

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

Ing. Juan Miguel Luna Fuentes



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
INTRODUCCIÓN

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

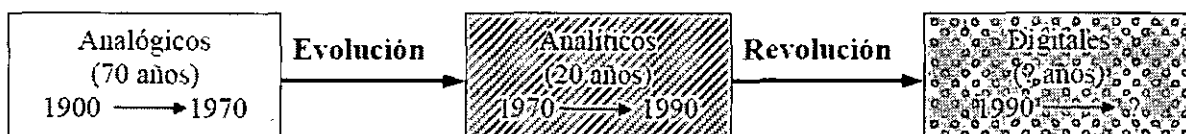
INTRODUCCION

Los métodos fotogramétricos pueden ser clasificados en función de la forma de su resolución. Así se puede distinguir entre Fotogrametría Analógica, resolución mediante analogías mecánicas y Fotogrametría Electrónica en la que los sistemas óptico-mecánicos se sustituyen por un sistema informático encargado de la realización de los cálculos. La Fotogrametría Electrónica mediante la sustitución realizada se consigue una importante mejora en cuanto a la precisión de los resultados y flexibilidad del equipo, pudiendo utilizar fotografías de muy distinto origen (desde fotogramas de rango cercano a fotogramas de gran altura de vuelo) y diferentes características de toma (inclinación, base, focal, etc.).

Dentro de los métodos fotogramétricos electrónicos se pueden distinguir la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital.

- La Fotogrametría Analítica aborda la resolución informatizada de los cálculos fotogramétricos, utilizando como información de entrada las medidas realizadas sobre la fotografía (en formato analógico). La utilización del apoyo informático permite la rápida obtención de las relaciones existentes entre los puntos del objeto y sus correspondientes imágenes así como los errores del sistema (Gosh, 1988).
- La Fotogrametría Digital se caracteriza por utilizar información (imágenes) en formato digital. Este aspecto va a determinar muchas de las ventajas e inconvenientes que tienen estas técnicas, definidos por los importantes cambios conceptuales y metodológicos. Así Ackermann (1991) indica que " con las cámaras digitales y el procesamiento de imágenes digitales, la Fotogrametría trabajará en un entorno completamente diferente, caracterizado por diferentes equipos, técnicas, oportunidades y por una forma distinta de pensar".

Al respecto es importante tener en cuenta que el cambio de la fotogrametría clásica analógica a la fotogrametría analítica no supuso ningún tipo de modificación en cuanto a principios ni resultados, consistiendo en una lógica evolución de los aspectos relacionados con la precisión y la productividad de los métodos fotogramétricos, se trata por tanto de una evolución metodológica. La transición entre la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital se presenta como la aplicación de unos procedimientos clásicos a una plataforma nueva, así todos los procesos fotogramétricos convencionales continúan aplicándose y se producen los mismos productos: básicamente, coordenadas de los objetos, mapas y imágenes ortorrectificadas.





DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITALES

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

Tema 1. Sistemas fotogramétricos digitales

1.1 Sistemas y estaciones fotogramétricas digitales (SFDs y EFDs)

Sistema Fotogramétrico Digital. El objetivo fundamental de un sistema fotogramétrico, cualquiera que sea la metodología empleada para su construcción es la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes de los mismos, a partir de imágenes en formato digital.

Un sistema fotogramétrico digital debe cumplir los siguientes requerimientos en cuanto a hardware:

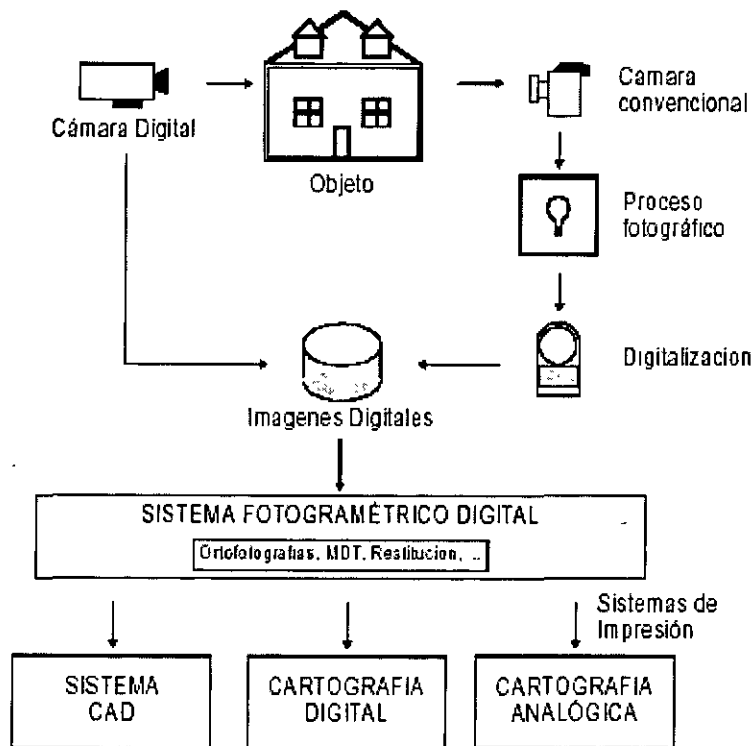
- Un sistema de digitalización de imágenes analógicas.
- Posibilidad de entrada directa de datos en formato digital (p.ej., cámara digital) para la realización de aplicaciones fotogramétricas en tiempo real.
- Sistema de medida 3D de imágenes digitales de diferentes fuentes y geometrías.
- Manipulación y procesamiento de imágenes de gran tamaño en un tiempo razonable.
- Generación automática de modelos digitales de elevaciones con precisión a nivel de subpixel.
- Obtención de ortofotografías digitales en un tiempo de proceso aceptable.
- Visualización de las imágenes estereoscópicas en color real.
- Interfaz con SIG con sobre imposición monoscópica y estereoscópica de elementos gráficos y con funciones de edición para modificar dichos elementos.
- Impresoras de imágenes y trazadores gráficos (Plotter) para la impresión analógica de los resultados.

El sistema fotogramétrico digital incluye todos los elementos necesarios tanto a nivel de software como de hardware para obtener los productos fotogramétricos a partir de las imágenes digitales, incluyendo también sistemas de captura de imágenes (interfaces de conexión con cámaras digitales o sistemas digitalización de imágenes en formato analógico -escáner-) así como sistemas de impresión final (filmadoras, trazadores gráficos, impresoras de imágenes). El elemento fundamental del sistema fotogramétrico digital es la estación fotogramétrica digital - Digital Photogrammetric Workstation- (conocido

también como restituidor digital, si bien este nombre no es adecuado puesto que sólo hace referencia a una de las tareas de la estación, el proceso de restitución).

La tendencia actual de diseño de los sistemas fotogramétricos digitales es la utilización de una concepción modular ofreciendo grandes posibilidades para la expansión del sistema tanto a nivel de software como de hardware. Además, cada vez es más frecuente la utilización de hardware estándar, dentro de las posibilidades debido a las características particulares de este tipo de sistemas, para conseguir por un lado, la compatibilidad con otros sistemas, facilitar las tareas de mantenimiento y la reducción de costes de los equipos.

Las peculiaridades más importantes de un restituidor fotogramétrico se encuentran en la interfaz con el usuario: necesidad de visión estereoscópica, obtención de coordenadas en tiempo real, precisión de medida a nivel de subpixel.



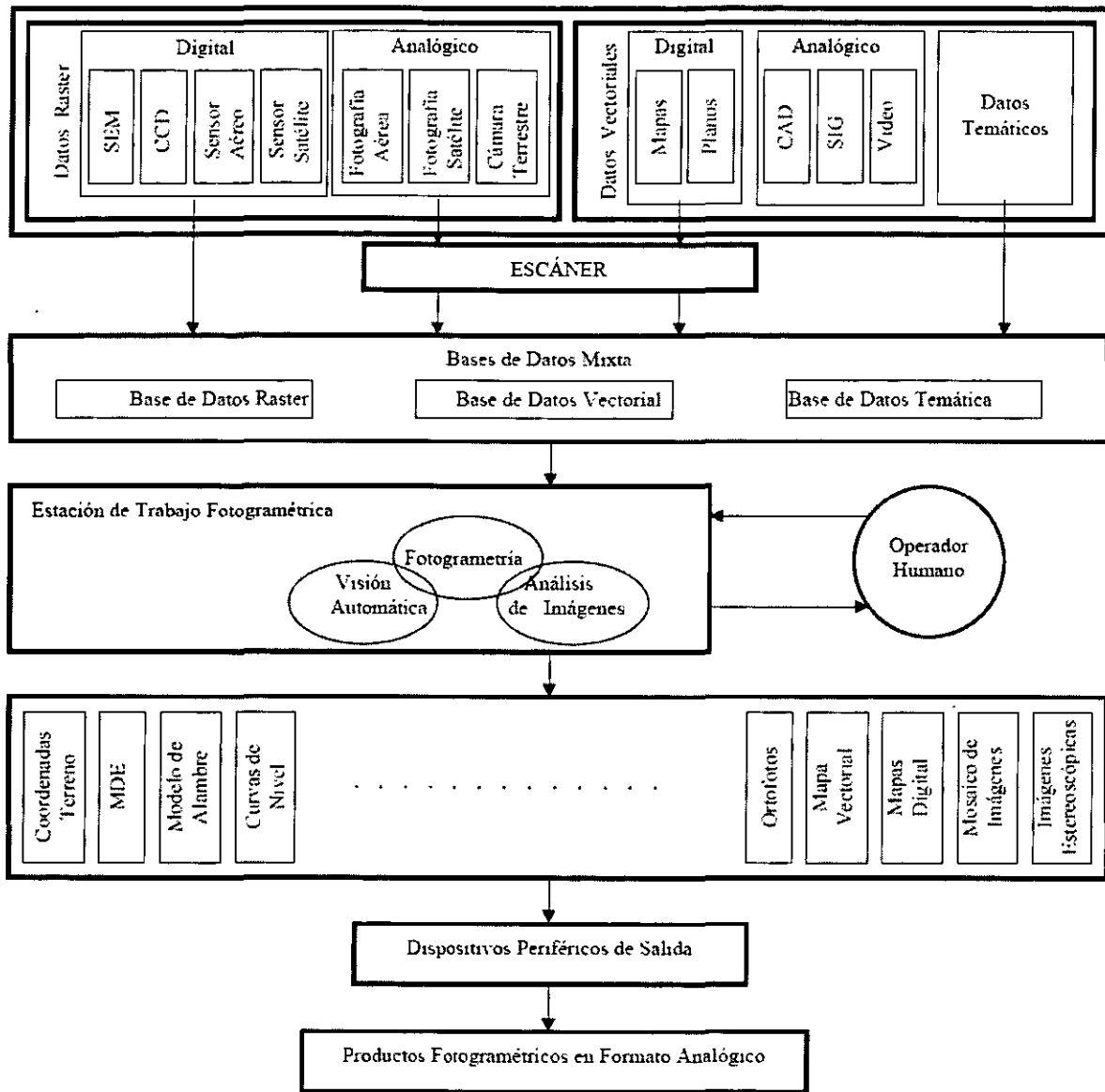


Diagrama de flujo de un Sistema Fotogramétrico Digital (Albertz et al., 1991)

Estaciones Fotogramétricas Digitales

Gugan y Dowinan (1986) exponen las cuatro características esenciales para un sistema de restitución fotogramétrica digital:

- a) Digitalización en tiempo real del modelo en "3D".
- b) La visión estereoscópica
- c) La posibilidad de manejar volúmenes de imágenes grandes.
- d) La precisión de medida a nivel del subpixel.

Grün (1986) introduce nuevas ideas relativas al potencial y al diseño de las estaciones fotogramétricas digitales. Los nuevos diseños contemplan la utilización de imágenes digitales obtenidas con diferentes plataformas (cámaras aéreas, satélite, fotogrametría terrestre, etc.), lo que permite el realizar todos los trabajos de fotogrametría con un único sistema. Ésta es una de las grandes ventajas con respecto a los sistemas analógicos y analíticos, la integración de todo el proceso en un único sistema, flexible y universal, que permite obtener productos tanto en formato analógico (hardcopy) como en formato digital (softcopy). A Grün se debe la denominación de "Softcopy Photogrammetry" que ciertos autores norteamericanos, utilizan como sinónimo de la Fotogrametría Digital.

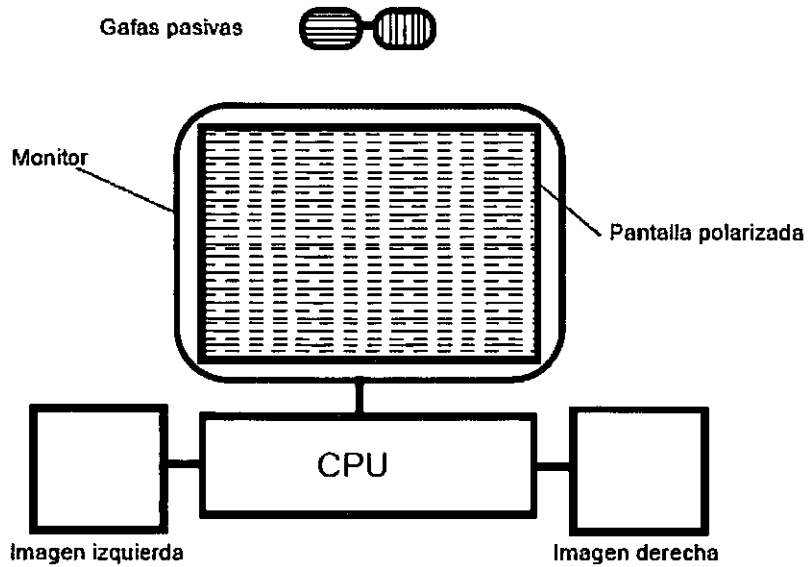
Como fruto de la popularidad de estas nuevas técnicas, en el período 1984-88 se crea un grupo de trabajo dentro de la ISPRS sobre Sistemas Fotogrametricos Integrados. En Makarovic (1986) se presentan los principales aspectos de los sistemas de tipo digital, este artículo marca la tendencia que se ha mantenido estos últimos años, del hardware al software, es decir, de los sistemas analógicos a los digitales, de los métodos manuales a los automatizados.



Fuente: <http://www.lh-systems.com>



Fuente: <http://imgs.intergraph.com>



Sistemas de visualización con polarización gafas pasivas (LH Systems).

Polarización con gafas activas (active flickler). En este caso las imágenes se editan en la pantalla de una manera alternativa y secuencialmente con una frecuencia de 120 Hz. Las gafas (activas) en este caso usan unos cristales con un obturador (LCS-Liquid crystal Shutter-) que separan las imágenes ofreciendo alternativamente al operador la imagen izquierda y derecha (incluyendo la marca flotante) a tal velocidad que se produce la fusión de imágenes y por tanto el efecto estereoscópico. La pantalla y el obturador están separados mediante un emisor de rayos infrarrojos que se suele colocar encima del monitor. Este sistema es comercializado por la StereoCorporation bajo el nombre de CyrstalEyes.



Sistemas de visualización con polarización de gafas activas (ImageStation ZIII. Intergraph)

Los dos métodos anteriores tienen las siguientes ventajas:

- Permiten la visión de imágenes en color.
- Permiten el principio de superposición.
- Permiten que varios operadores puedan ver el modelo simultáneamente.
- Permiten a los operadores la libertad en los movimientos de la cabeza.

En cuanto al principal inconveniente es que hay una reducción del brillo en comparación con un monitor normal debido a la doble frecuencia y a la absorción de la luz por la polarización de una pantalla (caso de gafas pasivas) o por el obturador en el de gafas activas.

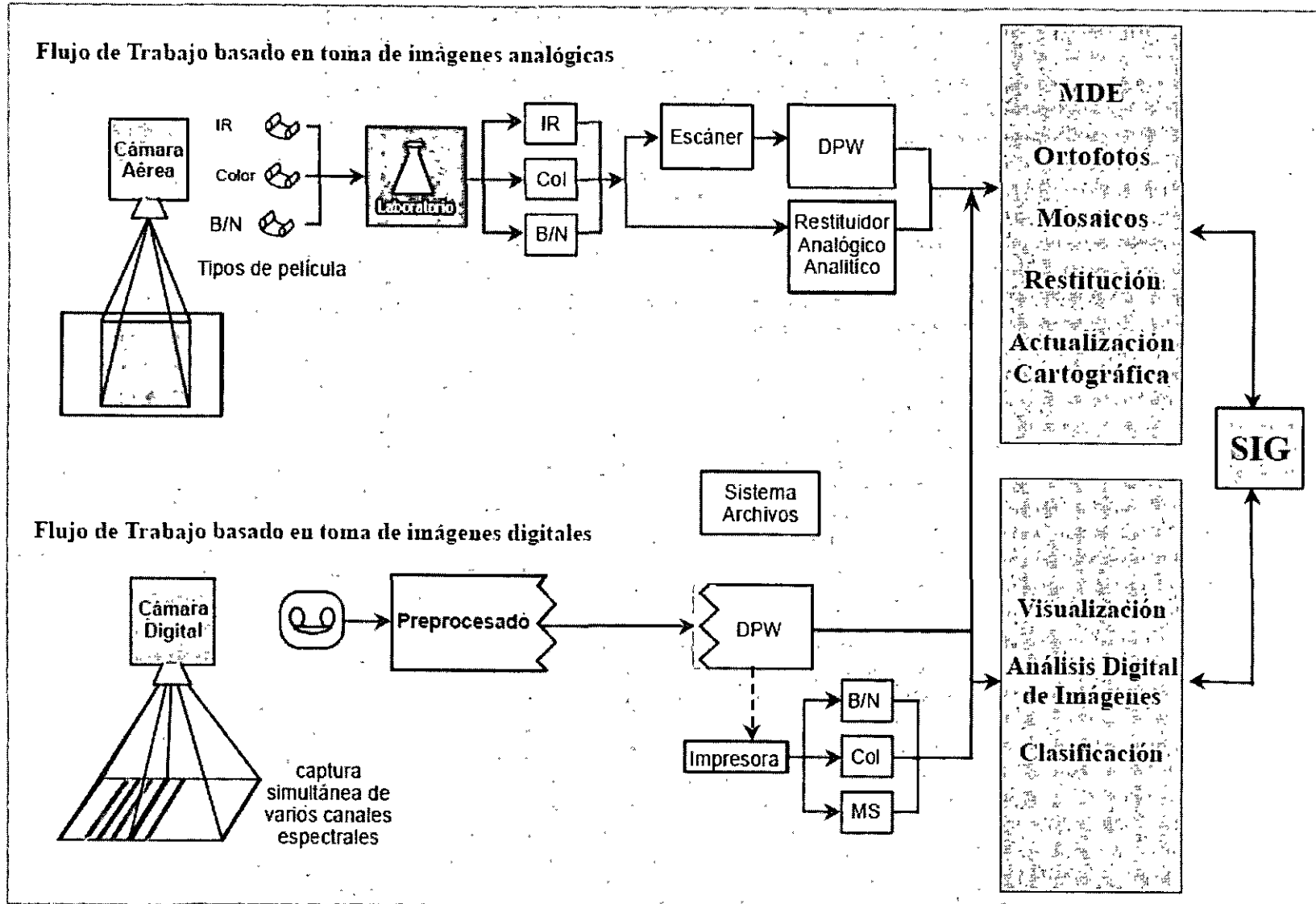
Gafas Pasivas

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Bajo peso de las gafas (como cualquier gafa de corrección óptica)	Precio del sistema completo
Bajo precio unitario de las gafas	Perdida de luminosidad
Libertad de movimientos	Ghosting (separación incompleta entre imagen izquierda y derecha)

Gafas Activas

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Precio del sistema completo	Precio del sistema completo
Mejor luminosidad	Perdida de luminosidad
	Ghosting (separación incompleta entre imagen izquierda y derecha)

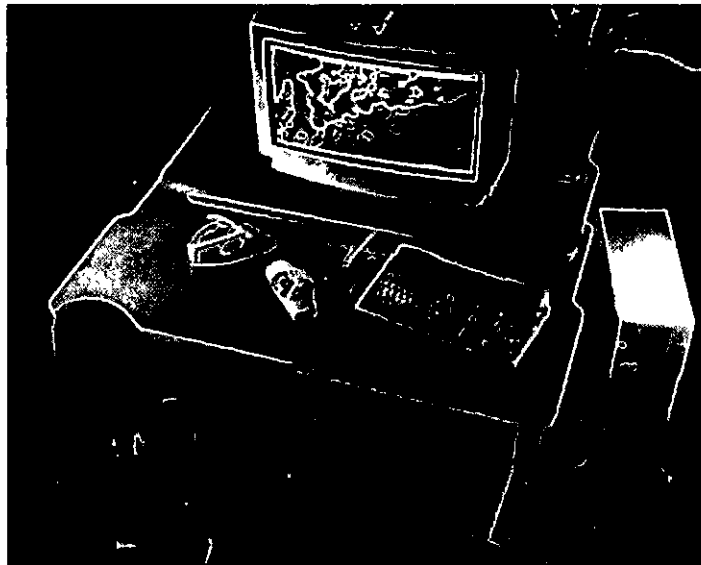
1.3 Flujo de trabajo de las estaciones fotogramétricas digitales



1.4 Restituidores digitales

La Fotogrametría digital está siendo implantada hoy en todos los ámbitos de la Cartografía (CAD, GIS, etc.), siendo sin duda el presente y futuro inmediato de la Fotogrametría.

Los restituidores digitales no son sólo herramientas semiautomáticas de extracción de datos para la producción cartográfica. Además de sus múltiples ventajas con respecto a los restituidores tradicionales, analógicos o analíticos, ofrecen nuevas posibilidades, al permitir la integración de herramientas para la generación de modelos digitales del terreno, ortofotos, mosaicos, aerotriangulaciones automáticas, etc., de forma rápida y sencilla.





DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES
DIGITALES

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

2. Sistemas de adquisición de imágenes digitales

2.1 Clasificación de sensores

Los sensores remotos son la técnica utilizada para recolectar información a distancia de objetos de la superficie terrestre. Por convención, el término “a distancia” es considerado como una longitud relativa a lo que una persona puede tener a su alcance y tocar, puede ser desde unos cuantos metros hasta cientos de kilómetros.

Actualmente, muchos de los mapeos de recursos naturales se realizan utilizando los sensores remotos. La fotografía aérea ha sido utilizada para producir todos los mapas topográficos y muchos de los mapas forestales, geológicos, de uso del suelo y edafológicos del país.

Así también los datos de radar y digitales son tan buenos como las fotografías de satélite utilizadas para éste tipo de mapas. Las técnicas de sensores remotos son utilizadas para coleccionar datos de las características de un terreno para reproducir los contornos de elevación en mapas topográficos. Datos de sensores remotos basados en la radiación gamma y magnetismo son utilizados rutinariamente para exploración geológica y mapeo.

Breve reseña histórica

El desarrollo de sensores remotos comenzó con la fotografía aérea con fines militares desde 1860 en Estados Unidos y Alemania principalmente. Fue durante los periodos de guerras donde la fotografía aérea, fotointerpretación y fotogrametría se desarrollaron con rapidez. Para la década de 1920 los métodos de fotogrametría eran utilizados para la generación de mapas topográficos y de recursos naturales. La fotointerpretación para arqueología, ecología, ciencias forestales, geología, ingeniería y otras aplicaciones comenzó a utilizarse por parte de agencias de gobierno en sus operaciones de mapeo.

La película infrarroja fue desarrollada durante la 2ª Guerra Mundial para identificar equipo militar camuflado. Esta película era sensible a las longitudes de onda correspondientes al verde, rojo e infrarrojo cercano. Esto produjo una imagen muy útil con colores no naturales o falso color (esta es la razón de que se le conozca como película infrarroja o de falso color). El ojo humano no es sensible a las longitudes de onda cercanas al infrarrojo, es por esto que en una fotografía, la vegetación y la pintura verde parecen ser del mismo color. Sin embargo, en las fotografías de color infrarrojo, la vegetación verde aparece en colores rojizos y los objetivos pintados en verde aparecen en tonos azules.

