

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal



**"Prueba de dos metodologías para la ortorectificación
de fotografías CARTA 2005"**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el grado de
bachiller en Ingeniería Forestal**

Paula Loaiza Salas

Cartago, 2007

RESUMEN

Cuando se trabaja con imágenes o fotografías, se requiere de instrumentos y procesos sumamente eficaces para extraer información de la mejor calidad, ya que de estos dependen los resultados de interpretación. Para lograr esta tarea deben plantearse metodologías que conduzcan a la obtención de resultados satisfactorios.

El objetivo de esta práctica era realizar una prueba de dos metodologías para la ortorectificación de fotografías digitales de la cámara DCS tomadas durante la misión CARTA 2005.

Las metodologías establecidas consistieron básicamente en ortorectificar un grupo de fotografías previamente georeferenciadas y otro grupo sin georeferenciar. El fin principal era determinar con cual de las dos metodologías se trabaja más eficientemente, tomando en consideración el error mínimo aceptable, establecido con el error medio cuadrático, y la duración del proceso.

Se logró determinar, por medio del error medio cuadrático, que no existe diferencia significativa al ortorectificar fotos georeferenciadas y no georeferenciadas.

Palabras clave: georeferenciación, ortorectificación, error medio cuadrático

ABSTRACT

Workings with aerial photographs require instruments and procedures highly effective in order to extract the best quality information, since interpretation results depend on them. To achieve this task, methodologies must be recommended in order to obtain satisfactory results.

The purpose of this document was to compare two methodologies of orthorectification of the CARTA 2005 digital photographs.

These methodologies consisted basically in orthorectification of two groups of photos, one previously geometrically rectified and the other one not rectified. The main purpose was to verify which one of the two methodologies provides better results of orthorectification, taking into consideration the root mean square error and the time of the process.

Results determined there is no difference between the orthorectification of rectified and not rectified photos.

Keywords: image rectification, orthorectification, root mean square error.

Prueba de dos metodologías para la ortorectificación
de fotografías CARTA 2005

Informe presentado a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto
Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar al título
de Bachiller en Ingeniería Forestal.

Miembros del tribunal

Dr. Edgar Ortiz Malavassi
Profesor guía

Ing. Casia Soto Montoya
Lectora

Lic. Marvin Castillo Ugalde
Lector

DEDICATORIA

A mi misma, porque he confiado en quien soy y en lo que puedo dar.

A Irene, quien es la razón de mi esfuerzo.

A Adrián, por sus consejos, su disposición y paciencia.

A mami, papi y Mema, porque su ayuda ha sido invaluable.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien siempre me ha acompañado y me ha dado las fuerzas para seguir adelante.

A mi familia y Adrián, por quienes me fue posible llegar hasta aquí.

A Casia Soto, por la amistad y el apoyo que me brindó en todo momento.

A Braulio Vílchez, por la amistad, los consejos, la confianza y el ánimo que me dio durante toda la carrera.

A Silvia Cordero, por su ayuda incondicional mientras estuvo en Costa Rica.

A Edgar Ortiz, por guiarme durante esta práctica.

A todos los profesores de Forestal.

Y a todos quienes han sido parte de mi vida y han confiado en mi.

ÍNDICE GENERAL

Página

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1. Ortorectificación.....	3
Procedimiento general de ortorectificación.....	4
Ortorectificación de fotografías aéreas digitales (Cámara digital CDS).....	5
3.2. Pasos fundamentales para el proceso de ortorectificación en el programa Erdas Imagine.....	6
Triangulación en Bloque	6
Orientación interna	7
Orientación exterior.....	7
Puntos de control	8
Puntos de amarre	9
Modelo de Elevación Digital.....	9
3.3. Georeferenciación	9

3.4. Error Medio Cuadrático (RMS)	10
4. METODOLOGÍA	11
4.1. Ubicación del área de trabajo	11
4.2. Proceso de Georeferenciación	12
Metodología de georeferenciación en ERDAS Image 8.2.....	12
4.3. Proceso de Ortorectificación	19
Metodología de ortorectificación en ERDAS Image 8.2.....	20
4.4. Cálculo del RMS	37
5. RESULTADOS.....	39
6. CONCLUSIONES.....	48
7. BIBLIOGRAFÍA.....	49
8. ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Título	Página
	<hr/>	
Figura 1.	Proyección de perspectiva y proyección ortogonal de una imagen. Tomado de Okeke y modificado, 2006.....	4
Figura 2.	Residuos de Puntos de Control en el reporte de triangulación del OrthoBASE	40
Figura 3.	Diferencias entre el camino real en la foto y el digitalizado en la capa de Red de Caminos del Atlas, 2004.....	41
Figura 4.	Incongruencias en los trazos de los caminos digitados en el Atlas de Costa Rica y los observados en la foto.....	41
Figura 5.	Distribución no homogénea de la red de caminos en la fotografía.	42
Figura 6.	Distribución homogénea de la red de caminos del Atlas en la fotografía	43
Figura 7.	Distorsiones en las fotos en los bordes.....	44
Figura 8.	Distorsiones en las fotos en las esquinas.....	44

ÍNDICE DE CUADROS

Número	Título	Página
	<hr/>	
Cuadro 1.	Características generales de la cámara digital DCS utilizada en la misión CARTA 2005.	6
Cuadro 2.	Promedio y desviación estándar del RMS de la ortorectificación de las fotos georeferenciadas y sin georeferenciar.	44
Cuadro 3.	Promedio y desviación estándar del RMS para cada una de las fotografías de la prueba.	45

1. INTRODUCCIÓN

Entre los procesos más utilizados para la corrección de fotografías o imágenes se encuentran la georeferenciación y la ortorectificación. En el primer proceso se asigna coordenadas a cada punto en la imagen dándole una ubicación geográfica. El segundo proceso consiste básicamente en eliminar las distorsiones en el terreno causadas por la altitud, curvatura de la tierra, el relieve, orientación y velocidad de la plataforma del sensor, entre otros. Percibir esta diferencia al instante de hacer uso de las fotografías o imágenes corregidas es fundamental.

Las imágenes o fotos georeferenciadas informan únicamente sobre su ubicación en el espacio, dentro de un sistema de coordenadas en particular. Esto implica que no pueden hacerse mediciones precisas de distancia y dirección debido a que no se consideran las distorsiones en el terreno, a diferencia de las fotos o imágenes ortorectificadas.

La información de las fotografías digitales, y en este caso en particular de las fotografías del proyecto CARTA 2005, y el uso de los sistemas de información geográfica para su procesamiento, constituyen una herramienta muy valiosa en el análisis, desarrollo y actualización de datos necesarios para la planificación de las actividades humanas en diversos ámbitos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- ✍ Probar dos sistemas de ortorectificación de fotografías de la cámara digital DCS del proyecto CARTA 2005

2.2. Objetivos específicos

- ✍ Hacer una comparación entre los dos sistemas y escoger procedimiento más útil para la ortorectificación de las fotos CARTA 2005.
- ✍ Ortorectificar las fotografías de las 81 cabeceras de cantón de Costa Rica con el sistema más apto.
- ✍ Actualizar la capa de caminos del Atlas de Costa Rica de las cabeceras de cantón del país.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Ortorectificación

Las imágenes digitales crudas usualmente contienen distorsiones geométricas tan significativas que no pueden ser utilizadas directamente como base de información sin haber sido procesadas. La fuente de dichas distorsiones van desde variaciones de altitud, orientación y la velocidad de la plataforma del sensor hasta factores como distorsiones panorámicas, curvatura de la tierra, refracción atmosférica y relieve del terreno (Lillesand *et al.*, 2004).

La intención de la corrección geométrica es la de compensar las distorsiones introducidas por estos factores para que la imagen corregida tenga la más alta integridad geométrica (Lillesand *et al.*, 2004).

Si durante la rectificación se utiliza un modelo de elevación (MED), el proceso recibe el nombre de ortorectificación, ya que se trata de un tipo especial de rectificación que corrige específicamente el desplazamiento del terreno (Oracle, 2003).

La elevación de un punto del terreno provoca un desplazamiento aparente de dicho punto en la imagen. Este desplazamiento depende de parámetros como la localización y orientación de la imagen, de la propia elevación del punto en el terreno y otros específicos del tipo de sensor (Cuartero y Felicísimo, 2003).

La ortorectificación hace que las imágenes sean planimétricamente correctas, o sea, que representen de manera exacta los detalles del paisaje, como si la superficie de la tierra fuera plana y no ondulada y curva (Leica Geosystems, 2004).

La ortorectificación transforma la proyección central de la imagen en una vista ortogonal del terreno, resultando en la remoción de efectos de distorsión. Es decir, transforma las imágenes crudas a proyecciones ortogonales precisas (Figura 1). El producto del proceso de ortorectificación se denomina ortoimagen u ortofoto. (Okeke, 2006).

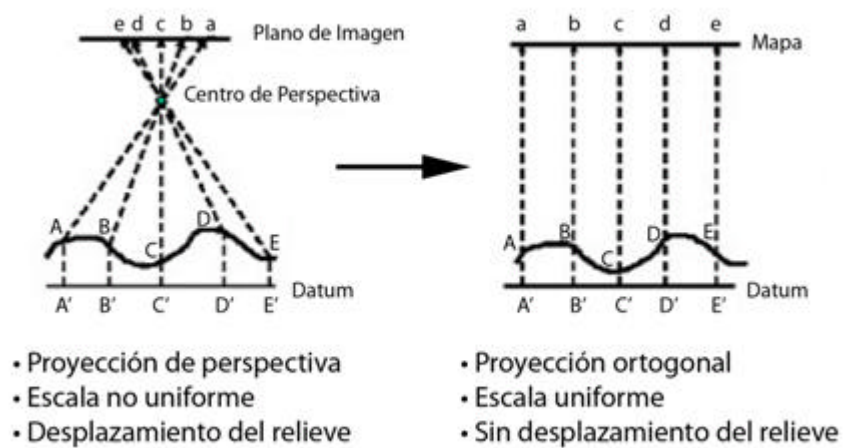


Figura 1. Proyección de perspectiva y proyección ortogonal de una imagen. Tomado de Okeke y modificado, 2006.

Sin la ortorectificación, la escala no es constante en la imagen y no pueden hacerse mediciones precisas de distancia y dirección (Okeke, 2006).

Procedimiento general de ortorectificación

El proceso de corrección geométrica está normalmente implementado como un procedimiento de dos pasos. Primeramente se consideran aquellas distorsiones *sistemáticas* o predecibles. Segundo, se consideran las distorsiones que son esencialmente *al azar* impredecibles (Lillesand *et al.*, 2004).

Las distorsiones sistemáticas son bien entendidas y se corrigen fácilmente aplicando fórmulas matemáticas que se derivan de modelar la fuente de las distorsiones matemáticamente (Lillesand *et al.*, 2004). Por ejemplo, la velocidad de la plataforma, la perspectiva, etc.

Las distorsiones al azar se corrigen analizando puntos de control (GCP's) bien distribuidos que se encuentren en la imagen. Dichos puntos de control son elementos con posición conocida en el terreno y que se pueden ubicar de forma precisa en la imagen. Algunos elementos que pueden funcionar como buenos puntos de control son las intersecciones de calles y algunos elementos en líneas costeras (Lillesand *et al.*, 2004).

Durante el proceso de corrección deben ubicarse numerosos puntos de control. Su ubicación es en términos de sus coordenadas de imagen (columna y fila) en la imagen distorsionada y en términos de las coordenadas sobre el terreno de los puntos de control (medidas de un mapa o tomados con GPS en el terreno, en coordenadas UTM o en latitud y longitud) (Lillesand *et al.*, 2004).

Ortorectificación de fotografías aéreas digitales (Cámara digital CDS)

La ortorectificación de fotos aéreas tomadas con una cámara digital, es un caso especial de ortorectificación, ya que a diferencia de las fotos aéreas normales, estas no tienen marcas fiduciales que ayuden a calcular la orientación interna y externa de las fotos. Sin embargo, cuando no se tienen marcas fiduciales se debe definir el tamaño del píxel de la cámara (Ortiz y Soto, 2007).

Un ejemplo de estas son las fotografías digitales en falso color de la misión CARTA 2005, tomadas con la cámara digital DCS, la cual tiene las siguientes características:

Cuadro 1. Características generales de la cámara digital DCS utilizada en la misión CARTA 2005. (Tomado de CENAT y modificado, 2007)

Lente	Tamaño de matriz	Ancho de matriz	Campo de visión (FOV)	Cobertura en terreno	Resolución nominal
50 mm	4072 x 4072 (pixels)	36.72 mm	40.3°	3.0 nm	1.4 m

Programas como Erdas Image, ENVI y ArcView podrían utilizarse para hacer ésta ortorectificación de las fotos de la cámara CDS.

