

# Elaboración de videomapas mediante la corrección fotogramétrica de imágenes de video en color: La región de La Montaña de Guerrero

Jorge López Blanco\*  
Teresita Arias Chalico\*\*

Recibido: noviembre 7, 1997

Aceptado en versión final: 5 de junio de 1998

**Resumen.** Se aplicó un método fotogramétrico para corregir la posición geográfica de los píxeles de un conjunto de imágenes de video registradas con el eje de la cámara cercano a la vertical. Las distorsiones son las causadas por el relieve y por proyección central. Se generó un modelo digital del terreno con un píxel de 4 m, con el fin de determinar la corrección fotogramétrica. Las imágenes procesadas permitieron producir un videomosaico corregido, el cual incluye un área cercana a los 20 km<sup>2</sup>. Los errores medios cuadráticos totales durante el procedimiento de resección fotogramétrica por imagen van de 6 a 25 m. Los resultados permitirán clasificar el mosaico para delimitar las unidades de uso del suelo y vegetación.

**Palabras clave:** corrección fotogramétrica, videoimágenes en color, SIG, La Montaña de Guerrero.

**Abstract.** A photogrammetric method to correct the position of pixels coordinates on near vertical axis video imagery was applied. Distortions corrected with that method are caused by relief displacement and photographic projection and it is carried out by means of a photogrammetric resection procedure. A digital terrain model with a 4 m pixel-size was performed in order to determine the photogrammetric correction. Video imagery processed allowed us to produce a corrected videomosaic that include an area of almost 20 square kilometers. The total root mean square error in the photogrammetric resection procedure per image goes from 6 to 25 m. The results of processing these images will allow us to produce a map of land use/land cover units.

**Key words:** color video imagery, photogrammetric correction, GIS, La Montaña de Guerrero.

## INTRODUCCIÓN

El uso de las imágenes de video como fuente de información detallada, ha ido adquiriendo cada vez mayor importancia, sobre todo en los últimos años. En trabajos de reciente publicación se ha establecido, con demostraciones claras, que la precisión geométrica de las mediciones llevadas a cabo sobre las imágenes obtenidas usando videocámaras equipadas con CCD (como plano focal o de imagen), pueden ser de considerable exactitud, teniendo como resultados normales valores más pequeños que la unidad píxel. Esto representa una opción real para que se utilice dicha tecnología con fines de aplicaciones fotogramétricas (Wong y Taleb, 1992; Sersland *et al.*, 1995; Pickup *et al.*, 1995; King, 1995:259-260). Sin embargo, hasta ahora ha habido una notable escasez de comunicaciones de resultados de trabajos en los que se evalúen las

exactitudes de las propiedades métricas de los rasgos del terreno en las imágenes registradas con cámaras de video convencionales y, asimismo, en los que se plantea la posibilidad de transformar tales imágenes en un documento de calidad cartográfica (videomapa).

Cuando se presenta la necesidad de evaluar las características del ambiente natural, y particularmente si el propósito es realizar inventarios de recursos naturales en un territorio, con los resultados de la evaluación, se manifiesta comúnmente un problema de transferencia de información gráfica (puntos, líneas y aéreas) a un mapa base (rasgos de diferentes clases), sobre todo si se encuentran trazados en fotografías aéreas convencionales o, bien, como en el caso aquí presentado, en imágenes digitales de video en color.

\* Instituto de Geografía, UNAM. Autor para correspondencia: jlblanco@servidor.unam.mx

\*\* Programa de Aprovechamiento Integral de los Recursos Naturales (PAIR), Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Considerando la evidente importancia de lo anterior, un aspecto esencial que ocasiona que se tengan bajas exactitudes al transferir rasgos fotointerpretados a un mapa, es la magnitud de la distorsión diferencial en cada parte de la imagen, causada por la prominencia e inclinación del relieve (principalmente en áreas con laderas montañosas y lomeríos); asimismo, por la proyección cónica central o fotográfica.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de aplicar un método de corrección fotogramétrica a la posición de cada pixel de un conjunto de imágenes de video, para la construcción de un videomapa. Esto, subsecuentemente, permitirá delimitar y evaluar las unidades de uso del suelo y cobertura vegetal, a escala semidetallada, de una porción del municipio de Alpoyecá, en la región de La Montaña de Guerrero, procesando la información en un ambiente de SIG.

Una de las principales razones para llevar a cabo este trabajo ha sido el que no se ha generado hasta ahora un mapa de uso del suelo y vegetación, actualizado, de dicha región, y a escala semidetallada, el cual pueda ser empleado para diversos fines.

## ÁREA EN ESTUDIO

El municipio de Alpoyecá es uno de los 17 que conforman la región denominada La Montaña de Guerrero (Carabias *et al.*, 1994:37; INEGI, 1996:106). Esta región se localiza en la porción oriental del estado de Guerrero, en la parte limítrofe con los estados de Oaxaca y Puebla. La localización específica del municipio mencionado es en la porción noreste de esa región (Figura 1). Su extensión hacia el norte llega hasta el municipio de Malinaltepec, al sur hasta el municipio de Tlapa y al oeste hasta el municipio de Xalpatláhuac. Sus coordenadas centrales son 17°35'N y 98°29'W. El área específica para este trabajo tiene una extensión de casi 20 km<sup>2</sup> (recuadro número 3 de la figura 1).

La Montaña de Guerrero es una de las regiones que presenta uno de los relieves más abruptos del país. Sus paisajes se caracterizan por la presencia continua de laderas montañosas, muy

inclinadas, con superficies cumbreles angostas y redondeadas, asociadas a valles intermontanos profundos. Además, existe en el área la presencia de población marginada y en condiciones económicas de extrema pobreza; asimismo, el área está caracterizada por un significativo deterioro ambiental (Carabias *et al.*, 1994:47).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El levantamiento videográfico se realizó con la ayuda de un helicóptero como plataforma aérea (soporte de las cámaras) usando videocámaras convencionales de video en color, con el fin de caracterizar el uso del suelo de algunas porciones de cuatro de los municipios de la región de La Montaña de Guerrero, en el sur de México. En este trabajo se muestran los resultados de procesar 52 imágenes de video que cubren sólo una parte del municipio de Alpoyecá. Los vuelos se realizaron empleando un helicóptero bi-turbina Bolkow (construido en Alemania, Figura 2A).