No fue sino hasta después de 1970 que los sensores remotos comenzaron a ser utilizados con fines no militares, el primer satélite que recolectó información acerca de los recursos de la tierra fue el Earth Resources Technology Satellite (ERS-1), más tarde renombrado Landsat, lanzado por los Estados Unidos en 1972. La serie de satélite Landsat se extiende hasta nuestros días con la operación de Landsat-7. Otros países ingresaron al mercado de imágenes espaciales a partir del éxito del programa americano. En 1986, Francia pone en órbita el primer satélite SPOT hoy en día opera el SPOT-5. La India lanza el IRS-1 en 1988 y actualmente tiene en operación el IRS-1D. Rusia pone en órbita el RESURS-01 en 1985 y en 1994 lanzó el tercero de la serie.

La tendencia en el desarrollo de los sensores remotos se ha diversificado en varias direcciones, la primera ha sido la de producir imágenes de baja resolución espacial pero con una frecuencia muy alta de visita sobre el mismo sitio, ejemplo de este tipo de sistemas lo son el Advance Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y el Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS).

Otra tendencia ha sido la de producir imágenes con un alto número de bandas espectrales o sensores hiperespectrales, alcanzando hasta 220 bandas (en comparación con las 7 bandas que ofrece el programa Landsat), como ejemplo operacional de éstos satélites tenemos a Hyperion un sensor que forma parte del programa Earth Observation System de la NASA. La tercera tendencia en los sensores remotos ha sido la de producir imágenes con muy alta resolución espacial (píxeles de 1 metro o menores), en comparación con la resolución que ofrece Landsat (30 m) o SPOT (20 m). Ejemplos de estos sistemas son Ikonos de la compañía Space Imaging y QuickBird de la compañía DigitalGlobe. Ambos sistemas producen imágenes multiespectrales y pancromáticas con resoluciones muy finas.

La última tendencia en el desarrollo de los sensores remotos es la de los satélites de radar, los cuales producen imágenes de la superficie terrestre en longitud de onda que varía de centímetros a metros (en comparación con los sistemas previamente mencionados que operan en el rango de los micrómetros).

Además, los sistemas de radar son del tipo activo, es decir producen su propia fuente de iluminación, a diferencia de los sistemas pasivos que requieren de la iluminación del sol para operar. Una gran ventaja de los sistemas de radar es que las nubes no representan un obstáculo para la observación de la tierra. Ejemplos de los sistemas de radar son el satélite Canadiense RadarSat el satélite de la Unión Europea (ERS) y del Japón (JERS).

El rápido desarrollo de la tecnología en sensores remotos ha provisto la capacidad de generar datos en un rango de lejanía muy grande que ha podido ser analizado y estudiado. De hecho, el desarrollo de sensores, captación de datos y capacidad de almacenamiento de los mismos ha procedido mucho más rápido que sus aplicaciones prácticas.

Los sensores de tipo `solid_state`, se fundamentan en la captación de imágenes por la conversión de los fotones en cargas eléctricas. El sensor está compuesto por un conjunto de elementos fotosensibles para su posterior medición, registro y almacenamiento.

Para explicar el funcionamiento de un sensor `solid_state` se ha realizado una comparación muy ilustrativa empleada (Shotis y Beyer) que es asemejarlo a un conjunto de cubos que captan los fotones de la luz. Cada cubo en la matriz se corresponde con un elemento fotosensible denominado elemento del sensor. Los cubos "cargados" de fotones de luz se transportan en una serie de cintas hasta una cinta transversal que ejerce el registro y en el que se miden los fotones captados.

Los sensores de captura de imágenes digitales están formados por un sustrato semiconductor que puede almacenar y transmitir carga eléctrica. El sustrato del semiconductor es silicio al que se han añadido una serie de impurezas con una capa superior de 0.1 μm de espesor de dióxido de silicio que actúa como aislante.

Los sensores electroópticos combinan una parte óptica, similar a los sistemas fotográficos, con un sistema de detección electrónica, con la gran ventaja de que evita la dependencia de un formato analógico para la transmisión a distancia de las imágenes. Un sensor se compone básicamente de un sistema óptico, que focaliza los rayos electromagnéticos hacia el elemento fotosensible, una matriz de elementos sensibles y opcionalmente puede disponer de un sistema mecánico de barrido.

Otra clasificación de los sensores electroópticos (Pinson, 1986) sería en detectores cuánticos y detectores térmicos. Dentro de los primeros hace otra subclasificación, los fotoemisores y los fotoconductores.

Los fotoemisores se basan en el efecto fotoeléctrico externo y son los utilizados en los fotomultiplicadores y en cámaras de tv, los fotoconductores se basa en el efecto fotoeléctrico interno y se utilizan en los sensores tipo solid_state.

Los sensores electroópticos más empleados son la cámara CCD y los escáneres.

2.2 Parámetros de resolución de un sensor

Geometría y propiedades de los sensores.

a) Geometría y planeidad del sensor

Aspectos clave que no suelen ser tenidas en cuenta fuera del ámbito fotogramétrico.

La precisión geométrica es muy elevada y se deriva del proceso fotolitográfico empleado en la construcción del sensor con precisiones del orden de 1/60 a 1/100 para sensores de 8 x 8 mm, con precisiones de alineamiento de 0.1 μm .

La planeidad es un factor que no se ha considerado como consecuencia de la escasa resolución de los sensores.

Ej. Cámara Thompson CSF con una distancia focal de 14 mm y un sensor con diagonal de 27.5 mm y resolución de 1024 x 1024 (tamaño de pixel de 19 μm). Presenta un valor de planeidad de 10 μm dando lugar a los ángulos de incidencia de 45°.

Los valores actuales son del orden de 0.5 μm con máximos de 1 μm .

b) Color

Los sensores solid-state son acromáticos registrando una amalgación en el visible.

Métodos para la obtención de imágenes en color:

1. Captura de tres imágenes incorporando filtros.

No es posible en movimiento.

Problemas de desplazamientos entre canales.

2. Incorporación de los filtros en los sensores.

El ojo es más sensible a la intensidad (mayor % de rojo y verde que de azul).

Sólo se requiere una matriz CCD y una sola pasada (captura en movimiento).

Se reduce la resolución del sensor.

Imagen pancromática mediante la media ponderada.



c) Señales falsas (spurious signals)

Efectos sistemáticos producidos por defectos de los sensores o por problemas de la tecnología de los CCD.

Degradan la calidad de la imagen y se detectan mediante la calibración radiométrica del sensor.

1. Corriente de oscuridad (Dark Current):

Los sensores se llenan con carga aunque no reciban luz alcanzando la capacidad total en el tiempo de almacenamiento. Esta carga no puede ser diferenciada de la producida por la luz.

Para reducir la corriente de oscuridad se debe reducir la temperatura de trabajo (una reducción de 5-10°C reduce el ruido a la mitad) y reducir el tiempo de exposición.

2. Desbordamiento (Blooming)

Es la sobrecarga de los elementos del sensor que cuya carga afectan unos a otros.

Se asocia a las fuentes de iluminación de gran intensidad (targets).

Se soluciona mediante los canales anti-blooming (actualmente se admite 10 000 veces).

3. Smear

Es un fenómeno que produce una fuente de luz intensa en la dirección de las columnas.

Relación entre el cambio en el brillo de la imagen sobre o bajo un área brillante que cubra un 10% del tamaño del sensor en la dirección de las columnas.

4. Traps

Defectos que producen un defecto local de transferencia de carga.

Para solucionar este problema se puede mantener siempre un cierto nivel de carga (fat zero) aunque tiene el problema de la reducción del rango dinámico.

Se pone de manifiesto como líneas oscuras de corta longitud que tienden a alargarse en las imágenes uniformes (flat field images).

En temperatura ambiental, prácticamente se anula por efecto de la corriente de oscuridad.

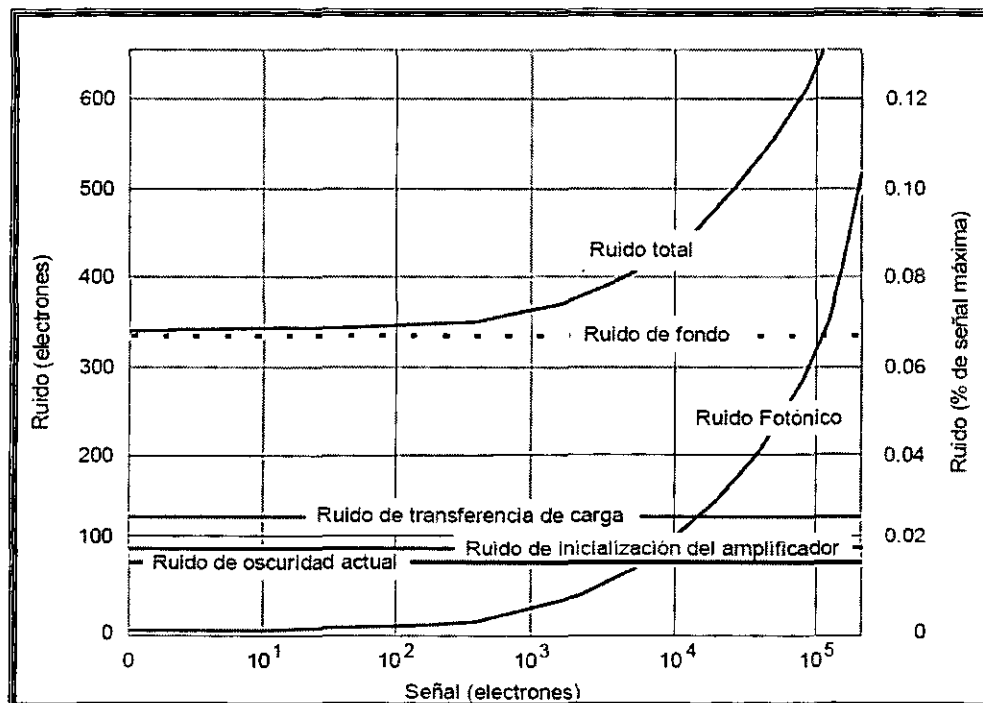
5. Blemishes

Son defectos del material que compone el sensor (problemas cristalográficos o de fabricación).

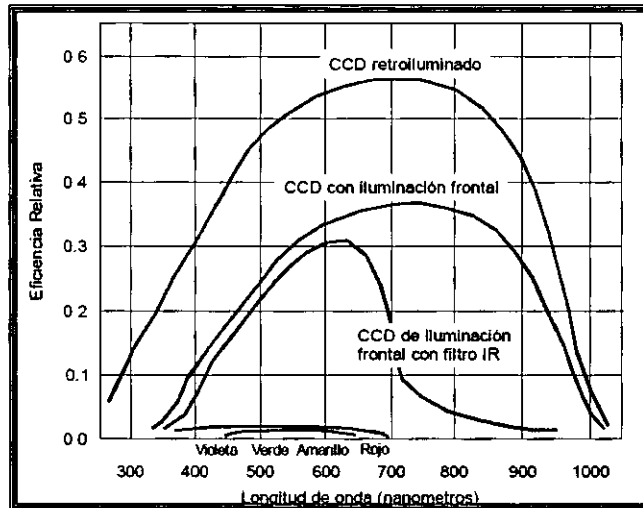
Son de tipo puntual, lineal o areal y constituyen un criterio para la clasificación de la calidad del sensor.

d) Fuentes de ruido.

1. Ruido fotónico.
Se produce durante la integración de la carga y su transferencia.
Es igual a la raíz cuadrada de la señal.
2. Ruido de corriente de oscuridad.
Asociado a la generación de imágenes de baja intensidad.
3. Ruido del circuito
Asociado a cualquier circuito electrónico (fundamentalmente al proceso de amplificación de la señal)
Está relacionado con la velocidad de lectura siendo casi nulo en cámaras de lectura lenta.
4. Ruido de inicialización (reset noise).
Es el ruido asociado con la inicialización de la carga tras la lectura.
5. Otros ruidos: ruido de transferencia de carga (charge transfer noise), ruido de cero gordo (fat zero noise).



e) Respuesta espectral.



f) Linealidad

La respuesta del sensor debe ser lineal a la entrada, respuesta que no se mantiene en los circuitos electrónicos.

$s = k q' + d$	s: señal de salida
	k: constante de proporcionalidad
	q: carga generada
	d: señal de corriente de oscuridad

Los errores suelen ser inferiores al 3% (e incluso al 2% para sensores científicos).

g) Relación señal/ruido.

Cociente entre el nivel de la señal y el ruido de una determinada captura se expresa en dB.

$$SNR_{dB} = 20 \log (s / \sigma_s)$$

Valores en torno a 50-60 dB para los sensores científicos.

h) Rango dinámico

Relación entre un pico de la señal y el nivel de ruido más bajo de ruido del sistema o como la relación en intensidad de luz, entre los puntos más altos y bajos cuando SNR=1.

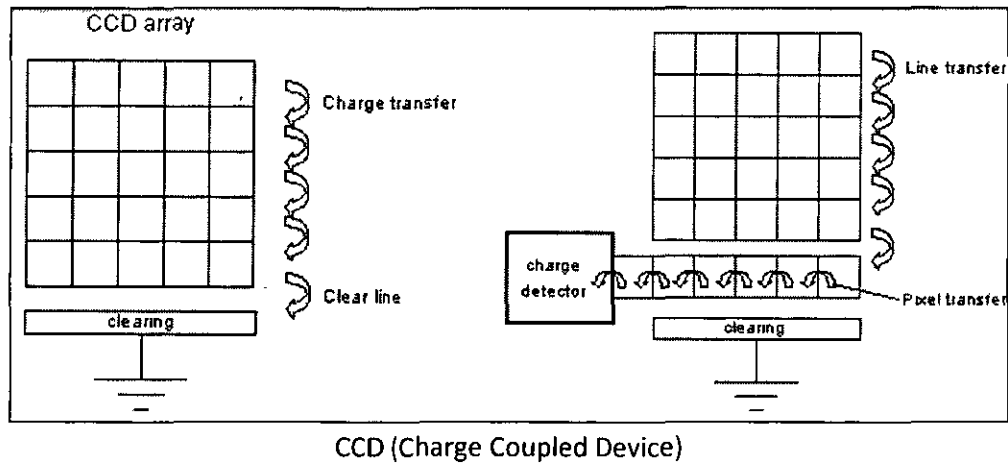
Los valores de rango dinámico oscilan entre 10^4 y 10^5 (60-100 dB).

i) Función de la transferencia de modulación.

j) No uniformidad

2.3 Cámaras CCD

La cámara CCD (Charge Coupled Device) es un dispositivo compuesto por sensores de imagen que utilizan elementos semiconductores fotosensibles en forma de arreglos matriciales. Los receptores activos de este arreglo son distribuidos en pixeles individuales.



En un sensor CCD se transforma la energía de la luz incidente en energía eléctrica. La carga eléctrica almacenada en la celda es posteriormente transportada utilizando un registro de desplazamiento (shift register) para conformar una señal de video como puede verse en la figura anterior. Cabe señalar que en las cámaras CCD se discretiza la imagen en píxeles, sin embargo el valor de la carga eléctrica almacenado en cada celda no se digitaliza en el arreglo CCD si no en una conversión posterior realizada por un conversor análogo-digital.

Las cámaras CCD son consideradas como dispositivos que poseen una muy baja deformación geométrica de la imagen, una muy buena sensibilidad a la luz y una muy buena resolución llegando típicamente a los 400.000 píxeles. El tiempo de captura de la imagen está típicamente en el rango de $1/60$ seg. Y $1/10000$ seg.

Existen dos tipos de sensores de imagen (CCD y CMOS), ambos son de silicio y son similares en cuanto a la sensibilidad al espectro visible. Ambas tecnologías convierten la luz incidente (fotones) en carga electrónica (electrones) por el mismo proceso de foto-conversión.

La tecnología CCD tiene casi 25 años y usa un especializado proceso de gran escala de integración VLSI por sus siglas en inglés (Very Large Scale Integration), que es una condensada malla de electrodos de polisilicio que se forma en la superficie del sensor. Técnicamente es factible pero sería muy caro integrar todos los circuitos de control de la cámara. Así que se necesitan varios chips para realizar una cámara con CCD.

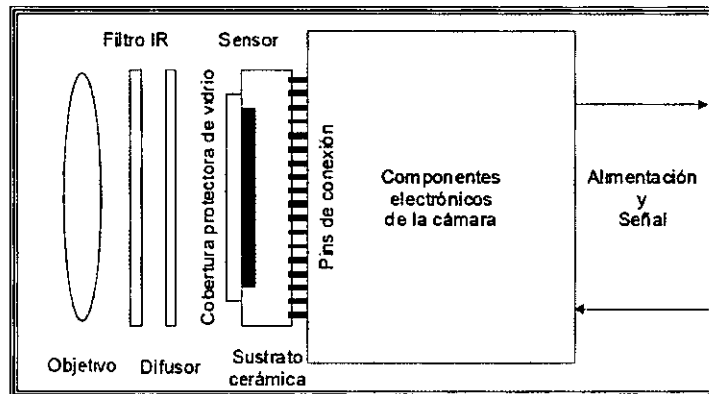
Los sensores CCD son de bajo ruido, proporcionando una excelente calidad de imagen, pero necesitan voltajes de alimentación altos y el consumo de corriente es alto.

Los sensores CCD son los más populares para las cámaras fotográficas digitales, y se asocian generalmente imágenes de mayor calidad. Un CCD convierte simplemente la luz entrante en cargas eléctricas y las envía a otra parte de la cámara fotográfica en donde se procesaran. Esto reduce al mínimo el ruido y la calidad de la imagen aumenta.

Los sensores CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), por otra parte, realizan más tareas. Pueden ser programados par convertir las cargas eléctricas a datos digitales, para detectar bordes y para realizar el procesado de la imagen. Esto permite que la cámara sea mucho mas pequeña, funciona con menos energía y crea menos ruido termal. Son también mucho más baratos de producir. Sin embargo, todas estas funciones adicionales tienden a crear mas ruido de lo usual (y baja la calidad de la imagen) debido a las resistencias e interferencia. Por esta razón, los sensores CCD dominan el mercado, mientras que el sensor CMOS sigue siendo una buena opción para las cámaras fotográficas menos costosas. Sin embargo, los avances recientes han empujado la tecnología del CMOS para producir menos ruido mientras que todavía se aprovechan de las otras ventajas de la tecnología.

Aspectos relativos al diseño de cámaras CCD.

- Grandes diferencias de diseño con respecto a las cámaras convencionales.
- Menor tamaño del área sensible e incorpora un tratamiento para instrumentos y controles electrónicos.
- Peor calidad general (mayor importancia a la calidad radiométrica que a la geométrica).



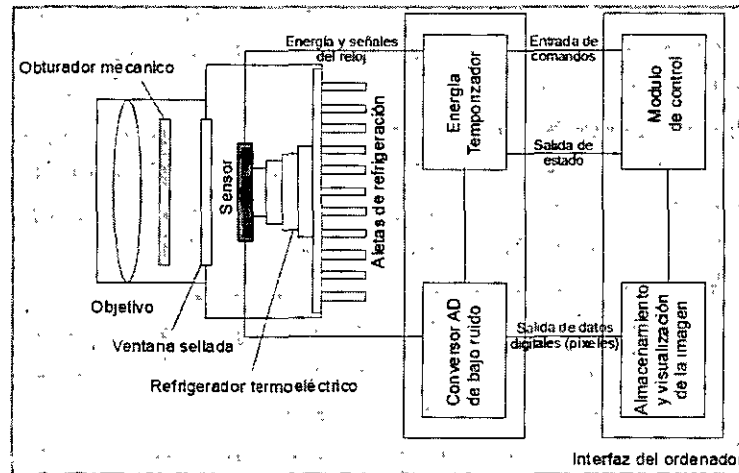
Cámaras de video estándar.

- Sistema muy económico de almacenamiento de imágenes.
- Son cámaras de tipo solid-state que utilizan un sensor CCD para la captura de imágenes y se almacenan como señal de video estándar.
- Formato 4:3 (sensores de 2/3", 1/2" o 1/3").
- Baja resolución (700 x 500 píxeles) con tamaño de píxeles mínimos de 5 μm .
- No se puede utilizar tamaños menores debido a la pérdida de rango dinámico.

- Cámaras HDTV: Sensores de 1" (1920 x 1024 píxeles) formato 16:9.

Cámaras de alta resolución.

- Formato cuadrado con resolución hasta 5K X 5K. Matrices de sensores.
- Frecuencia de barrido muy baja para eliminar ruidos (tiempo captura de varios minutos)
- Suelen incorporar un sistema de refrigeración (-60 a 120°C).
- Aplicaciones: Astronomía, metrología industrial, Inspección R-X,.....



Cámaras digitales de imagen fija (still video Cameras)

- Son las cámaras más empleadas con resoluciones cada día mayores (6 Mpix).
- Aspectos fundamentales: calidad de la óptica y tamaño del sensor.
- Escasa calidad geométrica en comparación con la calidad radiométrica.
- Sistemas móviles con almacenamiento independiente.

2.4 Escáneres

El sistema más empleado para la captación de imágenes digitales en fotogrametría digital es la digitalización de las imágenes obtenidas mediante una cámara analógica convencional ya que se requiere que el intervalo de digitalización (tamaño del pixel) sea igual a la resolución de la fotografía, con objeto de evitar pérdidas de información y que además se conserve la precisión.

La configuración de un escáner depende del tipo de fotodetector utilizado. Los tipos de fotodetectores empleados son fotomultiplicador y CCD (Charge Couple Devices). Los primeros solo pueden utilizarse como elemento simple (lineal) mientras que los CCD se agrupan formando matrices lineales o rectangulares.

Los escáneres de tambor (drum scanners) se basan en el principio de los fotomultiplicadores, son utilizados en artes gráficas. La película se monta sobre el tambor giratorio, el fotomultiplicador está montado fuera del tambor y la imagen es barrida punto a punto siguiendo una línea. Cuando se utilizan diapositivas la imagen es barrida desde el interior del tambor con una iluminación

directa tipo láser, de un gran margen de rango dinámico (D). Estos escáneres ofrecen un nivel extraordinariamente alto de trabajo en cuanto a la resolución y rango dinámico de densidad. En cambio, presentan la desventaja de montar la película sobre el tambor, lo cual no garantiza la estabilidad geométrica, por ello, la mayoría de los escáneres utilizados son planos.

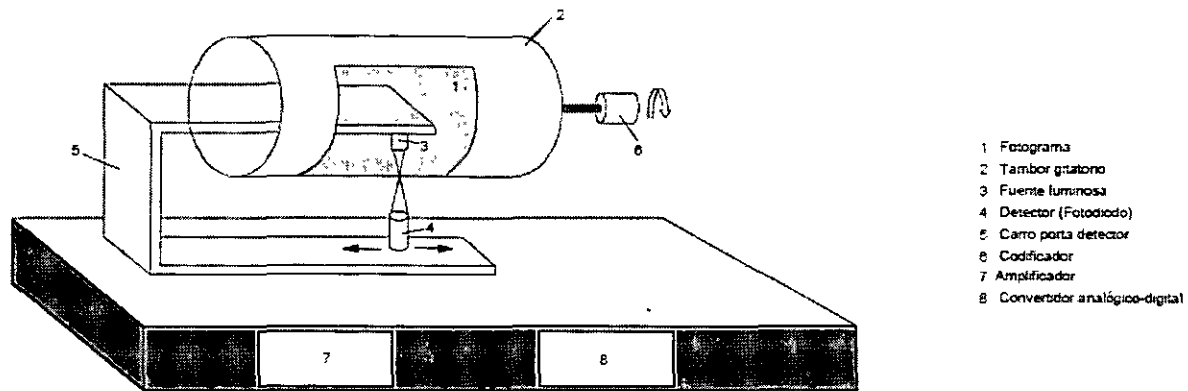


Figura 1. Escáner de tambor

En los **escáneres planos** (flat bed scanners) la película se coloca entre dos cristales asegurando el mantenimiento de la planeidad de la misma y una mejor protección. La película se coloca en una plataforma móvil movida por motores, desplazándose con respecto al sensor y la iluminación o bien sobre una plataforma fija, desplazándose en este caso el sistema de iluminación y captación. Los sensores utilizados en este tipo de escáneres planos son CCD, los cuales pueden ser lineales o matriciales.

