de iniciar el proceso de *resección fotogramétrica* es necesario generar el modelo digital del terreno (MDT) del área en estudio (véase **Figura 2**). Un MDT es una representación digital de la geometría de la superficie de la Tierra, constituido por un conjunto de puntos de los cuales las coordenadas X, Y, Z son registradas en una base de datos (Skidmore, 1989). El MDT es fundamental en el proceso fotogramétrico mencionado, ya que sirve como fuente básica de información, con relación a los valores altitudinales, tanto de los puntos de control que se han definido para la realización del proceso como para asignar a cada punto de coordenadas conocidas que conforma cada porción de cada segmento digitizado, una fotografía aérea. Cada uno de estos valores altitudinales, tomado del MDT, servirá para establecer, a partir del modelo de corrección mencionado, su valor correspondiente de ajuste de posición, para contrarrestar el efecto de desplazamiento por relieve.

La carta topográfica 1:50 000 sirvió de base de información altitudinal básica. Se registraron digitalmente sus curvas de nivel a cada 20 m en las áreas poco inclinadas del piedemonte y a cada 100 m en algunos sectores de las porciones montañosas de la sierra. El archivo de curvas de nivel se *rasterizó*, es decir, se convirtió de formato vectorial, en el que cada punto de cada línea tiene un par de coordenadas almacenadas secuencialmente, a formato *raster*, que consiste en una matriz de celdas georreferidas y con atributo.

Esta conversión permitió asignar un valor de altitud a la celda, en la cual coincide algún sector de una curva de nivel. Todas las celdas restantes, que no coinciden con una curva, son tomadas como *sin atributo* o de valor *desconocido*. Con este proceso se obtiene una representación reticulada de las curvas de nivel, la cual se utilizará en un proceso subsiguiente, para completar el registro de los valores altitudinales del área (Gorte y Koolhoven, 1990; Weibel y Heller, 1991; ITC, 1993).

Al mapa resultante de la *rasterización* de las curvas de nivel se le aplicó un algoritmo de interpolación, el cual calcula para cada *celda* las dos distancias más cortas a las dos curvas de nivel consecutivas más cercanas; enseguida se calcula el valor altitudinal de cada una de las *celdas* del modelo, mediante una relación lineal (véase Palacio *et al.*, 1991:92). Se generó un MDT de 776 columnas por 726 renglones, con un tamaño de celda de 20 m. En la **figura 6** se señalan las curvas de nivel digitizadas para el área en estudio.

3.5 Resección fotogramétrica espacial a partir de ecuaciones de colinealidad

La *resección fotogramétrica* involucra el uso de las ecuaciones de *colinealidad tridimensional* para una fotografía individual. Estas ecuaciones se utilizan para la determinación de los seis parámetros de la cámara fotogramétrica durante el momento de la exposición. Existen diversas referencias en las cuales es posible encontrar una explicación amplia de los fundamentos fotogramétricos y matemáticos en los que se basa el modelo de corrección mencionado (Wolf, 1974:269; ASP, 1980; Bargagli, 1991a y 1991b; ITC, 1994:S25-28).

Los parámetros mencionados son tres elementos angulares o de *rotación* que resultan de la comparación de las fotocoordenadas de los puntos de control, con respecto a las del *mundo real* (UTM en este caso), ellos son: 1. Rotación sobre el eje de las x (fotográficas) para generar el ángulo *omega* (ω). 2. Rotación sobre el eje de las y para generar el ángulo *phi* (φ). 3. Rotación sobre el eje de las z para generar el ángulo *kappa* (κ). Tres elementos lineales o de posición (de centro de proyección o de perspectiva) en coordenadas del mundo real: X_0 , Y_0 , Z_0 . Para dar solución a las ecuaciones son suficientes tres puntos de control distribuidos adecuadamente en la fotografía. El ITC (1994:S25) recomienda de cuatro a ocho, o más, puntos de control, que permitan determinar diferencias, pruebas estadísticas y mejores ajustes.