Se realizaron diversos vuelos en el área en estudio, tratando de registrar completamente las cuatro principales áreas de interés (Figura 1); éstas tienen una extensión total de 220 km<sup>2</sup>. Las localidades de interés y los municipios en que se encuentran (junto con las áreas registradas con los vuelos) son las siguientes:

1. Acatepec (Acatepec, 40 km<sup>2</sup>),
2. San Nicolás Zoyatlán (Xalpatláhuac, 60 km<sup>2</sup>),
3. Tecoyo (Alpoyecá, 70 km<sup>2</sup>) y
4. Ixcuinatoyac (Alcozauca, 50 km<sup>2</sup>).

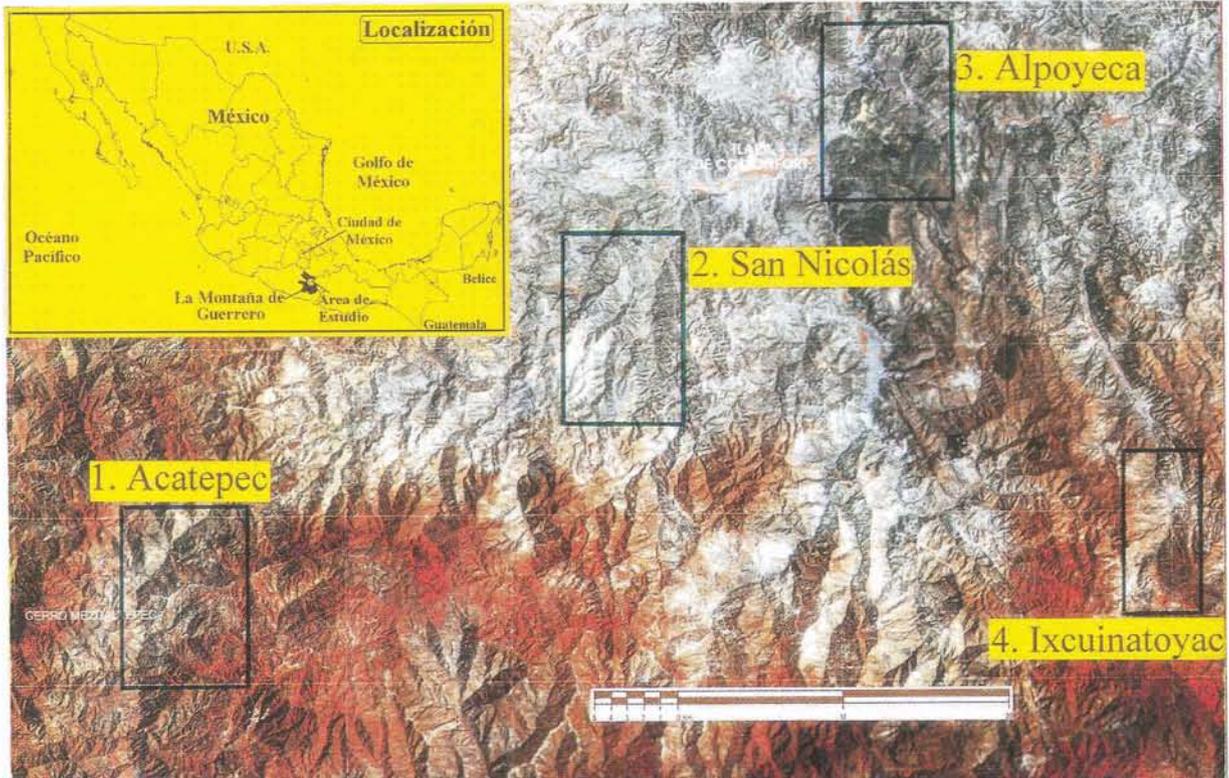
Los vuelos se llevaron a cabo durante los días 21 a 23 de octubre de 1995. Las horas en que se realizaron dichos vuelos, fueron entre las 10:00 y las 14:00 horas. Para el caso específico de este trabajo (municipio de Alpoyecá), el lapso de vuelo fue de las 13:00 a las 14:00 horas.

### Características de los vuelos, plataforma y registro de las imágenes

Para el registro de las imágenes se emplearon dos cámaras convencionales de video en color, una de ellas es la Sony CCD-TR55 (f=11-66 mm, usando una distancia focal de calibración

de 14 mm) y la otra fue la cámara Sharp modelo VL-MX7U-SL/GY (f=6-48 mm, distancia focal no calibrada de 6 mm) (sensor de imagen CCD 1/3", con 270 000 pixeles aproximadamente), asimismo, se empleó una cámara fotográfica reflex (Nikon) de formato de 35 mm (f=28 mm). Se colocaron en una montura de lámina de aluminio instalada en la estructura inferior del helicóptero (patín o ski, véase Figura 2). Esta

montura tiene forma rectangular (con el eje paralelo a la dirección del vuelo) y una extensión hacia el frente, que termina en punta, para ofrecer menor resistencia al viento (Figura 2B); básicamente consta de tres compartimientos de cámaras que son unas pequeñas cajas interiores (dos volúmenes cúbicos y uno rectangular) con las paredes formadas de lámina de aluminio (Figura 2C).



**Figura 1.** Localización del área en estudio. Con recuadros se marcan las cuatro áreas de levantamiento de teledetección viodeográfica. La porción evaluada se encuentra dentro del recuadro número 3 (Municipio de Alpyeca). Fuente de la imagen: Espaciomapa Chilpancingo (E14-8) a escala 1:250 000 (INEGI, 1996).



**Figura 2.** En A se muestra el helicóptero empleado para realizar los registros de las imágenes. En B se notan las dimensiones del soporte de aluminio en donde se colocaron las cámaras de video y fotográfica. En C se aprecia el diseño para sujetar la montura metálica en la estructura inferior del helicóptero, y los detalles de los compartimientos para la instalación de las cámaras.

En el fondo de cada compartimento se encuentra un orificio circular para el acomodo del lente de la cámara. El eje de cada cámara se centra sobre el orificio correspondiente, y se fija con firmeza a la estructura de lámina de aluminio, mediante el acomodo de bloques de espuma de poliuretano. Este tipo de montura es similar a la que fue descrita y usada por Long *et al.* en 1986. Para la observación de las imágenes como monitor de video se instaló un pequeño televisor (de 5") dentro de la cabina del helicóptero, el cual permanecía conectado a las dos videocámaras; esto con el fin de corroborar que no hubiese alguna falla en el registro de las imágenes, asimismo, para detectar la suspensión de grabación por término de energía de la batería y, eventualmente, para ayudar al piloto a establecer en forma adecuada las direcciones de las líneas de vuelo, con el fin de corroborar que las áreas del terreno registradas coincidiesen con las que se programaron previamente. Mediante una selección alternativa, con la sintonía del televisor, fue posible recibir la señal de salida de cada una de las dos cámaras.