3.2. Pasos fundamentales para el proceso de ortorectificación en el programa Erdas Imagine

Triangulación en Bloque

Triangulación en Bloque es el proceso de definir la relación matemática entre las imágenes en un bloque, la cámara o el sensor y el terreno. Una vez que ésta relación se ha definido, es posible crear imágenes e información exacta e inteligente con respecto a la superficie terrestre (ERDAS, 2001).

La triangulación en bloque estima simultáneamente:

- La posición (X, Y, Z) y la orientación (omega, phi, kappa) de cada imagen en un bloque tal y como existía al momento de la toma de la imagen (por ejemplo, los parámetros de orientación exterior).
- Las coordenadas X, Y, y Z de los puntos de amarre colectados manualmente o automáticamente a través del bloque de imágenes (por ejemplo, la determinación de

puntos y posicionamiento). Una vez que las coordenadas X, Y, y Z de los puntos de amarre son computadas pueden convertirse en puntos de control.

- Los parámetros internos asociados a la cámara o el sensor.
- Parámetros adicionales que caracterizan errores sistemáticos en el bloque de imágenes y observaciones (por ejemplo, distorsiones del lente).

Cuando se procesan imágenes de cámaras enmarcadas, cámaras digitales, videografía, y cámaras no-métricas, la triangulación en bloque se conoce comúnmente como *Triangulación Aérea*. Cuando se procesan imágenes colectadas con un sensor de barrido, la triangulación en bloque se conoce como Triangulación (ERDAS, 2001).

Orientación interna

La orientación interna define la geometría interna de una cámara o sensor tal y como existía en el momento de la captura de los datos. Las variables asociadas con el espacio de la imagen son definidas durante el proceso de orientación interna. La orientación interna se usa principalmente para transformar el sistema de coordenadas de píxel de la imagen u otro sistema de medición de coordenadas de la imagen en el sistema de coordenadas espaciales de la imagen (ERDAS Field Guide, s.f.).

Orientación exterior

La orientación exterior define la posición y la orientación angular asociada con una imagen al momento de exposición o captura. Las variables que definen la posición y la orientación de una imagen son referidas como elementos de la

orientación exterior. Los elementos posicionales de la orientación exterior incluyen X_0 , Y_0 , Z_0 . Ellos definen el centro de perspectiva (O) con respecto al sistema de coordenadas espaciales del terreno (X, Y, Z). Z_0 es usualmente referido como la altura de la cámara sobre el nivel del mar, la cual está definida usualmente con respecto a un datum (ERDAS Field Guide, s.f.).

Los elementos angulares o rotacionales de la orientación exterior describen la relación entre el sistema de coordenadas espaciales del terreno (X, Y, Z) y el sistema de coordenadas de la imagen (x, y, z). Usualmente se definen 3 ángulos de rotación para definir la orientación angular. Ellos son omega (ω), phi (ϕ) y kappa (κ)(ERDAS Field Guide, s.f.).

Puntos de control

El componente instrumental para el establecimiento de una relación exacta entre las imágenes de un proyecto, la cámara o el sensor, y el terreno son los puntos de control (GCP's). Los puntos de control son objetos identificables en la superficie terrestre que tienen coordenadas conocidas (X, Y, Z) (ERDAS, 2001).

Los siguientes objetos de la superficie terrestre se utilizan como puntos de control:

- ✍ Intersección de vías
- ✍ Infraestructura de servicios públicos
- ✍ Intersección de lotes de cultivos agrícolas
- ✍ Mojones de levantamiento

Puntos de amarre

Un punto de amarre es un punto cuyas coordenadas de terreno pueden o no ser conocidas, pero que es visualmente reconocible en el área de traslape entre dos o más fotografías. Las posiciones de imagen correspondientes a los puntos de amarre que aparecen en las áreas de traslape se deben identificar y medir. Los puntos de amarre pueden medirse manual o automáticamente.

Modelo de Elevación Digital

Un MED es una capa de datos raster que contiene valores de elevación de un lugar. Para crear una ortofoto es necesario utilizar un modelo digital de elevación, el cual le permite al software modelar la superficie terrestre (diferencia en elevaciones) y de esta manera eliminar el efecto de desplazamiento del relieve (Fallas, 2004).

3.3. Georeferenciación

El proceso de georeferenciación consiste básicamente en asignar, a las coordenadas de celda de una imagen, las coordenadas sobre el terreno en un sistema de proyección dado terreno (Oracle, 2003). Así se liga o relaciona una información geográfica a unos puntos en común con el fin de llevar toda la información a unas coordenadas base para que posteriormente otros datos se puedan unir al mismo y estos guarden la misma relación. La georeferenciación es un proceso que se puede aplicar a todo tipo de datos ya sea línea, punto o polígono (Ortiz, s.f.).

La rectificación no es necesaria si no hay distorsión en la imagen (bastaría solamente con georeferenciar). Por ejemplo, si un archivo de imagen es producido escaneando o digitalizando un mapa de papel el cual está en el sistema de

proyección deseado, esa imagen ya es plana y no requiere rectificación, a menos que haya alguna distorsión o rotación en la imagen. Este tipo de imágenes planas no contienen coordenadas de mapa, por tanto sólo necesitan ser georeferenciadas (ERDAS, 2001).

3.4. Error Medio Cuadrático (RMS)

El error medio cuadrático es la distancia entre la ubicación de entrada (fuente) de un punto de control y la nueva ubicación del mismo punto. En otras palabras, es la diferencia entre la coordenada deseada de salida de un punto de control y la coordenada real de ese mismo punto (ERDAS, 2001).

El error medio cuadrático se calcula con la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{(x_F - x_A)^2 + (y_F - y_A)^2}$$

Donde:

x_F y y_F son las coordenadas de entrada en la foto.

x_A y y_A son las coordenadas retransformadas

4. METODOLOGÍA

Para la realización de esta práctica se utilizaron las fotos Carta 2005 y para su procesamiento se empleó el programa ERDAS Image 8.2.

4.1. Ubicación del área de trabajo

Inicialmente se seleccionaron las 81 cabeceras de cantón de Costa Rica. De éstas, solamente se encontraron 79 cabeceras en los polígonos de ubicación de las fotos digitales CARTA 2005. Quiere decir que no se tomaron fotos de dos localidades (Upala y Los Chiles). Posteriormente, se debieron descartar las fotografías de otras cabeceras, debido a que las fotos pertenecientes a ellas se encontraban total o parcialmente cubiertas de nubes, haciendo imposible la toma de puntos de control.

El proceso de selección de las fotografías necesarias para la realización de esta práctica consistió en:

- ✍ Ubicar todas las cabeceras de cantón del país en la capa de poblados del Atlas de Costa Rica 2004.
- ✍ Sobreponer la nueva capa de cabeceras de cantón a la capa de las fotos CARTA 2005.
- ✍ Hacer un listado con los números de fotos correspondientes a cada cabecera.
- ✍ Hacer una búsqueda de cada una de las fotos en la base de datos de las imágenes CARTA del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del ITCR.

4.2. Proceso de Georeferenciación

Se realizó la georeferenciación de 4 fotos CARTA 2005 con el programa ERDAS Image 8.2. para posteriormente llevar a cabo el proceso de ortorectificación.

Metodología de georeferenciación en ERDAS Image 8.2.

Para la georeferenciación en ERDAS Image 8.2. de las fotos Carta 2005 se procedió a utilizar la siguiente metodología (Soto, 2005):

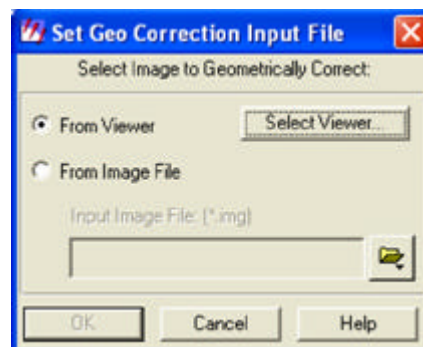
- ? Se desplegó en una vista la imagen Carta 2005.
- ? Se abrió otra vista con la capa de red de caminos del Atlas de Costa Rica 2004.
- ? En el menú principal de ERDAS imagine se seleccionó el icono *DataPrep*:



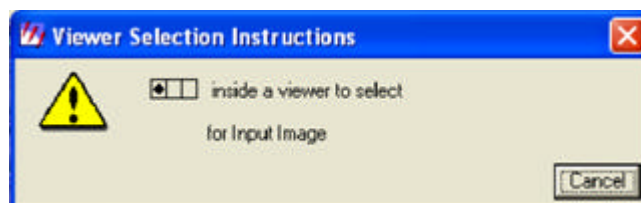
- ? Se desplegó la siguiente ventana:



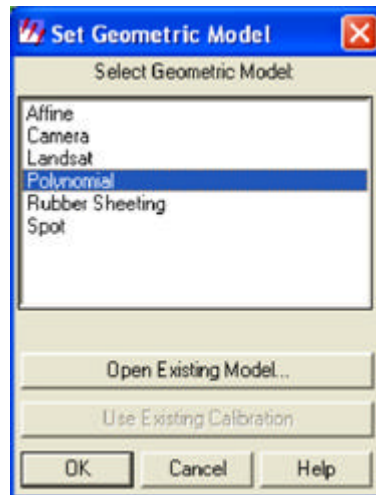
? Se eligió *Image Geometric Correction*. Se desplegó la siguiente ventana:



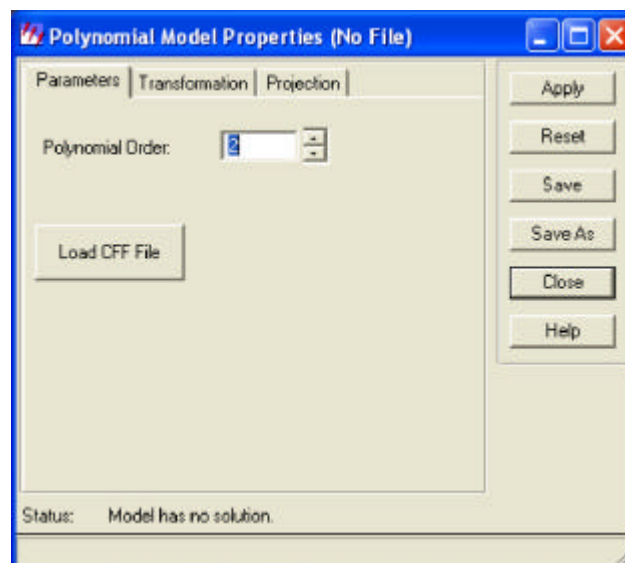
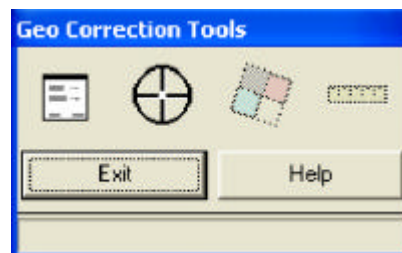
? Se activó *From Viewer* y se hizo clic sobre *Select Viewer*. Se desplegó la siguiente ventana:

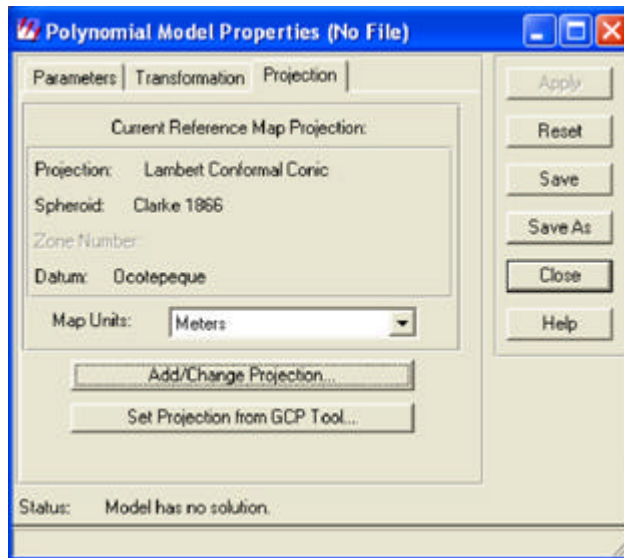


? Se hizo clic sobre la vista con la foto a georeferenciar (Carta 2005). Se desplegó la siguiente ventana:

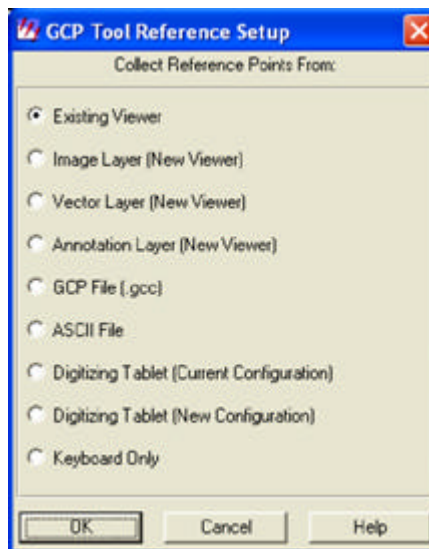


? Se eligió el modelo *Polynomial* de segundo orden pero la georeferenciación se hizo con 12 puntos. Se despliegan las siguientes ventanas simultáneamente:

