

# METODOLOGÍA EN LA REALIZACIÓN DEL INVENTARIO NACIONAL FORESTAL: ORTOCORRECCION DE IMÁGENES DIGITALES\*

Alfredo Cortés\*\*  
Valentino Sorani\*\*

## Resumen

En este trabajo se presenta el proceso metodológico empleado en la corrección geométrica de las imágenes digitales (LANDSAT TM) utilizadas en la realización del Inventario Nacional Forestal de México, recientemente efectuado por el Instituto de Geografía de la UNAM y auspiciado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). La corrección geométrica de las imágenes se llevó a cabo ubicando alrededor de 60 puntos de control por escena y permitiendo un error máximo global de menos de 1.5 píxeles de magnitud (menos de 45 m), lo que aseguró una precisión espacial confiable para la escala de la cartografía realizada (1:250 000). La ubicación de los puntos se determinó a partir de la cartografía topográfica escala 1:50 000 editada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). En la corrección se tuvo en consideración el relieve de la zona cubierta por cada imagen, a través del Modelo Digital del Terreno (MDT). En este trabajo se desarrolla la metodología empleada y cada una de las etapas involucradas en la misma. Finalmente, se muestra un ejemplo del desempeño de esta técnica a través de una imagen digital cartografiada correspondiente a la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México.

## Summary

In this work we present the methodology that was used in the forestry cartography that the Instituto de Geografía (Institute of Geography, IGG) had developed with the Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (Secretary of Agriculture and Hydraulic Resources, SARH). We present in this first stage of the project the methodology used in the orthorectification of images, showing one orthoimage processed with this methodology. This geometrical correction was achieved using about 60 ground control points per image with a root mean square error of 1.5 pixels (45 m), getting a good cartographic precision for this scale work (1:250 000). The ground control points were obtained using topographic cartography from INEGI (National Institute of Cartography). The DTM (Digital Elevation Model) was used in the image correction. In this work we present the methodology used and an example of this technique on an image of Guadalajara, Jalisco, Mexico.

---

\* Recibido: 5 de mayo de 1995.

\*\* Instituto de Geografía, UNAM, México.

## Introducción

En 1992 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) firmó un convenio con el Instituto de Geografía de la UNAM a través del cual este último se comprometió a realizar la cartografía forestal nacional. La finalidad de la SARH fue la de contar con un inventario nacional forestal que le permitiera tener un mejor control sobre el recurso forestal de nuestro país. En este trabajo se resume la metodología seguida a lo largo de la primera etapa del proyecto que consistió en la ortocorrección de las imágenes y la creación de mosaicos para la posterior extracción de subimágenes de acuerdo con la división de la cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 1:250 000. Existe un trabajo en el que se empleó una técnica parecida de ortocorrección, sólo que fue aplicado a imágenes MSS y se utilizaron técnicas de geoposicionamiento con GPS (Fisher, 1991). La técnica descrita en este trabajo se aplicó a imágenes LANDSAT TM.

A lo largo del proyecto se usaron dos sistemas de procesamiento de imágenes: PIXSAT y GRASS, el primero de ellos desarrollado en el Instituto de Geografía (Cortés, 1992) y el segundo es un producto del *U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory* (Westervelt, 1988). GRASS se utilizó únicamente en la ubicación de puntos de control, mientras que PIXSAT se usó prácticamente en todo el proyecto. Cabe hacer notar que la plataforma de ejecución de estos sistemas fue en estación de trabajo.

Para que una imagen de satélite sea un producto cartografiable se requiere que ésta se ajuste a un sistema de referencia global, utilizado en la cartografía de un país o de una zona determinada. En el caso de México, la cartografía existente (editada por INEGI) se encuentra en la proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) que define un marco de referencia. Para mantenerse en esta misma línea, se decidió generar la cartografía forestal utilizando la proyección UTM (Blachut *et al.*, 1979 y Caire, 1986).