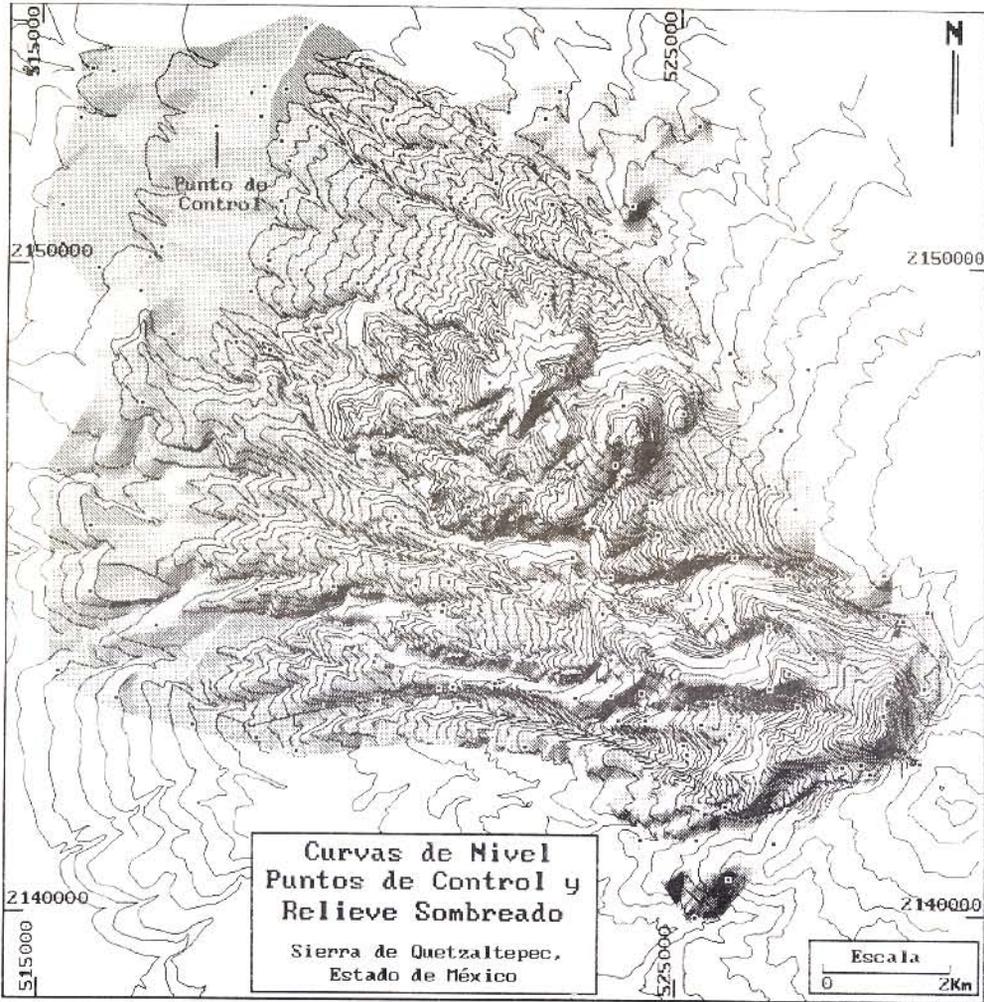


Figura 6. Mapa de relieve sombreado que muestra las curvas de nivel digitizadas para la creación del MDT y también la posición de los puntos de control.

3.6 Programa Monoplot de ILWIS

Con el programa *Monoplot* de ILWIS se da solución a las ecuaciones con base en el cálculo inicial de valores aproximados para los seis parámetros mencionados. Estos valores son modificados en forma de *iteraciones*, en las cuales se van reduciendo alternativamente las discrepancias de los valores digitizados en fotocoordenadas x, y , con respecto a los calculados directamente con las ecuaciones, de tal manera que las diferencias llegan a ser despreciables (ITC, 1994). Es decir, se van agregando los nuevos valores de corrección en cada una de las iteraciones, de tal forma que en cada una de ellas se acerca cada vez más al valor más exacto, con respecto a cada uno de los seis parámetros. El número máximo de iteraciones que se ha establecido para el programa mencionado es de 15, teniendo como umbral de convergencia para terminar el proceso, un valor de 0.00001 de radián (2.06" de arco).