Durante los vuelos, dentro de la cabina del helicóptero, se instaló un receptor GPS (Garmin GPS-100 Surveyor II) para el registro y la observación continua, en la pantalla del GPS, de las posiciones geográficas actualizadas a cada segundo. Este instrumento permitió la modificación de los trayectos de las líneas de vuelo, indicándole al piloto el rumbo hacia donde tenía que corregir.

Las posiciones de las líneas de vuelo fueron definidas de antemano para que coincidiesen con un valor cerrado a cada 500 m (en el eje de las X), en valores de coordenadas UTM. Sin embargo, aun cuando se intentó cubrir toda el área en estudio, frecuentemente se presentaron giros erráticos<sup>1</sup> del helicóptero en los tres ejes, lo que ocasionó que no se registrara una franja continua del terreno (véase el videomapa resultante al final del artículo). De cualquier manera, se cubrió en este trabajo, casi completamente, el área programada para la evaluación.

Pocos momentos antes de iniciar cada uno de los vuelos, se asignó al reloj de cada cámara de video el valor del tiempo desplegado en la pantalla del GPS (tiempo universal), con el fin de reducir al máximo el pequeño desfase de tiempo (centésimas de segundo) que se presenta debido a la menor exactitud de los relojes de las videocámaras y a los ajustes de tiempo asignados continuamente a los receptores GPS.

Para obtener una posición geográfica aproximada de cada una de las imágenes de video que serían seleccionadas para ser procesadas, durante toda la extensión del vuelo, en forma continua se registraron en la cinta de video los valores de tiempo (asignación en formato de horas-minutos-segundos) mediante el reloj de la cámara, esto con el fin de relacionar en fases posteriores del proceso las posiciones geográficas, a cada segundo, grabadas en el receptor GPS, con respecto a su valor correspondiente "titulado" en las imágenes grabadas en el videocasete.

Mediante cinco líneas de vuelo en dirección norte-sur fue posible registrar el área evaluada en este trabajo. Se trató de obtener una suficiente sobreposición lateral entre líneas consecutivas, lo cual permitiría una cobertura completa para la realización del videomapa de nuestra área de interés.

Las imágenes fueron registradas con una señal en formato analógico (empleando videocasetes de 8 mm), mediante la grabadora integrada a la videocámara. Las altitudes del terreno del área en estudio van desde los 1 000 hasta los 1 500 msnm y las altitudes de vuelo estuvieron entre los 2 800 y los 2 900 msnm (altitudes geoidales del GPS). Por tanto, las alturas de vuelo (sobre el terreno) fueron cercanas a los 1 600 m.

### **Selección y digitización de las imágenes de video**

Las imágenes seleccionadas fueron digitizadas usando una tarjeta de captura de video digital del tipo Video Reveal TV 500, con una resolución espacial seleccionada de 320 x 240 pixeles, empleando un formato de archivo TIFF de 24 bits (color "real"). El haber seleccionado

esta baja resolución espacial se debió principalmente a las siguientes razones:

1. Las imágenes fueron digitizadas desde un formato analógico (señal electrónica de frecuencias registrada en el videocasete), mediante su reproducción con una grabadora. Esto ocasiona que no se aproveche toda la información que registra el sensor CCD de la cámara, durante la "observación" original del terreno; es decir, si se hubiesen digitizado las imágenes durante el vuelo podía haberse utilizado una resolución espacial mayor, ya que existe más información registrada por el sensor que la que es grabada en la cinta, pero se hubiese perdido la continuidad de registro que ofrece la grabación continua en una cinta de video.

2. La plataforma aérea se encontraba en movimiento continuo durante todo el vuelo. Considerando esto y, además, teniendo en cuenta que el número específico de líneas de barrido por campo (cada 1/60 de segundo, s) determinado como algo constante para una señal de televisión (video estándar), en un formato "entrelazado" (del inglés *interlaced*), en términos realistas podría tener solamente 480 líneas totales de barrido (240 del barrido "par" y las mismas para el barrido "non") (véase King, 1995:248-249); el haber usado un número de líneas mayor a 250 hubiese generado una falsa mayor resolución espacial (525 líneas totales por "cuadro" (cada 1/30 s), segmentado en 262.5 líneas numeradas como pares y 262.5 numeradas como nones, cada 1/60 s).

3. Finalmente, la baja velocidad del procesador de la computadora que se usó para la captura de las imágenes no permitió una mayor resolución espacial (número de pixeles por fila y columna), pues ello significaba mayor tiempo de almacenamiento de información en archivo, lo que hubiese ocasionado una reducción en el porcentaje del área de sobreposición entre dos imágenes consecutivas.

Se seleccionaron y capturaron 90 imágenes, de ellas 52 fueron procesadas para su corrección fotogramétrica. Esto se hizo con el fin de tener una suficiente sobreposición longitudinal entre

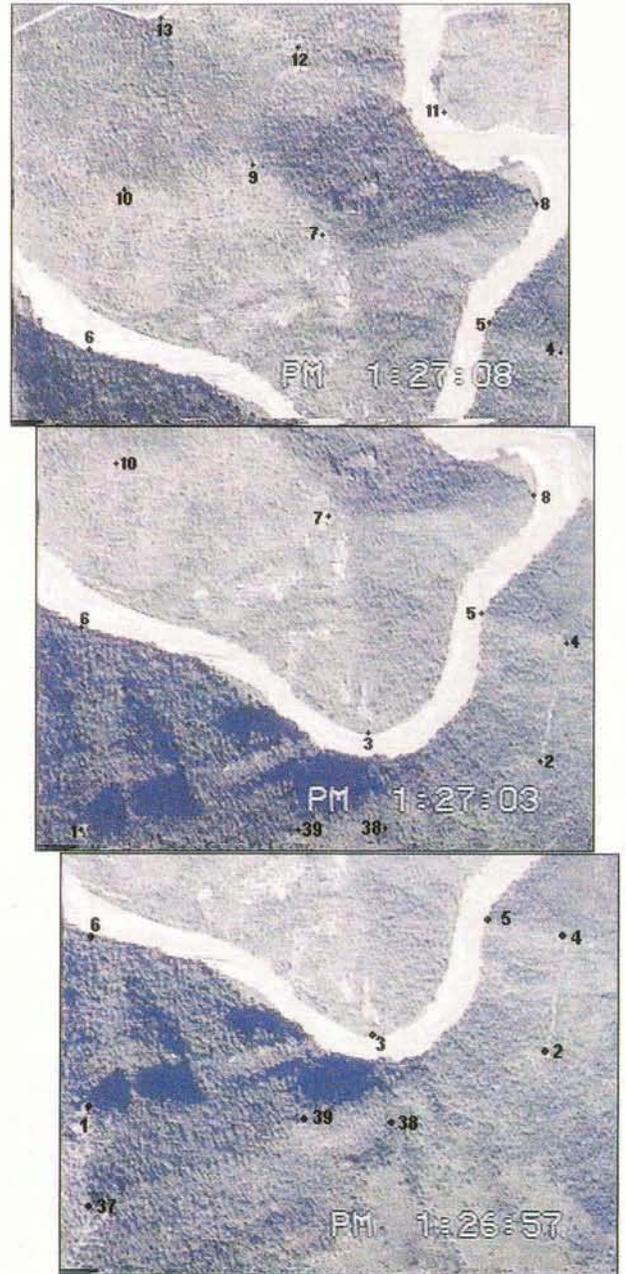
dos imágenes consecutivas, para llevar a cabo el procedimiento de análisis de videointerpretación estereoscópica en pantalla, lo que permitiría localizar y establecer los puntos de control terrestre sobre las imágenes seleccionadas. Esto es, en términos de tiempo de vuelo representa capturar y guardar una imagen cada seis segundos aproximadamente (Figura 3). En todos los casos existió una sobreposición longitudinal, entre dos imágenes consecutivas, de más de 60% dentro de una misma línea de vuelo. Esto simplificó la realización del proceso estereoscópico mencionado, asimismo, permitió tener mejores condiciones para decidir cuáles imágenes serían procesadas.