## Metodología

En la **figura 1** se muestra un diagrama de flujo de la metodología utilizada en el proceso de ortocorrección geométrica de las imágenes de satélite. En este trabajo se describe cada uno de estos pasos y las razones por las que se hizo así. Como se puede ver en dicha figura, el primer paso en la generación de una imagen corregida fue la de generar un Modelo Digital del Terreno confiable y en una proyección común a la imagen de satélite y a la cartografía utilizada por el INEGI. El segundo paso fue el de ubicar los puntos de control sobre la imagen a corregir y la evaluación de los mismos. Estas dos tareas se realizaron en un ciclo de ubicación-evaluación que permitió determinar la mejor ubicación de los puntos (donde el error fuese minimizado). Una vez obtenido un conjunto de puntos "confiables", se procedió a la ortocorrección de cada una de las

imágenes, con las que se pudieron generar los mosaicos de donde se extrajeron las imágenes con cuadrícula usada por INEGI en su cartografía topográfica, escala 1:250 000. Con estos compuestos trabajaron los fotointérpretes.

Cabe hacer notar que todos los procesos descritos en este trabajo, en lo que concierne a imágenes, se llevó a cabo utilizando el compuesto de color 432 de las bandas LANDSAT TM para la fotointerpretación y el compuesto 542 para la ubicación de puntos de control. Se utilizaron estos compuestos de color debido a que en ellos es más fácil discernir entre los diferentes tipos de vegetación. Esta selección fue decisión de los fotointérpretes.

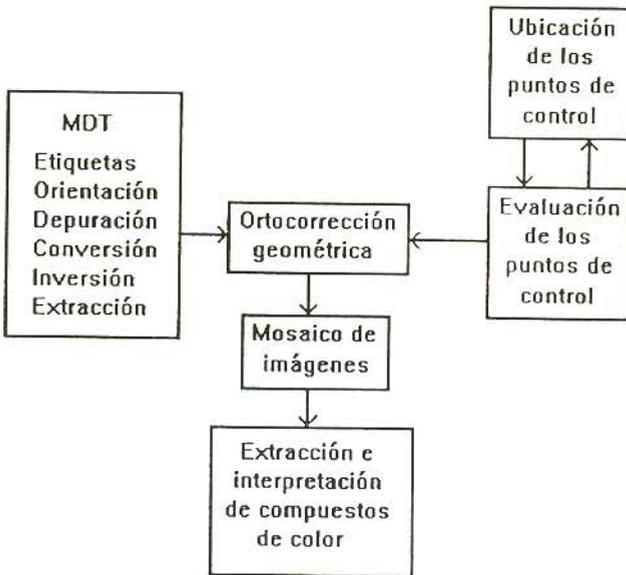


Figura 1. Metodología seguida en la generación de imágenes ortorectadas.

### Modelos de terreno

La corrección geométrica de las imágenes usadas en el proyecto de la cartografía forestal se llevó a cabo utilizando Modelos Digitales de Terreno (MDT), que son representaciones digitales de las alturas sobre el nivel del mar de un conjunto de puntos equiespaciados de un área determinada (Burrough, 1986). Estos MDT se utilizaron para lograr una corrección ortográfica

(Bargagli, 1990). Los modelos de terreno fueron proporcionados por INEGI para toda la zona boscosa del país. Sin embargo, cabe hacer notar que fue necesario hacer algunas operaciones sobre los MDT antes de utilizarlos en el proyecto; estas operaciones se explican a continuación.

Cada renglón (perfil) del MDT se almacena como un registro independiente en memoria. En cada uno de estos registros se almacena información al inicio y al final del mismo que no corresponde al perfil, sino información secundaria. En esta parte del registro se define el número de línea de cada uno de los perfiles representados en el modelo digital. Estos valores fueron desechados del MDT. En la **figura 2** se muestra un diagrama de un modelo digital del terreno de un grado por un grado, y en donde se puede ver que al "unir" cada uno de los perfiles se obtiene el modelo final; también se puede ver la banda que se desecha de cada modelo.

Los MDT originales de INEGI constan de un archivo que define una región geográfica de 1° de latitud por 1° de longitud, con un valor de altura cada 3 segundos geográficos. La distancia entre cada par de puntos en las direcciones vertical y horizontal en el Ecuador es de aproximadamente 90 m. Como la cartografía forestal se generó en la proyección UT fue necesario transformar cada MDT a esta proyección, remuestreando alturas cada 90 m en las direcciones horizontal y vertical, lo que permitió tener un modelo equiespaciado y donde los valores interpolados coincidieran lo más posible con los originales.