Sistema de Iluminación, es un elemento de gran importancia, pudiéndose distinguir dos sistemas: luz directa o difusa.

En la luz directa se utiliza un condensador para ampliar más o menos la fuente de luz antes de que incida en la lente de proyección. Una ventaja de este tipo de iluminación es que es bastante económica, no obstante, una limitación a tener en cuenta de un uso tan económico de la fuente de luz es que produce una difusión de calor bastante importante, pudiéndose producir deformaciones en el original. Para reducir este efecto se utilizan frecuentemente fibras ópticas para transmitir la luz desde una lámpara lejana. La fuente de luz directa genera un haz de luz con una apertura muy pequeña, de esta manera se obtiene una gran profundidad de campo, lo cual hace que este sistema sea poco sensible a los problemas de desenfoque.

La luz difusa se obtiene utilizando placas de vidrio difusoras, utilizando una luz fluorescente, la cual tiene un efecto difusor, o bien, utilizando un canal de luz y una esfera de vidrio vacía y recubierta en su exterior por dióxido de magnesio.

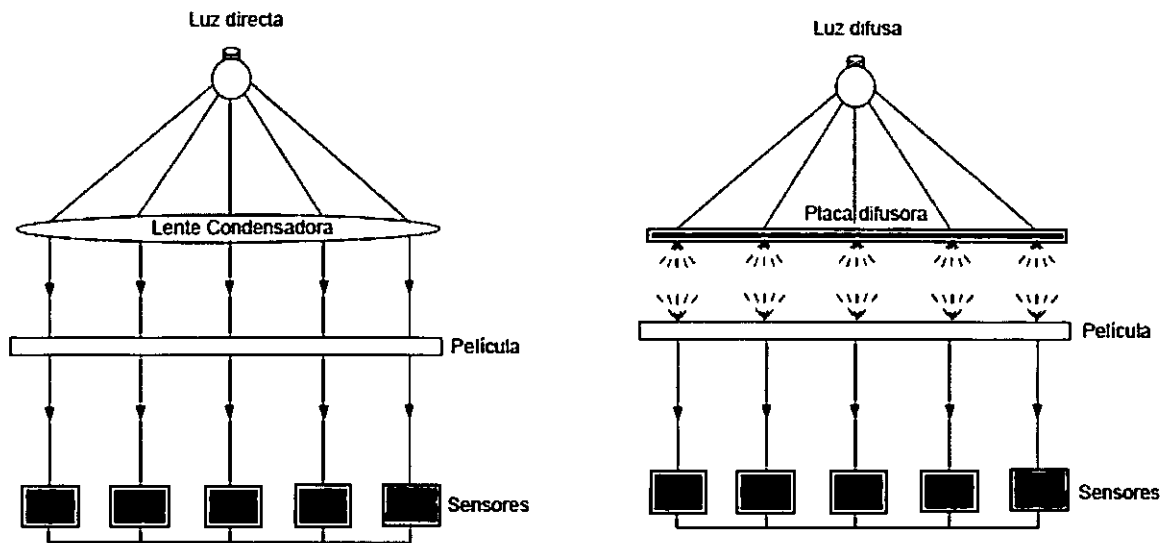


Figura 2. Sistemas de Iluminación.

Tipo de escáner

Los escáneres actualmente en el mercado responden a los siguientes tipos, según las características del trabajo y de la calidad y precisión requerida:

- Sensor simple. Barre una línea recorriéndola mediante un mecanismo de rotación.
- Sensores de banda (lineal). Barren la fotografía en bandas paralelas.
- Sensores de matriz cuadrada. Digitaliza zonas del fotograma y posteriormente las une numéricamente, para ello tiene un caneavá de cruces de coordenadas conocidas.

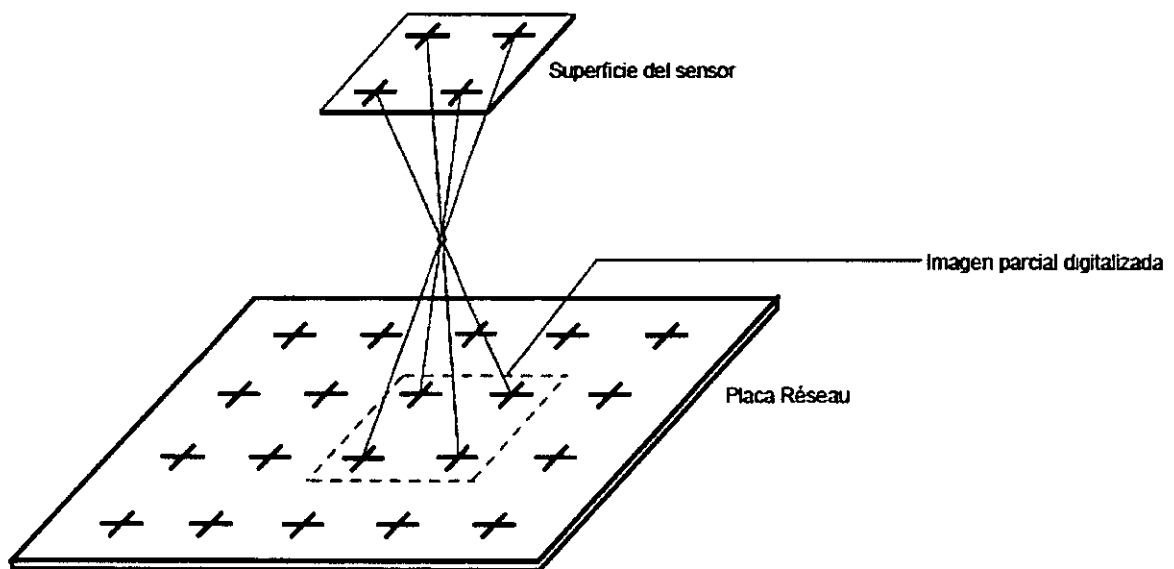


Figura 3. Principio de los sensores de matriz cuadrada.

La escaneo Fotogramétrica tiene un interés creciente con la llegada de fotogrametría digital. Al final de la década de los '80, la tecnología de escaneo que existía entonces no tenía la estabilidad suficiente para transferir la precisión geométrica de la película Fotogramétrica al formato digital. Los escáneres fotogramétricos especializados empezaron a aparecer hace unos 10 años, con la introducción del escáner plano VX3000 de Vexcel Corporation en la Conferencia-GIS en Orlando, Florida en octubre 1989 (Lebrel et al, 1990 a, b; 1992). En aquel momento no se había introducido la idea de unos escáneres electrónicos de tambor, y por lo tanto de bajo costo - esto empezó en febrero 1990 con el anuncio de un nuevo producto Optronics de escaneo. Los escáneres electrónicos de tambor de bajo costo conquistaron entonces al mercado de las artes gráficas, con grandes capacidades radiométricas pero con una precisión geométrica muy pobre. Aunque hubo varios intentos de utilizar dichos escáneres en la fotogrametría, resultó que no era factible, ni la producción ortofoto de baja precisión, ya que se informó de errores geométricos en la gama de más-menos 500 μ m, debido a la imposibilidad de mantener permanentemente en contacto con el tambor a la película, para la extensión total de la fotografía aérea.

Así se justificó el desarrollo de los escáneres fotogramétricos planos con un formato lo suficientemente grande para aceptar el tamaño de una imagen aérea a toda plana y lo suficientemente preciso para cumplir con los requisitos del flujo de trabajo fotogramétrico de alrededor de " 2 μ m. Desde 1991, varios de estos escáneres planos han aparecido en el mercado de acuerdo con la literatura (Baltsavias, 1998 y 1999). La necesidad de escáneres ha ido en aumento, a pesar de las predicciones que dicen que en último término las cámaras digitales eliminarán la necesidad de escáneres de película.

Bajo condiciones ideales, los escáneres deben ser capaces de digitalizar una fotografía aérea completa con una sola pasada y con una resolución geométrica de al menos 2000 dpi o 12,5 μ m por píxel. Sin embargo, esta capacidad no existe en este momento. Por tanto, la fotografía aérea se escanea por partes, montando una imagen grande a partir de pequeños cuadrados o pasadas, recogidos por una cabeza móvil de escaneo.

Es el tipo de sensor - bien una disposición de array lineal o cuadrada - que define el tipo de sub-imágenes. La disposición lineal produce franjas o tiras de imagen, la disposición cuadrada crea imágenes teseladas. Ambas aproximaciones al escaneo requieren una gran estabilidad geométrica para evitar desajustes geométricos entre las sub imágenes, y ambas necesitan una alta capacidad de repetición radiométrica para evitar costuras visibles al empalmar las tiras o imágenes cuadradas.

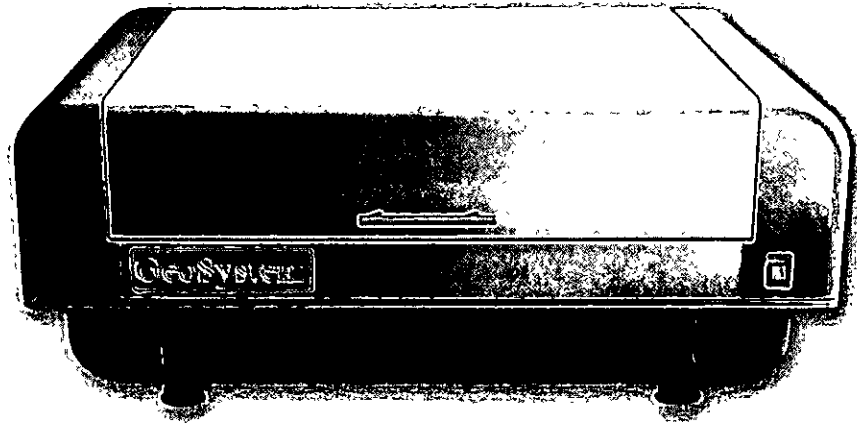
La estabilidad geométrica requiere una alta precisión geométrica para apoyar las medidas fotogramétricas y, los escáneres fotogramétricos también deben cumplir con excelentes especificaciones radiométricas. Una razón evidente es la demanda para productos de imágenes de alta calidad en la forma de ortofotomapas, que deben mostrar detalles que se pueden interpretar. Una segunda razón es la necesidad de resolver las diferencias finas en la densidad de la imagen para soportar la estereoadaptación, donde una pérdida en la textura significa una pérdida en las correspondencias correctas. En tercer lugar, a medida que se empleen las imágenes digitales para la medición de objetos, su valor se comprometería si los detalles para la medición de control del terreno no se identificasen, por ejemplo, en ambientes de alto contraste con la existencia de sombras.

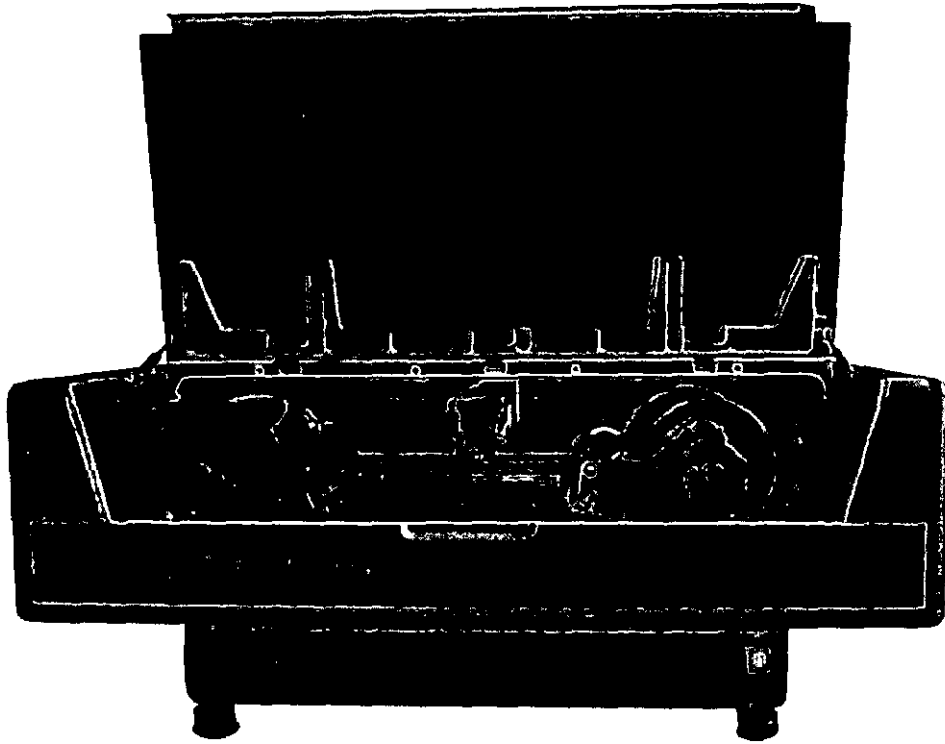
Entonces, nosotros hacemos hincapié en que un escáner fotogramétrico debe resolver completamente toda la gama de densidades de cualquier imagen que se tenga que procesar.

Hemos encontrado en el caso de material monocromo (blanco y negro, B/W) una densidad máxima de hasta 2,5 D que existe típicamente en la fotografía aérea y, en el caso de diapositivas de color, las densidades máximas pueden superar valores de 3,0 D. Estas gamas pueden ser aun mayores en la fotografía fija terrestre con buena iluminación para la fotogrametría de corta distancia.

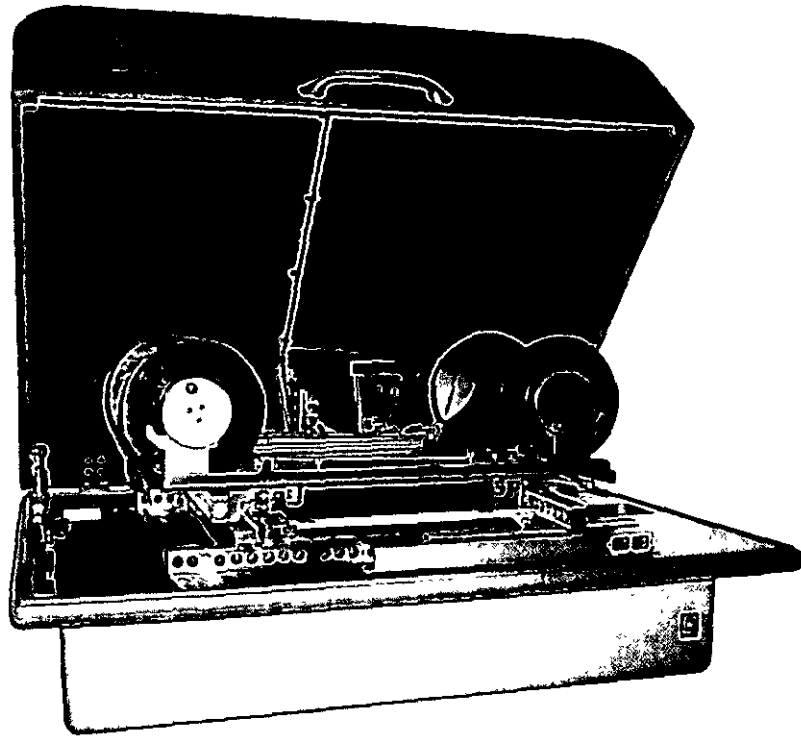
Escáner fotogramétrico a color

Existen modelos diferentes de escáneres orientados en una sola base mecánica. Todos los escáneres tienen igual resolución, parámetros geométricos y radiométricos. El primer, modelo profesional, posee un sistema automático de rebobinado de película, el segundo modelo, está equipado con un módulo de rebobinado manual. Todos los modelos permiten también escanear fotografías separadas (cortadas). Los escáneres estándar están destinados para los rollos de película con ancho hasta 250 mm, y diámetro hasta 168 mm. Estos escáneres también permiten escanear fotografías separadas de tamaño 300 por 300 mm. El modelo especial, de formato ancho, está destinado para escanear especialmente fotografías satelitales de 300 por 450 mm y películas de 300 mm de ancho.





Reembobinado Automático



Re embobinado Manual

Características técnicas

Tamaño del pixel de CCD	8 μ m
Resolución geométrica	1 μ m
Error medio cuadrático	$\pm 2\mu$ m
Densidad óptica máxima	3.4D
Diapasón de las densidades ópticas	2.7D
Resolución radiometría	12/8, por canal
Area máxima para escaneado	320x320 mm o 320x450 mm
Escaneado de los rollos de película	hasta 250 o 300 de ancho
Diámetro del rollo máximo	168 mm
CCD-sensor	a color SONY 3x5300x8
Fuente de luz	potentes diodes de luz
Escaneado de materiales no transparentes	soporta
Formatos de salida	Tiled TIFF, Tiled TIFF(JPEG), BMP a color 24bit, blanco y negro - 8bit

Tiempo típico para escaneado

Pixel Tamaño, μ m	Blanco y negro 8bit				A color 24bit			
	230x230		300x300		230x230		300x300	
	Tiempo min	Tamaño Mb	Tiempo min	Tamaño Mb	Tiempo min	Tamaño Mb	Tiempo min	Tamaño Mb
8	12	788	20	1340	30	2368	52	4024
16	6	197	12	335	15	592	25	1006
32	4	49	7	84	9	148	15	252

Parámetros geométricos

El Escáner tiene una alta resolución: 8 μ m (3175dpi);

Error medio cuadrático del escaneado no excede $\pm 2 \mu$ m. El error se determina por medio de escaneado y luego la medición de la malla de control.

El Escáner está equipado de un mecanismo para escanear películas embobinadas con ancho hasta de 250 mm (300 mm para el modelo 300x450).

Parámetros radiométricos

El Escáner está equipado con un CCD-sensor lineal SONY a color y iluminador con potentes diodos de luz, lo cual asegura una perfecta calidad de las imágenes obtenidas.

El Controlador de CCD-sensor tiene una capacidad digital interna de 12 bits en cada canal, que a través de hardware se transforman en salida en 8-bits.

El Escáner permite escanear foto materiales de color y también a blanco y negro, guardar imágenes en el formato True Color (24 bit) o con 256 gradaciones del color gris (8 bit).

El Escaneado preliminar automáticamente determina los valores óptimos de la exposición, contraste y la gama para cada canal del color.

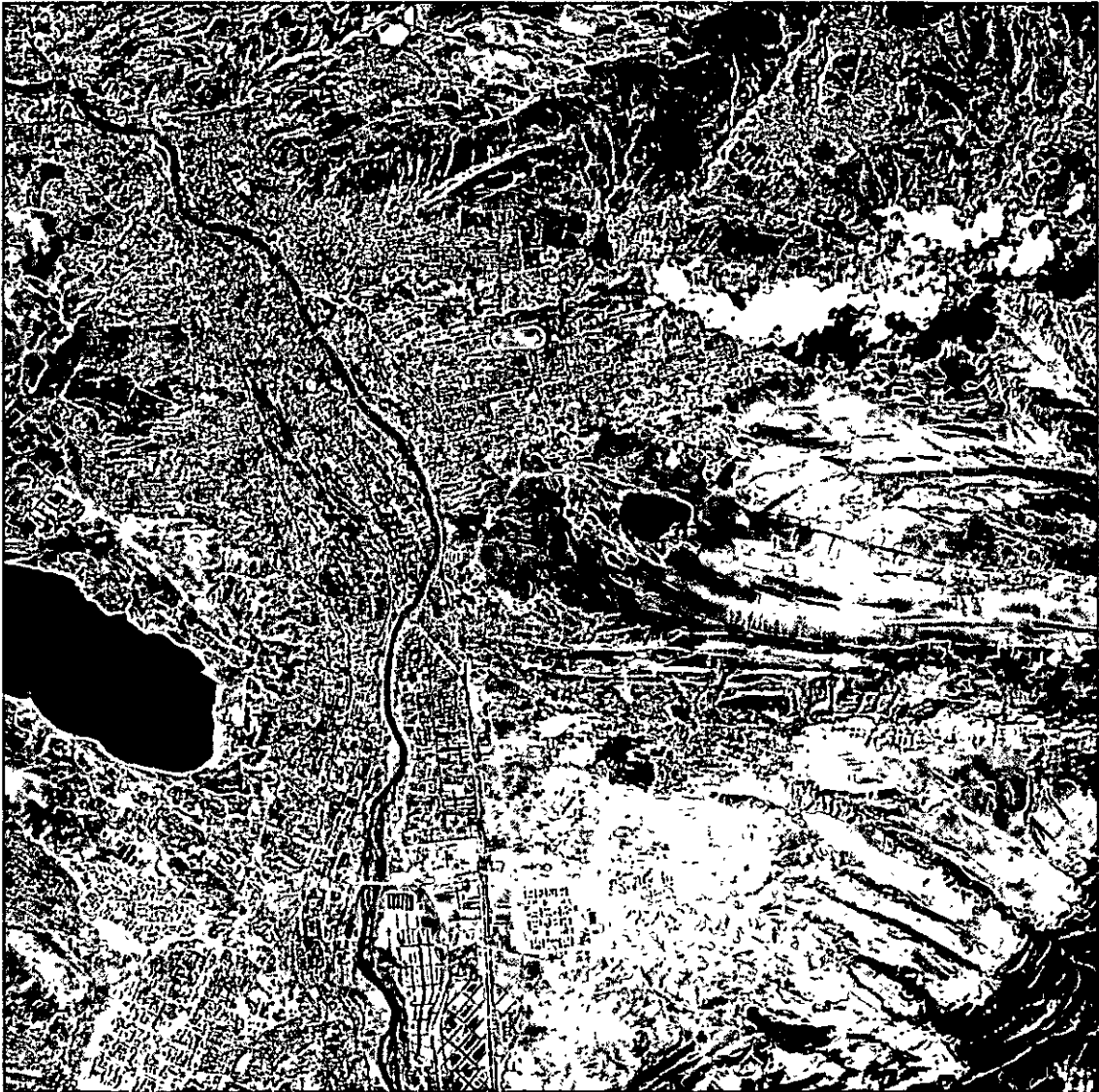
El Escáner puede escanear en dos modos: linealidad por densidad y linealidad por transmisión, que asegura resultados óptimos para las fotografías de cualquier calidad.

El tiempo de escaneado para una fotografía del tamaño 230x230 mm en modo True Color con tamaño de pixel 16 μm es de 15 minutos.

El tiempo de escaneado de las fotografías con tamaño 230x230 mm con 256 gradaciones del color gris (8 bit) es de 6 minutos.

Ejemplos de las imágenes de baja resolución: aéreo 1:5000 y satelital false color.





2.5 Sistemas de almacenamiento

La Fotogrametría Digital se basa en las medidas efectuadas sobre las imágenes digitales, imágenes obtenidas mediante la digitalización de fotografías convencionales o bien directamente mediante la utilización de sensores. Este hecho supone importantes ventajas, apoyadas en las posibilidades de automatización del proceso, pero a la vez plantea ciertos problemas, debido a la cantidad de información que es necesario manipular y almacenar. Así, por ejemplo, para el almacenamiento de una fotografía aérea de formato 23x23 cm digitalizada a una resolución de 10 μm se requiere un espacio de 473 Mb (B/N). Esta cifra se elevaría a 1.5 Gb si la fotografía se almacena en formato de color (24 bits), además es necesario tener en cuenta que en un proyecto fotogramétrico se utilizan cientos de modelos, por lo que las cantidades requeridas podrían saturar en la práctica cualquier sistema.

Por lo anteriormente expuesto, se puede indicar que la previsión del almacenamiento de la información digital es una de las principales preocupaciones a la hora de trabajar con imágenes digitales.

Entre los sistemas de almacenamientos de imágenes digitales pueden citarse:
Discos magnéticos

En estos discos, la grabación de datos se realiza al pasar la superficie del medio cerca de una cabeza que puede variar la posición del campo magnético. Los discos magnéticos son dispositivos tipo RAD (read access direct). Dentro de este tipo de sistemas se pueden distinguir básicamente dos tipos: discos duros y discos flexibles (diskettes).

La capacidad de los discos duros ha evolucionado desde los primitivos 10 MB hasta las capacidades actuales de varios Gb, con velocidades de acceso muy rápidas (80ms¹). Uno de los factores determinantes de la velocidad de acceso es la velocidad de rotación, así por ejemplo, un disco moderno tipo SCSI de 4.2 Gb con acceso de 8ms debe tener una velocidad de giro de 7000 rpm permitiendo una transferencia de datos de 10 Mb/seg².