Para su aplicación se requiere al menos de la ubicación de tres puntos de control en la imagen fotográfica, cuyos valores de coordenadas reales X, Y, Z (por ejemplo, en coordenadas UTM) sean conocidos. También la distancia focal o principal (f) de calibración de la cámara debe ser un dato de partida. El programa *Monoplot*, elaborado por Bargagli (1991a, 1991b), fue utilizado para la corrección fotogramétrica de los segmentos digitizados de las fotografías aéreas. Este programa está incluido dentro de la versión 1.41 de ILWIS (ITC, 1994).

3.7 Orientación Interior y Orientación Exterior

En una primera fase el programa *Monoplot* para cada fotografía por corregir solicita los siguientes datos: el nombre del archivo con extensión *.OCP en formato ASCII, en el cual está integrada la información tanto de coordenadas fotográficas como de la proyección UTM, de los puntos de control correspondientes a cada fotografía aérea. Además solicita el nombre del MDT, distancia focal en metros de la cámara usada para las tomas fotográficas y nombre de salida del archivo resultante (véase ejemplo en el **cuadro 1**).

Cuadro 1. Información requerida por el programa *Monoplot* para realizar la *orientación interior y exterior* en el proceso de corrección de segmentos (*Foto AF06-13*)

Nombre del archivo de puntos de control: **AF06-13.OCP**
 Nombre del MDT en formato *patched* de ILWIS: **Quetzpat**
 Distancia focal de la cámara en m: **0.15215**
 Nombre del archivo para los resultados de la orientación *.ORI: **AF06-13.ORI**

El MDT deberá tener una estructura fragmentada (*patched*, en bloques de 32 x 32 píxeles), es decir, un arreglo que le permita al SIG buscar de una manera lo suficientemente rápida los valores individuales de altitud de los puntos de control y de los segmentos digitizados, sin tener que realizar una búsqueda en el total de los datos (ITC, 1993:6.164). El programa ejecuta la *orientación interior*, basándose en la relación de las coordenadas fotográficas de los puntos

de control medidas en las fotografías, con respecto a sus valores de coordenadas de calibración o *ideales* (véase residuales en las columnas 6 y 7 de la **Tabla 4**).

Tabla 4. Residuales de la *orientación interior* (Foto AF06-13)

Punto	x(dig)	y(dig)	xph(mm)	yph(mm)	dx(mm)	dy(mm)
1	2.0	-2.0	0.02	-0.15	0.024941	-0.149693
2	2120.0	2.0	211.87	0.15	-0.025019	0.150117
3	1.0	2122.0	-0.02	212.05	-0.024929	0.149623
4	2120.0	2120.0	211.93	211.75	0.025004	-0.150040

Terminado este paso, el programa leerá las alturas y verificará los puntos de control (basado en su posición en el terreno) a partir de la información del MDT. En caso de ser necesario, es posible agregar directamente en este proceso el valor de altitud de alguno de los puntos de control que esté fuera del MDT. En este trabajo no fue necesario, ya que el MDT usado cubría completamente el área en estudio (véase **Figura 6**).