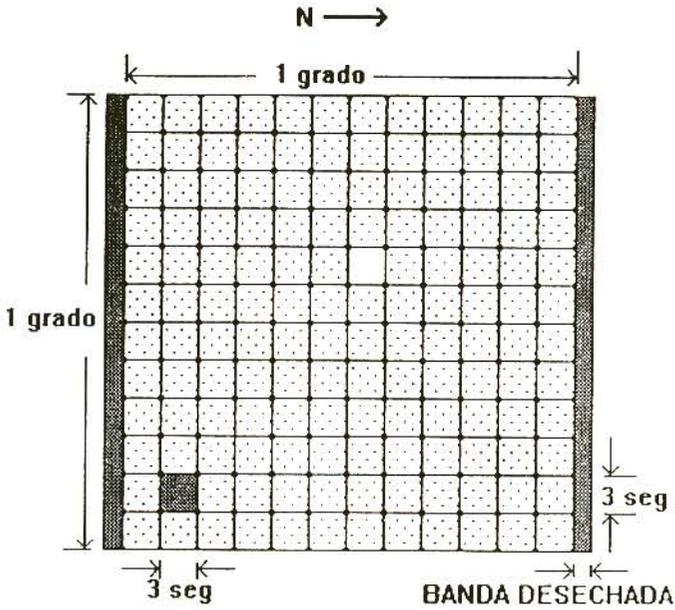
La orientación de los MDT es Este-Oeste, cuando debería ser Norte-Sur. Cada modelo fue rotado 90° para lograr esta orientación. En la **figura 2** se muestra una representación esquemática de cada uno de estos MDT. Dentro de cada MDT hay valores que no pudieron ser determinados por el INEGI y que tienen un valor "fantasma", por simplicidad, estos valores se igualaron a cero; con lo cual el resultado de ortocorrección no los tiene en cuenta.

Para algunos procesos donde se requería la microcomputadora, fue necesario invertir los valores de altura (cada altura está formada por dos bytes) ya que las estaciones de trabajo usadas almacenan un número entero en forma inversa a como lo hace la microcomputadora.

### **Extracción del MDT**

Una vez que los modelos de terreno se adaptaron al formato generado por la aplicación de los cinco pasos anteriores, las etapas que se siguieron para la adaptación de éstos a las necesidades del proyecto fueron:

a) Generación de mosaicos de modelos digitales por zona UTM (seis zonas para todo el país).



**Figura 2.** Estructura de un Modelo Digital de Terreno de INEGI.

b) Determinación del área que ocupa una imagen y extracción de esta región. Para asegurarse que el MDT estuviera cortado correctamente se transformaron las coordenadas extremas de las imágenes a coordenadas UTM y se añadieron 10 km de margen a cada lado de estas coordenadas (Figura 3).

c) La región del MDT extraída se utilizó en el programa REGISTRO (Cortés, 1992), para la ortorección de la imagen correspondiente.

### Casos particulares

La generación de mosaicos del MDT por zonas fue directa, ya que la separación de cada MDT proporcionado por INEGI es de grados enteros. Sin embargo, este no fue el caso para las imágenes, ya que existen algunas que se encuentran en dos zonas UTM adyacentes (Figura 4).

Este caso se manejó de manera especial: una corrección para cada zona. El proceso de extracción del MDT se realizó dos veces y se ejecutó la ortocorrección para cada subimagen (Figura 4) por separado.