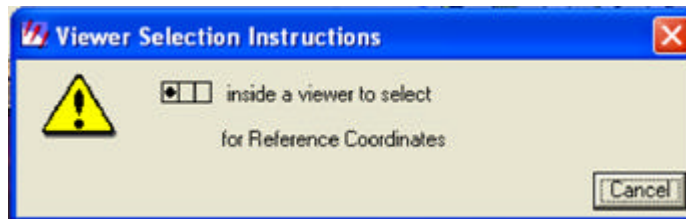




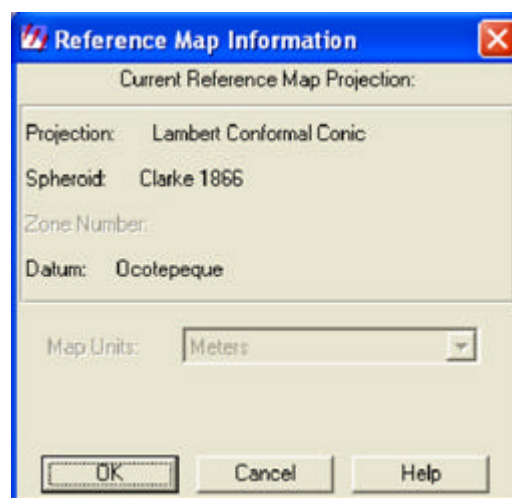
- ? En la pestaña *Parameters* se escogió el orden del polinomio a usar (2) y luego en la pestaña *Projection* se eligió la proyección *Costa Rica Lambert Norte*; luego se cerró la ventana. Se despliega la siguiente ventana:



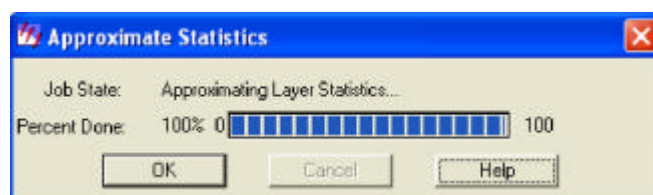
- ? Se eligió *Existing Viewer*, se hizo clic en *OK*. Se desplegó la siguiente ventana:



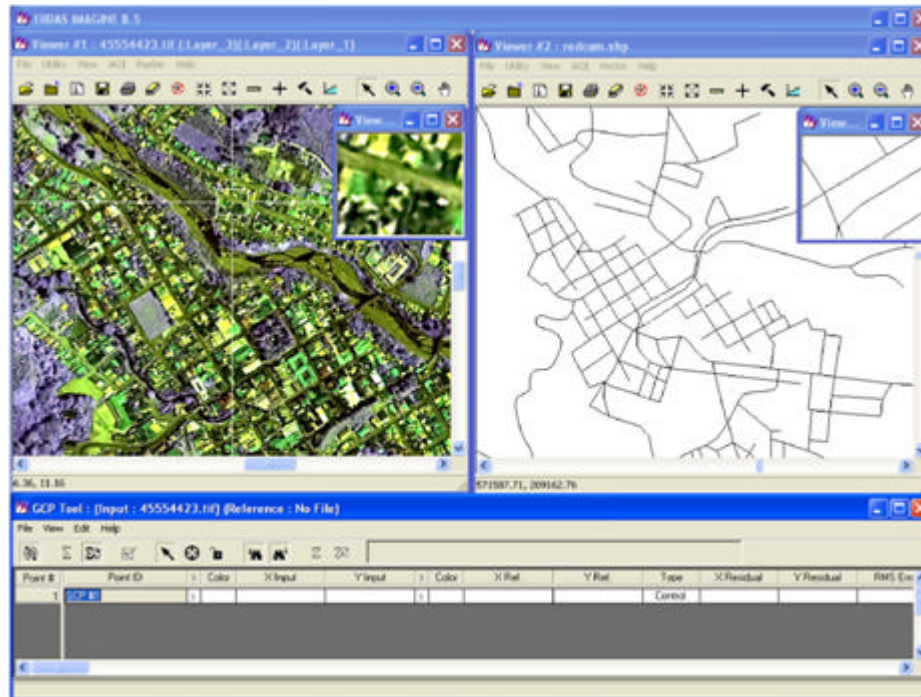
? Se hizo clic sobre la ventana tomada como referencia (Red de Caminos) y apareció el siguiente cuadro:



? Se hizo clic en OK. Se despliega la siguiente ventana:



? Se hizo clic en OK. Aparecen las siguientes ventanas:



? A partir de este momento se inició el proceso de toma de puntos de control. Se utiliza el siguiente icono para marcar los puntos en la vista con la foto a georeferenciar y la vista con la referencia.



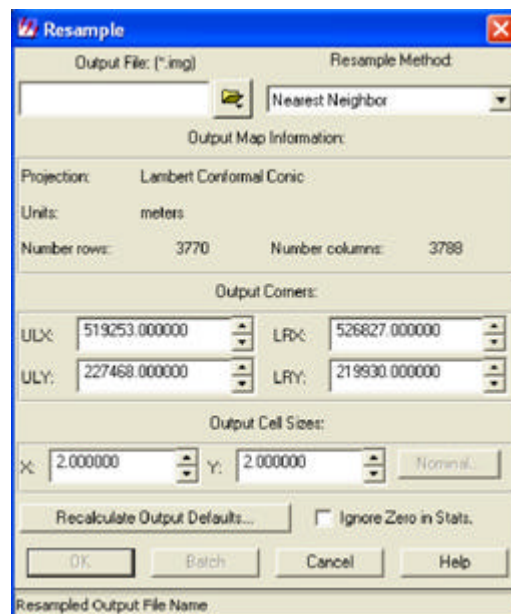
? Cada punto tomado aparece en el cuadro *GCP Tool*:

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref	Y Ref	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.
1	GCP #1	Orange	6.499	6.462	571420.730	209601.280	Control	0.008	-0.004	0.009	0.122
2	GCP #2	Green	7.601	5.816	571061.606	209421.086	Control	-0.034	0.002	0.034	0.472
3	GCP #3	Yellow	6.079	4.714	571024.470	210037.352	Control	0.019	-0.074	0.076	1.073
4	GCP #4	Purple	3.500	3.067	571084.164	211045.342	Control	-0.021	-0.013	0.025	0.353
5	GCP #5	Red	2.725	0.703	570599.149	211673.200	Control	0.023	0.052	0.057	0.802
6	GCP #6	Cyan	4.783	3.013	570835.794	210710.057	Control	-0.031	-0.017	0.035	0.497
7	GCP #7	Blue	7.223	7.909	571710.492	209090.548	Control	-0.012	0.121	0.121	1.703
8	GCP #8	Light Blue	6.921	11.598	572731.415	208496.074	Control	-0.089	0.010	0.089	1.257
9	GCP #9	Magenta	10.140	2.754	569767.833	209321.285	Control	0.088	-0.053	0.103	1.446
10	GCP #10	Dark Red	15.625	2.093	568676.030	208071.379	Control	-0.022	0.061	0.064	0.905
11	GCP #11	Light Green	16.048	6.627	569696.187	207116.376	Control	-0.037	-0.055	0.066	0.925
12	GCP #12	Light Cyan	10.989	11.261	571810.667	207438.473	Control	-0.095	0.014	0.096	1.350
13	GCP #13	Light Purple	3.395	13.593	573950.798	209063.946	Control	-0.016	-0.045	0.048	0.674
14	GCP #14	Light Blue	0.345	8.958	573285.311	210778.952	Control	0.080	0.028	0.085	1.193
15	GCP #15	Dark Blue	1.302	3.861	571706.713	211515.339	Control	-0.051	-0.026	0.057	0.804
16	GCP #16						Control				

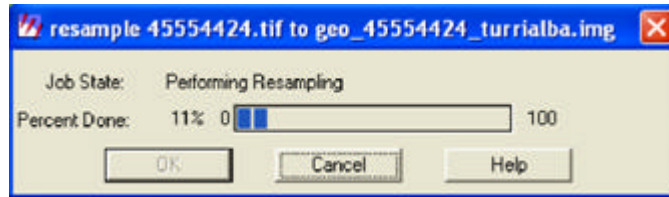
- ? En el menú principal del *GCP Tool*, en *File* se salvan los puntos en dos archivos diferentes, uno para los puntos tomados en la foto a georeferenciar (*input*) y otro para los puntos del tema de referencia (*reference*).
- ? Al terminar la toma de puntos, se procedió a iniciar la georeferenciación. Se hace clic en el icono *Display Resample Image Dialog* de la ventana *Geo Correction Tools*.



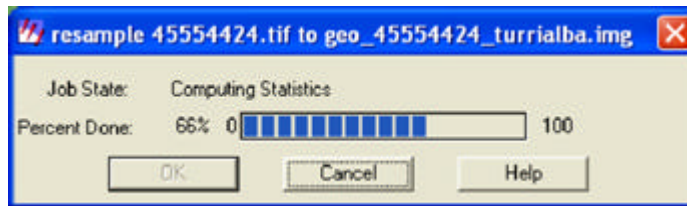
☞ Aparece la siguiente ventana:



☞ Se escogió el nombre para la salida o foto georeferenciada (*output file*). Se hizo clic en OK. Se despliega la ventana siguiente:



- ✍ Al terminar el proceso de anterior (*Resampling*), se desplegó la siguiente ventana:



- ✍ Se hizo clic en OK.
- ✍ Se concluye el proceso de georeferenciación. Se abrió una nueva vista y se cargó la foto georeferenciada.

Se hizo una georeferenciación polinomial de segundo grado utilizando de 10 a 15 puntos de referencia por foto. La georeferenciación de las fotos se corroboró colocando la foto georeferenciada en una vista con la capa de red de caminos del Atlas de Costa Rica 2004.

4.3. Proceso de Ortorectificación

Durante este proceso se realizó una prueba de ortorectificación de las fotos CARTA 2005 utilizando el programa ERDAS Image 8.2. Esta prueba consistió en ortorectificar 4 fotos georeferenciadas y 4 fotos no georeferenciadas. Posteriormente se compararon ambos procedimientos mediante el Error Medio Cuadrático.

Metodología de ortorectificación en ERDAS Image 8.2.

Para la ortorectificación en *ERDAS Image 8.2.* de las fotos CARTA 2005 se procedió a utilizar la siguiente metodología, la cual consta de 8 pasos (Ortiz y Soto, 2007, modificada). Dichos pasos se presentan a continuación:

Paso 1. Recolección de datos de las fotos a ortorectificar

Se utilizaron como referencia los polígonos de ubicación de las fotos digitales CARTA 2005 (tema carta05_dcs_pg_v2.shp). Los datos iniciales que necesitaron para cada foto fueron:

- ✍ Número de frame y número de foto.
- ✍ Coordenadas “**x, y**” del centro de cada foto.
- ✍ Elevación promedio del vuelo en metros (aproximadamente 7620 m para las fotos CARTA 2005)
- ✍ Angulo Kappa según el número de foto. Se determinó con la siguiente fórmula:

$$\theta = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Donde:

θ = ángulo Kappa

x, y: coordenadas de los centros de dos fotos continuas.

- ✍ Coordenadas “**x, y**” del extremo superior izquierdo (ULX, ULY) y del extremo inferior derecho (LRX, LRY) del área (marco) que cubre las dos fotos que va a ortorectificar.

Paso 2. Inicio del proceso de ortorectificación en ERDAS.

Para iniciar el proceso de ortorectificación debe iniciarse la subrutina *OrthoBASE* de ERDAS.

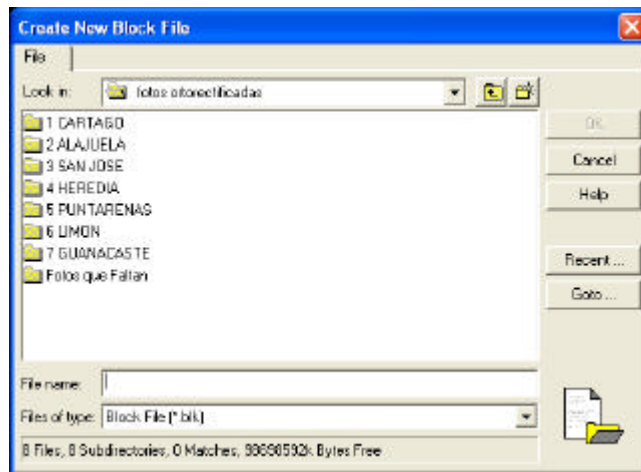
- ✍ Se hizo clic sobre la opción *OrthoBASE* del menú principal de ERDAS.