El programa realiza una serie de aproximaciones sucesivas de los valores de las coordenadas de la fotografía (x,y) a partir de la corrección de los ángulos *phi* (ϕ), *kappa* (κ) y *omega* (ω), en el momento en que fue tomada la fotografía, y finalmente ajusta estas iteraciones hasta llegar a un valor óptimo de los seis parámetros. Los resultados de este proceso se ejemplifican para la Foto AF06-13 en la **tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros de posición y rotación del centro de toma, después de *cuatro iteraciones* por aproximaciones sucesivas (Foto AF06-13)

X0=515164.179 m	Y0=2149304.706m	Z0=5718.950 m
w=-2.12882561	ϕ =-2.70007304	κ =0.94193052

En la **tabla 6** se muestran los valores de la matriz de orientación (rotación tridimensional) que están en función de los tres ángulos mencionados, resultado del procedimiento de *orientación exterior*.

Tabla 6. Resultado de la matriz de orientación para la fotografía AF06-13

a11= 0.99875483	a12=0.01817735	a13= 0.04645820
a21=-0.01642080	a22=0.99914603	a23=-0.03791532
a31=-0.04710772	a32=0.03710523	a33= 0.99820041

En la **tabla 7** se muestran los resultados en términos de residuales y errores medios cuadráticos en X y Y, respecto a la *orientación exterior* que se realizó. Si algunos de los valores de los residuales (columnas 4 y 5) son demasiado grandes, es posible marcar estos puntos de control

para que no sean tomados en cuenta en una nueva *corrida* del proceso de orientación. De tal forma que *interactivamente* se puede ir mejorando en forma sustancial el ajuste, al reducirse los residuales y por consiguiente los errores medios cuadráticos (EMC) en los dos ejes.

En esta **tabla 7** se encuentran los seis puntos de control que se emplearon en el proceso de orientación para esa fotografía. Los valores de los puntos de control, junto con las coordenadas X, Y y Z, sirvieron de base para el cálculo del error medio cuadrático, el cual no debía superar el valor de 30 m, valor que se consideró aceptable para que los segmentos corregidos no presentaran deformaciones considerables. Los puntos de control 2, 3, 5 y 6 que están en la **tabla 8**, fueron los no considerados en el cálculo, debido a la magnitud del error total que aportaba cada uno de ellos (véase residuales). Fueron *anulados* durante el proceso interactivo para tener un EMC Total menor a 30 m.

Tabla 7. Resultados numéricos de aplicar el proceso de *orientación exterior* (Foto AF06-13)

Punto de Control	X en m (Coord. UTM)	Y en m (Coord. UTM)	Diferencia en X	Diferencia en Y	Altitud en m
1	515341.50	2146794.00	1.459	-5.711	2363.00
4	516875.20	2144419.00	5.212	9.234	2430.00
7	517464.20	2142898.00	14.174	8.074	2476.00
8	518445.20	2142694.00	-4.852	-7.079	2524.00
9	519061.40	2142475.00	-8.606	-20.153	2565.75
10	519627.10	2145054.00	-6.864	16.133	2635.00
Error Medio Cuadrático	EMC(X)= 7.90 m	EMC(Y)= 12.24 m	EMCTotal =14.57 m		

3.8 Corrección de segmentos

Una vez que se ha obtenido el ajuste buscado dentro del proceso de orientación exterior o absoluta, se procede a realizar la corrección de vectores digitizados, por medio de la función correspondiente del programa *Monoplot*, en la parte de corrección de segmentos (ITC, 1994; Bargagli, 1991a y 1991b).

El programa *Monoplot* corregirá la posición de cada par de coordenadas que tiene cada punto, de cada segmento. En esta parte, el programa solicita el nombre del archivo de entrada, el cual debe contener los segmentos en coordenadas fotográficas. Asimismo solicita el nombre del archivo de salida, el cual contendrá las coordenadas secuenciales de los segmentos ya corregidos (véanse los segmentos corregidos de la **figura 7**).