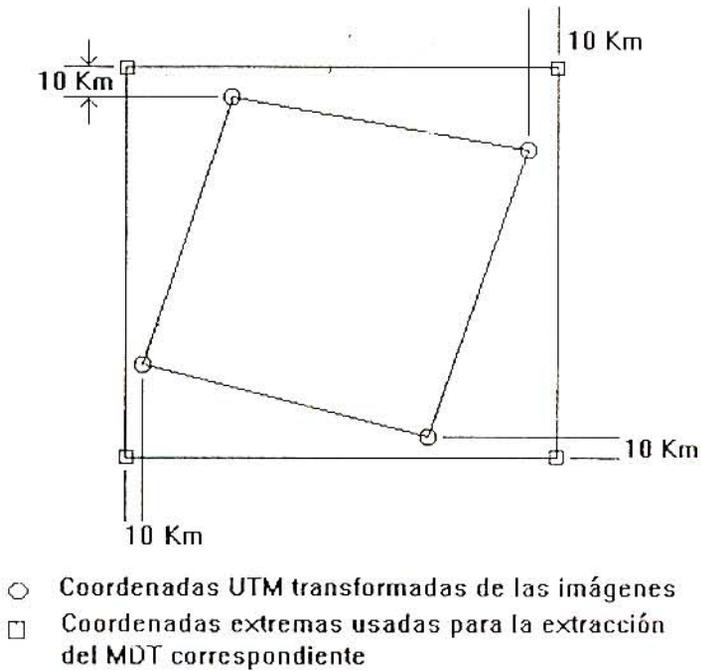
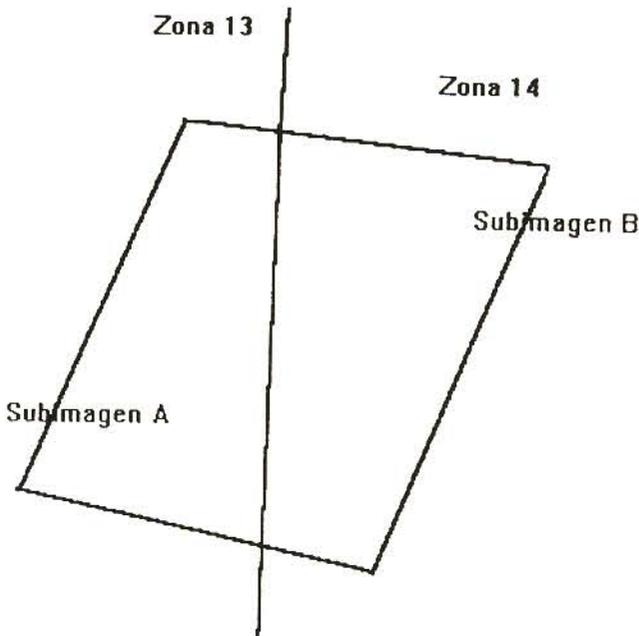


Figura 3. Extracción de MDT's a partir de una imagen.

### Ubicación de los puntos de control

Los puntos de control se ubicaron para cada imagen utilizando como base la cartografía topográfica de INEGI, escala 1:50 000. Se ubicó un promedio de 60 puntos de control por imagen que no cruzó zona UTM, mientras que para los que ocupan dos zonas, el número fue de un promedio de 30 puntos por subimagen. Se usó una ortocorrección con polinomios de tercer grado, que requiere al menos de 10 puntos de control. La regla de ubicación de puntos de control fue básicamente que la distribución de éstos a lo largo y ancho de la imagen fuera tan homogénea como fuese posible y ubicarlos en lugares identificables, tanto en la imagen como en la carta de referencia.



**Figura 4.** Ejemplo de una imagen que cruza dos zonas.

En el caso en que el área ocupada por una subimagen en una zona fuese muy pequeña (20%), el número de puntos se redujo considerablemente, de forma tal que pudiera utilizarse al menos un polinomio de corrección de primer grado con un mínimo de tres puntos. Por otro lado, el área reducida de la subimagen en una zona no permitió un mayor número de puntos.