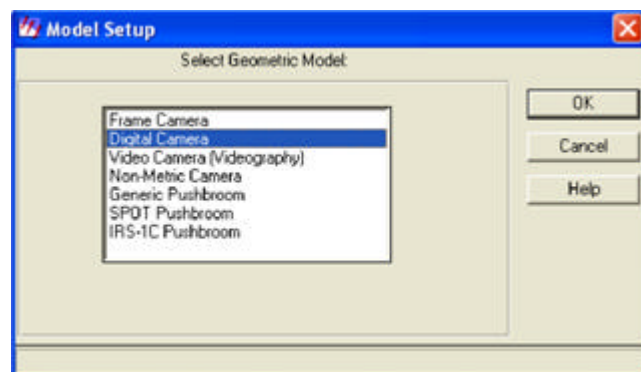
- ✍ Aparece la ventana *OrthoBASE Startup*, se seleccionó *Create a new Orthobase project*.



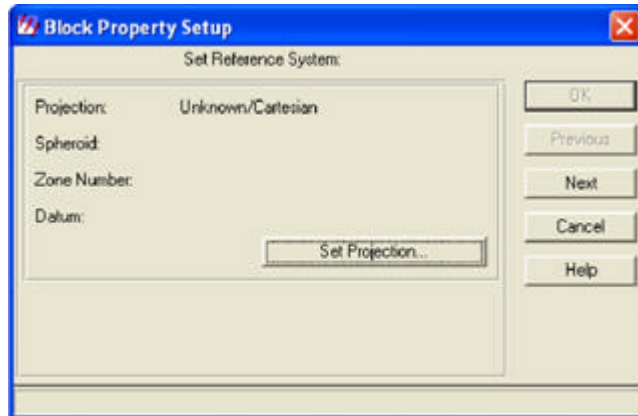
- ✍ Seguidamente aparece una ventana en la cual debe indicarse el nombre del proyecto de ortorectificación (*.blk) y el directorio donde éste se guardará.



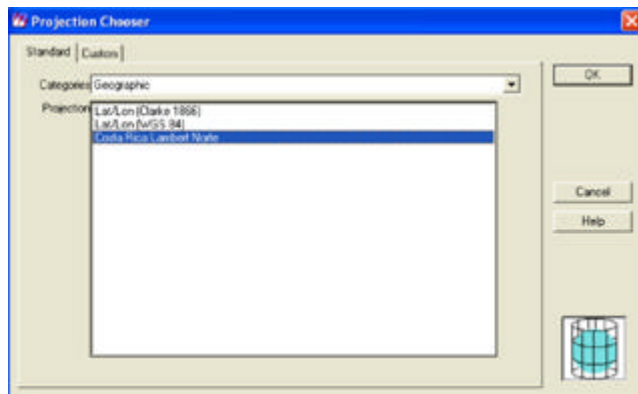
➤ Se despliega la ventana *Model Setup*.



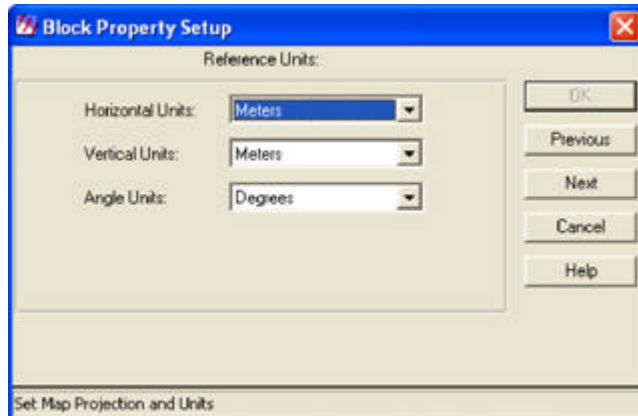
➤ Se eligió *Digital Camera* (las fotos CARTA 2005 fueron adquiridas con una cámara digital). Se hizo clic en OK. Aparece la siguiente ventana:



✍ Se hizo clic sobre el botón *Set Projection*. Se abre la ventana *Projection Chooser*.



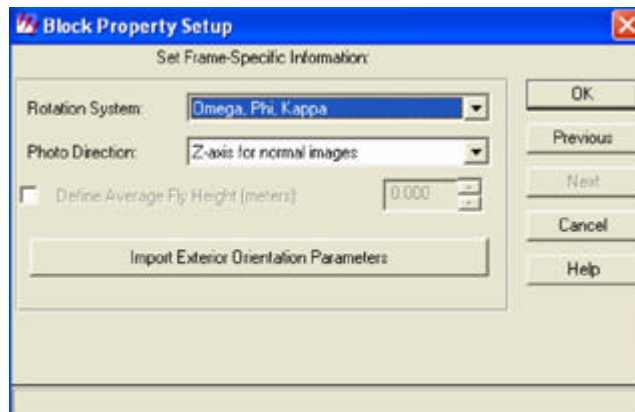
✍ Se eligió la opción *Costa Rica Lambert Norte* del submenú *Standard*. Se hizo clic en el botón *Next*. Se despliega la siguiente ventana:



✍ Se eligieron las unidades de referencia:

- ? *Horizontal Units: Meters*
- ? *Vertical Units: Meters*
- ? *Angle Units: Degrees*

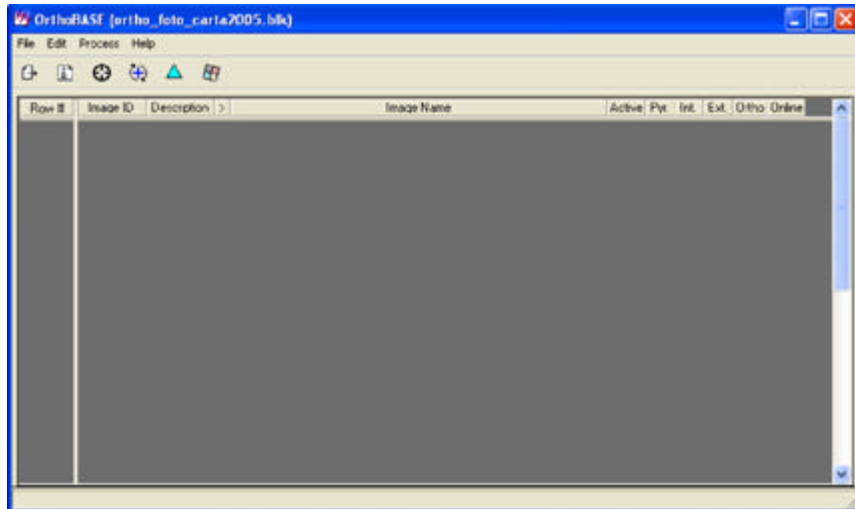
✍ Se hizo clic en *Next*. Se desplegó la siguiente ventana:




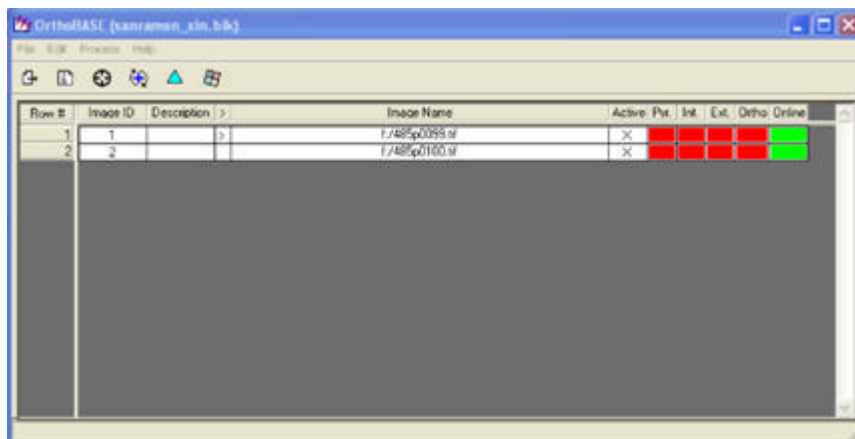
✍ Se eligió la información específica del *Frame*:

- ? *Rotation System: Omega, Phi, Kappa*
- ? *Photo Direction: Z-axis for normal images*

✍ Se hizo clic en *OK*. Se desplegó la ventana *OrthoBASE*:



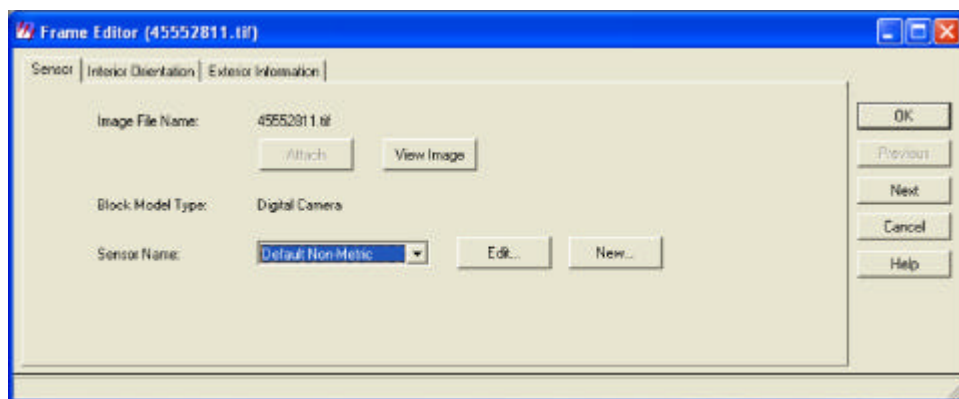
Se hizo clic en *Edit/Add Frame* o en el icono . Se agregaron las fotos a ortorectificar en orden. Esto es, primero la que está a la izquierda y luego la siguiente a la derecha; esto se recomienda para facilitar la ubicación de los puntos de control en el paso 6. La ventana *orthoBASE* aparece de la siguiente manera:



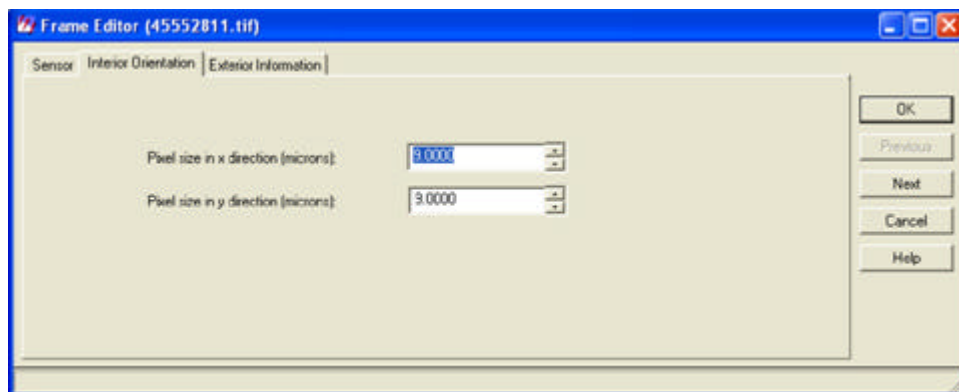
Paso 3. Definir las características de las imágenes

Las características de las imágenes se definen con el comando *Frame Editor* disponible en el menú *Edit* (las características de la(s) siguiente(s) fotos deben completarse usando el botón *Next*).