En el caso de que se requiera una elevada capacidad de almacenamiento se pueden utilizar baterías de discos duros que se conectan mediante un sistema SCSI (Small Computer System Interface) y que poseen posibilidades RAM (Redundant Arrays of Inexpensive Disks). De esta forma se pueden alcanzar capacidades de hasta 45 Gb.

La capacidad de los discos flexibles es sensiblemente más reducida entre 1.44 Mb y 270Mb, además son considerablemente más lentos que los discos duros y menos fiables, motivos por los que son escasamente utilizados para almacenamiento de datos.

Discos ópticos

Los discos ópticos son sistemas tipo "RAD" en los que la información es leída y escrita mediante un sistema luminoso (usualmente un láser).

Dentro de este tipo se pueden distinguir distintos tipos de tecnologías, la más conocida de las cuales es la WORM (Write Once Read Many), es decir, sistemas que permiten una sola escritura y múltiples lecturas. En los sistemas WORM, un haz de rayo láser codifica la información y realiza perforaciones en la superficie del medio (hendiduras realizadas sobre la capa de material reflectante del CD) en forma espiral (CD-R). El CD tiene un diámetro estándar de 120 mm y en la actualidad constituye uno de los sistemas más populares de almacenamiento de datos, con una capacidad máxima de 650 Mb (en otros modelos hasta 705 Mb). Los discos óptico regrabables (CD-RW) funcionan de una forma similar que los sistemas magnéticos en el sentido que la información puede ser reescrita repetidas veces.

Los DVD cuyas características son parecidas a las del CD, tienen capacidades de almacenamiento previsible de hasta 17 Gb y la posibilidad de sobrecribir información. El funcionamiento de los DVD es prácticamente idéntico al del CD, las perforaciones o hendiduras (pits) que se realizan sobre la capa de material reflectante del DVD son más cortas y estrechas que en el CD, además tienen dos capas y dos caras sobre las cuales se puede almacenar información. (Fig 4).



Figura 4. Diferencias entre DVD y CD en los pits.

La ventaja principal de este tipo de discos es su robustez y fiabilidad con una velocidad de acceso aceptable (20-90 ms).

Sistemas de cinta.

Las cintas son otro tipo de almacenamiento magnético de datos que presenta la ventaja de permitir el transporte de la información. Las unidades lectoras de cinta son más económicas que los sistemas ópticos pero son considerablemente más lentas, valga como referencia el hecho de que mientras que la velocidad de acceso a un disco duro o a una unidad óptica se mide en mseg para la unidad de cintas se mide en decenas de minutos. Este es el motivo por el cual estos sistemas son utilizados como sistemas de backup, (salvaguarda de datos) y no permitiendo en la mayor parte de los casos el acceso directo a los mismos.

Almacenamiento holográfico.

En 1991, un grupo de científicos de Stanford publicó el desarrollo de un sistema de almacenamiento mediante técnicas holográficas. En este sistema los datos son convertidos en patrones de luz, las ondas de luz entran en un medio fotorrefractivo, produciendo una modificación a nivel microscópico de la carga eléctrica que afecta finalmente al índice local de refracción. Para la lectura de los datos, se emplea un sistema láser y un elemento CCD, Los resultados expuestos fueron modestos, con un almacenamiento de 163 Mb y 6.3 Mb/seg. de transferencia.

Formatos gráficos de almacenamientos de imágenes digitales.

Formato PCX.

Es el formato original de los programas Paintbrush. Puede tener hasta 24 bits de profundidad de color, aunque también hay versiones de 8 y 4 bits.

Formato BMP.

Este es el formato que utiliza Windows para su fondo de pantalla. Puede usar un máximo de 24 bits de profundidad de color. Su cabecera describe las dimensiones y los colores, y el resto del fichero contiene los bytes que definen propiamente la imagen. Acabada esta cabecera comienza la tabla de definición de colores. Estos colores se definen por medio de intensidades relativas de cada uno de los colores fundamentales (RGB), utilizando un byte para cada uno de ellos y otro que queda reservado.

Formato GIF.

GIF (Graphic Interchange Format) es el formato propuesto por CompuServe para el intercambio y transmisión de información gráfica. Tras la cabecera comienza la tabla global de colores, que es donde se almacenan los valores de los colores que se usarán en la imagen, cada uno de los cuales vendrá definido por una combinación RGB de 3 bytes. A continuación viene la descripción de la imagen, que a su vez contiene la propia descripción, una tabla de color global (opcional) y los datos propiamente dichos.

Formato TIF.

El formato TIF (Tag Image File Format) nació como una mejora de los PCX ya existentes, y se caracteriza principalmente por estar orientado al intercambio de ficheros entre diferentes entornos. Es un fichero bitmap (raster). La lectura general de un fichero TIF se puede dividir en tres partes bien diferenciadas:

- ☐ La cabecera.
- ☐ La IFD (Image File Directory).
- ☐ La imagen propiamente dicha.

Es uno de los formatos gráficos más usuales en fotogrametría debido a su carácter compacto y al mismo tiempo abierto para añadir información.

Formato TGA.

Este es el formato de los ficheros Targa de TrueVision permitiendo el almacenamiento de imágenes monocromáticas o en color de 24 o 32 bits de profundidad.

2.6 Compresión de imágenes digitales

La compresión de las imágenes digitales es una necesidad para la mayoría de las aplicaciones, en las que un número considerable de imágenes de gran tamaño deben de ser almacenadas en un espacio limitado o bien cuando éstas deben de ser transmitidas desde un sistema a otro. La idea básica de la compresión es la eliminación de la redundancia de la imagen original. Esto se realiza mediante la transformación de la imagen en una serie de coeficientes que serán posteriormente codificados.

En la actualidad los métodos más utilizados para la compresión de imágenes están basados en una transformación de coseno discreto, en la cuantización del vector y en el uso de pirámides de imágenes.

El objetivo final de la compresión es la reducción del número de bits requeridos para representar una imagen, eliminando las redundancias existentes en la misma. La tasa de compresión (o ratio de compresión) se define como la relación entre el número de bits de la imagen original dividido por el número de bits de la imagen comprimida.

En las imágenes digitales nos podemos encontrar con tres tipos básicos de redundancias:

- Redundancia espacial, debida a la correlación entre el nivel de gris de un pixel y el correspondiente de los vecinos próximos.
- Redundancia espectral, debida a la correlación entre el nivel digital correspondientes a las diferentes bandas (imágenes multiespectrales).
- Redundancia temporal, debida a la correlación entre imágenes tomadas en distintos momentos (imágenes de vídeo).

Existen varios métodos de compresión, siendo la de los formatos TIFF y el uso de ficheros JPEG los más utilizados. Actualmente ha aparecido otro tipo de formato el MrSID.

Formato TIFF.

Se basa en cambiar la definición de cada uno de los valores de la celda por una suma de valores iguales.

Ejemplo. Supongamos la siguiente matriz:

```
2 2 2 1 1
1 1 1 1 2
2 2 2 4 5
6 7 2 2 2
```

Sin compresión: 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 4, 6, 5, 3, 2, 2, 6

Con compresión: 3, 2, 6, 1, 4, 2, 1, 4, 5, 6, 7, 3, 2

El inconveniente de esta compresión es que llega a un máximo de 1/3 de tamaño original (tasa de compresión máxima 3:1). La ventaja reside en la nula pérdida de información.

Formato JPEG.

Es el formato de compresión más extendido y debido a la cada vez mayor necesidad de comprimir las imágenes puede convertirse en otro estándar, junto con el TIFF, dentro de Fotogrametría. Se basa en dividir la imagen en bloques de 8×8 (pixel) donde toman un valor mediante una transformación bidimensional discreta de cosenos (DCT) produciendo 64 coeficientes de salida. La media de los valores se registra y los otros 63 se expresan relativamente respecto al valor base.

Esto hace reducir la magnitud de los valores e incrementan el número de ceros en los coeficientes. Los datos son entonces compactados usando la codificación Huffman la cual genera códigos más cortos para símbolos más frecuentes (la descompresión es al revés).

Con este tipo de se puede llegar a una reducción de entre 10 y 15 veces (tasa de compresión 1:10, 1:15) sin causar significantes cambios en la geometría de la imagen. La compresión se regula por un parámetro Q función de la calidad de la compresión y que establece el usuario.

La compresión no afecta solo al tamaño de los ficheros, sino a los tiempos invertidos en las operaciones, no de los ficheros en la memoria del ordenador que son los mismos, sino de lectura y grabación de las fotografías.

El estándar JPEG define 3 diferentes sistemas de codificación:

1. Sistema de codificación de base de pérdida, el cual se basa en una transformación discreta de cosenos (DCT) adecuada a la mayor parte de las aplicaciones.
2. Sistema de codificación extendida para aplicaciones de mayor compresión, mayor precisión o reconstrucción progresiva.
3. Sistema de codificación independiente de pérdidas para definir la reversibilidad de la compresión.

El sistema de codificación de base de pérdidas frecuentemente llamado, sistema secuencial de base, tiene el límite de 8 bits tanto en la entrada como en la salida de los datos. La compresión se realiza en 3 pasos:

- a) Cálculo de la DCT.
- b) Medición.
- c) Asignación de variables longitud a los códigos.

Una vez dividida la imagen en bloques procesados de izquierda a derecha y de arriba abajo, se aplica la transformación bidimensional discreta de cosenos y reordenando la

matriz solución de forma que mediante un patrón zigzag se forma una secuencia unidimensional de coeficientes.

Compresión jerárquica predictiva (HPC).

Este sistema de comprensión de imágenes surge como un sistema de comprensión para imágenes de vídeo. El algoritmo comienza con la creación de una representación a escala a distintos niveles de la imagen original (pirámides de imágenes). Por ejemplo, una imagen de un tamaño de, 1024×1024 píxeles se descompone en cinco imágenes correspondientes a cinco niveles de escala: 512×512 , 256×256 , 128×128 y 64×64 . La pirámide se crea mediante la convolución de las imágenes de mayor resolución mediante la aplicación de un operador gaussiano y la aumento del tamaño del pixel al doble.

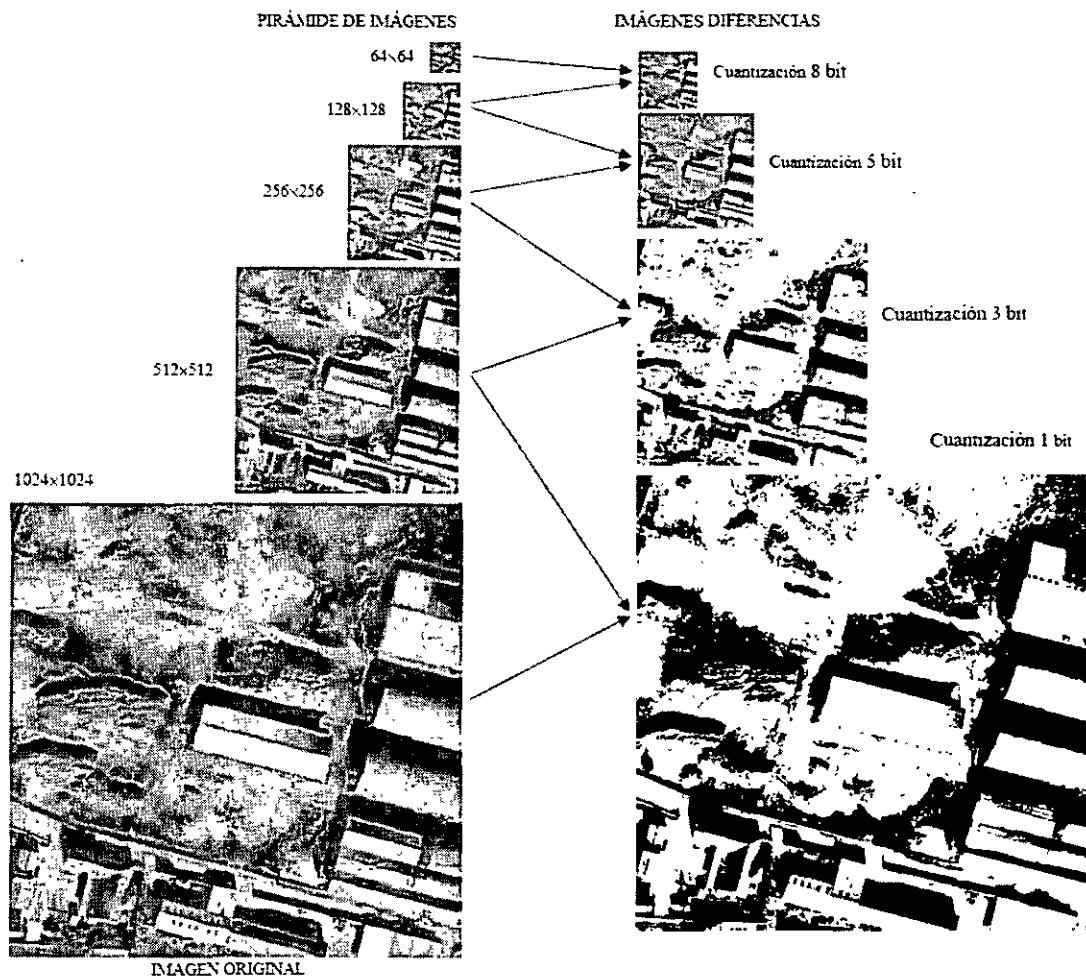
Se calculan las imágenes diferencia entre los diferentes niveles estas diferencias representan los componentes de alta frecuencia del nivel previo de la pirámide. La imagen original puede ser reconstruida a partir de su representación en el nivel de menor resolución (64×64 píxeles) y de las imágenes diferencia. Los valores de pixel de las imágenes diferencia son normalmente pequeños y pueden ser codificados y almacenados en un número reducido de bits, de forma que se alcanza una compresión sin pérdida de información, no obstante para obtener mayor tasa de compresión se utiliza la cuantización, que produce degradación de la imagen y una compresión más eficaz pero con pérdida de calidad.

El algoritmo de la HPC consta de los siguientes pasos.

- Se crea una, pirámide de imágenes mediante un operador gaussiano de tamaño 3×3 . De esta forma, por ejemplo, una imagen de tamaño 1024×1024 , da lugar a una sucesión de imágenes 512×512 , 256×256 , 128×128 y 64×64 .
- Se calculan las imágenes diferencia de todos los niveles, obteniendo en el ejemplo anterior 4 imágenes diferencia ($1024-512$), ($512-256$), ($256-128$) y ($128-64$).

La clave del método consiste en el modo de almacenamiento de las imágenes:

- Los valores de la imagen del nivel más alto (64×64) y la primera imagen diferencia (128×128) es almacenada como enteros de 8bits.
- Los valores de la imagen diferencia $256/128$ son almacenados como enteros de 5 bits.
- Los valores de la imagen diferencia de $512/256$ son almacenados como enteros de 3 bits.
- Los valores de la imagen diferencia $1024/512$ son almacenados como enteros de 1 bits.



Esquema de compresión HPC.

Mediante este sistema (HPC-8.5.3.1) se alcanza una tasa de compresión de 3.6. Para obtener tasas más elevadas las imágenes diferencia deben, ser almacenados en un número más pequeño de bits. Sin embargo, esto supone una mayor degradación de la imagen así con un esquema (8.3.3.1) se alcanza una tasa de compresión de 4.5.

Puede decirse que la compresión es más eficiente que las imágenes piramidales en cuanto a reducción de tamaño se refieren. En compresión se pueden reducir más el tamaño de las imágenes, sin embargo las imágenes piramidales tienen un potencial mayor en el análisis de las mismas y en su cálculo.

Entre las ventajas de este tipo de imágenes cabe destacar:

- Los niveles se pueden incrementar, ya que estas imágenes se forman a partir de la imagen original.
- Existen unos valores iniciales para niveles piramidales bajos que nos pueden orientar sobre los valores de las imágenes.
- La velocidad de cálculo puede ser mejorada dependiendo del nivel piramidal.
- Se pueden encontrar cálculos erróneos con valores promediados.
- La ventaja más clara es la disminución de tamaño y consiguiente velocidad.

Una ventaja adicional del sistema HPC es la posibilidad de disponer de un conjunto de imágenes a diferentes resoluciones que permite la resolución del problema fotogramétrico, partiendo de una imagen generalizada (de escaso volumen pero que refleja los elementos más relevantes de la imagen) y refinando los resultados al descender de nivel utilizando los resultados de nivel superior como valores de partida.



Imagen Original (Nivel 0) (1024x1024)

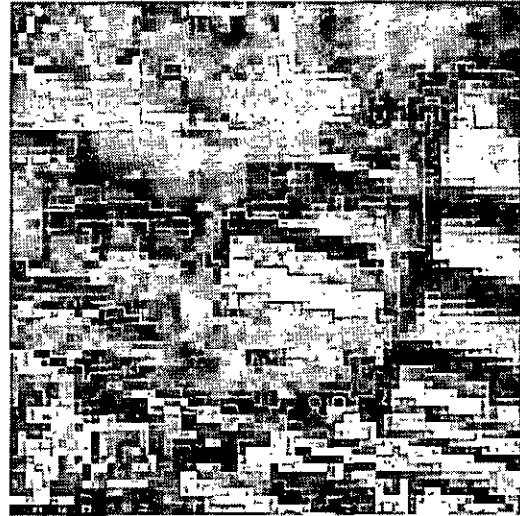


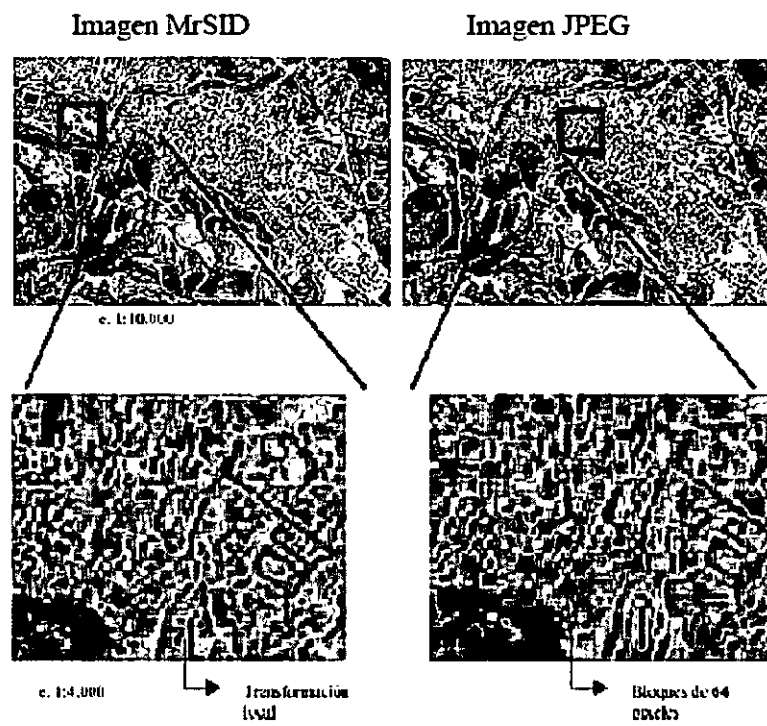
Imagen Nivel 4 (64x64). Ampliada 16 veces

Imagen original e imagen del nivel superior obtenida mediante HPC

Formato MrSID.

Este tipo de compresión se basa en la utilización de una transformación local, basándose en la transformada de wavelet discretizada, de manera que tiene una resolución uniforme y una calidad superior en toda la imagen. Otra ventaja de este tipo de formato es que lleva a cabo una transformación multiresolución. Esta característica hace que la visualización sea mucho mejor a todas las escalas de trabajo, especialmente las pequeñas y medianas así como favorece una velocidad de transmisión de datos superior. La descompresión que realiza es selectiva, es decir, únicamente descomprime la porción de la imagen visualizada, cosa que, junto con la multiresolución, permite visualizar y trabajar con imágenes de gran tamaño con gran agilidad.

Este tipo de formato mantiene una perfecta calidad de la imagen hasta tasas de compresión de 20:1 para imágenes a color (RGB) y de 12:1 para escala de grises (B/N).



Comparación MrSID y JPEG.



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
AEROTRIANGULACIÓN FOTOGRAMÉTRICA
DIGITAL

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

3. Aerotriangulación fotogramétrica digital

La Aerotriangulación digital es el proceso con mayor potencial de automatización dentro del flujo de trabajo de fotogrametría digital. Una definición de Aerotriangulación puede ser la técnica fotogramétrica que a partir de un mínimo número de puntos de apoyo o control y mediante mediciones en los fotogramas, determinara las coordenadas de los puntos de enlace y los parámetros de orientación exterior que permitirá realizar la fase de orientación exterior de cada uno de los fotogramas individuales.

Las distintas fases de que se compone la Aerotriangulación digital son:

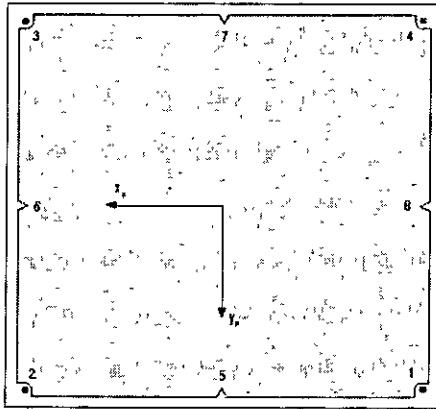
- Definición del bloque
- Medición de puntos de control semiautomáticamente
- Medición automática: Elección de puntos
- Numeración de puntos
- Transferencia de puntos
- Medición de puntos
- Cálculo y compensación

Las principales ventajas de la Aerotriangulación digital son la automatización del proceso, su rapidez de ejecución (3 a 5 minutos por foto), su robustez y redundancia por la cantidad de puntos que se utilizan, la precisión que se alcanza por medio de técnicas de identificación de imágenes (0,1 píxel) y como resumen por ser más económica que la convencional. Una vez obtenidos los parámetros de orientación interna y externa para cada imagen digital estas podrán ser visualizadas en cualquier estación digital en estereoscopia directamente o podrá ser utilizada para cualquier procedimiento fotogramétrico.

3.1 Orientación interior

Existen en una fotografía métrica aérea ocho posibilidades dentro de las zonas donde se encuentran las marcas fiduciales. Las cámaras convencionales tienen cuatro marcas fiduciales diametralmente dispuestas, aunque existen cámaras que disponen de las ocho marcas. Nuestro planteamiento se basa en la localización de estas marcas, en su medición y en el conocimiento de la focal de la cámara.

Por la disposición de las marcas fiduciales también existirá una rotación de 90° en el caso de que existiera una mala posición de la fotografía en el momento del escaneo, teniendo en cuenta que dentro de la misma pasada, las fotografías están dispuestas en la misma dirección. Por tanto existe la posibilidad de necesitar una rotación previa a la orientación interna para corregir este error.



Fotografía métrica con ocho marcas fiduciales.

Como las marcas fiduciales son objetos bidimensionales con una geometría y radiometría particular y que no difieren en rotación más de 10° . La correlación es la opción más válida para la medición de las marcas. Si tenemos en cuenta la homogeneidad tanto en la forma como en la radiometría de estas marcas, la correlación presenta en esta detección una aceptación máxima en la medición. Si a este aspecto añadimos técnicas de segmentación por binarización se consigue una correlación muy eficiente.



Aspecto de diversas marcas fiduciales dependiendo el tipo de cámara.