Tabla 8. EMC de los puntos de control *no tomados* para la orientación exterior, Foto AF06-13

Punto de Control	X en m (Coord. UTM)	Y en m (Coord. UTM)	Diferencia en X	Diferencia en Y	Altitud en m
2	518494.50	2146216.00	-35.499	106.033	2538.00
3	515793.30	2145928.00	-36.690	-38.875	2438.00
5	515457.80	2143717.00	127.749	-5.988	2354.35
6	516305.30	2143282.00	55.308	-7.711	2431.00
Error Medio Cuadrático	EMC(X)= 74.14 m	EMC(Y)= 56.68 m	EMCTotal =93.32 m		

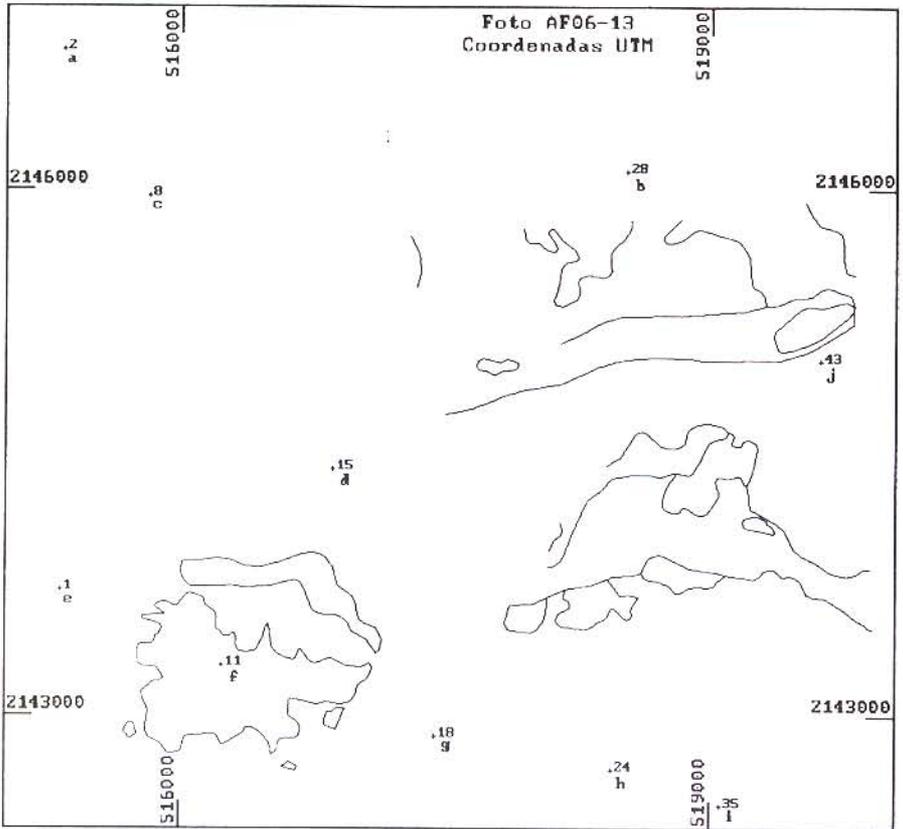


Figura 7. Valores de coordenadas UTM y segmentos corregidos para la fotografía AF06-13.

3.9 Integración de archivos individuales de segmentos corregidos

Con la función de agregación de archivos de ILWIS (*Copy&Merge*) se conjugaron los 16 archivos de las fotografías correspondientes. Se realizó un proceso de conexión manual de los segmentos digitizados en el límite de digitización de dos fotografías adyacentes.

En algunos casos se presentaron deformaciones de los rasgos al compararlos en dos fotografías consecutivas, en estos casos se dio mayor peso a los trayectos de segmentos cuyas fotografías tuvieron mejor ajuste o menor error medio cuadrático en el proceso de orientación exterior.

Con esto fue posible conjugar el conjunto de rasgos que delimitan las unidades de uso del suelo para la fecha de toma de las fotografías (1989). A partir de esta información se generó en ILWIS el mapa de uso de suelo para el área en estudio.