✍ Al seleccionar *Frame Editor* aparece la siguiente ventana:



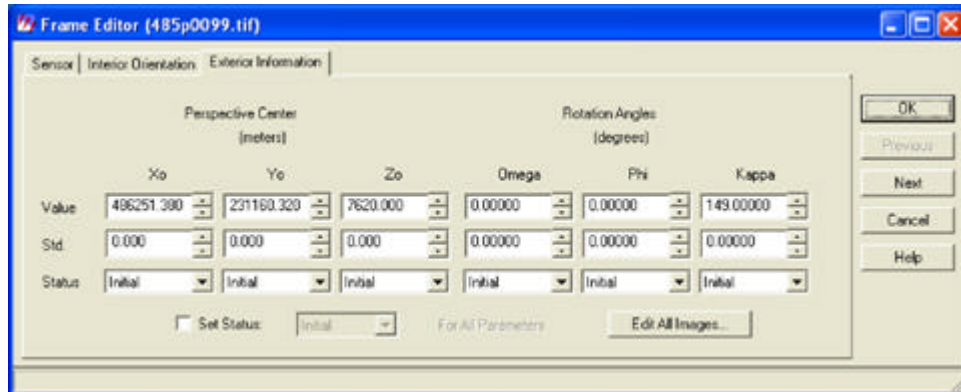
✍ En la opción *Sensor Name* se escogió *Default Non-Metric*. Se seleccionó la pestaña *Interior Orientation*. Aparece la siguiente ventana:



✍ Se definió el tamaño de píxel:

- ? *Pixel size in x direction (microns): 9.00*
- ? *Pixel size in y direction (microns): 9.00*

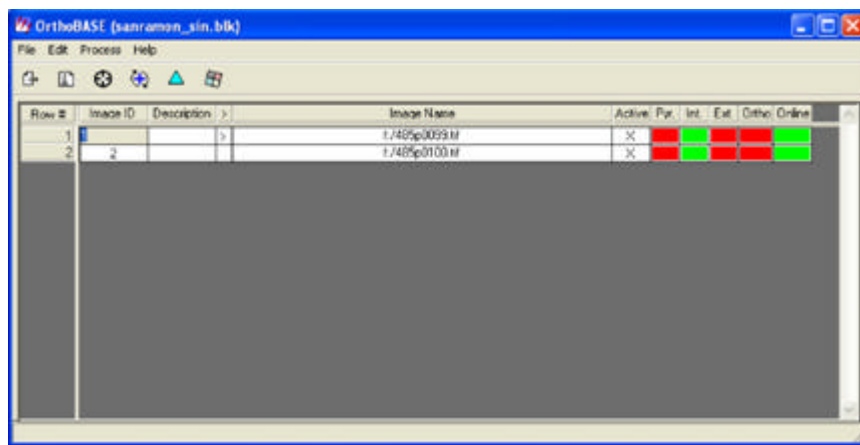
Se seleccionó la pestaña *Exterior Information*. Aparece la siguiente ventana:



Para completar los datos de esta ventana se utiliza la información recopilada en el Paso 1.

Se repitió el proceso con la(s) foto(s) siguiente(s). Se hizo clic en OK.

Al haber completado los parámetros anteriores, las casillas *Int.* cambian de color rojo a verde (indicando que se realizó el proceso). La ventana *OrthoBASE* aparece de la siguiente manera:

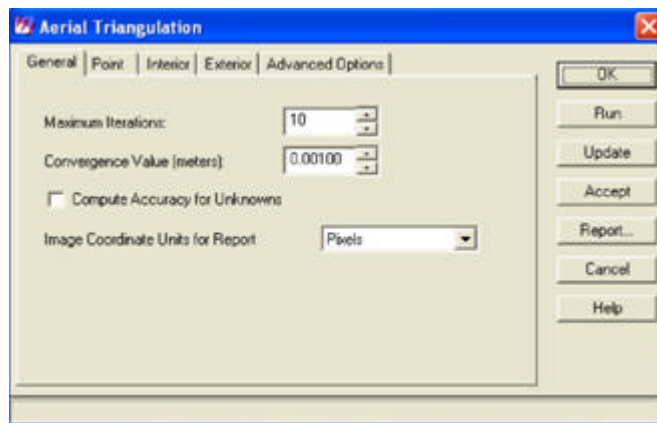


Paso 4 Definir las propiedades de triangulación.

Las propiedades de triangulación se establecen con el comando *Triangulation Properties* disponible en el menú *Edit*. También puede hacerse clic en el siguiente icono:



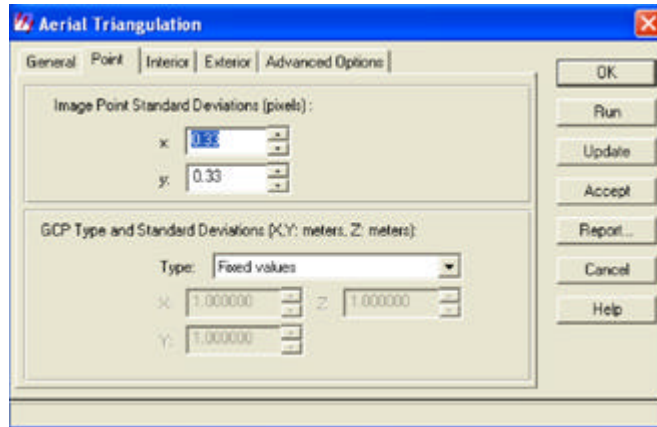
☞ Se seleccionó *Triangulation Properties*. Se desplegó la siguiente ventana:



☞ En la pestaña *General* se establecen los siguientes parámetros:

- ? *Maximum Iterations*: 10
- ? *Convergence Value (meters)*: 0.001
- ? *Image Coordinate Units for Report*: Pixels

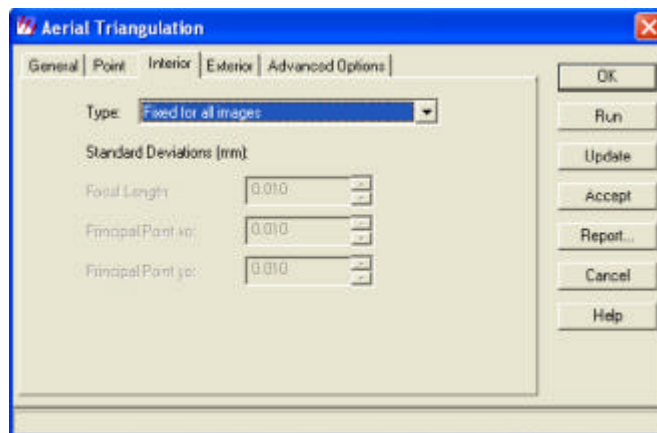
☞ Se selecciona la pestaña *Point*. Aparece la ventana siguiente:



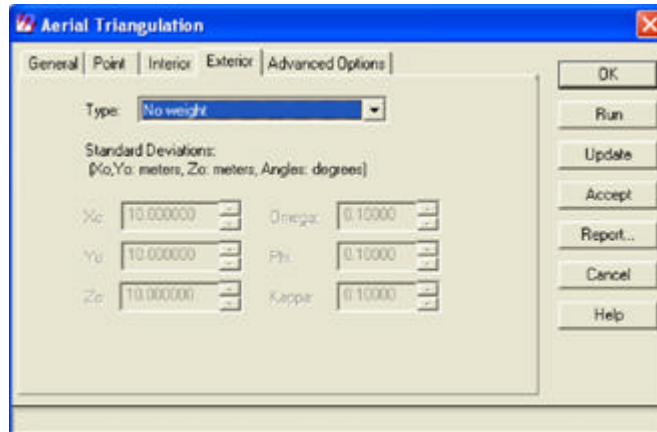
Se establecen los siguientes datos:

- ? *Image Point Standard Desviations (pixels):* X=0.33, Y=0.33
- ? *Type:* Fixed values

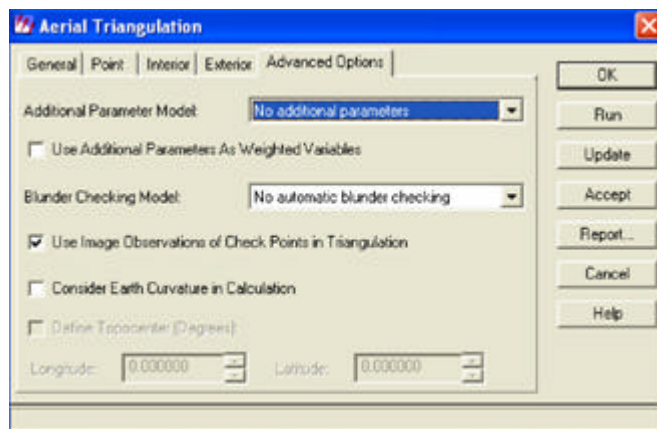
Se selecciona la pestaña *Interior*. Aparece la siguiente ventana:



En *Type* se elige *Fixed for all images*. Se selecciona la pestaña *Exterior*. Aparece la ventana siguiente:



✎ En *Type* se elige *No weight*. Se selecciona la pestaña *Advanced Options*. Aparece la ventana siguiente:



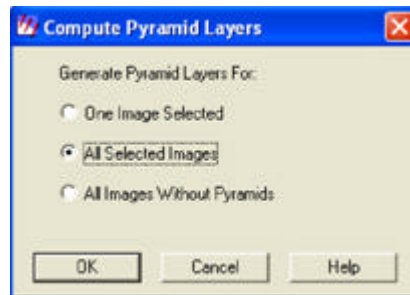
✎ En *Additional Parameter Model* se eligió *No additional parameters* y en *Blunder Checking Model* se eligió *No automatic blunder checking*. Se hizo clic en OK.

Paso 5. Establecer las opciones de salida

Las opciones de salida toman en cuenta la creación de pirámides en las fotos. Estas se establecen con el comando *Compute Pyramid Layer* disponible en el menú de *Edit*.

✍ Se seleccionaron ambas fotos.

✍ Se hizo clic en *Compute Pyramid Layer*. Se desplegó la siguiente ventana:



✍ Se seleccionó la opción *All Selected Images*. Se hizo clic en OK.

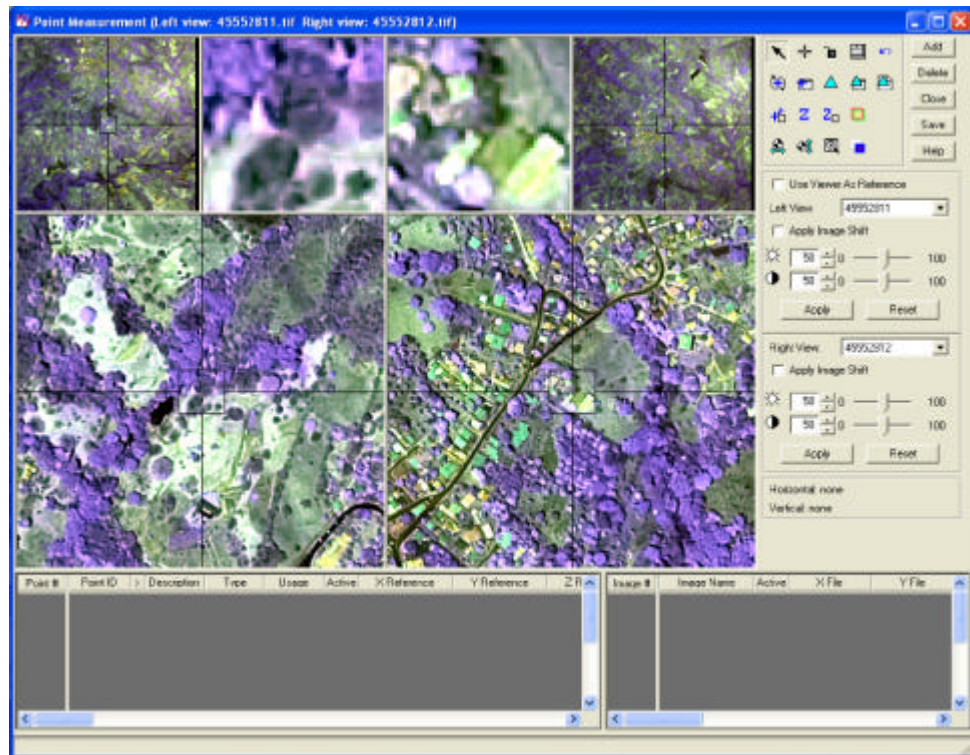
✍ Las casillas *Pyr.* de la ventana del *OrthoBASE* cambian de rojo a verde:

Paso 6 Entrada de puntos de control

La toma de puntos de control se realiza con el comando *Point Measurement* disponible en el menú de *Edit*. También puede hacerse clic en el siguiente icono:




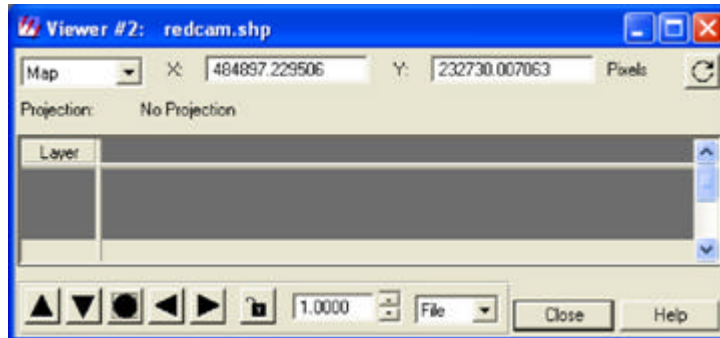
✍ Se selecciona *Point Measurement*. Se despliega la siguiente ventana:



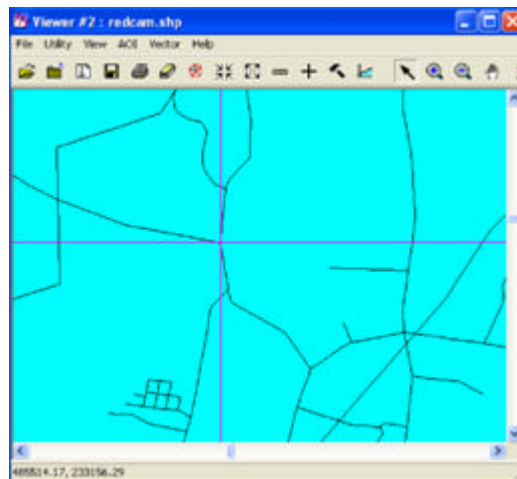
- ? Se hizo clic derecho sobre cada vista y se seleccionó *Rotate*. Se rota la foto con el valor kappa.
- ? Se presionó el botón *Add* para agregar un punto de control. Se definió *Type* como *Full* y *Usage* como *Control/Tie*.