El proceso de cálculo tiene las siguientes etapas:

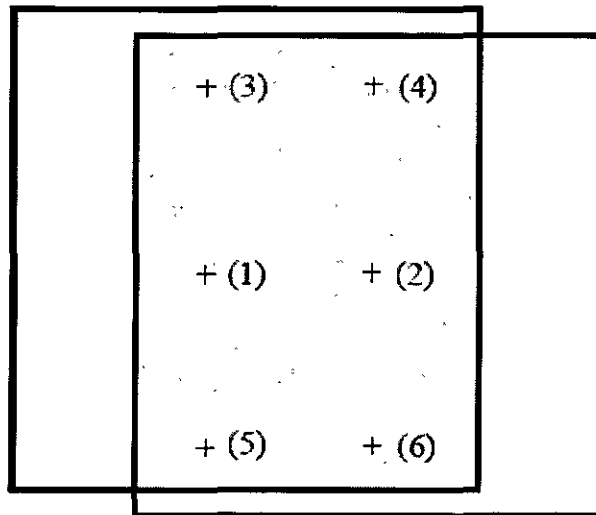
- Reconocimiento del patrón, mediante la identificación del tipo de marca fiducial que contenga la fotografía.
- Tratamiento de imágenes piramidales. El uso de imágenes piramidales, ayudará a una rápida localización de la zona en que se encuentra la marca fiducial.
- Localización robusta marcas. Esta etapa incluye el reconocimiento de positivo/negativo de la fotografía digital mediante el cálculo de la media de los niveles de grises de la imagen. El proceso de localización comprende:
 - Definición del espacio de búsqueda. Utilizando las imágenes piramidales para una localización más rápida de las marcas fiduciales
 - Binarización. Este paso comprende la segmentación de la imagen de búsqueda.
 - Correlación binaria. La correlación es en niveles de grises, las imágenes difieren en geometría por una traslación $T(u,v)$ y en radiometría por una transformación lineal en brillo y contraste. Además de funcionar sólo con imágenes binarias, también habrá que tener en cuenta la única posibilidad de

medir blanco o negro. Usando una correlación binaria para localizar una marca fiducial, el patrón se traslada por $T(u,v)$.

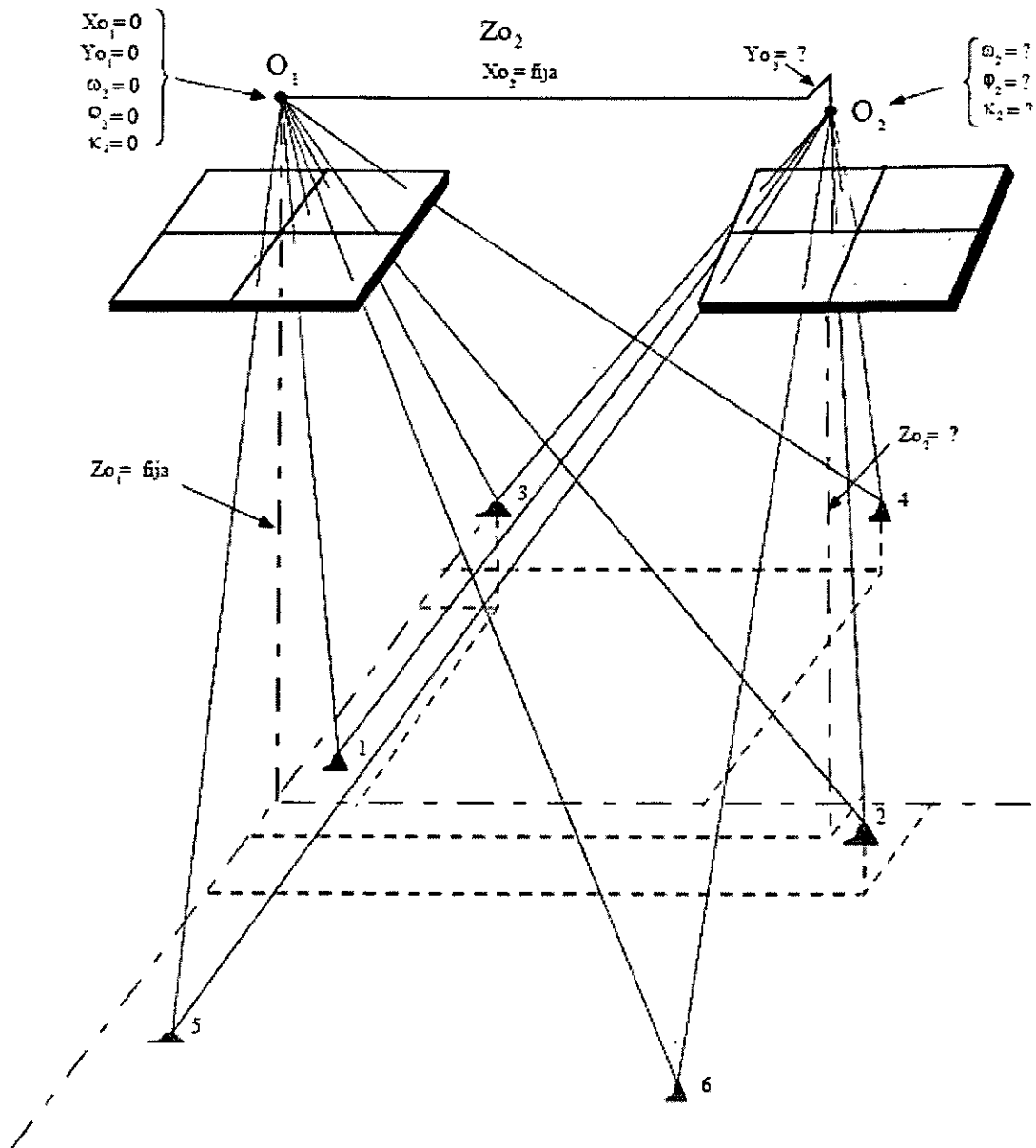
- Test de consistencia. El resultado de las localizaciones individuales en cada nivel piramidal es chequeada usando un criterio para detectar afloramientos. Se hará una búsqueda de la mejor solución que se define por una transformación tomando los errores remanentes más pequeños.
 - Autodiagnóstico. Es necesario para un sistema automático poderse autodiagnosticar. Será necesario realizar este tipo de operaciones para detectar errores ocultos o sistemáticos. Analizando la precisión y sensibilidad de las mediciones se podrán realizar métodos de autodiagnóstico.
- Estimación de los parámetros de transformación 2-D afín. Una vez realizadas las mediciones de las marcas fiduciales se realizarán los cálculos de la transformación y después se obtendrán los parámetros que permiten pasar al sistema de coordenadas imagen.
- Autodiagnóstico. Otro autodiagnóstico llevará a poder realizar comprobaciones finales de precisión y sensibilidad de los resultados.

3.2 Orientación relativa

La orientación relativa se habrá realizado correctamente si se produce la intersección de todos los rayos homólogos. El mínimo número de puntos de intersección para lograr la formación del modelo es de cinco, distribuidos según Vön Grüber.



La orientación relativa analítica consistirá, en la medida de coordenadas imagen de un número mínimo de puntos de dos tomas consecutivas y aplicación a cada uno de estos de la condición de coplaneidad (plano epipolar o nuclear) o por aplicación de la condición de colinealidad, con lo cual los dos rayos homólogos intersectan en un punto común del espacio modelo $P(X, Y, Z)$.



Condiciones de colinealidad

Para la realización de esta fase de orientación es necesario disponer de los siguientes datos:

- Los parámetros de orientación interna de la cámara.
- Las relaciones entre los sistemas de coordenadas de imagen y píxel.
- El orden de las imágenes.

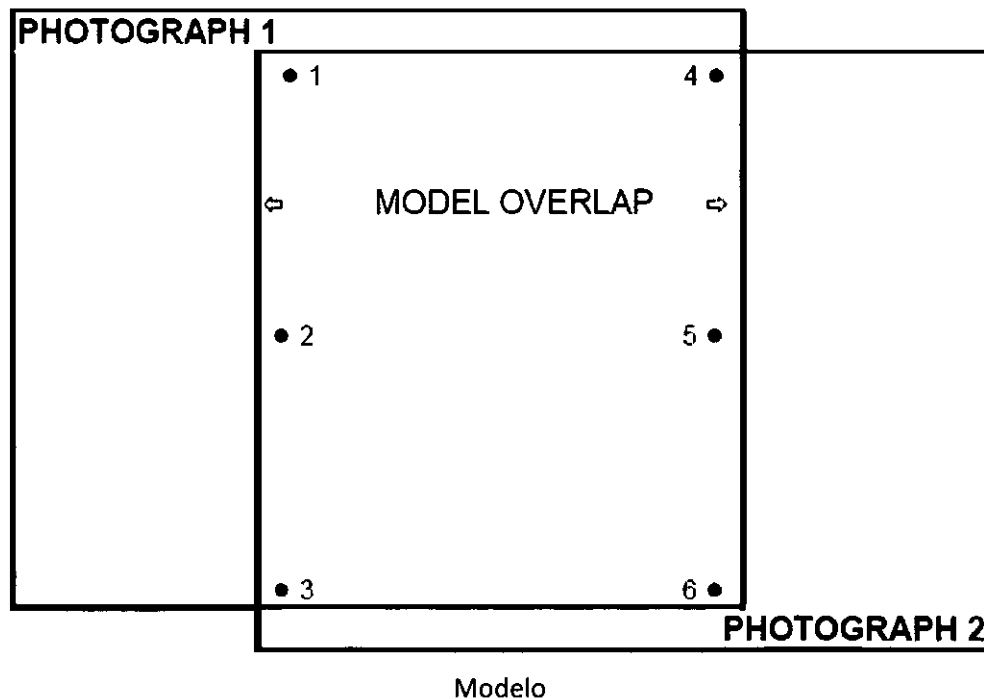
Las operaciones se inician en el nivel piramidal mayor y con el tamaño de imagen y resolución más baja. El proceso se subdivide en dos partes, la primera corre desde el nivel piramidal mayor hasta el llamado intermedio. La segunda llamada rastreador de puntos corre a través de los niveles remanentes. Al criterio para definir el nivel intermedio se llega por la óptima combinación del uso de la cantidad posible de información y del tipo de cálculo.

Durante el enfrentamiento de puntos, se determinan puntos conjugados. Para cada nivel, las características del punto son extraídas y separadas en cada imagen usando un operador de interés. Ellos son entonces enfrentados de acuerdo a un criterio de geometría y radiometría,

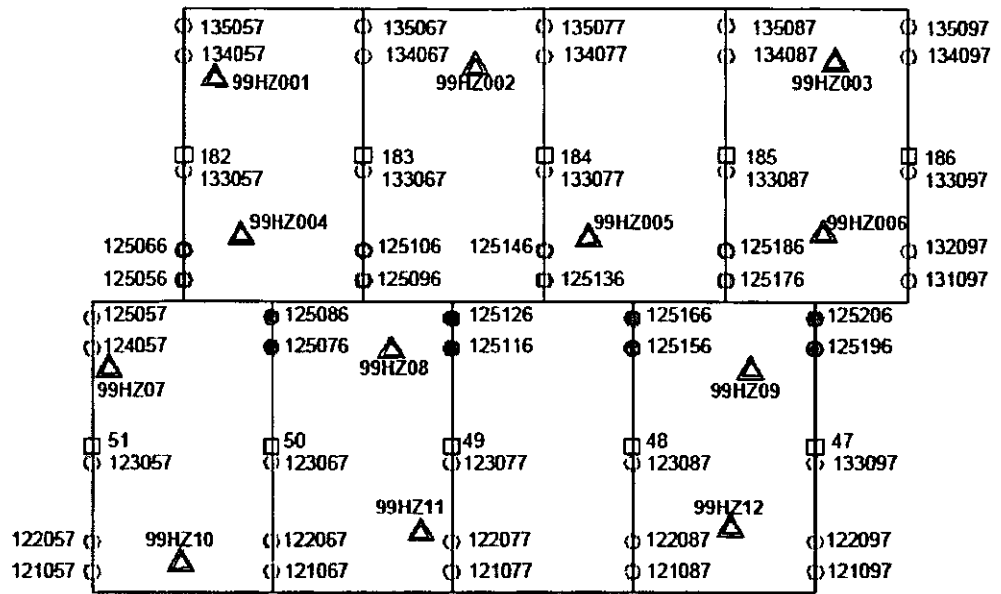
resultando una lista de candidatos a puntos conjugados. Esas parejas de puntos se introducen en un robusto procedimiento de ajuste de rayos con el que se determina tanto los parámetros de orientación relativa como las coordenadas modelo tridimensionales de los puntos conjugados. El enfrentamiento de puntos para en un nivel intermedio y allí es donde se calculan los parámetros de la relativa y de las coordenadas tridimensionales de los puntos.

El segundo paso o rastreador de puntos es una medición fina de las coordenadas de la imagen de los puntos conjugados en el nivel intermedio por mínimos cuadrados a través de los niveles piramidales. Con una ventana de búsqueda se calculan los seis parámetros afines y dos radiométricos entre las dos ventanas y por métodos iterativos. Para cada punto enfrentado, el coeficiente de correlación cruzada se calcula entre dos ventanas. Si el coeficiente es mayor que el permitido, el enfrentamiento se declara correcto. El operador de interés se usa otra vez en la ventana de referencia para encontrar un punto para transferir el siguiente nivel piramidal más bajo. Este punto es entonces transformado a la ventana de búsqueda para encontrar los parámetros y definir el punto. Esos dos puntos son marcados en el siguiente nivel y se repite el cálculo de mínimos cuadrados. Al final del enfrentamiento de puntos, los puntos conjugados correctamente enfrentados a las imágenes originales entran en un ajuste robusto para el cálculo final de los parámetros de la orientación relativa y sus coordenadas.

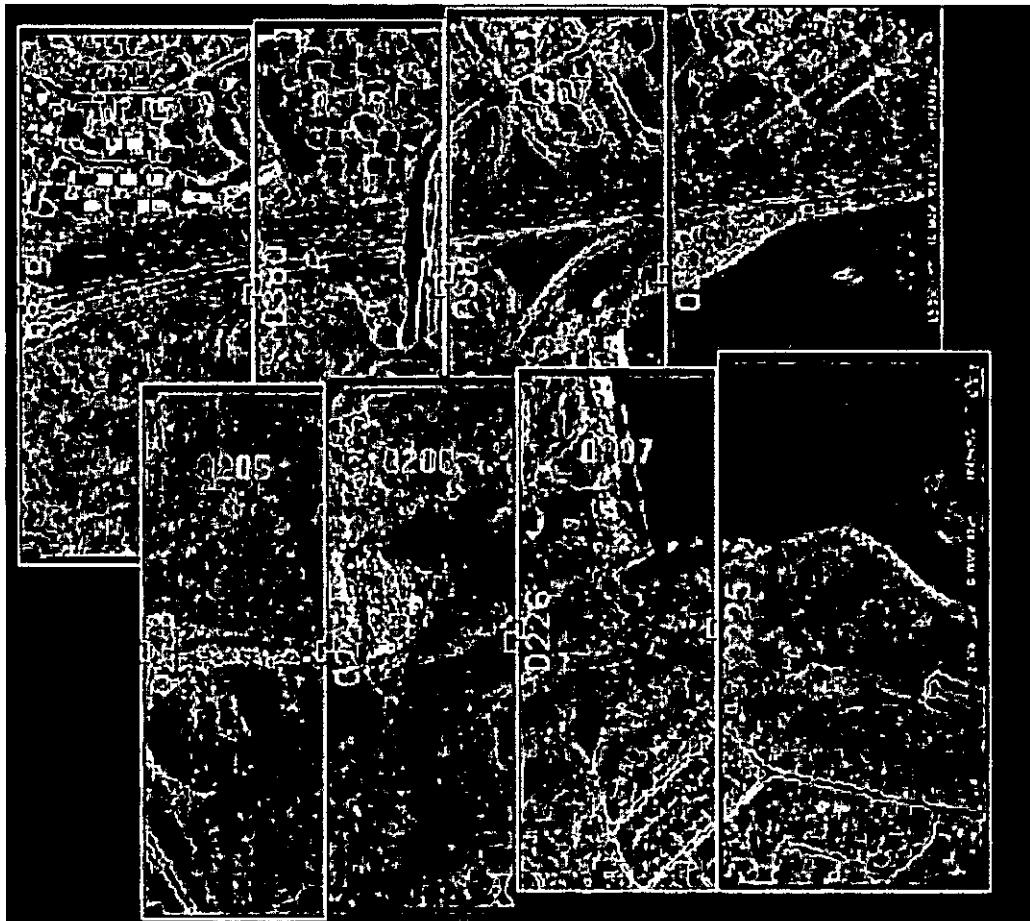
El enfrentamiento de puntos tiene la ventaja de la velocidad y de no tener pérdida de precisión. Asegura que los puntos conjugados son hechos en zonas bien definidas y en los que se puede esperar buenas características.



- ▲ PCP
- Pass Point
- Tie Point
- Photo Center



Bloque



Bloque Fotogramétrico.

3.3 Orientación absoluta

Una vez calculadas las coordenadas modelo, la siguiente operación a realizar sería la nivelación del modelo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio.

En el caso de un apoyo preseñalizado, si es posible realizar la absoluta automáticamente. El caso queda inscrito en la búsqueda de un patrón en otra imagen. En casos de urbana sería más fácil, y existe algún trabajo al efecto, definir un patrón y ayudarse del conocimiento de su posición para lograr una orientación absoluta automática.

El desarrollo del G.P.S. y su aplicación, en la determinación junto con el INS (Sistema Inercial de Navegación) en la determinación de las coordenadas de los centros de perspectiva ha llevado a mejorar y reducir la necesidad del control de campo, pero no a eliminarlo.

Sin embargo si se han desarrollado sistemas con una orientación absoluta semiautomática consistente en definir sobre una imagen al punto de apoyo y que sea el ordenador el encargado de localizar en el resto de las imágenes el mismo punto con el subsiguiente ahorro de tiempo.

Se dice que la orientación es semiautomática cuando interna y relativa son automáticas y la absoluta es semiautomática o manual. También y como es lógico existen multitud de particularidades ya que hay sistemas con procesos semiautomáticos en todas las orientaciones. Existe por último la posibilidad de confirmar la correlación en cada punto encontrado.

Hasta aquí se ha visto orientación relativa y a continuación absoluta, es decir, la orientación en clásica en dos pasos. En el caso de realizarse la orientación externa simultáneamente por medio de la condición de colinealidad, orientación en un paso, ocurren los mismos problemas que en la orientación absoluta al identificar los puntos de apoyo y al utilizar los mismos puntos para corregir paralaje, escala y giros, sino se llega a realizar automáticamente la identificación de los puntos no hemos orientado ninguna de las dos, mientras que de la forma tradicional estarían realizadas la orientación interna y la relativa a falta de la absoluta.

3.4 Ajuste de los bloques fotogramétricos

Las observaciones obtenidas en la fase instrumental (medición), conjuntamente con las coordenadas terreno de los puntos de control constituyen los datos de entrada para el cálculo y ajuste del bloque. El resultado será la relación de coordenadas ajustadas y las discrepancias obtenidas en los puntos de control y en los puntos de paso y enlace internamente.

También esta fase está condicionada por el método de Aerotriangulación que se utilice, así pueden presentarse los casos siguientes:

En el caso de Aerotriangulación por *Pasadas o Aeropoligonación*:

1. Transformación y ajuste de las pasadas.
2. Formación del bloque.
3. Ajuste del bloque.

Método secuencial: en este método, desarrollado a finales de los años cincuenta por National Council Research (*NCR*) y el British Ordnance Survey (*BOS*), las etapas fundamentales son:

- Formación de pasadas con respecto a un sistema de coordenadas rectangular arbitraria (orientación relativa)
- Transformación de las coordenadas modelo al sistema terrestre de referencia respecto del cual se conoce la posición de los puntos de control (orientación absoluta).

Suponiendo una orientación arbitraria para la primera fotografía de la pasada fotogramétrica, la primera etapa consiste esencialmente en la determinación de la orientación de cada fotografía con respecto a la precedente. Debe procederse además a un ajuste en la escala del modelo resultante al anterior mediante puntos comunes a ambos modelos. Tanto en el método desarrollado por el *NCR* como en el *BOS* la orientación relativa se obtiene por medio de la condición de coplaneidad. El resultado final es una banda continua referida al sistema de coordenadas del primer modelo.



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DIGITAL

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

4. Restitución fotogramétrica digital

Este método de producción cartográfica obedece a la noción de los llamados "planos de línea" o planos en formato vectorial. Cada elemento del terreno observado por el operador a partir de las fotografías orientadas es tipificado en una categoría dentro de un nivel o capa de información, trazado y simbolizado para la comprensión posterior por parte de los usuarios.

4.1 Conceptos fundamentales

En la Restitución Fotogramétrica, la posición de un punto en el espacio se determina mediante la intersección de dos rectas determinadas por los centros de perspectiva O' , O'' , y las imágenes homólogas p' , p'' de ese punto (Fig. 1). Es necesario, naturalmente, determinar antes las posiciones espaciales de los centros O' , O'' , y las orientaciones de ambos haces de rayos. La posición y orientación de cada haz de rayos se denomina Orientación Exterior e implica la determinación de 6 incógnitas: las 3 coordenadas del centro de perspectiva y tres giros (los ángulos, ω , γ , K , indicados en la Fig. 2, por ejemplo).

Una manera analítica de encontrar los 12 parámetros de las Orientaciones Exteriores de los dos haces de rayos sería la siguiente: Cada punto origina un par de ecuaciones de colinealidad (1), Fig. 2.

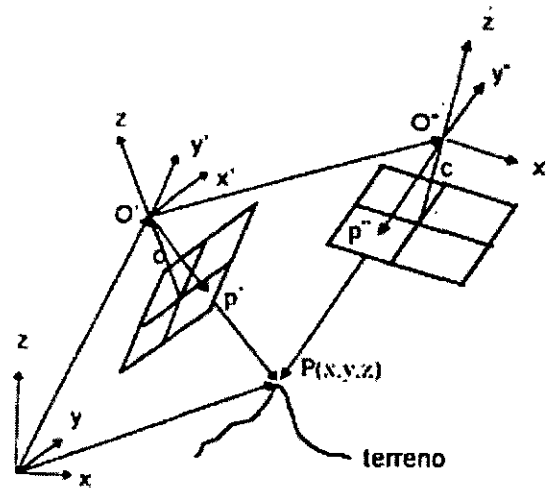


Fig. 1: Un punto queda determinado por la intersección de dos rayos homólogos

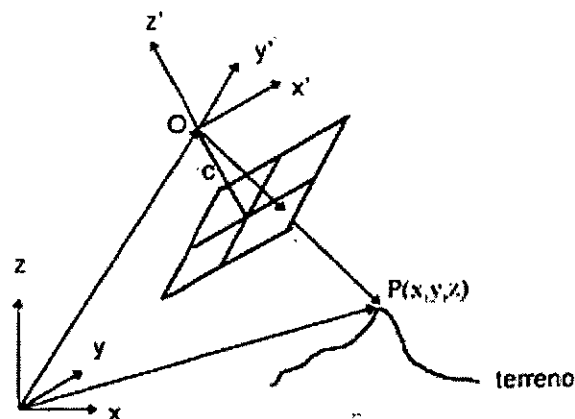


Fig. 2: Los ejes x' , y' , son paralelos a las líneas que conectan las marcas fiduciales. Los ángulos w , s , K , son los formados por x', y', z' con x , y , z con la secuencia, w primario, s secundario, K terciario; c es la distancia principal.

$$x'_{ij} = -c \frac{a_{11}(x_{ij} - x_{0i}) + a_{12}(y_{ij} - y_{0i}) + a_{13}(z_{ij} - z_{0i})}{a_{31}(x_{ij} - x_{0i}) + a_{32}(y_{ij} - y_{0i}) + a_{33}(z_{ij} - z_{0i})} \quad (1)$$

$$y'_{ij} = -c \frac{a_{21}(x_{ij} - x_{0i}) + a_{22}(y_{ij} - y_{0i}) + a_{23}(z_{ij} - z_{0i})}{a_{31}(x_{ij} - x_{0i}) + a_{32}(y_{ij} - y_{0i}) + a_{33}(z_{ij} - z_{0i})}$$

donde los coeficientes a son los elementos de una matriz ortogonal según las fórmulas que siguen:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\varphi \cos K \\ a_{12} &= -\cos\varphi \sin K \\ a_{13} &= \sin\varphi \\ a_{21} &= \cos\omega \sin K + \sin\omega \sin\varphi \cos K \\ a_{22} &= \cos\omega \cos K - \sin\omega \sin\varphi \sin K \\ a_{23} &= -\sin\omega \cos\varphi \\ a_{31} &= \sin\omega \sin K - \cos\omega \sin\varphi \cos K \\ a_{32} &= \sin\omega \cos K + \cos\omega \sin\varphi \sin K \\ a_{33} &= \cos\omega \cos\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

Los valores, x'_i, y'_i (el índice i indica, en este caso, si se trata del fotograma izquierdo o el derecho), son las coordenadas del punto j del fotograma i medidas en dicho fotograma y referidas a su punto principal; los valores $x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}, \omega_i, \varphi_i, K_i$ son los seis parámetros de la orientación exterior del fotograma i , mientras que, x_u, y_u, z_u son las coordenadas del punto en el terreno.