### Generación del MDT

Un fragmento del único mapa existente (topográfico a escala 1:50 000) fue escaneado empleando una resolución de 300 dpi (puntos por pulgada). Este mapa fue producido por el INEGI en 1983, procesando fotografías aéreas de 1979. Se aplicó un procedimiento de corrección geométrica al fragmento escaneado del mapa topográfico, empleando 34 puntos de control en los cruces, a cada kilómetro, de la retícula de las coordenadas UTM, esto durante la fase de asignación de coordenadas. Este procedimiento permitió rectificar la información de las curvas de nivel y las distorsiones incorporadas durante los procesos de edición del mapa e impresión en el papel.

Todas las curvas de nivel a cada 20 m fueron convertidas desde un formato raster o de celdas a un formato de puntos-líneas (vector), empleando la posibilidad funcional, que da el SIG, de realizar la función de digitización en pantalla. Al archivo vectorial resultante se le aplicó un algoritmo lineal de interpolación, y de esta manera se obtuvo el modelo digital del terreno (MDT), al cual se le estableció una resolución espacial de 4 m (tamaño de celda).

El MDT es esencial durante el proceso fotogramétrico empleado en este trabajo, ya que funciona como la fuente básica de información, con respecto a los valores altitudinales, tanto de



**Figura 3.** Tres imágenes secuenciales de video. Note los puntos de control determinados y sus claves, la sobreposición y el efecto de estereoscopia, asimismo la hora de registro para cada imagen.

los puntos de control que han sido establecidos para realizar el procedimiento, como para asignar los valores de desplazamiento para cada uno de los píxeles de cada imagen, en relación con su magnitud altitudinal con respecto al plano fotogramétrico de comparación (el nivel del mar o un nivel de alturas definido).

### CCD y distancia focal calibrada

La videocámara empleada está equipada con un sensor estándar de imágenes (CCD de 1/2"), el cual tiene las dimensiones 4.8 x 6.4 mm, formado por un arreglo aproximado de 250 000 fotodetectores activos de un total de 270 000 integrados en el microcircuito (chip). El área del plano focal (o plano de la imagen) fue determinada al consultar los manuales técnicos de la compañía que manufacturó la videocámara y el catálogo de la compañía Edmund Scientific Co. (Sony, 1989:144; ES 1996:181-189; López, 1994:42-44).

La distancia focal calibrada de la cámara se determinó mediante la aplicación del concepto geométrico de los triángulos semejantes, usando las medidas obtenidas directamente de los objetos de dimensiones conocidas, a diferentes distancias (también medidas) desde la cámara, resultando ser de 0.01360 m (para fines de cálculo de la corrección fotogramétrica se redondeó a 14 mm).

### Mejoramiento de las imágenes

Para el mejoramiento de la calidad gráfica de las imágenes (escogidas y procesadas), así como para resaltar los rasgos dentro de las mismas, se emplearon algunos programas comerciales de computación para el procesamiento y edición de las imágenes digitales. El programa Aldus Photo Styler (Versión 2.0) fue muy útil durante la fase de videointerpretación estereoscópica sobre la pantalla de la computadora, para establecer los puntos de control de apoyo terrestre, considerando las características topográficas para cada imagen (**Figura 3**).

Las principales características del terreno, empleadas con el fin de establecer los puntos de control en las imágenes de video, fueron las

siguientes: cambios marcados de trayectoria de los cauces, confluencia de cauces, carreteras y caminos, divisorias de agua (parteaguas), superficies cumbreles y crestas de montañas y colinas, cambios marcados de pendiente, etc. Otro programa que también fue útil para el mejoramiento de la calidad de las imágenes (usando formato de 24 bits) fue Photo-Paint de la versión 4.0 de Corel Draw. Este programa se empleó, además, para la edición de textos, símbolos y líneas, en relación con las posiciones de los puntos de control y para fragmentar-integrar (componer) las bandas RGB (rojo-verde-azul) de cada imagen procesada.

### Procesamiento fotogramétrico

El método aquí usado considera la aplicación de las ecuaciones de colinealidad tridimensional fotogramétrica, con el fin de determinar los seis parámetros que definen la orientación externa (absoluta) de la estación de "exposición" de cada imagen de video y la subsiguiente corrección de la posición de las coordenadas de cada pixel considerando sus valores altitudinales en el MDT. Existen diferentes referencias en las cuales es posible encontrar una amplia explicación acerca de la base conceptual fotogramétrica en la que se basó el modelo de corrección (Wolf, 1974:269; ASP, 1980; Bargagli, 1991 y 1991a, ITC, 1994:S25-28).

La estación de exposición de cada imagen de video se determinó de acuerdo con las coordenadas del mundo real del centro de perspectiva o de proyección central,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  (tres elementos de localización) y los ángulos de rotación omega  $\omega$  (en el eje de las X), phi  $\phi$  (en el de las Y) y kappa  $\kappa$  (en el de las Z). La aplicación del método de resección fotogramétrica mencionado, empleando las ecuaciones Bundle (Wolf, 1974:540-551) para una fotografía individual, se llevó a cabo procesando e integrando el conjunto de las imágenes en el contexto de un sistema de información geográfica (ILWIS; ITC, 1993, 1994). Para ver con más detalle todo el procedimiento de orientación y los resultados que se obtuvieron en cada una de las partes, véase López, *et al.* (1996).