Para la toma de coordenadas para los puntos de control se realiza el siguiente proceso:

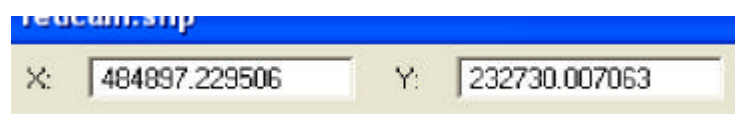
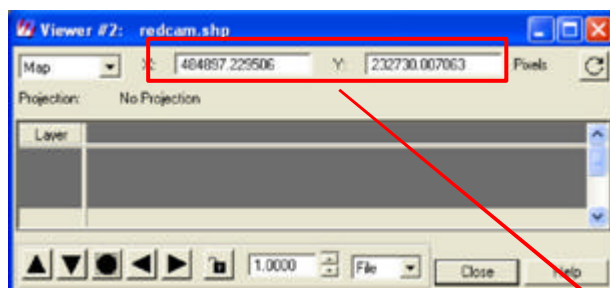
- ✍ Se abrió una vista con los vectores de referencia (red de caminos y elevaciones).
- ✍ En la vista se seleccionó el icono  (*Inquire Cursor*). Se despliega la siguiente ventana:




☞ En la vista aparece el cursor (cruz).



☞ El cursor marca las coordenadas exactas de determinado punto. Estas coordenadas aparecen en la ventana del *Inquire Cursor*.



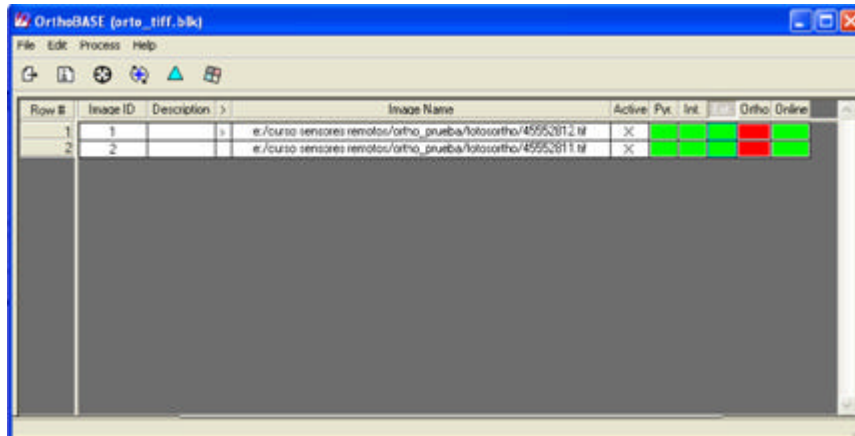
- ✍ Se identificaron los puntos de control en la foto y en la vista que contenía los vectores de referencia.
- ✍ Con el botón  (*Create Point*) se marcaron los puntos (ya sean de *Control* o *Tie*).
- ✍ Se copiaron las coordenadas de la ventana anterior y se pegaron en la ventana del *Point Measurement*.
- ✍ Se tomaron al menos 6 puntos de *Control* por foto y 6 puntos *Tie* (puntos de enlace entre fotos). Los puntos definidos como *Control* se marcaron para cada foto y los *Tie* en ambas dos fotos.

Paso 7. Triangulación



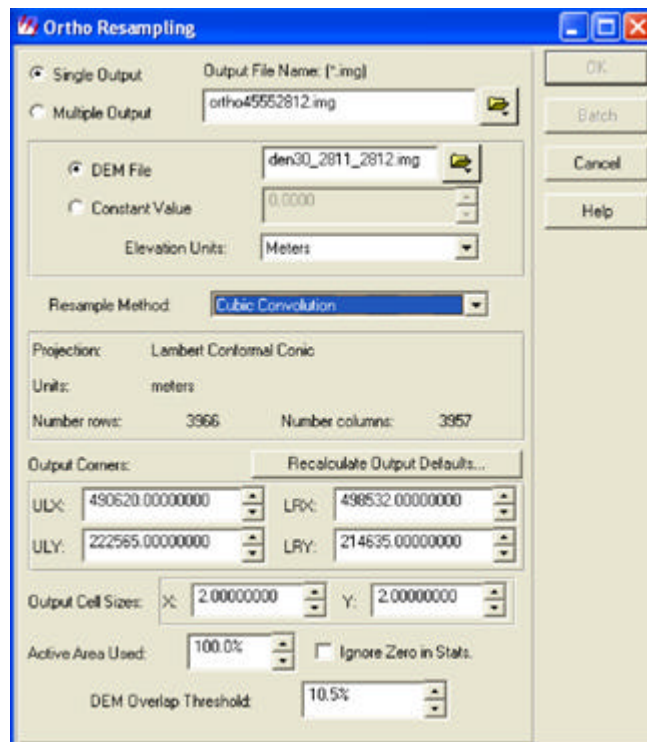
Una vez introducidos los puntos de control debe calcular la triangulación y verificar que se haya calculado la orientación interna y externa. En este momento se debe comprobar en la ventana *OrthoBase*, que las imágenes tengan construidas las capas o pirámides y que se les haya calculado o introducido la orientación interna y la orientación externa. En caso contrario, se va al comando *Triangulation Properties*, se escoge la pestaña correspondiente y se selecciona *Run/Accept/Update*.

La ventana *OrthoBASE* muestra que la orientación interna y externa de las fotografías ha sido calculada:

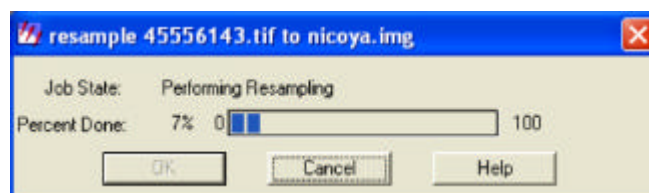


Paso 8. Generar la foto ortorectificada.

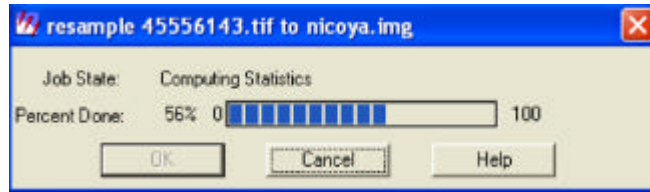
Se hizo clic sobre el botón  disponible en la ventana *OrthoBASE*. Se desplegó la siguiente ventana:



- ✍ Se escogió el nombre y se indicó la ubicación para la salida o foto ortorectificada (*Output File Name*).
- ✍ Se escogió *Single Output*, para ortorectificar una foto a la vez. También puede elegirse *Multiple Output* en caso de que se desee ortorectificar todas las fotos activas en el *OrthoBASE*.
- ✍ Se eligió el *DEM File* y se indicó la ubicación del modelo de elevación.
- ✍ Se determinaron las unidades de elevación: *Elevation Units: Meters*
- ✍ En *Resample Method* se seleccionó *Cubic Convolution* (método recomendado para que la foto no pierda calidad).
- ✍ De ser necesario, se cambian las esquinas u *Output Corners* ingresando los datos correctos de ULX, ULY, LRX, LRY, los cuales corresponden a los datos tomados en el paso 1.
- ✍ En *Output Cell Sizes* se escogió el número 2 (para el caso de la fotos la cámara DCS de Carta 2005).
- ✍ Se hizo clic en OK. Se despliega la ventana siguiente:



- ✍ Al terminar el proceso de anterior (*Resampling*), se desplegó la siguiente ventana:



✍ Se hizo clic en OK.

✍ Se abrió en una nueva vista la foto ortorectificada.

4.4. Cálculo del RMS

El siguiente es el procedimiento utilizado para el cálculo del RMS:

✍ Cada foto se desplegó en una vista y se sobrepuso la capa de caminos.

✍ Se ubicaron 12 puntos al azar, en la foto y sus correspondientes en la capa del atlas.

✍ Se tomaron las coordenadas de los puntos y se copiaron en una hoja de Excel.

✍ Al final del proceso se tenían tres pares de coordenadas por cada punto escogido (coordenadas de las fotos georeferenciada, las fotos sin georeferenciar y las del Atlas 2004).

✍ Posteriormente se calculó el RMS con la siguiente fórmula:

$$\text{RMS} = \sqrt{(x_F - x_A)^2 + (y_F - y_A)^2}$$

Donde:

X_F = coordenada X del punto en la foto.

X_A = coordenada X del punto en el Atlas.

Y_F = coordenada Y del punto en la foto.

Y_A = coordenada Y del punto en el Atlas.

5. RESULTADOS

Georeferenciación de las fotos Carta 2005:

El proceso de georeferenciación de las fotos Carta y sus resultados fueron muy similares y satisfactorios para las cuatro fotografías que formaron parte de la prueba. Para dos de ellas (Quesada y Turrialba) existió la dificultad de ubicar puntos de control ya que no se tenían suficientes puntos visibles en la capa de la red de caminos del Atlas. Sin embargo, pudo llevarse a cabo la georeferenciación. Para todas la fotografías se contó con errores de alrededor a un metro.

Ortorectificación de las fotos Carta 2005:

Los resultados del proceso de ortorectificación fueron bastante aceptables con respecto al error máximo total de cada una de las fotografías, ya que este error oscila entre 5 y 25 metros.

En este punto resalta la diferencia entre el error de ortorectificación y el error de georeferenciación. Se asume que, si en ambos procesos se utilizó la misma fuente de datos (coordenadas x , y de la capa de red de caminos del Atlas) la causa del aumento en el error son los datos de altura (z).

Por otra parte, hubo algunas fotografías que luego de concluir el proceso de triangulación (paso 7 de la metodología de ortorectificación) contaban con errores mayores a 25 metros, por lo tanto se intentó disminuir el error de cada una. Esto se hizo revisando los valores residuales de los puntos de control en el reporte de triangulación (The Triangulation Report With OrthoBASE) (Figura 2).

Los valores residuales son las distancias entre los puntos de control originales y las nuevas coordenadas estimadas de los puntos de control, y por tanto es posible utilizarlos como base para corregir esa diferencia y así disminuirla.

The image residuals of the control points		
The image ID = 1		
Point ID	Vx	Vy
7	-1.171	-0.354
8	-4.087	-0.042
9	13.118	-10.059
10	1.927	2.421
11	-0.510	7.264
12	0.485	7.357
13	-12.343	-6.365
RMSE of 7 points: $\sigma_x=7.038$, $\sigma_y=6.030$		
The image ID = 2		
Point ID	Vx	Vy
14	2.162	4.323
16	2.588	2.025
17	-0.593	-6.766
18	-1.772	4.362
19	-4.533	-2.587
20	4.534	-1.797
RMSE of 6 points: $\sigma_x=3.054$, $\sigma_y=4.031$		

Figura 2. Residuos de Puntos de Control en el reporte de triangulación del OrthoBASE

Durante el proceso de revisión de los residuos, se encontraron altos valores residuales, los cuales se atribuyen a causas como errores en la ubicación de los puntos de control, en la entrada de los datos o la mala calidad de la referencia (capa de red de caminos del Atlas de Costa Rica 2004) de los puntos de control.

Entonces, una vez identificados los puntos, se sumó o restó la diferencia a la nueva coordenada estimada en el proyecto, logrando acercar el valor al del punto real en terreno. Esta tarea se realizó frecuentemente debido a que se encontraron numerosas discrepancias (caminos no coincidían ni en tamaño ni en forma) entre lo observado en la fotografía y lo observado en la capa de red de caminos del Atlas (Figura 3 y 4).

Sin embargo, es importante notar que la capa de red de caminos del Atlas fue elaborada con datos a escala 1:50000, por lo que a escalas mayores no se va a encontrar coincidencia entre ambos datos.