Si se conociese las coordenadas espaciales del terreno de al menos 3 puntos que aparezcan en ambas imágenes, con las (1) se podría formar un sistema de 6 ecuaciones, tanto para el fotograma izquierdo como para el derecho. Conocidas las Orientaciones Exteriores después de resolver ambos sistemas, la posición de cualquier otro punto se obtendría mediante la intersección de rectas determinadas por los centros de perspectiva y las imágenes p' y p'' respectivamente (fig. 1).

Un problema importante se plantea porque las (1) no son lineales. Su linealización conduce a las siguientes expresiones:

$$x'_{ij} = (x'_{ij})_0 + a_{1ij} dx_{0i} + b_{1ij} dy_{0i} + c_{1ij} dz_{0i} + d_{1ij} d\omega_i + e_{1ij} d\varphi_i + f_{1ij} d\kappa_i$$

$$y'_{ij} = (y'_{ij})_0 + a_{2ij} dx_{0i} + b_{2ij} dy_{0i} + c_{2ij} dz_{0i} + d_{2ij} d\omega_i + e_{2ij} d\varphi_i + f_{2ij} d\kappa_i$$

donde: los coeficientes a_{1ij} hasta f_{1ij} y a_{2ij} hasta f_{2ij} son las derivadas de las funciones x'_{ij} , y'_{ij} de las (1) con respecto a las variables x_{0i} , y_{0i} , z_{0i} , ω_i , φ_i , κ_i . Los valores dx_{0i} , dy_{0i} , dz_{0i} , $d\omega_i$, $d\varphi_i$, $d\kappa_i$, son correcciones a los valores aproximados adoptados para los parámetros de la orientación exterior. Por último, $(x'_{ij})_0$, $(y'_{ij})_0$, son los valores que toman las funciones x'_{ij} , y'_{ij} para los valores aproximados de las incógnitas. La solución es iterativa: con los valores aproximados x_{0i} , y_{0i} , z_{0i} , ω_i , φ_i , κ_i , se forma el sistema de ecuaciones lineales, con cuya solución se consiguen las correcciones dx_{0i} , dy_{0i} , dz_{0i} , $d\omega_i$, $d\varphi_i$, $d\kappa_i$, las cuales permiten mejorar los valores aproximados iniciales y repetir el cálculo.

Las derivadas que representan los coeficientes a hasta f son bastante extensas. Se las incluye en este trabajo con la única finalidad de poner claramente de manifiesto las tremendas dificultades con que tropezaban los fotogrametristas de comienzos de siglo, si elegían el camino analítico para resolver el problema de la Restitución Fotogramétrica. Un rápido examen de las (4) permite apreciar que el mero cálculo de los coeficientes de los sistemas de ecuaciones es ya una tarea ciclópea. Resolver sistemas de seis ecuaciones con máquinas de calcular mecánicas es también una tarea lenta y laboriosa y, por lo tanto, nada práctica. Finalmente, calcular intersecciones de rectas en el espacio tampoco es algo que pueda realizarse en poco tiempo.

Si, en lugar de partir de las ecuaciones de colinealidad, se hubiese partido de la ecuación de coplanaridad aplicada a pares de rayos homólogos, las doce incógnitas podrían haberse resuelto a través de las soluciones de la Orientación Relativa (5 incógnitas) y Absoluta (7 incógnitas). Las fórmulas, aunque distintas, resultan igualmente extensas y engorrosas.

Todas estas serias dificultades llevaron a la Fotogrametría de la primera mitad de este siglo hacia las soluciones analógicas. Algo que queda perfectamente graficado en la conocida expresión de Otto Von Gruber: Fotogrametría es el arte de evitar todo cálculo.

$$\begin{aligned}
a_{1i,j} &= -1/q \{-x'_i a_{31} - f a_{11}\} \\
b_{1i,j} &= -1/q \{-x'_i a_{32} - f a_{12}\} \\
c_{1i,j} &= -1/q \{-x'_i a_{33} - f a_{13}\} \\
d_{1i,j} &= -1/q \{x'_i [-a_{33}(y_i - y_0) + a_{32}(z_i - z_0)] + f [-a_{13}(y_i - y_0) + a_{12}(z_i - z_0)]\} \\
e_{1i,j} &= -1/q \{x'_i [\cos\varphi (x_i - x_0) + \sin\omega \sin\varphi (y_i - y_0) - \cos\omega \sin\varphi (z_i - z_0)] + \\
& f [-\sin\varphi \cos\kappa (x_i - x_0) + \sin\omega \cos\varphi \cos\kappa (y_i - y_0) - \cos\omega \cos\varphi \cos\kappa (z_i - z_0)]\} \\
f_{1i,j} &= -1/q \{f [a_{21}(x_i - x_0) + a_{22}(y_i - y_0) + a_{23}(z_i - z_0)]\} \\
a_{2i,j} &= -1/q \{-y'_i a_{31} - f a_{21}\} \\
b_{2i,j} &= -1/q \{-y'_i a_{32} - f a_{22}\} \\
c_{2i,j} &= -1/q \{-y'_i a_{33} - f a_{23}\} \\
d_{2i,j} &= -1/q \{y'_i [-a_{33}(y_i - y_0) + a_{32}(z_i - z_0)] + f [-a_{23}(y_i - y_0) + a_{22}(z_i - z_0)]\} \\
e_{2i,j} &= -1/q \{y'_i [\cos\varphi (x_i - x_0) + \sin\omega \sin\varphi (y_i - y_0) - \cos\omega \sin\varphi (z_i - z_0)] + \\
& f [\sin\varphi \sin\kappa (x_i - x_0) - \sin\omega \cos\varphi \sin\kappa (y_i - y_0) + \cos\omega \cos\varphi \sin\kappa (z_i - z_0)]\} \\
f_{2i,j} &= -1/q \{f [a_{11}(x_i - x_0) + a_{12}(y_i - y_0) + a_{13}(z_i - z_0)]\} \\
\text{donde: } q &= a_{31}(x_i - x_0) + a_{32}(y_i - y_0) + a_{33}(z_i - z_0)
\end{aligned}
\tag{4}$$

2. El Restituidor Analógico Óptico

Al resultar impracticable la solución analítica, las soluciones analógicas comienzan a aparecer y logran gran esplendor durante mucho tiempo. La figura 3 muestra un Restituidor de proyección óptica. Los fotogramas son colocados en proyectores, mediante los cuales se reproducen los haces de rayos de los instantes de toma (orientación interior). Cada proyector puede desplazarse a lo largo de tres ejes ortogonales entre sí, y girar alrededor de esos ejes (6 grados de libertad). Partiendo de una posición aproximada de ambos proyectores, la orientación relativa se realiza logrando la intersección sucesiva de determinados pares de rayos homólogos (eliminación de paralajes Y). Una vez completada la orientación relativa, todos los pares de rayos homólogos se intersectan, y se dispone de un modelo semejante al terreno del cual se desconoce su verdadera posición en el espacio (3 desplazamientos y 3 giros), y su escala. La orientación absoluta se lleva a cabo moviendo la hoja del mapa, y ambos proyectores solidariamente, hasta que el modelo coincida en determinados puntos con las verdaderas posiciones de esos puntos en el terreno (representado a una determinada escala). El mapa se dibuja siguiendo, mediante la visión estereoscópica, el rasgo cartográfico con la marca flotante. Un lápiz que se mueve solidariamente con esa marca dibuja el rasgo en la hoja del mapa.

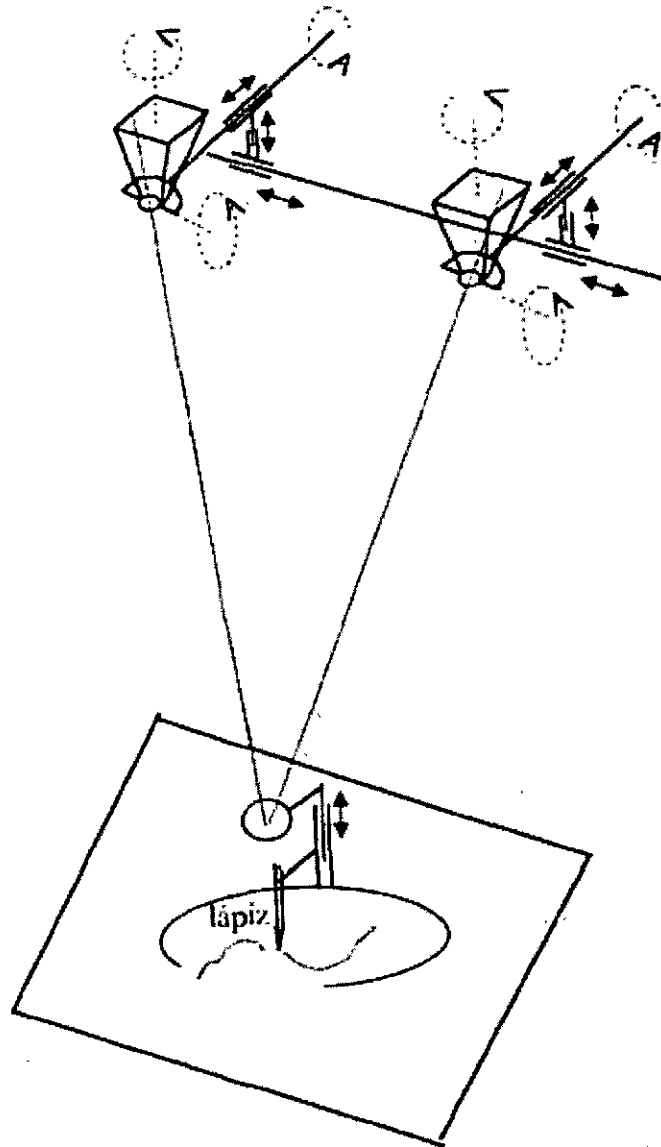


Fig. 3: Restituidor óptico

El papel de la visión estereoscópica es el siguiente: en la mesita medidora (Fig. 4), el operador observa, mediante los anteojos, dos imágenes superpuestas de la misma zona. Así, al observar estas imágenes, percibe un modelo estereoscópico subjetivo que difiere del modelo geométrico (los puntos homólogos p' , p'' , aparecen fusionados en un único punto P'). Además, encima del modelo subjetivo se percibe la marca medidora, o marca flotante M . Si bien se está aparentemente en un contrasentido, puesto que se observa un modelo subjetivo y debe medirse sobre el modelo geométrico, puede apreciarse, fácilmente, que al bajar la mesita medidora, la marca M baja, y los puntos p' , p'' , se acercan, ocasionando que el modelo subjetivo suba. De esta manera, cuando se percibe que la marca M toca el "terreno", ambos modelos, el subjetivo y el geométrico, coinciden y, por lo tanto, la marca medidora se encontrará posada sobre el modelo geométrico, en la intersección de los dos rayos homólogos, que es la posición correcta del punto (punto P en la fig. 4).

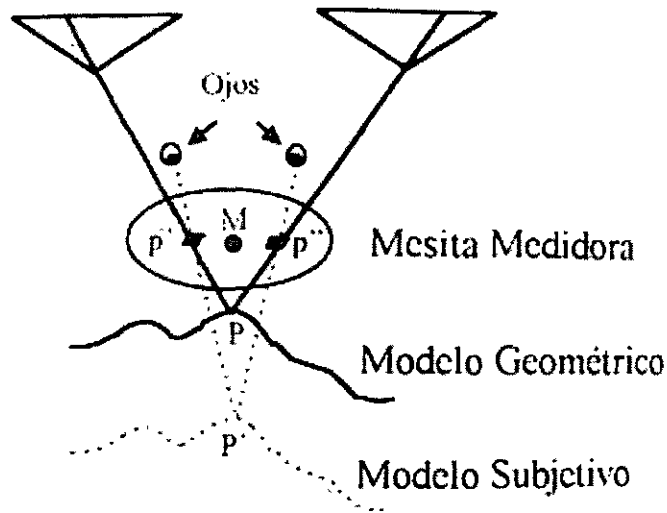


Fig. 4: Visión estereoscópica y marca medidora en la proyección óptica

El Restituidor Analógico Mecánico

La fig. 5 muestra un Restituidor de proyección mecánica, en el cual los rayos ópticos son reemplazados por varillas mecánicas, obteniéndose el punto del modelo como intersección de esas varillas.

Los puntos homólogos p' y p'' son observados por los sistemas de observación O_b , los cuales captan ambas imágenes y las transmiten, a través de un camino óptico formado por prismas y lentes, a los oculares. Los puntos (p') y (p'') están constreñidos por dispositivos mecánicos, indicados simbólicamente en la figura, a describir planos. Esos puntos experimentan movimientos idénticos a los de ambos sistemas de observación y describen, de esta manera, planos paralelos a los fotogramas que se denominan "planos mecánicos", o "planos artificiales", de la fotografía. De esta forma, los puntos (p') y (p'') ocuparán, en los planos mecánicos, las mismas posiciones que los puntos p' y p'' en los fotogramas. Los puntos (p') y (p'') se denominan "puntos mecánicos", o "puntos artificiales", de las fotografías. Los puntos O' y O'' , son articulaciones cardánicas fijas. Por lo tanto, si O' y O'' están a una distancia c (distancia principal) de los planos mecánicos, las varillas que pasan por (p') y O' , y por (p'') y O'' , tomarán las mismas posiciones que tomarían los rayos ópticos en caso de encontrarse las fotografías en las posiciones de los planos mecánicos y las lentes en la posición de las articulaciones cardánicas O' y O'' . En la fig. 5 también se indica la posibilidad mecánica de cambiar el valor de la distancia principal c . El punto de intersección P de las varillas será, entonces, el punto de) modelo buscado. Para no complicar la figura, ambos fotogramas se muestran completamente horizontales, pero, naturalmente, ellos pueden tomar posiciones inclinadas dentro de los rangos de las inclinaciones habituales. Es posible introducir los ángulos α de la orientación relativa y β de la orientación absoluta. De éstos, en la figura sólo aparece la posibilidad de α . Como ya se mencionó, los planos mecánicos serán siempre paralelos a los de los fotogramas. La realización mecánica del punto de intersección de las dos varillas es tal que punto P puede moverse horizontalmente y verticalmente. En cualquier otro punto, cuyos movimientos fueran los mismos que experimenta el punto P , se podría ubicar el lápiz que se muestra en la figura, el cual servirá para graficar la posición de un punto en la hoja del mapa que se coloca sobre la mesa del instrumento. La necesidad de que el lápiz y el punto P experimenten idénticos movimientos se satisface por medio de las guías paralelas que se indican. Si se desea confeccionar el mapa a una escala diferente de la del modelo, en lugar del lápiz deberá emplearse una conexión a un pantógrafo.

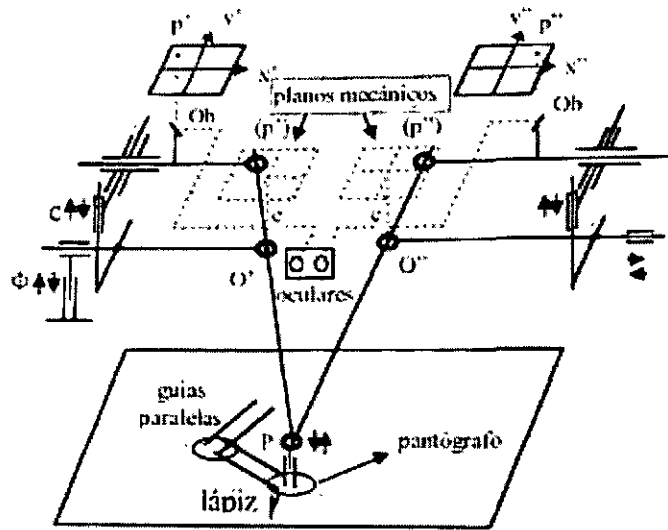


Fig. 5: Restituidor Mecánico (preparado en base a 6)

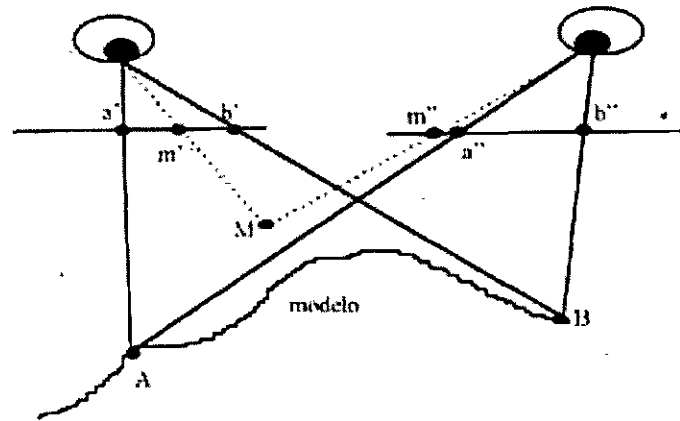


Fig. 6: Visión Estereoscópica y Marca Medidora en un Restituidor Mecánico

La visión estereoscópica y el principio de la marca medidora se realizan de manera distinta de la descrita para el aparato restituidor óptico, aunque, en realidad, lo que percibe el operador es prácticamente lo mismo en ambos casos y, por lo tanto, su trabajo no difiere mayormente en uno u otro aparato.

En la fig. 6 se muestra lo que observa el operador a través de los oculares. Las zonas observadas son homólogas. Por lo tanto, será posible la visión estereoscópica indirecta, y al observar simultáneamente las imágenes a' , a'' , al observador le parecerá que observa un solo punto A en un espacio tridimensional. Las imágenes b' , b'' , provocarán la impresión de que se trata de un solo punto B, y lo mismo ocurrirá con todas las imágenes homólogas de los puntos de) modelo entre A y B. Así, el operador percibirá una superficie continua de un modelo del terreno en sus tres dimensiones. En los caminos ópticos de ambos sistemas de observación se intercalan marcas, en una posición tal que ellas resultan nítidamente proyectadas sobre las imágenes. El observador percibirá esas marcas como m' , m'' , las cuales, al igual de lo que ocurre con a' , a'' y b' , b'' , serán fusionadas en una sola marca M que, en el caso de la fig. 6, aparecerá "flotando" encima del "terreno", razón por la cual se la denomina en buena parte de la literatura "marca flotante". Se puede apreciar también, que al variar la separación entre m' y m'' , la marca M sube o baja, y que cuando m' , m'' , están suficientemente alejadas, la marca M podrá ser observada como "hundida" en el "terreno". Además, si las marcas m' , m'' , se mueven en idénticas cantidades, la marca

resultante M aparece como moviéndose en un plano horizontal. De esta manera resulta fácil comprender que el observador podrá desplazar horizontalmente y verticalmente la marca M en relación al modelo estereoscópico del terreno y que, si lo desea, podrá posar la marca flotante en el punto o detalle que le interese. Así, cuando el operador perciba que la marca M se ha posado sobre el punto A del modelo, podrá estar seguro de que la marca m' coincide con a' , y que la marca m'' coincide con a'' . Con esto se tiene una posibilidad muy importante de bisectar puntos homólogos con las marcas m', m'' en ambos fotogramas, sin que sea necesario transferir un punto de una fotografía a la otra, algo que sería engorroso y muchas veces imposible en terrenos sin suficientes puntos claramente identificables. Bastará, simplemente, con posar la marca flotante sobre el punto que interesa medir para estar seguro de que las marcas m' y m'' están en detalles homólogos. Este es el gran aporte de la visión estereoscópica y del principio de la marca flotante al proceso de medición en la Fotogrametría, que vino a superar el viejo e incómodo problema que se planteaba en procedimientos fotogramétricos de principios del siglo con la identificación de puntos homólogos en ambos fotogramas.

La determinación de la posición espacial de un punto en un restituidor analógico se realiza de la siguiente manera: Para una determinada posición de las varillas espaciales que fijan la posición del punto P del modelo geométrico que representa el terreno (fig. 5), y suponiendo que se ha efectuado al menos la orientación relativa, el operador percibirá un modelo estereoscópico frente a sus ojos que será totalmente subjetivo (fig. 6). Según sean las posiciones de las marcas m' y m'' , la marca flotante M se observará, en general, "flotando" o "hundida", como ya se mencionó. Moviéndolo horizontalmente, y en forma manual, el punto P del modelo (fig. 5), las varillas espaciales mueven los puntos mecánicos y, junto con ellos los sistemas de observación; entonces, las marcas m' y m'' se mueven en idénticas cantidades, y con esto, la marca flotante, que parece moverse horizontalmente en el modelo estereoscópico, es llevada a la zona que interesa. Allí, subiendo y bajando el punto P del modelo geométrico, las varillas harán que los puntos mecánicos (p') y (p'') se abran o cierren, al igual que los sistemas de observación, y las marcas m' y m'' , con lo cual el operador percibirá en el modelo estereoscópico que la marca flotante sube o baja y podrá posarla en el "terreno" en el punto que le interese medir. En esta situación, por lo explicado anteriormente, los puntos del fotograma observados serán homólogos y lo mismo ocurrirá con los puntos mecánicos (p') y (p''). Entonces las varillas espaciales asumirán la posición correcta y su intersección fijará la posición del punto P del modelo geométrico.

Con los Restituidores Analógicos, la Fotogrametría alcanza precisiones realmente sorprendentes, y la productividad crece de manera insospechada. Si se compara la posibilidad de trazar un mapa en una oficina, simplemente siguiendo los rasgos cartográficos con una marca sobre un modelo estereoscópico del terreno, con los lentos y laboriosos procedimientos de campaña, se comprende fácilmente que los procesos de mapeo no sólo se aceleran más que notablemente, sino también que los costos disminuyen a valores impensados. La producción de mapas empieza a ser comparable a un proceso industrial y comienzan a emplearse expresiones relativas a la productividad, tales como, $\text{Km}^2/\text{día}$, o Has/hora , etc.

3. El Restituidor Analítico

El advenimiento de las computadoras acarreó cambios inmensos en casi todas las disciplinas y alcanzó muy fácilmente a la Fotogrametría. No podía ser de otra manera. Con una herramienta tan poderosa para realizar cómputos era muy fácil demoler el viejo lema de Otto von Gruber. Seguir sosteniendo que "Fotogrametría es el arte de evitar todo cálculo", teniendo a disposición una máquina capaz de realizar los más complejos cálculos en pequeñas fracciones de segundo, era todo un despropósito. Toda la Fotogrametría Analógica, edificada bajo este lema, comenzaba a tambalear. Las ingeniosísimas soluciones analógicas, verdaderas joyas de la óptica y de la

mecánica de precisión, empezaban a recibir la amenaza de los Restituidores Analíticos, cuyas primeras versiones eran tan costosas que por los años '60 se estimaba que la transición Analógico-Analítica no resultaría nada rápida. Sólo a fines de la década del '70, los Restituidores Analíticos mostraron precios parejos con los Analógicos originándose de esta manera el cese de la producción de estos últimos. Sin embargo, el empleo de los Restituidores Analógicos ha continuado hasta el presente, aunque con una modalidad de trabajo que incluye la computación, puesto que los movimientos en las tres coordenadas del punto del modelo (punto P de la fig. 5) son captados por sensores e ingresados a una computadora.