## RESULTADOS

Se determinaron las coordenadas UTM de los puntos de control para cada imagen, identificándolas en el fragmento del mapa topográfico fuente (geocorregido e impreso en papel, a escala 1:17 000). Tales puntos de control fueron localizados en el mapa impreso, y luego digitizados en ILWIS (obteniendo un archivo en formato ASCII). En esta forma, un archivo con 215 puntos de control fue preparado para los siguientes procedimientos en este trabajo. Posteriormente se creó un archivo, en el mismo formato, el cual combina los valores de las coordenadas-imagen de los puntos de control, con sus correspondientes valores de coordenadas UTM del terreno (reales).

Se asumió que las cuatro esquinas de las imágenes escogidas y procesadas podrían ser tomadas como las "marcas fiduciales", particularmente para el proceso de orientación interior. Considerando esto y usando la posibilidad funcional de ILWIS para la digitización de puntos (*Digitizing Points*) en formato ASCII, para cada imagen se preparó un archivo para las orientaciones interior y absoluta, el cual contiene las video coordenadas en unidades pixel (comparables a una resolución de una centésima de mm, considerando las dimensiones del sensor CCD), asimismo, las coordenadas de las marcas fiduciales como de los puntos de control de la misma imagen.

Con el fin de asegurar los valores de coordenadas imagen a las marcas fiduciales mencionadas, se usaron los siguientes valores de video coordenadas (usando un arreglo matricial común, empleando filas y columnas): esquina superior izquierda  $x=1$ ,  $y=1$ ; esquina superior derecha  $x=320$ ,  $y=1$ ; esquina inferior izquierda  $x=1$ ,  $y=240$ ; y, finalmente, la esquina inferior derecha  $x=320$ ,  $y=240$ .

Tres puntos de control distribuidos de manera homogénea dentro de la imagen son suficientes para obtener la solución a las ecuaciones Bundle o de colinealidad tridimensional. Pero se recomienda el uso de 6 a 8 (o más) puntos de control, con el fin de corroborar diferencias y hacer algún tipo de análisis estadístico (ITC, 1994:S25). En promedio se localizaron 8.4 puntos de control (Desv. Estándar=1.7) para cada una de las imágenes procesadas, lo que permitió asociar las coordenadas de videoimagen (fotográficas) con respecto a sus correspondientes del mundo real (posiciones en el terreno empleando coordenadas UTM); esto con el fin de llevar a cabo los procedimientos de orientación interior y absoluta, basándose en las marcas fiduciales de la imagen, esquinas de la videoimagen en este caso (ITC, 1994:S17).

Con el programa *MonoPlotting* de ILWIS la solución de las ecuaciones se basa en el cálculo inicial de los seis parámetros de estación de registro de imagen, los cuales son iterativamente ajustados, minimizando las discrepancias entre las video coordenadas observadas X y Y, con respecto a aquéllas con las ecuaciones de colinealidad tridimensional, hasta que las diferencias sean numéricamente poco significativas. El número máximo de iteraciones fue establecido en 15. El umbral de convergencia se seleccionó en 0.00001 radianes (2.06 segundos de arco) (ITC, 1994:S25). Un dato de partida necesario para realizar el procedimiento anterior es el valor (en metros) de la distancia focal o principal ( $f$ ) de calibración de la cámara. En la **tabla 1** se ejemplifican, con la imagen 1717, los resultados de la orientación absoluta.

**Tabla 1.** Parámetros resultantes de la orientación absoluta para la imagen **1717** ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) y los valores de la matriz de orientación para la misma imagen ( $a_{11}$  ...  $a_{33}$ )

$X_0=551,058.272$ m	$Y_0=1,944,727.744$ m	$Z_0=3,531,601$ m
$\omega=9.29585965^\circ$	$\varphi=19.24264725^\circ$	$\kappa=11.17769829^\circ$

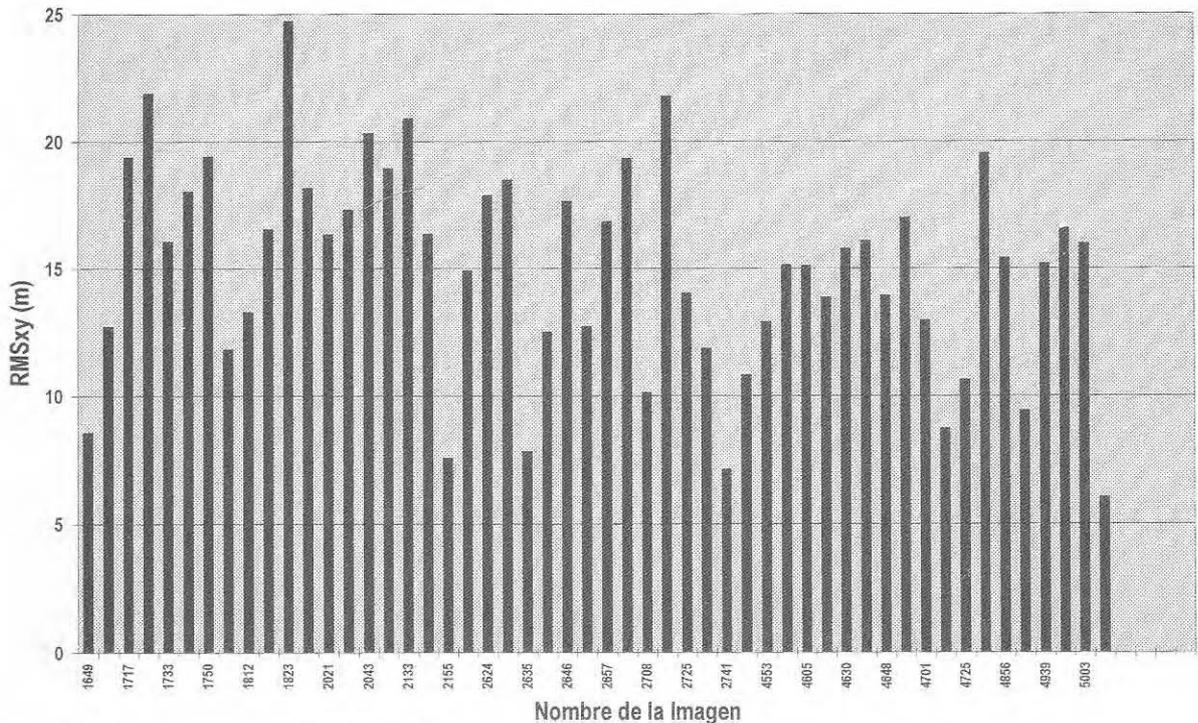
$a_{11}=0.92622180$	$a_{12}=0.13908039$	$a_{13}=0.35038526$
$a_{21}=0.18302223$	$a_{22}=0.97846716$	$a_{23}=0.09541949$
$a_{31}=0.32956949$	$a_{32}=0.15250790$	$a_{33}=0.93173241$