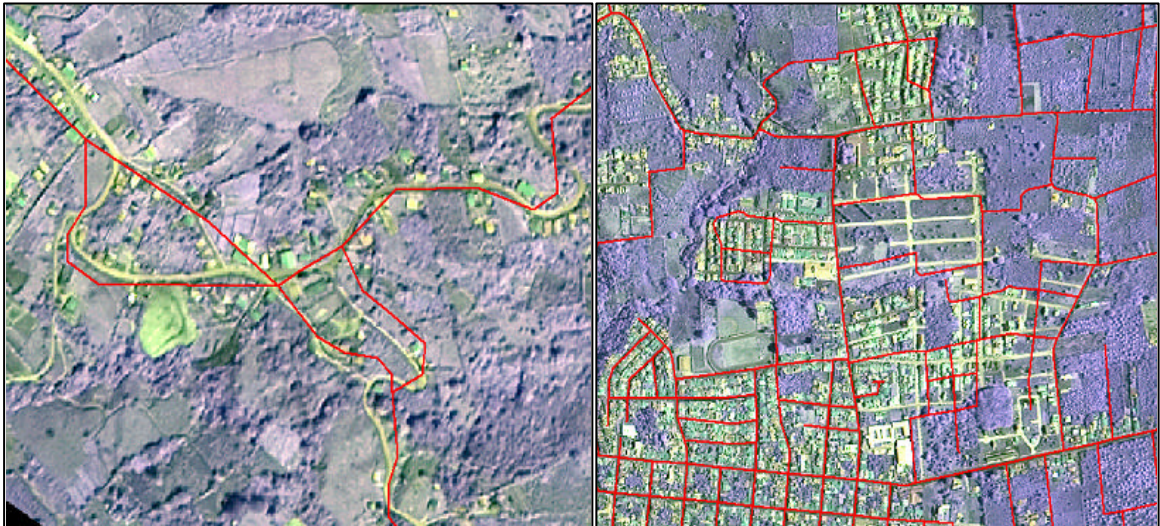


Figura 3. Diferencias entre el camino real en la foto y el digitalizado en la capa de Red de Caminos del Atlas, 2004.

Escala 1: 9000

Figura 4. Incongruencias en los trazos de los caminos digitados en el Atlas de Costa Rica y los observados en la foto.

Escala 1: 18000

Luego de corregir en la medida de lo posible el error de posición, se concluyó el proceso de ortorectificación. El resultado obtenido fue que el error total en cada foto alcanzó como máximo los 25 metros.

Por otra parte, se encontraron problemas con la localización de puntos, principalmente en las fotografías de las zonas rurales, de áreas cercanas a montañas, bosques y otros sectores donde no existen caminos digitalizados en la capa de red de caminos del Atlas, o bien, no es posible distinguir en la foto los cruces de los caminos, ríos, etc (Figura 5). En estos casos hubo que recurrir a utilizar como apoyo adicional, las esquinas de la capa de ubicación de las fotos CARTA 2005.

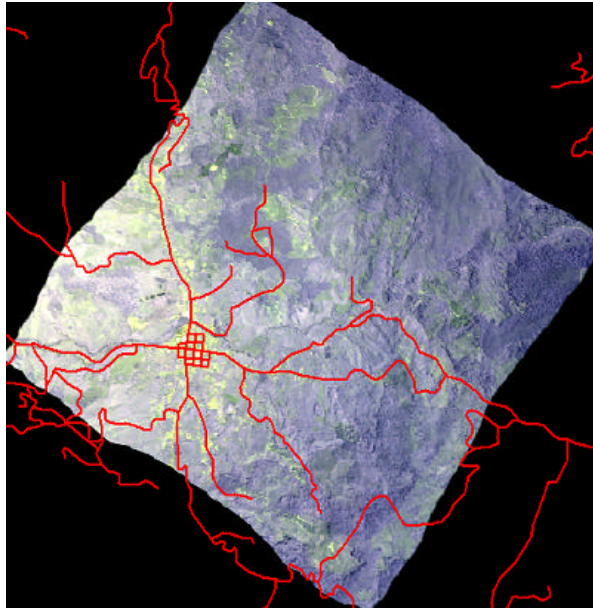


Figura 5. Distribución no homogénea de la red de caminos en la fotografía.

Con respecto a la duración del proceso completo de ortorectificación de las fotos, en las cuales la localización de puntos de control era sencillo y preciso, el tiempo necesario fue de alrededor de una hora y media, esto porque los caminos y los puntos utilizados se encontraban uniformemente distribuidos en la fotografía (Figura 6). Sin embargo, en algunas fotos donde no era tan fácil ubicar los puntos, el proceso tardó hasta 5 horas para completarse. En mayor parte debido a que se debió repetir el proceso al menos una vez.

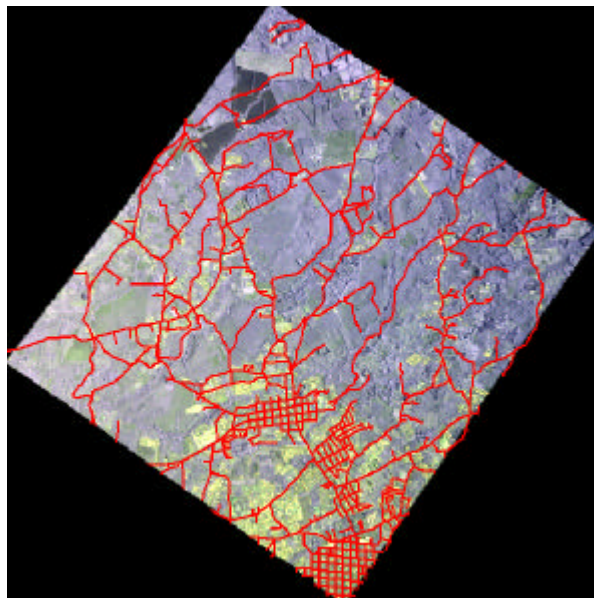


Figura 6. Distribución homogénea de la red de caminos del Atlas en la fotografía

Por tanto, ya que para algunas fotos fue complicada la ubicación uniforme de los puntos de control y tuvo que finalizarse el proceso con pocos datos y/o con datos de mala calidad, se encontró que al abrir la vista con la foto ortorectificada, esta se distorsionó en los bordes y en las esquinas de la misma (7 y 8).

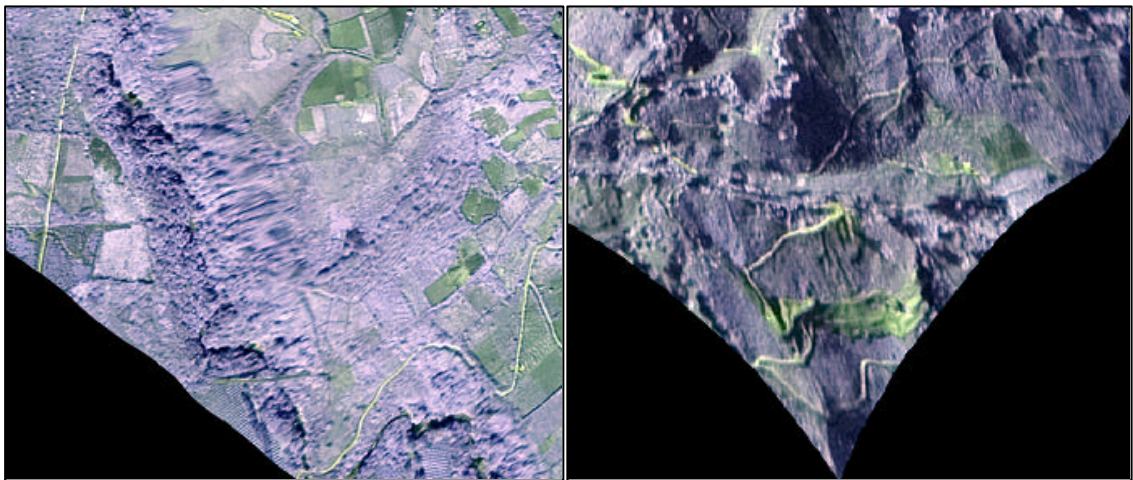


Figura 7. Distorsiones en las fotos en los bordes.

Figura 8. Distorsiones en las fotos en las esquinas.

Comparación de los dos sistemas de ortorectificación

Analizando los datos generales del error medio cuadrático (RMS) se obtuvo una diferencia muy pequeña en el promedio de las fotos georeferenciadas y las no georeferenciadas. Esta diferencia es de 22.2 y 19.48 metros respectivamente, tan solo 2.72 metros de diferencia. El valor de la desviación estándar es muy similar en ambos casos (cuadro 2).

Cuadro 2. Promedio y desviación estándar del RMS de la ortorectificación de las fotos georeferenciadas y sin georeferenciar.

	RMS fotos georeferenciadas (m)	RMS fotos sin georeferenciar (m)
Promedio	22,20	19,48
Desviación estándar	14,63	14,52

Además, es conveniente analizar el promedio y la desviación estándar del RMS de cada una de las cuatro fotografías. A continuación se presenta un cuadro con los resultados individuales.

Cuadro 3. Promedio y desviación estándar del RMS para cada una de las fotografías de la prueba.

Fotografía	Estadístico	RMS Georef. (m)	RMS sin georef. (m)
Guápiles	Promedio	18,39	14,62
	Desv. Estándar	6,30	6,57
San Ramón	Promedio	11,88	13,76
	Desv. Estándar	6,32	10,10
Turrialba	Promedio	27,67	15,91
	Desv. Estándar	19,96	10,15
Ciudad Quesada	Promedio	30,87	33,61
	Desv. Estándar	13,76	18,96

Se observa que para las fotografías de Guápiles y Turrialba los promedios más bajos son los de las fotos sin georeferenciar, sucediendo lo contrario con las fotos de Ciudad Quesada y San Ramón.

Las fotos de Turrialba (para foto georeferenciada) y Ciudad Quesada (ambas fotos) poseen los promedios de error más altos del grupo. Esto se debe, a la incongruencia en la posición de los puntos observados en la foto y los observados en el Atlas, lo cual dificultaba la labor de ubicación de los puntos de control.

Con los datos anteriores es posible inferir que no existe diferencia significativa al realizar la ortorectificación con fotos georeferenciadas y no georeferenciadas, sin embargo, se verificaron los resultados anteriores por medio de una prueba de hipótesis (Anexo 2), la cual ciertamente confirmó esa conclusión.

Por otra parte, cabe señalar que en algunos sectores de la fotografía, cuando se sobrepuso la capa del Atlas para la verificación de la ortorectificación, se encontró que los caminos calzaban muy bien o hasta casi perfectamente con lo visto en la foto; no obstante, al otro extremo de la misma foto, se observaba un desplazamiento de la capa. Por supuesto, estas discrepancias afectaron los valores del RMS, ya que para algunos sectores las diferencias eran pequeñas mientras que para otros eran muy amplias.

Debido a lo anterior, sería recomendable utilizar datos de mayor confiabilidad, como los que pueden obtenerse por medio de visitas de campo y así conseguir una ubicación con GPS más precisa de los puntos. Es decir, el objetivo sería recopilar datos que aseguren puntos de control de mejor calidad que los usados con la capa de red de caminos del Atlas, la cual está elaborada a una escala 1:50000.

Por último, debe considerarse que a pesar de que con una fotografía previamente georeferenciada es más fácil ortorectificar; porque con ésta se recurre a desplegar la foto en una vista y sobreponerle la capa de caminos del Atlas, para así se detecta mejor los puntos de referencia y ubicar los puntos de control más ágilmente; también se debe tomar en cuenta que el tiempo que se gana ortorectificando, debe invertirse durante el proceso de georeferenciación. Es decir, de igual manera es necesario ser meticuloso a la hora de realizar el proceso. Por lo tanto, toma más tiempo georeferenciar y ortorectificar las fotos, que solamente ortorectificarlas.

Ortorectificación de las fotos de la cabeceras de cantón y actualización de la capa de caminos del Atlas Digital de Costa Rica

Con respecto al objetivo de ortorectificar las fotos de la cabeceras de cantón del país, cabe decir que se ortorectificaron 72 fotografías (Anexo 3) de un total de 79.

Las demás fotos no se pudieron ortorectificar dado a la escasez de puntos de control o porque se éstas se encontraban parcial o totalmente cubiertas por nubes.

Además, se realizó la actualización de la capa de caminos del Atlas Digital de Costa Rica de todas las fotografías ortorectificadas.

6. CONCLUSIONES

- ✍ Se logró georeferenciar las fotos de Guápiles, Turrialba, San Ramón y Ciudad Quesada para utilizarlas en la prueba de ortorectificación.
- ✍ El error de georeferenciación de todas la fotos es de alrededor de 1 m.
- ✍ Se encontró que un problema fundamental fue la calidad de los datos de referencia para la ubicación correcta y precisa de los puntos de control.
- ✍ Hay sectores donde los caminos coinciden perfectamente con lo observado en la capa de caminos del Atlas, mientras que en otros no concuerdan en lo absoluto.
- ✍ En numerosas fotos la ubicación de puntos fue muy difícil debido a la ausencia total o parcial de caminos o cruces de caminos.
- ✍ Se pudo utilizar como ayuda adicional, en respuesta a la escasez de puntos, la capa de ubicación de las fotos CARTA 2005.
- ✍ Se logró un error mínimo de ortorectificación de 5 metros y máximo de 25 metros.
- ✍ La prueba de ortorectificación determinó que no hay diferencia significativa entre los dos procesos.
- ✍ Se deben utilizar datos más confiables para el proceso de toma de puntos de control. Estos pueden obtenerse con visitas a lugares previamente definidos y así conseguir una ubicación con GPS más precisa de esos puntos.
- ✍ Se consume más tiempo al georeferenciar y ortorectificar las fotos, que solamente ortorectificarlas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Atlas Digital de Costa Rica, 2004. Disponible en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

CENAT, 2005. Cirrus Digital Camera System (DCS) (correo electrónico). San José.