El principio del funcionamiento de un Restituidor Analítico se muestra en la fig. 7. Al comenzar, el instrumento trabaja en el modo Estereocomparador. Los valores de las coordenadas de fotograma, x',y',x'',y'' , fluyen hacia la computadora. El operador bisecta estereoscópicamente (Fig. 6) los puntos que empleará para la Orientación Relativa y para la Absoluta. Con las coordenadas de esos puntos, y con los valores de las coordenadas de campo de los puntos de control, la computadora calcula los 12 parámetros de las orientaciones mencionadas (5 para la orientación relativa y 7 para la orientación absoluta). Una vez concluida esta etapa, el instrumento pasa a trabajar en el modo Modelo. En esta modalidad, el operador ingresa a la computadora una terna de valores X,Y,Z , de coordenadas de terreno. Con los 12 parámetros de las orientaciones exteriores calculados previamente, la computadora calcula los valores x',y', x'',y'' , por medio de las ecuaciones de colinealidad (1). Servomotores actúan de manera casi instantánea (tiempo real) y guían las marcas medidoras de los sistemas de observación a los puntos correspondientes a esas coordenadas. De esta manera, mediante el cálculo de las coordenadas de fotograma y la acción de los servomotores, operaciones éstas que se repiten varias veces por segundo, se establece una correspondencia entre la terna X,Y,Z , de las coordenadas del terreno de un punto y los dos pares de las coordenadas x',y', x'',y'' , de los puntos homólogos correspondientes a las imágenes de dicho punto. El resultado de esta operación es idéntico al obtenido en el restituidor analógico de proyección mecánica descrito previamente (Fig. 5). En aquel caso, la correspondencia entre la terna de las coordenadas del terreno y los dos pares de coordenadas de fotogramas se obtenía a través del sistema mecánico formado por varillas y articulaciones cardánicas. En el Restituidor Analítico, la correspondencia se establece, en cambio, a través de un proceso analítico. En el trazado del mapa, el operador trabaja de la misma manera en ambos casos empleando la visión estereoscópica (Fig. 6).

Entre las grandes ventajas de los Restituidores Analíticos sobre sus antecesores analógicos Wolf [7] señala las siguientes: La posibilidad de trabajar con cualquier tipo de fotografía (vertical, inclinada, oblicua, convergente, panorámica y terrestre o aun con imágenes no fotográficas), con distancias principales arbitrarias y hasta diferentes en un mismo modelo. La sensible mejora en la precisión de los resultados por la no introducción de errores ópticos o mecánicos en la formación del modelo, la posibilidad de corregir mucho más eficazmente los errores sistemáticos originados en la distorsión de la lente de la cámara, en el encogimiento y alargamiento de la película y en la refracción atmosférica y curvatura terrestre y, por último, la facilidad con que se pueden manejar las observaciones redundantes con un tratamiento según mínimos cuadrados.

4. El restituidor Digital

Para algunos autores [3], "un restituidor digital no difiere demasiado de un restituidor analítico"; puesto que trabaja "..... de una manera completamente similar a aquella en que imágenes en film son usadas en un restituidor analítico, i.e. como fuente primaria para generar pares de coordenadas de fotograma, información que adecuadamente procesada permite obtener las tres coordenadas de un punto en el espacio". En general, las imágenes homólogas en la pantalla son observadas estereoscópicamente por medio de algún artificio, y el operador posa la marca

flotante sobre el terreno de la manera descrita en uno de los casos anteriores (fig: 6). A diferencia de lo que ocurre en el restituidor analítico, en el restituidor digital no son necesarios los servomecanismos para mover las imágenes. Ellas desaparecen y se generan muy rápidamente en la pantalla en las posiciones correctas. Al no ser necesarios dispositivos mecánicos, la restitución no introducirá errores, y la precisión dependerá solamente de los datos ingresados. Sin embargo, como todavía en la Fotogrametría Digital para fines cartográficos las imágenes son digitalizadas por medio de "scanners", "el problema de la precisión cambia del estereorestituidor al scanner" [3].

Para otros autores, en cambio, un sistema fotogramétrico digital debe ser más ambicioso. Helava [5] expresaba este punto de vista de una manera bastante elocuente mediante una pregunta y una respuesta algo desilusionante: "(Qué ofrece un sistema fotogramétrico digital, que necesita de un operador humano, para ser superior a un estereorestituidor? La respuesta hoy (corría el año 1988) tiene que ser: Muy poco". Para Helava, y muchos otros, el gran valor de la Fotogrametría Digital está en la posibilidad de automatización de varias de las tareas fundamentales de la Fotogrametría. Otra de sus frases tajantes es la siguiente [5]: " En Fotogrametría Digital la operación manual es la antítesis de la eficiencia; ella debe ser evitada".

La situación actual de la Fotogrametría Digital está ubicada entre ambas posiciones, con una tendencia clara hacia la segunda. Un buen grado de automatización ha sido ya logrado en los sistemas de Fotogrametría Terrestre. En la Fotogrametría Aérea, se ha conseguido la correlación automática de imágenes, donde se han logrado importantes precisiones subpixel (del orden de 0,1 pixel) [1] y [2]. Resuelto el problema de la correlación automática, varias tareas fotogramétricas como las orientaciones interior, relativa y, en algunos casos, absoluta, o la rectificación y la confección de ortofotos, o la aerotriangulación, se agilizan más que notablemente, y podrán llevarse a cabo con escasa o nula participación de un operador humano. Es esa la tarea que está en pleno desarrollo. Según la opinión de Grün [4] "... hay todavía un amplio espacio para el perfeccionamiento", y "notamos una suave transición de lo analítico a lo digital, con ambos sistemas todavía en uso en paralelo por algunos años".

Una situación novedosa y muy interesante se presenta en el terreno de la autoría intelectual en los Sistemas de Fotogrametría Digital. El mismo Grün [4] también señala que "En los tiempos de la Fotogrametría Analógica y en los primeros años de la Fotogrametría Analítica, los fabricantes eran las fuerzas directrices", mientras que hoy "mediante el uso e integración de componentes de hardware de bajo costo los sistemas digitales pueden ser armados por virtualmente cualquiera con conocimientos suficientes en fotogrametría digital". Esta afirmación se comprueba fácilmente si se pasa revista a la nutrida lista de ofertas existentes: Ella contiene "... más productos de los que estaban disponibles en cualquier momento en la época de los Estéreo restituidores Analógicos y Analíticos".

5. Conclusiones

El Estereoautógrafo de Von Orel, al permitir el trazado continuo de los rasgos cartográficos, marcó un verdadero hito en la eficiencia de los procedimientos de restitución de la Fotogrametría Terrestre. Sus sucesores en la Fotogrametría Aérea, los Restituidores Analógicos, alcanzaron una amplia difusión en razón de sus excelentes prestaciones tanto desde el punto de vista de la precisión como del de la economía. Con ellos la Fotogrametría adquiere un gran impulso y pasa a ser la herramienta idónea para los más variados proyectos de cobertura cartográfica, desde mapas a pequeña escala hasta planos muy precisos y detallados a escalas grandes.

Con el advenimiento de las computadoras, nace la Fotogrametría Analítica con indudables mejoras en precisiones y rendimientos y con importantes cambios en el manejo y almacenamiento de la información cartográfica.

La reciente Fotogrametría Digital ha alcanzado un importante grado de desarrollo y es dable esperar importantes avances en el futuro próximo. Los logros más notables se han conseguido en la automatización de los procedimientos de orientación, en la confección de ortofotos y en la aerotriangulación. No obstante, en la Restitución Fotogramétrica, la transición de los procedimientos analíticos a los digitales no será tan rápida.

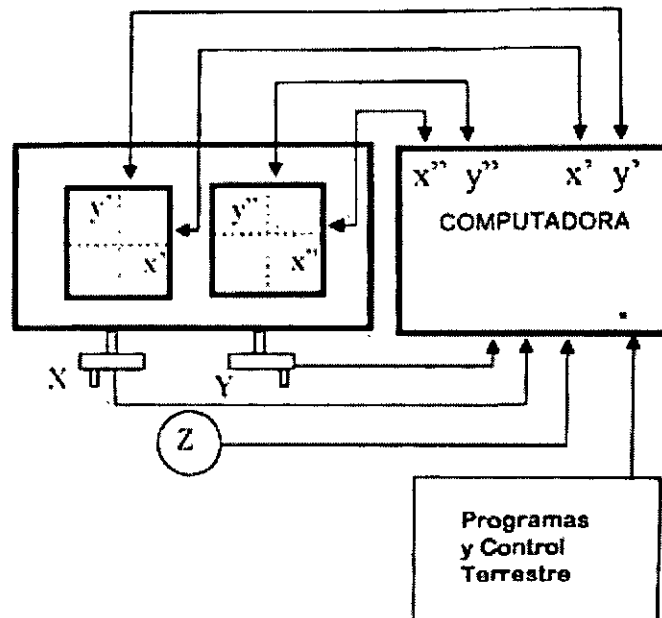


Fig. 7: Restituida Analítico

Una circunstancia digna de mención es el lugar importante en el desarrollo de los Sistemas Digitales que les corresponde actualmente a las Universidades, las cuales han pasado a ocupar una posición de liderazgo.

4.2 Operadores puntuales y lineales

4.3 Correlación de imágenes

Las ventajas que aportan los restituidores digitales es la capacidad de identificar imágenes homólogas por métodos estadísticos. Esto permite que puedan medir por sí mismos.

Las imágenes en los restituidores digitales se almacenan como matrices de valores. Cada unidad elemental de imagen de la que se conoce su valor se denomina píxel. Son muchas las formas de dar valores a cada píxel, desde los que emplean 1 byte para cada píxel, esto es un valor entre 0 y 255, pudiendo representar así una imagen en tonos de gris (256 tonos de grises son suficientes para que el ojo humano pueda distinguir con nitidez una imagen). También se puede emplear 1 byte para representar en color una imagen, en este caso se define primero una paleta de color con 256 colores distintos y el valor de cada píxel actúa como un índice en esa paleta (una imagen en

color con sólo 256 colores distintos el ojo humano la ve como poco definida, por eso este sistema no se emplea nunca en fotogrametría). La manera más usual de representar el color es emplear 3 bytes por cada píxel y cada byte representará un valor de la intensidad de las componentes del color, rojo, verde y azul. A este método se le denomina color verdadero y puede representar $256 \times 256 \times 256 = 16$ millones de colores.

Para poder medir un punto en las dos imágenes el ordenador tendrá que comparar dos matrices de valores, una en la imagen izquierda y otra en la derecha y calcular cómo de iguales son. Si repitiéramos la misma imagen a la derecha y a la izquierda el proceso se reduciría a seleccionar una matriz de un determinado tamaño, por ejemplo de 4×4 píxeles y buscar en la otra imagen exactamente los mismos valores y en las mismas posiciones dentro de otra matriz de 4×4 . Pero las dos imágenes no son la misma y además los objetos con altura no tienen imágenes iguales en una foto y en la otra debido al distinto punto de perspectiva de las tomas, por tanto el método de buscar la igualdad exacta no sirve. Actualmente existen muchos métodos de correlación de imágenes, estos nos dan un factor de cuánto se parecen dos matrices. Parece entonces que, utilizando alguno de estos métodos, no tendremos más que seleccionar una matriz en la foto izquierda y buscar el factor más alto en alguna matriz en la foto derecha, para medir un punto, pudiendo por tanto realizarse la orientación relativa analítica de forma automática sin intervención del operador. Si esto se consigue no sólo se podría hacer la orientación relativa sino muchos de los procesos del sistema fotogramétrico, la aerotriangulación automática, la extracción automática de miles de puntos para la obtención del modelo digital del terreno, etc.

El proceso de correlación

Como medida de similitud emplearemos el coeficiente de correlación cruzada:

$$r = \frac{\sum g_r g_b - n \cdot \overline{g_r} \cdot \overline{g_b}}{\sqrt{(\sum g_r^2 - n \cdot \overline{g_r}^2)(\sum g_b^2 - n \cdot \overline{g_b}^2)}}$$

n : número de píxeles de las matrices de referencia y de búsqueda.

g_r : cada uno de los valores de la matriz de referencia.

g_b : cada uno de los valores de la matriz de búsqueda.

$\overline{g_r}$: valor medio de los valores de la matriz de referencia.

$\overline{g_b}$: valor medio de los valores de la matriz de búsqueda.

r : valor de correlación. Su valor absoluto está comprendido entre 1 cuando las dos matrices son idénticas y 0 cuando son distintas.

Matriz de referencia. El objetivo de la correlación es localizar la posición de esta matriz en la matriz de búsqueda

23	25	31	17
----	----	----	----

21	32	17	14
25	35	36	21
21	25	32	21

Matriz de búsqueda

5	67	34	65	23	25	31	17	23	43	31	17	23	25	31	17
21	43	67	65	21	32	17	34	21	32	51	14	21	32	17	14
24	14	32	43	25	35	36	21	25	35	36	21	25	45	36	21
21	56	31	15	21	25	21	26	31	15	32	21	21	25	32	21
21	32	67	12	21	32	21	32	18	12	31	17	23	25	31	17
76	34	86	20	25	35	23	34	39	20	17	14	87	88	76	14
18	46	34	22	21	25	18	23	34	22	54	21	25	35	36	21
14	25	67	23	25	31	17	23	21	25	32	43	21	25	32	21
78	65	24	21	32	17	14	21	24	25	31	17	23	25	31	17
45	34	42	23	43	36	67	31	21	65	47	14	89	32	17	14
23	22	12	21	25	56	21	21	25	35	36	56	25	35	36	21
23	45	66	78	89	91	12	56	21	25	32	21	21	25	32	21

Sobre la matriz de búsqueda iremos tomando matrices del mismo tamaño que la de referencia (4 x 4 en este ejemplo) y calculando para cada posición el valor de "r". Obtendremos el valor máximo en la zona sombreada, que es la imagen homóloga de la de referencia.

Una vez seleccionado la posición del valor máximo de correlación, se realizará un ajuste por mínimos cuadrados con éste valor y los valores de las posiciones vecinas para conseguir una localización subpíxel.

La localización de puntos homólogos en las imágenes plantea algunos problemas que pasamos a plantear:

Primero el esfuerzo de cálculo, aunque los ordenadores son cada vez más rápidos, el número de operaciones que se realizan en la búsqueda de la correlación hace necesaria alguna estrategia para que los tiempos de cálculo sean razonables. La solución que se sigue es una vez seleccionada la matriz de referencia alrededor del punto que se desea buscar, por ejemplo en la imagen izquierda, hay que saber en que área se puede encontrar el punto homólogo en la otra imagen, la derecha. Esta área se tratará como una matriz de búsqueda, dentro de la cual tendremos que encontrar el valor de máxima similitud. Para que la matriz de búsqueda no sea excesivamente grande, lo que supone un elevado número de operaciones de cálculo, el proceso de correlación no

se realiza directamente sobre las imágenes originales sino sobre imágenes reducidas, las imágenes piramidales.

4.4 Restitución fotogramétrica digital



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL II

CI 12/09

TEMA
PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MIGUEL LUNA FUENTES
DEL 21 AL 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009
PALACIO DE MINERÍA**

5. Productos cartográficos

La fotogrametría genera productos finales, gráficos, fotográficos y/o digitales, en función de la aplicación que tendrán los mismos. Discriminando estos productos según el proceso y su forma final, se pueden agrupar según los tipos que se describen brevemente a continuación.

Mapa de líneas. Es el producto por excelencia de la fotogrametría. Actualmente existen dos modalidades de medios de presentación de los mapas: los tradicionales, los cuales son ploteados sobre una mesa de dibujo por el aparato restituidor, y los numéricos los cuales son realizados mediante una interfase que conecta los movimientos del aparato restituidor para que puedan ser realizados mediante un programa CAD (Computer Assisted Design). En estos programas, los elementos que conforman la información que se extrae del modelo, se registran mediante puntos, líneas y polígonos, en diferentes capas según su contenido temático. Esta información puede editarse y completarse una vez hecha la restitución, por lo que se obtiene un plano digital del terreno, que por su naturaleza, se presta especialmente para su utilización en los Sistemas de Información Geográficos.

Puntos de control. Por medios fotogramétricos se pueden determinar las coordenadas espaciales (X, Y, Z) de puntos sobre el terreno, para densificar los puntos que ya se conocen, y los cuales son obtenidos por medios topográficos.

Fotomosaico. Es un ensamblaje de dos o más fotografías que presentan entre ellas un área común. Se clasifican en:

- Controlados: fotos rectificadas y trianguladas.
- Semicontrolados: fotos rectificadas o trianguladas.
- No controlados: fotos sin rectificar ni triangular.

Ortofoto. Es una fotografía o un conjunto de fotografías cuyas imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica. Esto se logra mediante un proceso denominado rectificación diferencial, en el cual se eliminan los efectos de la inclinación y del desplazamiento por relieve, propios a las fotografías. Por ello, las ortofotos son equivalentes a los mapas de líneas en lo referente a su precisión geométrica.

Para la realización de la ortofoto es necesario crear el modelo estereoscópico del terreno, para de esta forma, proyectar en forma ortogonal, mediante el uso de la rectificación diferencial, la fotografía izquierda del modelo sobre película fotográfica, la cual, una vez revelada, es la ortofoto.

Ortofoto estereoscópica.

Está conformada por dos imágenes, donde la imagen izquierda es una ortofoto de la fotografía izquierda y la imagen derecha es una ortofoto de la fotografía derecha, la cual contiene la suma de los paralajes en x obtenidos de las variaciones de altura de los puntos correspondientes del terreno. Esta última ortofoto es denominada *estereomate*, la cual puede ser considerada como una proyección paralela oblicua del terreno, sobre el plano de proyección.

Ortofotomapa. Es una ortofoto hecha a una escala determinada, sobre la cual se añade la información convencional que posee un mapa.

Ortofotomapa topográfico. Es un ortofotomapa al cual se añaden las curvas de nivel.

5.1 Modelos digitales de elevación

El nombre de Modelo Digital de Elevación o MDE implica una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos, generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación.

En otras palabras, un Modelo Digital de Elevación es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas "X" y "Y" a las que se les agrega un valor de "Z" que corresponde a la elevación. Se ha convenido que los puntos deben estar espaciados y distribuidos de modo regular, de acuerdo con un patrón que corresponde a una cuadrícula.

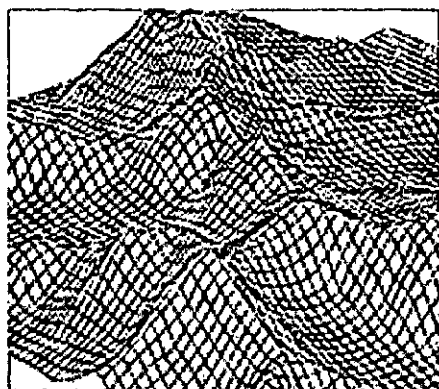
El clásico y cada vez más conocido nombre de Modelo Digital de Elevación, crea la idea automática de que necesariamente el grupo de valores numéricos deba visualizarse como un "modelo" de tercera dimensión cuando se usa un equipo de cómputo. Tal grupo de valores numéricos puede ser conceptualizado como un arreglo matricial o tabular de los valores de "X", "Y" y "Z" para cada punto. Para una mejor idea de esto, la siguiente es una manera de representar como texto los valores numéricos.

X	Y	Z
277800	2178550	1996
277800	2178500	1995
277800	2178450	1993
277800	2178400	1992
277800	2178350	1991
277800	2178300	1990
277800	2178250	1990
.....
277850	2178550	1996

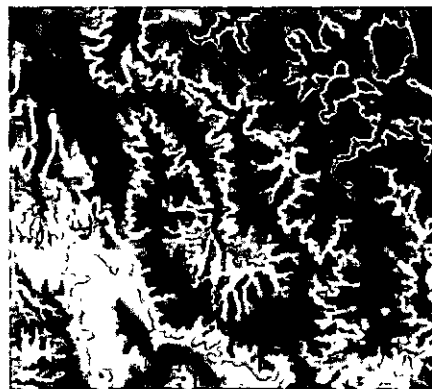
277850	2178500	2000
277850	2178450	2007
.....

Los valores de elevación pueden ser manipulados digitalmente y desplegados en un monitor como una "malla" (o como un conjunto de "celdas"), a la que se asocian los valores de altura a cada una de las intersecciones de líneas de la "malla". Para este caso, la presentación visual es una vista isométrica.

Para el caso de que a las "celdas" de una cuadrícula "raster" se le asignen los valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas, ya sea de tonos de gris o de colores, la presentación gráfica puede ser en dos o tres dimensiones.



Representación tipo malla
en vista isométrica



Representación en dos dimensiones
por medio de tonos

Características

Los MDE escala 1:50 000 que genera el INEGI, tienen las siguientes características:

- i. Los valores de "z" son de altitud o de alturas ortométricas, en unidades enteras de metro y están referidos al nivel medio del mar, con base en el Datum Vertical para Norteamérica de 1929 (NAVD29).
- ii. Los puntos del MDE están referenciados horizontalmente al sistema de coordenadas de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator). El Sistema de referencia geodésico es NAD27 o ITRF92 Época 1988.0.
- iii. El cubrimiento de cada MDE corresponde al formato regular de 15' de latitud por 20" de longitud de la cartografía elaborada a esa escala por el INEGI.
- iv. El espaciamiento (resolución espacial) entre las intersecciones de la retícula de elevaciones es de 50 metros, en las dos direcciones, es decir, la retícula forma una cuadrícula regular de 50x50 metros de lado.

- v. El número de puntos y en consecuencia el tamaño del archivo, varía según la latitud de la ubicación del área del mapa.

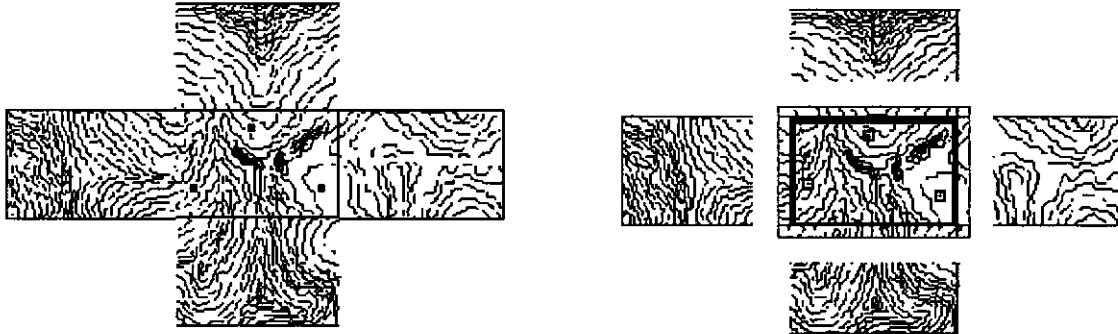
Producción

En el INEGI los MDE escala 1:50 000 se generan por dos métodos digitales: mediante la conversión de curvas de nivel de mapas topográficos escala 1:50 000, originalmente generados por el INEGI en la Serie I, o bien, por el método fotogramétrico de correlación de imágenes.

A) Generación a partir de la conversión de mapas

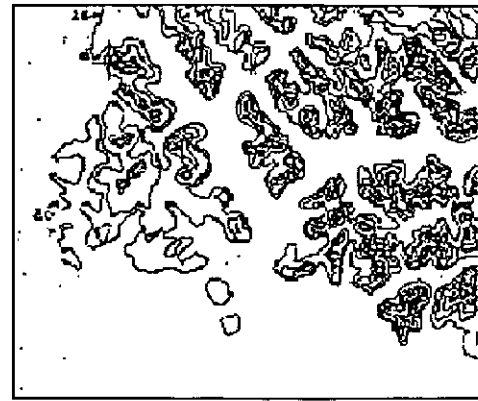
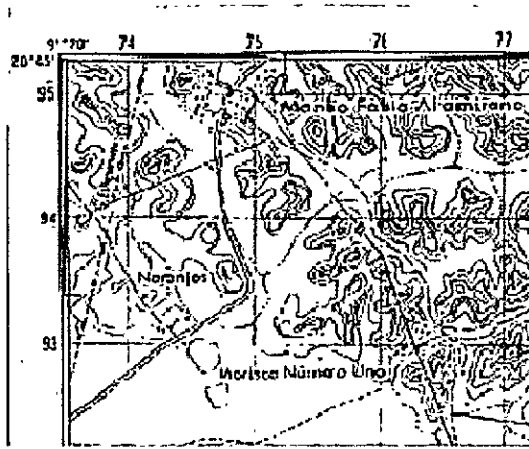
En la elaboración de los MDE por conversión de mapas se hace uso de los "originales" de la restitución fotogramétrica de curvas de nivel, los cuales, al estar en una base de material plástico que tiene características físicas de estabilidad dimensional, aseguran que no existe deformación de la información con el paso del tiempo.