La evaluación de los puntos de control se llevó a cabo utilizando el módulo EVALUACIÓN, de PIXSAT (Cortés, 1992) el cual permite habilitar, deshabilitar y borrar puntos de control, en función del nivel de error que cualesquiera de ellos pueda proporcionar a la corrección. Los niveles máximos de error permitido fueron del orden de 1.5 píxeles (50 m) para aquellos que participaron en la corrección (habilitados), mientras que el error permitido para puntos deshabilitados fue considerablemente mayor (100 m). En la **tabla 1** se puede observar una lista de evaluación de puntos de control. El *error medio* se midió con la fórmula:

**Tabla 1.** Ejemplo de la evaluación de puntos de control de la imagen 22-47 (*Path-Row*, LANDSAT), del estado de Tabasco

EVALUACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL DEL ARCHIVO 2247.GRF						
Pto.	COORD. X EN LA IMAGEN	COORD. Y EN LA IMAGEN	COORD. X EN EL MAPA	COORD. Y EN EL MAPA	ERROR EN LA COORD. X (m)	ERROR EN LA COORD. Y (m)
0	7198.98	5991.98	555400.00	2060840.00	8.749	-26.037
1	5617.44	3191.96	515900.00	1990760.00	4.386	79.470
2	8117.48	5593.38	578440.00	050830.00	0.193	10.003
3	6606.00	4363.50	540570.00	020130.00	6.509	-0.357
4	7138.00	4930.00	554000.00	034325.00	-4.750	-41.681
5	7914.00	5076.00	573350.00	037920.00	5.562	2.325
6	7201.07	4804.73	555490.00	031060.00	4.908	92.251
7	6634.00	4843.00	541340.00	032170.00	7.422	-55.001
8	6530.31	3826.98	538760.00	006735.00	-15.662	-18.296
9	7494.88	3681.82	562880.00	003120.00	-6.298	-29.952
10	8076.93	3848.32	577400.00	007250.00	40.650	6.429
11	4866.04	4898.04	497100.00	2033500.00	35.819	10.648
12	3487.85	5042.85	462700.00	2037150.00	-11.818	-18.399
13	1975.00	4521.00	424880.00	2024080.00	3.248	-12.077
14	1432.12	3370.53	411350.00	1995300.00	-25.225	18.920
15	2052.00	3857.00	426800.00	2007460.00	15.919	21.394
16	2794.03	4131.98	445375.00	2014350.00	-15.702	10.739
17	4877.85	3891.95	497460.00	2008350.00	-26.010	3.160
18	1132.00	2766.00	403800.00	1980240.00	23.583	-26.083
19	3948.00	2946.01	474200.00	1984725.00	-13.246	-24.629
20	2148.00	2682.00	429225.00	1978100.00	15.220	13.459
21	5501.00	2375.00	513035.00	1970420.00	-41.615	-17.764
22	7183.02	2730.28	555100.00	1979350.00	30.580	-49.558
23	854.02	1875.08	396875.00	1957950.00	-1.509	5.429
24	3354.97	1540.97	459320.00	1949550.00	28.067	5.047
25	4621.00	1156.00	491020.00	1939940.00	-38.496	-38.419
26	2926.43	2578.62	448620.00	1975555.00	36.751	-33.517
27	5828.43	1398.38	521130.00	1945940.00	43.592	27.309
28	7404.57	1889.97	560620.00	1958260.00	-3.222	37.768
29	143.95	1289.95	379135.00	1943350.00	-3.706	-1.749
30	1876.92	1553.88	422420.00	1949900.00	4.735	9.198
31	6674.00	137.00	542365.00	1914445.00	12.318	-15.130
32	6251.79	5760.50	531770.00	2055020.00	15.410	30.684
33	3373.77	850.86	459850.00	1932280.00	38.937	4.337
Error parcial medio (rms) en X: 28.867 m						
Error parcial medio (rms) en Y: 31.136 m						
Error total medio (rms) en X: 28.867 m						
Error total medio (rms) en Y: 31.136 m						
Error máximo global: 95.555 m en el punto 6						
Error máximo parcial: 95.555 m en el punto 6						

$$E_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2}$$

donde  $n$  es el número de puntos. El *error parcial medio* es el error medio considerando únicamente los puntos que participaron en la corrección. El *error total medio* es el error medio considerando también los puntos deshabilitados. El *error máximo* se midió con la fórmula:

$$E_{rms} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

en donde  $E_x^2$  y  $E_y^2$  son los errores en las coordenadas X e Y, respectivamente (columnas 6 y 7 de la **tabla 1**). El *error máximo global* es el error máximo de los puntos utilizados para la corrección. El *error máximo parcial* es el error máximo de los puntos, considerando también los puntos deshabilitados. Estos dos últimos errores se calculan con la única finalidad de detectar el punto de mayor error.