Cuartero, A., Felicísimo, A. (2003). Rectificación y ortorectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusión. GeoFocus (Artículos), nº 3, 2003, p. 45-57. ISSN: 1578-5157. En línea. Consultado el 5 de agosto del 2007. Disponible en: http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo3_2003.pdf

ERDAS Field Guide, 1997. Fourth Edition, Revised and Expanded. PDF. En línea. Consultado el 27 de junio del 2007. Disponible en: <http://support.erdas.com/documentation/files/FieldGuide.pdf>

ERDAS Field Guide, sf. Conceptos fotogramétricos. Capítulo 7. PDF. En línea. Consultado el 5 de agosto del 2007. Disponible en: http://www2.erdas.com/supportsite/documentation/files/spanish_field_guide/7_conceptos_fotogrametricos.pdf

ERDAS IMAGE. 1999-2001. IMAGINE OrthoBASE User's Guide 104p

Fallas, J. 2004. Ortorectificación de fotos aéreas con ILWIS. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. (UNA) Universidad Nacional. EDECA. 5, 12-22 p.

Leica Geosystems, (2004). Improving Accuracy of GIS Data. PDF. En línea. Consultado el 27 de junio del 2007. Disponible en:

http://gi.leica-geosystems.com/documents/pdf/imagineadvantage_WP.pdf

Lillesand, T; Keifer, R.W.; Choipman, J.W. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. 5 ta Edic. Editorial Wiley 763 p. New York, USA.

Okeke, F. I. 2006. Review of Digital Image Orthorectification Techniques. Department of Geoinformatics and Surveying, University of Nigeria, Enugu Campus, Nigeria. En línea. Consultado el 27 de junio del 2007. Disponible en:

http://www.gisdevelopment.net/magazine/years/2006/july/36_1.htm

Oracle, 2003. GeoRaster Overview and Concepts. En línea. Consultado el 5 de agosto del 2007. Disponible en:

http://download-uk.oracle.com/docs/cd/B14117_01/appdev.101/b10827/geor_intro.htm

Ortiz, E, Soto, C. 2007. Laboratorio de Ortorectificación. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Ortiz, G. s.f. Georeferenciación. En línea. Consultado el 27 de junio del 2007. Disponible en: <http://recursos.gabrielortiz.com/index.asp?Info=054>

Soto, C. 2005. Mapificación y Caracterización de Bosques Secundarios en la Subregión de Sarapiquí. Informe de Práctica de Especialidad. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 76 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas de las fotos georeferenciadas, sin georeferenciar y del Atlas Digital de Costa Rica y valores del RMS de cada fotografía.

Punto	Foto	Nombre	Georeferenciadas		No georeferenciadas		Atlas		RMS geo	RMS no geo
			x	y	x	y	x	y		
1	45552618	Guápiles	559141.9	244198.1	559139.4	244192.1	559130.3	244184.7	17.82	11.76
2			560469.8	244073.1	560458.8	244062.8	560449.9	244062.3	22.65	8.97
3			559946.1	242830.3	559945.5	242821.9	559934.6	242822.6	13.75	10.92
4			558362.4	243409.7	558368.9	243408.4	558349.5	243417.9	15.34	21.60
5			557065.4	242888.8	557077.8	242874.3	557054.7	242882.8	12.23	24.72
6			560251.2	242848.1	560237.0	242836.2	560225.7	242840.5	26.58	12.06
7			561331.5	243883.8	561288.4	243863.0	561306.7	243875.7	26.12	22.24
8			559046.8	244388.1	559044.2	244382.1	559031.1	244368.5	25.12	18.91
9			560197.6	243823.8	560188.1	243817.3	560181.1	243817.4	17.66	6.93
10			557719.6	243962.0	557703.5	243955.9	557717.5	243967.7	6.04	18.36
11			558918.4	244316.7	558915.6	244310.2	558908.4	244296.9	22.14	15.09
12			560632.3	244064.2	560618.3	244051.3	560621.7	244053.3	15.25	3.92
1	485p0099	San Ramón	486045.0	232288.6	486055.3	232283.0	486055.1	232287.5	10.17	4.51
2			487619.8	230926.3	487616.7	230921.8	487632.5	230908.8	21.55	20.42
3			486585.4	229808.2	486591.5	229809.7	486597.9	229790.5	21.64	20.32
4			484330.1	229935.6	484346.6	229938.9	484326.3	229928.4	8.17	22.92
5			485378.1	231680.4	485386.0	231673.9	485384.5	231675.5	8.03	2.27
6			486774.8	230813.0	486780.3	230805.6	486785.9	230795.9	20.42	11.17
7			484226.2	230781.2	484235.5	230780.8	484216.7	230777.9	10.12	19.07
8			485710.2	228329.0	485716.9	228348.9	485711.4	228313.6	15.42	35.72
9			484947.6	231094.6	484954.1	231089.8	484944.9	231087.4	7.70	9.50
10			484904.0	232718.6	484896.6	232721.7	484896.6	232724.9	9.73	3.22
11			488935.5	232299.7	488930.4	232297.4	488935.1	232296.8	2.84	4.80
12			485364.3	231015.3	485376.7	231009.9	485365.5	231008.7	6.76	11.26

Punto	Foto	Nombre	Georeferenciadas		No georeferenciadas		Atlas		RMS geo	RMS no geo
			x	y	x	y	x	y		
1	45554423	Turrialba	571070.6	211037.5	571098.3	211038.4	571083.6	211045.7	15.36	16.36
2			571739.9	211803.9	571796.4	211756.4	571769.6	211768.8	46.00	29.58
3			571430.3	209735.9	571453.5	209742.9	571442.8	209734.9	12.59	13.33
4			571047.2	209417.0	571052.5	209406.6	571061.7	209421.0	15.01	17.07
5			572724.9	210849.4	572755.2	210853.8	572719.7	210850.7	5.29	35.60
6			570611.2	210237.2	570606.6	210244.3	570602.4	210244.3	11.30	4.24
7			567863.5	209959.2	567873.6	209947.8	567872.8	209945.7	16.39	2.28
8			571023.6	206311.0	570994.7	206298.0	570993.6	206299.6	32.11	1.89
9			568471.4	208202.7	568537.1	208233.9	568522.5	208219.6	53.87	20.43
10			569832.2	212662.7	569869.7	212585.3	569860.2	212599.8	68.77	17.36
11			571627.0	211378.2	571677.4	211367.0	571664.9	211373.7	38.09	14.30
12			568510.1	210677.7	568475.4	210672.1	568493.8	210671.8	17.28	18.44
1	485p0349	Quesada	488107.8	260787.9	488130.4	260749.2	488129.3	260784.4	21.80	35.26
2			486601.1	260099.6	486557.2	260055.4	486545.6	260064.4	65.72	14.62
3			491559.2	258515.7	491614.5	258518.7	491584.5	258503.4	28.14	33.64
4			489227.6	255955.3	489204.3	255966.5	489207.9	255957.1	19.77	9.99
5			489096.1	257507.7	489110.7	257504.0	489076.9	257499.8	20.80	34.04
6			489181.3	256626.6	489178.4	256629.3	489197.4	256647.9	26.66	26.57
7			488698.4	259137.2	488718.9	259142.0	488692.0	259114.1	24.03	38.76
8			490282.8	259315.9	490349.0	259357.8	490303.0	259356.3	45.15	46.03
9			488824.9	258614.6	488849.0	258618.9	488811.6	258621.7	15.09	37.50
10			489179.8	257209.8	489190.0	257204.5	489146.6	257219.3	34.56	45.85
11			486914.9	260388.1	486888.2	260352.8	486918.9	260422.5	34.67	76.20
12			489853.0	255752.0	489815.4	255761.6	489820.3	255761.3	34.01	4.88

Anexo 2. Variables y fórmula utilizadas en la prueba de hipótesis y sus resultados.

Se consideró:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde

H_0 : hipótesis nula

H_a : hipótesis alternativa

μ_1 : foto georeferenciada

μ_2 : foto sin georeferenciar

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

donde:

x_1, x_2 = promedio del RMS

σ_1, σ_2 = desviación estándar del RMS

n = número de observaciones

Se utilizaron las siguientes variables:

	Fotos georef.	Fotos no georef.
n	48	48
Promedio	22.20	19.48
Desv. Estándar	14.63	14.52
$\sigma / 2$	5% (1.96)	5% (1.96)

La aplicación de la anterior fórmula da como resultado que $Z = 0.91$. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula. No existe diferencia significativa entre la media especificada y la media de la muestra. Se afirma con un nivel de significancia del 95%. Es decir, no hay diferencia significativa en ortorectificar fotos georeferenciadas y no georeferenciadas.

Anexo 3. Cabecera, hoja cartográfica y número de foto ortorectificada y digitalizada para esta práctica.

Cabecera	Hoja	Numero de foto	
Alajuela	Barva	45558108	45558109
Alajuelita	Abra	45558115	45558116
Aserrí	Abra	485p0122	485p0121
Atenas	Río Grande	45552811	45552812
Bagaces	Monteverde	45554953	45554954
Barva	Barva	485p0262	485p061
Buenos Aires	Buenos Aires	45556889	45556890
Cañas	Cañas	485p1836	485p1835
Carmona	Cerro Azul	45556283	45556282
Cartago	Istarú	45557949	45557948
Colón	Abra	45558657	45558656
Curridabat	Abra	45558003	45558004
Desamparados	Abra	45558116	45558115
Esparza	Barranca	45555762	45555763
Filadelfia	Belén	45553417	45553418
Golfito	Golfito	45557154	45557155
Grecia	Naranjo	45557324	45557325
Guácimo	Guácimo	45558873	45558872
Guadalupe	Abra	45557767	45557768
Guápiles	Guápiles	45552619	45552618
Heredia	Abra	45557763	45557764
Hojancha	Matambú	45556443	45556442
Jacó	Herradura	45558557	45558557
Juntas	Juntas	45555292	45555293
Liberia	Monteverde	45555964	45555965
Limón	Río Banano	45552948	45552947
Matina	Matina	45558892	45558891
Miramar	Miramar	45555395	45555396
Naranjo	Naranjo	485p5674	485p5675
Neilly	Canoas	45557220	45557221
Nicoya	Matambú	45556144	45556144
Orotina	Barranca	45559056	45559055
Palmares	Naranjo	45552816	45552817
Paraíso	Istarú	45557950	45557951
Parrita	Parrita	45558980	45558981
Puerto Cortés	Térraba	45556774	45556773

Puerto Viejo	Río Cuarto	45557725	45557726
Puntarenas	Golfo	45553446	-
Quepos	Quepos	45555411	45555412
Quesada	Quesada	485p0349	485p0350
San Antonio	Abra	45558110	45558109
San Ignacio	Caraigres	485p1776	485p1776
San Isidro	San Isidro	45556970	45556971
San Isidro	Barva	485p2283	485p2281
San Isidro	Abra	45552284	45552284
San Joaquín	Barva	45557762	45557763
San José	Abra	45558111	45558112
San Juan	Abra	45557942	45557943
San Marcos	Dota	485p1908	-
San Mateo	Barranca	45555754	45555755
San Pablo	Caraigres	45555893	45555894
San Pablo	Abra	45557763	45557764
San Pedro	Barva	45557758	45557757
San Pedro	Abra	45558004	45558003
San Rafael	Istarú	45552418	45552419
San Rafael	Barva	485p2430	485p2431
San Ramón	Naranjo	485p0100	485p0099
San Vicente	Abra	45557942	45557943
San Vito	Cañas Gordas	45557241	45557242
Santa Ana	Abra	45554997	45554998
Santa Bárbara	Barva	45557761	45557762
Santa Cruz	Diria	45552239	45552238
Santa María	Vueltas	485p1765	485p1764
Santiago	Río Grande	45557901	45557902
Santo Domingo	Abra	45557941	45557942
Sarchí Norte	Naranjo	45558103	45558102
Siquirres	Bonilla	45558865	45558864
Tejar	Istarú	45557999	45557998
Tilarán	Tilarán	45559984	45559983
Tres Ríos	Istarú	45557947	45557946
Turrialba	Tucurrique	45554424	45554423
Zarcelero	Quesada	45559943	45559944