4. Resultados y conclusiones

En la **figura 3** se muestra, como fondo, el conjunto de segmentos digitizados y corregidos fotogramétricamente de las 16 fotografías procesadas. En la **tabla 9** se ha hecho una síntesis de los resultados obtenidos, con relación a los errores medios cuadráticos totales, de las fotografías procesadas. Los errores fluctuaron entre 14.6 y 40.2 m.

Se concluye que existe una tendencia a tener mayor error conforme existe mayor influencia del relieve para la deformación de la posición de los segmentos (relieve abrupto en las porciones montañosas). Además en estas porciones existió, en general, mayor dificultad para identificar en los fotomapas y cartas, rasgos que fuesen fácilmente identificables en las fotografías aéreas, para que a partir de ellos se estableciesen los puntos de control necesarios para realizar el proceso de corrección fotogramétrica.

Para que los resultados de evaluaciones ambientales, usando fotografías aéreas, puedan ser consultados y utilizados por los usuarios, es necesario tener en cuenta el problema existente de la transferencia de los rasgos fotointerpretados a un documento cartográfico. Con el método de corrección empleado en este trabajo, dentro de un ambiente SIG, se obtuvieron resultados con exactitudes adecuadas para los objetivos planteados.

Este método es una alternativa práctica que permite solucionar con mayor exactitud un problema tradicional de transferencia de rasgos fotointerpretados y que puede ser aplicado por usuarios que no son especialistas en aspectos fotogramétricos.

Tabla 9. Resultados de aplicar el proceso de corrección fotogramétrica a los segmentos digitizados de las 16 fotografías del área en estudio

Clave de la Foto	Ptos. de Control Totales	Puntos Eliminados	Núm.de Iteraciones	Error MCT en m
06-09	16	1	4	19.8
06-11	12	4	3	24.4
06-13	10	4	3	14.6
07-11	11	2	4	23.2
07-13	10	2	4	18.4
07-15	13	4	4	16.3
08-15	12	3	5	23.9
08-16	13	5	3	24.3
09-13*	14	7	4	31.6
09-15	16	8	4	27.0
09-17	14	8	4	27.4
09-19*	9	5	5	40.2
10-09	11	4	4	19.0
10-11*	11	4	4	33.9
10-13	9	4	5	19.8
10-15	14	6	5	26.9

Nota: La columna 1 son los números de línea de vuelo y fotografía, asignados originalmente por SECTE (1989a y 1989b). La cuarta columna se refiere al número de iteraciones o de cálculo por aproximaciones sucesivas realizado durante el proceso de *orientación exterior* de cada fotografía aérea.

*En este caso el error medio cuadrático total (Error MCT) excedió el valor de tolerancia establecido arbitrariamente (30 m).

Para que los resultados de evaluaciones ambientales, usando fotografías aéreas, puedan ser consultados y utilizados por los usuarios, es necesario tener en cuenta el problema existente de la transferencia de los rasgos fotointerpretados a un documento cartográfico. Con el método de corrección empleado en este trabajo, dentro de un ambiente SIG, se obtuvieron resultados con exactitudes adecuadas para los objetivos planteados.

Este método es una alternativa práctica que permite solucionar con mayor exactitud un problema tradicional de transferencia de rasgos fotointerpretados y que puede ser aplicado por usuarios que no son especialistas en aspectos fotogramétricos.

La aplicación de la fotointerpretación como parte fundamental de la percepción remota en estudios del medio ambiente, debe ser reevaluada y utilizada más intensivamente por los especialistas correspondientes. Debe ser empleada como una herramienta fundamental que permite, con las tecnologías recientes, generar información nueva y actual, y que además puede realizarse de una forma más práctica e integrada con otras fuentes de información geográfica.