La **tabla 2** muestra las diferencias de distancia en metros (o residuos, en las columnas cinco y seis) entre las coordenadas reales de los puntos de control, con respecto a las obtenidas durante el proceso de orientación fotogramétrica (se emplea la misma imagen 1717 como ejemplo) y los valores de la raíz de la suma de los

cuadrados de los errores independientes (errores medios cuadráticos) para X, Y y la total en XY), después de realizado el procedimiento de orientación exterior. La **figura 4** muestra los resultados integrados para las 52 imágenes procesadas.

**Tabla 2.** Residuos y errores medios cuadráticos de los puntos de control para X, Y y XY, después de la orientación exterior. Se usa como ejemplo la imagen **1717**

Punto de control	X calculada UTM (m)	Y calculada UTM (m)	Residuo en X (m)	Residuo en Y (m)	Altitud del MDT (m)
67	550642.35	1944951.50	25.348	-11.503	1001.49
73	550294.50	1944485.77	-3.502	14.766	1005.98
173	550347.48	1944878.44	-8.519	-19.562	1157.45
174	550317.63	1945096.13	-8.632	7.133	1043.49
175	550473.48	1945099.68	-17.520	14.683	1018.92
176	551072.79	1945021.69	2.793	12.687	1160.33
177	550902.38	1945143.18	-7.615	-16.816	1000.55
Error medio cuadrático	RMSx = 12.95 m	RMSy = 14.36 m	RMSxy = 19.34 m		



**Figura 4.** Error medio cuadrático total (RMSxy) para las 52 videoimágenes corregidas. El promedio resultante fue de 15.01 m (desviación estándar=4.18 m, rango=6 a 25 m).

El procedimiento descrito puede ser parcialmente procesado en la versión 1.41 de ILWIS, específicamente la parte correspondiente a la orientación fotogramétrica (usando la función de *MonoPlotting*). Pero el programa principal (*ORTHOPH*), que permite corregir la posición de los píxeles por medio del uso del MDT, es un programa funcional, no comercializado, pero disponible con el autor (Bargagli, com. per., 1996), que fue desarrollado para cubrir actividades didácticas y de entrenamiento en fotogrametría (Bargagli, 1991a, 1991b).

#### Elaboración de mosaicos y edición del videomapa

Cada una de las 52 imágenes seleccionadas

fue "descompuesta" en sus tres bandas independientes RGB de formato de 8 bits, usando una escala de 256 tonos de gris. Tales bandas fueron re-compuestas y re-integradas ("mosaiqueadas"), después de ser individualmente corregidas, con el fin de producir el mosaico digital fotogramétrico (videomapa para propósitos de mapeo semidetallado), empleando el mismo formato original de archivo, de 24 bits (TIFF). El tamaño de pixel de salida (3 m) se seleccionó para cada imagen, antes de que se le aplicara el proceso de corrección fotogramétrica. El mosaico corregido resultante tiene una extensión de 1 837 filas por 1 570 columnas (**Figura 5**).

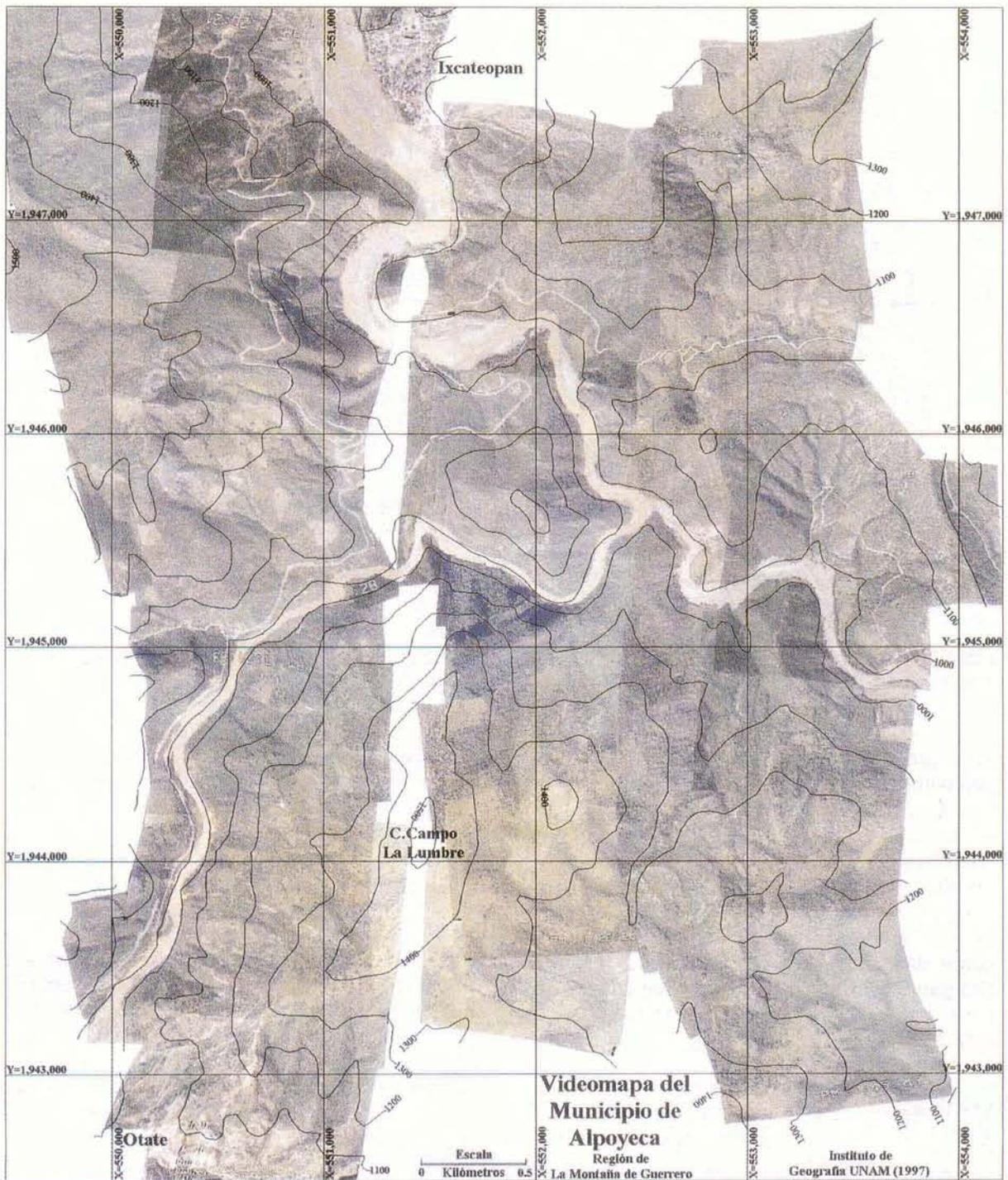


Figura 5. Videomapa de una porción del municipio de Alpayeca, en la Región de La Montaña de Guerrero.