### Ortorección

Una vez determinada la zona UTM, el área ocupada por el MDT y evaluados los puntos de control, se procedió a la ortorección de cada una de las 64 imágenes LANDSAT TM utilizadas en el proyecto. La ortorección es una técnica de corrección geométrica que tiene en consideración el relieve de la zona donde se encuentre la imagen correspondiente (de aquí que se haga necesario el uso de los MDT) (Wolf, 1983). En la **figura 5** se muestra el concepto geoméricamente.

De la **figura 5** se puede determinar que:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{L + L'}{H} = \frac{L'}{h}$$

en donde:

- $\theta$ : es un ángulo auxiliar
- L: es la distancia del nadir al punto corregido por efectos de relieve
- L': es el factor de corrección aplicado
- H: es la altura del satélite
- h: es la altura sobre el nivel del mar del punto bajo corrección

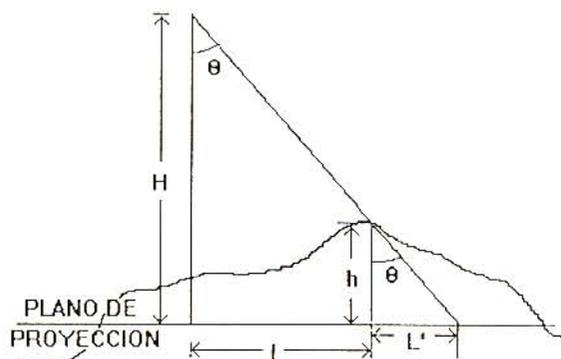


Figura 5. Concepto geométrico de ortocorrección.

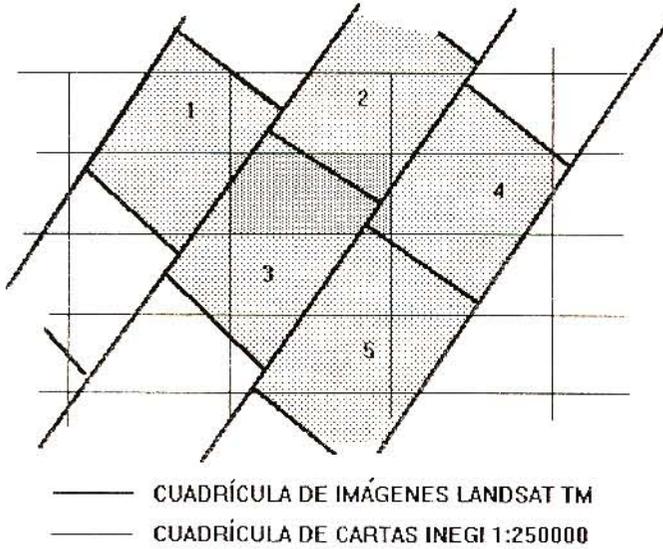
de donde:

$$L' = \frac{Lh}{H - h}$$

Es decir, el valor de corrección por relieve (L') es directamente proporcional a la altura del punto sobre el nivel del mar y a la distancia de este mismo punto al nadir del satélite, e inversamente proporcional a la diferencia de alturas entre el satélite y la altura sobre el nivel del mar del punto bajo corrección.

### Mosaico de imágenes

Para la extracción de cada una de las cartas 1:250 000 del INEGI fue necesario realizar una serie de mosaicos de imágenes, ya que imágenes y cartas no tienen un sistema de cuadrícula compatible. En la **figura 6** se muestra la superposición del sistema de coordenadas de imágenes y cartas del INEGI. Para la realización de los mosaicos fue necesario contar con todas las imágenes corregidas.



**Figura 6.** Superposición de la rejilla de coordenadas de imágenes LANDSAT TM y la cartografía topográfica INEGI 1:250 000.