Referencias y bibliografía recomendada

- ASP (1980) *Manual of Photogrammetry*, Fourth Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va., USA, 1056 pp.
- Bargagli, A. (1991a), *Screen digitizing, geometric corrections & monoplottting for SPOT, LANDSAT and normal aerial photographs in the ILWIS environment*, internal ITC publication, Enschede, The Netherlands, 28 pp.
- Bargagli, A. (1991b), *Geometric aspects and DTM requirements related to feature extraction from SPOT images*, ITC MSc Thesis, Enschede, The Netherlands, 94 pp.
- Bausch and Lomb (s/f), *Zoom Transfer Scope Manual de Instrucciones*, Nueva York, 28 pp.
- CIAF (1970), *Introducción a la Fotogrametría*, Curso Especial, Centro Interamericano de Fotointerpretación, Bogotá, 52 pp.
- Gorte, B. y W. Koolhoven (1990), Interpolation between isolines based on the Borgfors distance transform, *ITC Journal* 1990-3:245-247, Enschede, The Netherlands.
- INEGI (1983a), Carta Topográfica Escala 1:50 000, Clave E13B31, Chalco, México.
- INEGI (1983b), Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:50 000, Clave E13B31, Chalco, México.
- INEGI (1983c), Fotomapa, Escala 1:20 000, Clave E13B31B, Coatlinchán, México.
- INEGI (1983d), Fotomapa, Escala 1:20 000, Clave E13B31C, Santa Catarina, México.
- ITC (1993), *The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 1.4, User's Manual*, First Edition, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands, 412 pp.
- ITC (1994), *The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 1.41, Supplement to 1.4 User's Manual*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands, 87 pp.
- Lillesand T. M. y R.W. Kiefer (1994), *Remote Sensing and Image Interpretation*, Third Edition, Wiley & Sons, Nueva York, 750 pp.

- López Blanco, J., I. Valdez Muciño y J. Ugalde Rivera (1995), "Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG", *Boletín SELPER-MÉXICO*, sept.-nov., pp. 6-24.
- Luján Álvarez, C. (1991), *Fotogrametría. Principios Básicos*. Colección Textos Universitarios, Universidad Autónoma de Chihuahua, México, 172 pp.
- Palacio Prieto, J. I., J. López Blanco y M. A. Ortiz Pérez (1991), "Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno", *Investigaciones Geográficas Boletín*, núm. 23, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 89-101.
- SECTE (1983). Ortofoto del Municipio de Texcoco Escala 1:20 000 (Tepetlaoxtoc, Chicoloapán, Chiautla) Hoja 127, Subd. de Est. y Cons. del Terr. Estatal, Gobierno del Estado de México.
- SECTE (1989a), Fotografías Aéreas Esc. 1:19 000 (Volcanes) mayo 1989. Fotos 14 a 17 línea 8, 12 a 19 línea 9 y 8 a 16 línea 10. Subd. de Est. y Cons. del Terr. Estatal, Gobierno del Estado de México.
- SECTE (1989b), Fotografías Aéreas Escala 1:21 500 (Chalco) mayo de 1989. Fotos 8 a 13 de la línea 6 y 10 a 15 de la línea 7. Subd. de Est. y Cons. del Terr. Estatal, Gobierno del Estado de México.
- Skidmore, A. K. (1989). "A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model", *Int. Journal of Geogr. Inf. Syst.*, vol. 3, núm. 4, pp. 323-334.
- Ugalde Rivera, J. (en prep.), Inventario de áreas erosionadas en la porción noroeste de la Sierra de Quetzaltepec, Texcoco, Estado de México, tesis Lic. en Geografía, FFyL, UNAM.
- Valdez Muciño, I. (1996), Evaluación del cambio de uso del suelo en el área de la Sierra de Quetzaltepec, Texcoco, Estado de México, utilizando un sistema de información geográfica, tesis Lic. en Geografía FFyL, UNAM, 93 pp.
- Weibel, R. y M. Heller (1991), Digital Terrain Modelling, in Maguire *et al.*, (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, vol. I, Longman, U. K., pp. 269-297.
- Wolf, P. R. (1974), *Elements of Photogrammetry*, 2a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 562 pp.
- ZEISS (1972), *Photogrammetric Instruments*, Carl Zeiss, Oberkochen, West Germany, 143 pp.