El método de remuestreo de píxeles, aplicado durante la corrección fotogramétrica de cada banda-imagen, con el fin de determinar los niveles digitales (ND) de los píxeles corregidos, fue el del "vecino más cercano". Este procedimiento de muestreo se utilizó para evitar la transformación de los valores en la escala de grises (de la "banda" original), causados cuando se emplean procedimientos de interpolación conocidos como bilineales y spline-cúbico, los cuales se usan frecuentemente para el remuestreo de los ND, dentro de procesamiento digital de imágenes de satélite. En esta forma, el método mencionado permitió evitar que los valores originales de color "real" sufrieran cambios durante la fase de recomposición, al emplear las tres "bandas" corregidas (RGB) para cada videoimagen.

Las imágenes seleccionadas fueron procesadas de manera independiente, y después de ser corregidas fotogramétricamente, empleando el MDT, fueron "mosaiqueadas" una a una empleando la capacidad funcional del SIG ILWIS conocida como *GlueMap* (ITC, 1993, 1994). Dichas imágenes al ser integradas permitieron producir la composición de un mosaico digital corregido que cubre un área aproximada de 20 km<sup>2</sup> (Figura 5).

En diferentes pasos del procedimiento aplicado, como el que se mencionó en el párrafo anterior, se empleó la posibilidad que presenta el SIG de aplicar los archivos de procesamiento en bloques de comandos en línea (*batch file*), lo que dio la posibilidad de la automatización de algunos procesos rutinarios del método propuesto en este trabajo. Otras fases en las que se empleó ese tipo de archivos fue en la aplicación de la ortocorrección de cada imagen por banda RGB, asimismo durante el procedimiento de orientación.

Después de la integración de todas las imágenes en un mosaico por banda RGB, se le agregaron los vectores de las curvas de nivel a cada 100 m. Con el fin de producir el videomapa final, cada banda RGB corregida y con los trazos de curvas de nivel y cuadrícula fue integrado en un solo archivo, generando una imagen en color natural, de 24 bits. Posteriormente, a este

archivo se le agregaron textos marcando los poblados más importantes, las cotas de las curvas de nivel y los valores de las coordenadas UTM en metros, en los extremos del videomapa; para ello se usaron los programas convencionales para edición de imágenes.

## CONCLUSIONES

El procedimiento fotogramétrico aplicado en este trabajo, según las condiciones de carencia de información detallada (específicamente considerando la resolución espacial del MDT), ha demostrado ser una metodología disponible y apropiada para producir el videomapa de una parte del municipio de Alpoyecá, Guerrero.

Con el método propuesto, la producción de tales tipos de videomapas resulta ser de bajo costo y permite la actualización cartográfica, con suficiente detalle, de áreas en donde no existe información temática reciente y disponible, incluyendo aquellas con relieve abrupto, como es el caso presentado del área en estudio.

Es importante decir que, cuando se habla de bajo costo, se refiere a la posibilidad de emplear una plataforma aérea de mucho menor precio a la utilizada en este trabajo, pues es obvio que el importe de un vuelo en helicóptero es mucho más alto si se compara, en condiciones similares de lejanía del sitio a registrar y de tiempo efectivo de vuelo, con respecto al de un avión pequeño (por hora de vuelo).<sup>2</sup>

Se tienen que considerar varios aspectos para que se pueda hablar de altos o bajos costos en la aplicación de un método como el mostrado aquí. Es fundamental considerar que, si el proceso mencionado se lleva a cabo en el contexto de un apoyo institucional y no personal, sobre todo pensando en la disponibilidad de equipo y programas de computadora tan especializados y costosos, como lo puede llegar a ser un SIG que tenga posibilidades funcionales de procesamiento fotogramétrico digital, entonces pueden resultar costos considerablemente pequeños.

El haber tenido el programa *ORTHOPH* disponible para corregir cada imagen,

empleando el MDT, dio las posibilidades reales para hablar de reducir sustancialmente los costos si se consideran las magnitudes de los recursos que se necesitan para adquirir un programa especializado en fotogrametría digital.

Las exactitudes alcanzadas durante el procedimiento de orientación exterior o absoluta, sugiere que el mosaico producido con las 52 imágenes y su posterior integración y edición (con el fin de que se tenga lo que se ha llamado aquí un videomapa), tiene un suficiente nivel de certidumbre como para que dicho documento cartográfico sea empleado para propósitos generales de interpretación y actualización cartográfica, asimismo, para propósitos de mapeo semidetallado y con exactitudes medias.

El número de puntos de control terrestre (en promedio) establecidos para cada imagen, a partir de la cartografía topográfica, fue suficiente para obtener una adecuada exactitud durante los procesos de orientación y corrección fotogramétricas.

Se realizó un análisis visual para cada una de las imágenes corregidas, con el fin de corroborar la coincidencia entre características topográficas (como las curvas de nivel a cada 20 m, cauces, superficies cumbresales y crestas de montañas, rupturas de pendiente, etc.), comparándolas con los mismos rasgos correspondientes en las videoimágenes, el resultado fue que en la mayoría de los casos hubo una cercana correspondencia, sin embargo, en algunos sitios las diferencias de distancias entre la misma característica, entre las dos imágenes, llegó a ser considerable (más de 30 m) (véanse los trayectos de los cauces en áreas de unión de imágenes de la **figura 5**).

Considerando que la información fotográfica aérea existente de esta parte de la región de La Montaña de Guerrero es de baja resolución espacial en los dos casos (fotos a escala 1:80 000 para 1979 y 1:75 000 para un vuelo de INEGI de 1990), es evidente la importancia que representa generar una actualización cartográfica, a escala semidetallada, para propósitos generales de uso y específicamente

para realizar la caracterización del medio natural biofísico.