Como se puede observar en la **figura 6**, es necesario un total de hasta cinco imágenes para cubrir la misma área que la cubierta por una carta del INEGI. Para la extracción de las cartas se convirtió cada vértice de una carta de coordenadas geográficas a UTM, lo cual proporcionó los cuatro vértices necesarios. Una vez extraídas las cartas se procedió a su interpretación teniendo como base la clasificación de vegetación definida en las cartas del INEGI, con un énfasis especial para las zonas arboladas del país. En la **figura 7** se muestra un ejemplo de un corte de la carta F13-12 (Guadalajara). Se puede observar en esta carta el mosaico a partir del cual fue generada (3 imágenes).

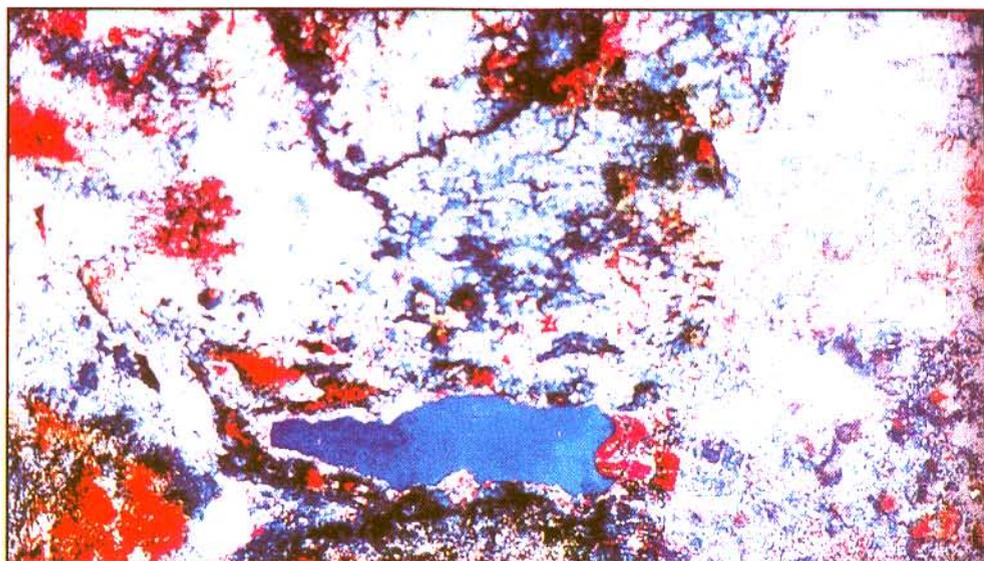


Figura 7. Mosaico que forma la Carta Guanajuato, escala 1:250 000.

### Conclusiones

La metodología aplicada en este trabajo demostró su efectividad en la generación de 121 cartas forestales de que se compone México, debido al fuerte relieve presente en una buena parte del país, la ortocorrección permitió tener un grado mayor de precisión en cada una de las cartas editadas. El error medio máximo detectado fue del orden de 1.5 píxeles (45 m, aproximadamente), mientras que para puntos de control no usados en la corrección, pero sí identificados sobre la imagen, el error medio máximo detectado fue del orden de 2 píxeles (60 m, aproximadamente). Se recomienda el uso de esta metodología en la corrección geométrica de cualquier imagen digital que comprenda áreas con un relieve de gradientes pronunciados. La metodología expuesta en este trabajo fue implantada en PIXSAT (Cortés, 1992).

## Referencias

- Bargagli, A. (1990), *New developments for the ILWIS Environment*, Comunicación interna, ITC, Holanda.
- Blachut T., A. Chrzanowski y J. Saastamoinen (1979), *Cartografía y levantamientos urbanos*, Springer Verlag.
- Burrough, P. A. (1986), "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment", *Monographs on Soil and Resources Survey*, No. 12, Oxford Science Publications.
- Caire, J. L. (1986), *La proyección cartográfica para la República Mexicana*, UNAM, México.
- Cortés, A. (1992), *PIXSAT, Manual de referencia*, Comunicación interna, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Fisher, L. (1991), GPS/DTM Method Improve MSS Data, GISWORLD, September, 1991.
- Westervelt, J. (1988), *An Introduction to GRASS GIS Software*, U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory, September 1988.
- Wolf, P. (1983), *Elements of photogrammetry*, McGraw-Hill International Editions.