Las condiciones económicas de la población que habita el área en estudio son de extremada pobreza. La información del videomapa de uso del suelo y vegetación, que se tendrá como producto final del proyecto, permitirá tener una referencia geográfica actualizada y con mayor nivel de detalle que cualquier información cartográfica temática, generada hasta ahora, del área en estudio. En esa forma será posible evaluar y hacer un diagnóstico forestal, con información fidedigna y detallada (a nivel de localidad o comunitario), que permita delimitar las características de uso de la energía vegetal (leña), en la vida cotidiana de las comunidades de la región, con fines de evaluar la magnitud del recurso y los patrones de su consumo.

## CONSIDERACIONES FINALES

La exactitud de los videomapas depende de la calidad y resolución espacial de la información altitudinal de origen (mapa topográfico). En este caso particular no existió una comparabilidad representativa entre el MDT usado y la resolución de las imágenes de video. El siguiente paso en el proceso de videomapeo es explorar las posibilidades de obtener ortoimágenes corregidas usando el MDT generado por las propias imágenes, mediante un procedimiento de estereocorrelación espacial automatizada. Para ello será necesario partir de mayor exactitud en el establecimiento de las coordenadas de los puntos de control terrestre, mediante levantamientos diferenciales con receptores GPS o con receptores de doble frecuencia.

En un futuro cercano, el videomapa resultante será clasificado aplicando un procedimiento de clasificación supervisada estándar, usando las bandas rojo-verde-azul (RGB) considerando para ello la información integrada de acuerdo con el formato de archivo empleado (24 bits por pixel). El objetivo principal de esto será explorar las posibilidades de clasificación y obtención de un mapa de uso del suelo, conjugando la información que se registre durante el

procedimiento de fotointerpretación de coberturas en pantalla (mediante el modelo estereoscópico generado por dos imágenes consecutivas seleccionadas), además de la que aporten los campos de entrenamiento en la imagen, asimismo de la información de coberturas registrada en el terreno.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos manifestar nuestro agradecimiento al M.Sc. Alejandro Bargagli, por el uso del programa de computación para realizar parte

del procedimiento presentado en este trabajo. Se agradece ampliamente la participación del piloto capitán Mario Flores, de la compañía TAESA, por su amplia colaboración en la realización de los vuelos en el área en estudio, así como al personal logístico de la misma empresa. También a Luis Arias Chalico, de la UAM-Xochimilco, por el apoyo en la realización de las tomas y el empleo del equipo fotográfico. En igual forma se agradece al Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNAP (México) el apoyo brindado para la realización de este estudio.

## NOTAS

<sup>1</sup> El piloto del helicóptero no está capacitado para realizar vuelos con fines fotogramétricos (videogramétricos en este caso), por lo cual las direcciones seguidas para registrar cada línea fueron, en algunos momentos, erráticas. En términos de levantamiento del terreno, el piloto no había tenido una experiencia anterior semejante.

<sup>2</sup> Se contó con el apoyo institucional de la compañía aérea para conseguir sin costo la plataforma mencionada, lo cual en algunos casos, para otros grupos de trabajo, con baja disponibilidad de recursos económicos, también sería posible tener acceso a un vehículo similar, considerando la infraestructura aérea existente en las entidades de gobierno en el país (PEMEX, CFE, SAGAR, gobiernos de los estados, compañías aéreas, entre otras).

## Referencias

- ASP (1980), *Manual of Photogrammetry*, Fourth Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va., EUA, 1056 pp.
- Bargagli, A. (1991), *Screen digitizing geometric correction & monoplottting for SPOT, LANDSAT and normal aerial photographs in the ILWIS environment*, internal ITC publication, Enschede, The Netherlands, 28 pp.
- Bargagli, A. (1991a), *Geometric aspects and DTM requirements related to feature extraction from SPOT images*, ITC MSc Thesis, Enschede, The Netherlands, 94 pp.
- Carabias, J., E. Provencio y C. Toledo (1994), *Manejo de recursos naturales y pobreza rural*, UNAM-CFE, México, 138 pp.
- ES (1996), *1996-1997 Optics and Optical Instruments Catalog*, Edmund Scientific Company, Barrington, N. J., 258 pp.
- INEGI (1983), *Carta topográfica Tlapa*, escala 1:50 000, clave E14D22 (producida con fotografías aéreas a escala 1:80 000 de 1979), México.
- INEGI (1996), *Conteo de población y vivienda 1995*. Estados Unidos Mexicanos. Resultados preliminares, Aguascalientes, México, pp 106.
- ITC (1993), *The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 1.4, User's Manual*, First edition, International Institute for Aerospace and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands, 412 pp.
- ITC (1994), *The Integrated Land and Water Information System ILWIS version 1.4, Supplement to 1.4 User's Manual*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands, 87 pp.
- King, D. J. (1995), "Airborne multispectral digital camera and video sensors: A critical review of systems designs and applications", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 21, Ottawa, August 1995:245-273.
- Long, D. S., J. E. Taylor y J. McCarthy (1986), "Cessna Aircraft Cabin Door Mount for Photographic and Videographic Cameras", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, núm. 11, pp. 1753-1755.
- López Blanco, J. (1994), Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS), tesis de Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 222 pp.
- López Blanco, J., I. Valdez Muciño y J. Ugalde Rivera (1996), "Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG, para la determinación del uso del suelo en la Sierra de Quetzaltepec, México", *Investigaciones Geográficas Boletín*, núm. 33, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 9-30.
- Pickup, G., G. N. Bastin, V. H. Chewings y G. Pearce (1995), "Correction and Classification Procedures for Assessing Vegetation Cover for Use with Airbone Video data", *Proceedings of The 15th Biennial Workshop on Color Photography and Videography in Resource Assessment*, May 1995, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, EUA.
- Sersland, C. A., C. A. Johnston y J. Bonde (1995), "Using GPS-Linked, Color Video Image Mosaics to Assess Wetland Vegetation", *Proceedings of The 15th Biennial Workshop on Color Photography and Videography in Resource Assessment*, May 1995, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, EUA.
- Sony (1989), *Video Camera Recorder CCD TR55 User's Manual*, Japón, 157 pp.
- Wolf, P. R. (1974), *Elements of Photogrammetry*, 2nd. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 562 pp.
- Wong, K. W. y M. Taleb-Obaidat (1992), "DRSTEREO A stereo measurement system for the PC", *Technical Papers of the ASPRS/CSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change*, vol. 2, (Photogrammetry and Surveying), Washington, D. C., August 3-8, pp. 228-234.