A partir de los mapas adyacentes, al "original" de un mapa se le agregan franjas de información de curvas de nivel en los márgenes. Después se procede a su reproducción fotomecánica.



Esquema de unión de mapas adyacentes para agregar la franja adicional de curvas de nivel

Lo que se obtiene es un positivo de curvas de nivel con extensión de curvas que garantiza la liga entre conjuntos de datos. El positivo obtenido se digitaliza con un equipo automático para generar un archivo en formato raster, mismo que se vectoriza mediante un software interactivo de tipo "seguidor de línea".



Detalle de un Mapa fuente con curvas de nivel Detalle del "Positivo" de curvas de nivel

El archivo vectorial resultante es el insumo para la generación de la matriz de datos para el MDE. Para ello se crea, a partir de los vértices de los vectores de las curvas de nivel, una red irregular de triángulos con la que se obtienen, por interpolación, los valores de altura que serán usados para calcular los valores de una red regular de puntos.

B) Generación a partir del método fotogramétrico de correlación de imágenes

Los métodos fotogramétricos de captura de MDE son ampliamente usados hoy en día. Requieren fotografías aéreas con control terrestre, instrumentos analógicos, analíticos o digitales y software específico de aplicación.

Cuando un modelo fotogramétrico está orientado absolutamente en un instrumento, cualquier punto del modelo, incluyendo los puntos mismos del MDE, pueden ser accedados por la marca de medición del instrumento, por lo que sus coordenadas pueden registrarse en un archivo digital.

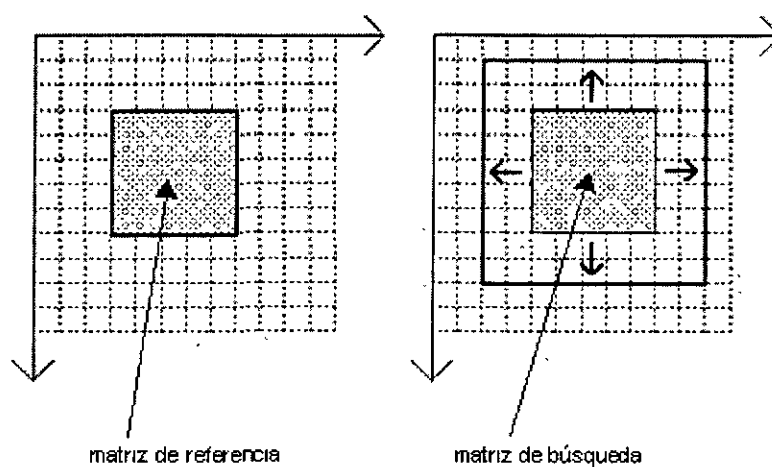
La técnica de correlación de imágenes (también llamada correlación cruzada), aplicada por el INEGI, se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. Este es un método automatizado de generación de MDE.

En este método se extraen sub-imágenes homólogas digitales de ambas fotografías, izquierda y derecha, que subsecuentemente se correlacionan por medio de su información radiométrica (los valores de la escala de grises), para que se determinen puntos del MDE a partir de píxeles homólogos de cada imagen.

Para calcular las coordenadas planimétricas de los puntos del MDE así como sus elevaciones, se hace uso tanto de las coordenadas de "fotografía" obtenidas por transformación pixel a foto para todos los pares de píxeles homólogos, así como de los elementos de orientación exterior de las fotos aéreas.

Por supuesto que los puntos del MDE generados por este procedimiento, no están en una retícula o malla espaciada regularmente, por lo que los puntos para tener una red regular, se obtienen por interpolación.

En la figura se muestra el esquema en el que la primera matriz, o matriz de "referencia" (se supone la foto aérea izquierda), se toma como elemento para comparar los tonos de gris con la segunda matriz, o matriz de "búsqueda" (se supone la foto aérea derecha).



Para cada posición se calcula el coeficiente de correlación de la matriz de búsqueda (ecuación 1). El resultado de la aplicación de la función de correlación cruzada define la posición del mejor "empate" de la matriz de referencia y su correspondiente en la matriz de búsqueda.

ECUACIÓN 1:

$$\rho = \frac{\sum_{R=1}^R \sum_{C=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1) (g_2(r,c) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{R=1}^R \sum_{C=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1)^2 \sum_{R=1}^R \sum_{C=1}^C (g_2(r,c) - \mu_2)^2}}$$

donde:

ρ = coeficiente de correlación.

$g_1(r,c)$ = valores individuales de gris de la matriz de referencia.

μ_1 = valores promedio de gris de la matriz de referencia.

$g_2(r,c)$ = valores individuales de la parte correspondiente de la matriz de búsqueda.

μ_2 = valores promedio de gris de la parte correspondiente de la matriz de búsqueda.

R, C = número de filas y columnas de la matriz de referencia.

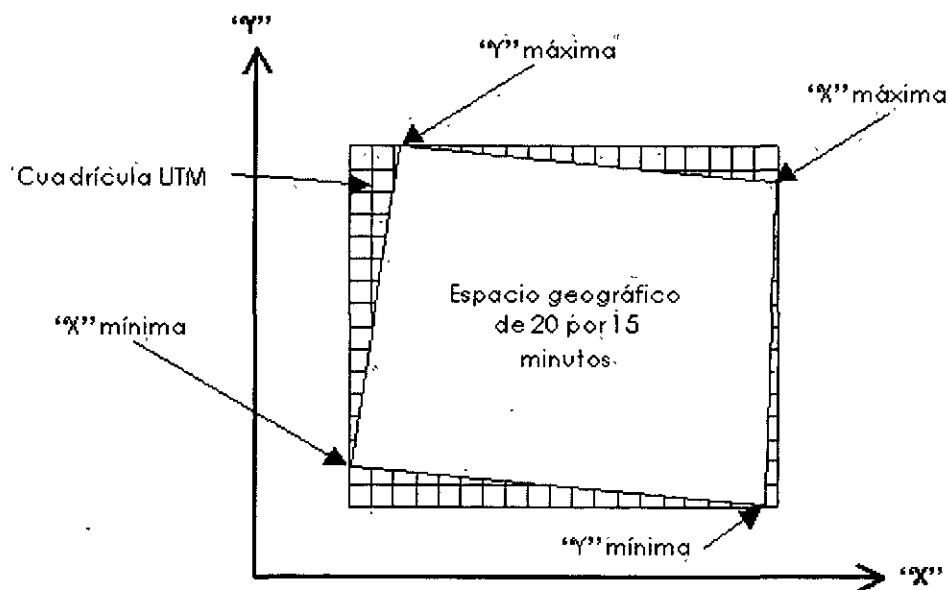
Aspectos geométricos

La generación de MDE, en una línea de producción como la del INEGI, presenta singularidades que requieren un tratamiento diferente si se compara con el trabajo y método que se aplica a la generación de un MDE único o aislado.

Una singularidad es que debe haber continuidad de datos en la vecindad de conjuntos de datos adyacentes, que de acuerdo con el formato de 20 por 15 minutos en proyección UTM, deben ligar con toda naturalidad.

El formato regular de 15' de latitud por 20' de longitud, por construcción en la proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator, forma un cuadrilátero trapezoidal cuyos lados verticales no son paralelos, por lo que se requiere hacer una consideración de carácter geométrico.

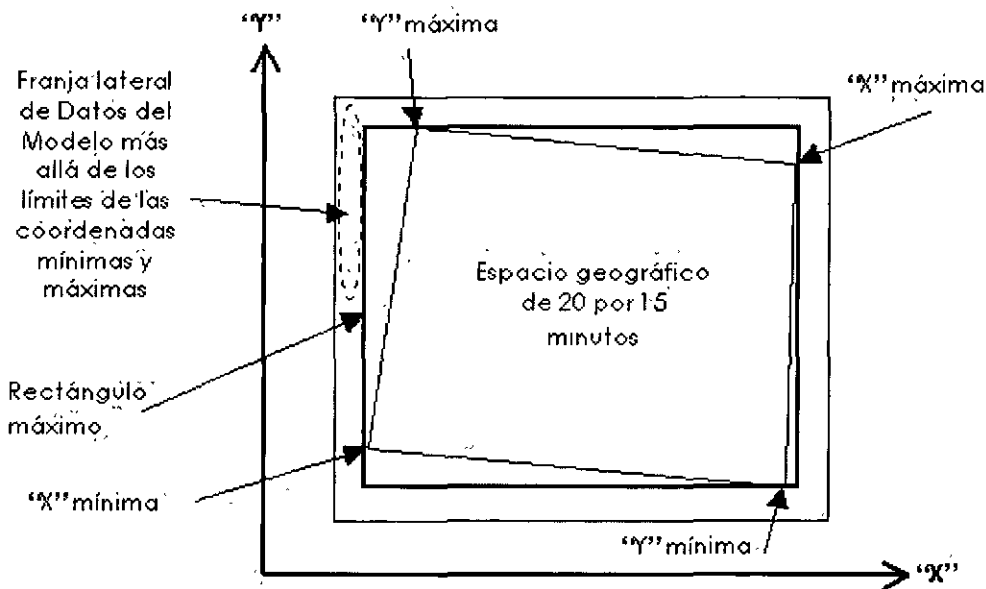
Por ejemplo, un mapa escala 1:50 000 ubicado a la izquierda del meridiano central de cualquier zona UTM, tiene un ángulo de inclinación con respecto a cualquiera de los ejes "x" ó "y", que se reducirá en función de su proximidad al meridiano central. El valor de la inclinación del ángulo según el lado al que se encuentre del meridiano central, determina las coordenadas "x" y "y" mínimas y máximas de las esquinas del mapa.



El esquema muestra con exageración la condición de lados verticales no paralelos de una carta topográfica sobre la cuadrícula UTM.

Es a partir de esas coordenadas mínimas y máximas, que se agregan las franjas excedentes para asegurar la continuidad entre dos Modelos, debido a que durante la generación del MDE, el software debe disponer de información más allá del borde del mapa para que la interpolación que realiza sea más eficiente. Finalmente, el modelo resultante contiene datos más allá del límite del mapa.

Lo anterior significa que los datos del MDE son suficientes para que cubran el rectángulo máximo delimitado por las coordenadas "x" y "y" mínimas y máximas del mapa, así como una porción extra que mejora la capacidad de poder ligar dos modelos, lo que constituye otra singularidad.



El esquema muestra con exageración el excedente de datos del Modelo más allá de los límites de las coordenadas mínimas y máximas.

El esquema previo muestra la geometría final de los datos de un modelo tipo, en el que se aprecia que los excedentes laterales de datos del MDE tienen una geometría irregular si se compara con la cobertura de 15 por 20 minutos.

Es conveniente aclarar que los primeros modelos elaborados no cuentan con el excedente mencionado, por lo que tales Modelos solo cuentan con datos hasta los límites marcados por las coordenadas máximas y mínimas.

La existencia de las zonas de geometría irregular requiere que el usuario, en caso de necesitar conjuntar dos MDE adyacentes, deba efectuar algunas operaciones particulares, debido a que en el momento de hacer el empate se sobreponen las zonas de excedentes de cada modelo, lo que puede ocasionar que el software de aplicación indique algún tipo de "error".

Por ejemplo, una operación consistiría en eliminar los datos de una de las zonas de excedente.

Exactitud

Para el caso de MDE derivados de curvas de nivel vectorizadas, la exactitud del MDE depende de la escala del mapa fuente y de la precisión de los métodos de compilación así como de los procedimientos empleados para la vectorización de las curvas de nivel. La vectorización con software seguidor de línea para curvas de nivel en formato "raster" obtenidas de positivos fotomecánicos dará mayor exactitud que la digitalización con tableta a partir de mapas impresos en papel.

Los MDE creados a partir de curvas de nivel vectorizadas con seguidor de línea son verificados durante la rectificación de fotografías aéreas para la creación de ortofotos, donde eventualmente se detectan inconsistencias que permiten corregir un modelo.

Algunos factores adicionales que intervienen en la exactitud de los modelos de elevación son:

1. La relación entre la escala del material fuente y el nivel de detalle o refinamiento de la retícula de puntos o "malla" que se obtenga.
2. En el método fotogramétrico, la generación de una retícula con espaciamiento regular, requiere de la transferencia de puntos geodésicos de referencia en el terreno, lo que mejora la calidad de la exactitud.

Si el usuario requiere cambiar los datos del modelo a otra escala mayor, es claro que algunos datos que aparecen en el material fuente resultarán insuficientes y por lo tanto podrán mostrarse como muy generales en cuanto a detalle, por lo que para la aplicación del Modelo, por ejemplo en ortofotografías, introducirá errores naturales en la exactitud de los rasgos debido a la incongruencia de la exactitud del modelo con los datos de una escala mayor.

A) Exactitud horizontal

Las ubicaciones de los puntos de la retícula en un MDE se hallan en posiciones definidas matemáticamente en la proyección UTM en unidades cerradas de metro. Estos puntos de la retícula son fijos en posición y pueden considerarse constantes para el propósito de determinar la exactitud.

Los errores mensurables y perceptibles en el MDE existen sólo como errores verticales que quizá parcialmente son atribuibles a errores en los datos fuente, por lo que para medir el error horizontal dentro del MDE con algún grado de seguridad, la componente vertical del rasgo a ser medido deberá ser claramente fotoidentificable, es decir, el rasgo a medir deberá ser reconocible con lo que la posición horizontal de ese rasgo puede ser verificada.

Para reconocer por fotoidentificación los rasgos que se medirán, puede usarse la imagen de la ortofotografía digital, sobre la que se muestran todos los elementos del paisaje.

B) Exactitud vertical

Las especificaciones de exactitud vertical para los MDE, dependen de la metodología de producción, sea ésta una fuente cartográfica o bien, fotogramétrica, además del grado de edición al cual se somete el modelo.

La exactitud vertical se calcula comparando las elevaciones interpoladas linealmente en el MDE contra las correspondientes elevaciones conocidas. Los puntos de prueba deberán estar bien distribuidos sobre el MDE, y en lugares fotoidentificables del terreno, además de contar con la elevación verdadera, con exactitudes dentro de los parámetros establecidos para los MDE del INEGI.

En orden de preferencia para los puntos de prueba aceptables se incluyen los puntos de control terrestre, los de triangulación aérea, los puntos en lugares elevados y puntos sobre curvas de nivel de mapas existentes con un intervalo apropiado.

Se recomienda evaluar un mínimo de 30 puntos de prueba para calcular el Error Medio Cuadrático (EMC), distribuidos 20 en el interior y 10 cerca de los bordes del MDE.

El error estadístico conocido como error medio cuadrático se usa para describir la exactitud vertical de un MDE, comprende los errores "al azar" y los errores sistemáticos introducidos durante la producción de los datos.

El EMC se define como:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_t)^2}{n}}$$

donde:

Z_i = Valor interpolado de las elevaciones del MDE del punto de prueba

Z_t = Valor de elevación "verdadero" del punto de prueba

n = Número de puntos de prueba

La elevación "verdadera" (Z_t) se refiere al valor de elevación más probable, ya que los valores son tomados normalmente de fuentes de producción de mapas. Si se dispone de puntos de control terrestre o de triangulación aérea, deberán tomarse éstos.

Especificaciones

Resumen:

Los Modelos Digitales de Elevación se refieren a un conjunto de datos que representan la superficie del terreno a través de una matriz regular de puntos con valor de altura "z" y coordenadas "x, y" conocidas. La coordenada "z" es obtenida a partir de las de curvas de nivel vectorizadas de la carta topográfica escala 1:50 000 o por el método fotogramétrico de correlación de imágenes.

Especificaciones de los datos:

A partir de 1994, el INEGI produce datos para Modelos Digitales de Elevación escala 1:50 000 con estas especificaciones:

Área de cubrimiento:

15' de latitud por 20' de longitud, de manera consistente para todo el territorio nacional.

Sistema de coordenadas de referencia:

UTM (Proyección Universal Transversa de Mercator).

Datum horizontal:

NAD27 (por sus siglas en inglés, *North American Datum of 1927*) o ITRF92 Época 1988.0 (por sus siglas en inglés, *International Terrestrial Reference Frame of 1992*), .

Datum vertical:

NAVD29 (por sus siglas en inglés, *North American Vertical Datum of 1929*). Elevaciones en metros referidas al nivel medio del mar.

Contenido:

Datos de altura, georreferenciados y espaciados a intervalo constante.

Estructura:

Archivo de datos representable gráficamente como estructura raster.

Resolución:

La resolución en "x, y" de la red regular de puntos de altura es de 50 metros, ajustada a valores cerrados en metros, en coordenadas UTM.

Formato:

El formato del Modelo es de tipo raster, llamado crudo binario de dos bytes por dato, sin encabezado.

Tamaño de archivo:

La cantidad de información varía en función de la latitud y longitud geográfica del área representada, en promedio el tamaño es de 750 Kb

Estructura de datos de los MDE

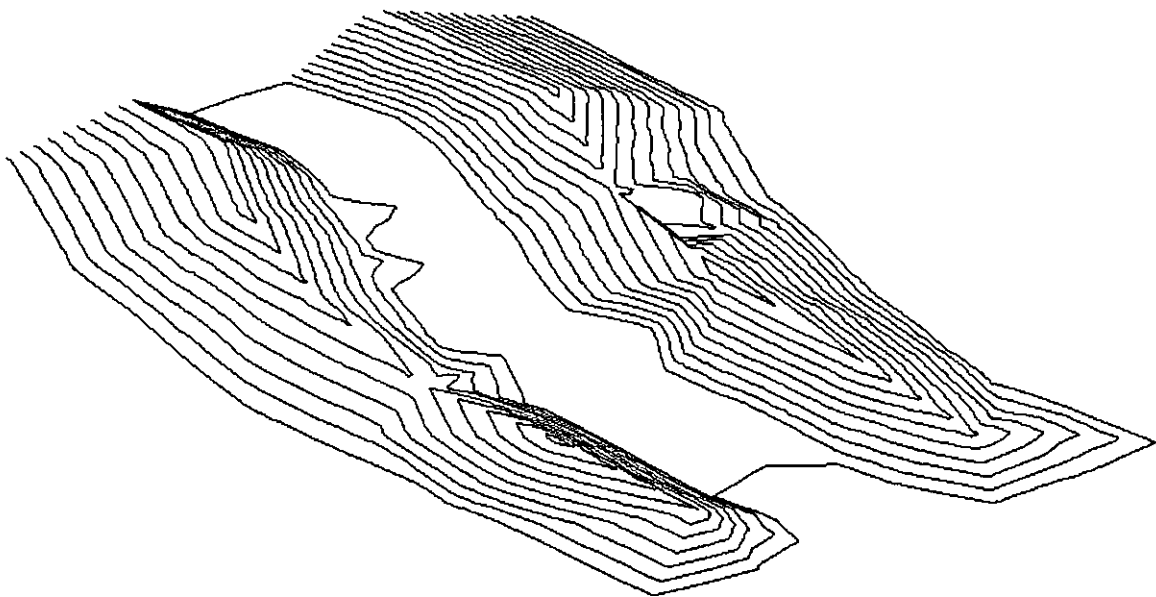
En general la unidad básica de información en un modelo digital de elevaciones es un punto acotado, definido por una terna compuesta por un valor de la altitud (Z) al que acompañan los correspondientes valores de X e Y. Las variantes a parecen cuando estos datos elementales se organizan en estructuras que representan las relaciones espaciales y topológicas.

Mientras los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (curvas de nivel) para representar la superficie del terreno, en los MDE se han utilizado alternativamente formas alternativas diversas. Las estructura de datos en los MDE se han dividido históricamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: raster y vectorial.

Estructura vectorial

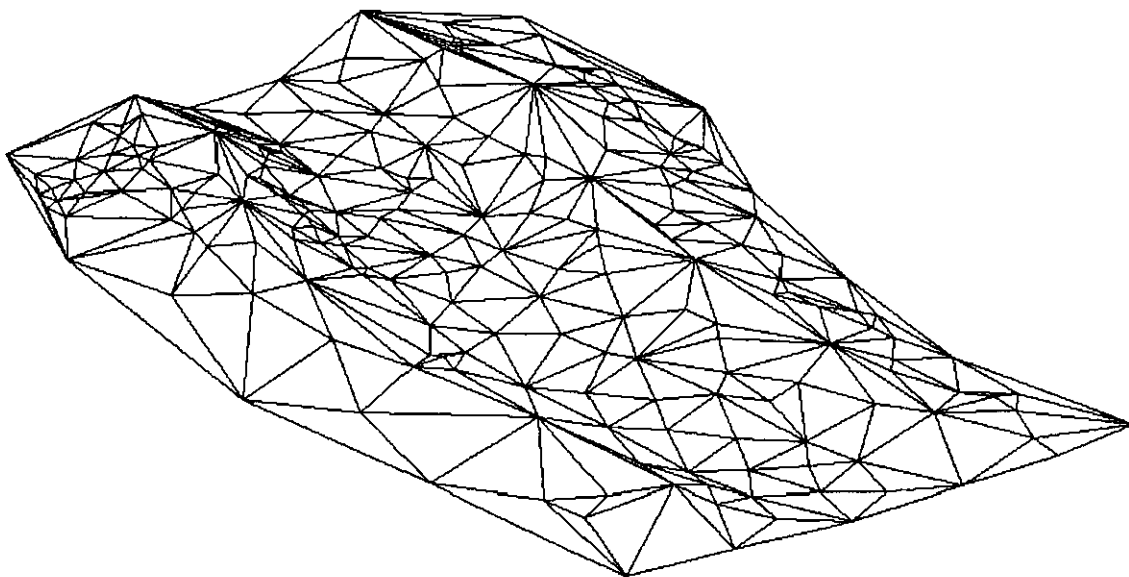
La estructura de datos tipo vectorial se basa en entidades geométricas u objetos geométricos (puntos y líneas), que se definen por sus coordenadas. Las dos estructuras vectoriales más empleadas son por curvas de nivel o también llamadas estructuras de contorno y los TIN (*triangulated irregular network-red de triángulos irregulares*).

- *Estructura de Contornos*. La estructura básica es la polilínea definida como un vector de n pares de coordenadas (X, Y) que describe la trayectoria de las líneas isométricas (en el caso de los MDE, se trata de las curvas de nivel o isohipsas). El número de elementos de cada vector es variable.



MDE representado por curvas de nivel

- *Redes de Triángulos irregulares (TIN)*. Esta estructura de datos se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suelen identificarse por las siglas de su denominación inglesa *TIN*. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y que los ángulos que forman los lados del triángulo sean lo más parecidos posibles (triángulos isósceles - triangulación de Delaunay-). Estos se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferentes grados de detalle, en función de la complejidad del relieve.



MDE representado por un TIN.

5.3 Ortofotos y fotomapas digitales

Por rectificación se conoce el proceso fotogramétrico mediante el cual se puede transformar una imagen en una proyección del terreno, por medio del enderezamiento del eje del fotograma. La rectificación corrige los desplazamientos existentes en la imagen fotográfica original producidos por la inclinación del eje de la toma. Su desarrollo se ha debido principalmente a las aplicaciones en las fotografías aéreas como un método muy rápido para actualizar cartografía. En la actualidad puede aplicarse a un gran número de imágenes (radar, multiespectrales, digitales, etc.). Es una técnica que permite obtener *pseudomapas* de zonas en las que la fotografía clásica no puede hacerlo.

La imagen rectificada debe tener las características geométricas de una proyección ortogonal del objeto fotografiado sobre un cierto plano y a una determinada escala. Se presupone que el objeto es plano y vertical.

Para poder realizarse una rectificación se han de cumplir dos condiciones:

- Ángulo de inclinación de la toma tiene que ser muy pequeño (3°).
- El terreno tiene que ser prácticamente horizontal y llano.

Rectificación de imágenes digitales

La rectificación digital presenta importantes ventajas respecto a los procedimientos ópticomecánicos. La calidad de la imagen, al no estar en estos procedimientos supeditada a complejos dispositivos de enfoque que afecten a la nitidez fotográfica en el plano de reproducción, no constituyen ninguna restricción al sistema, tampoco imponen condicionantes importantes al sistema.

Se mantienen las restricciones en cuanto a desplazamiento debido al relieve, tanto según las características del terreno como de los objetos en el caso de fotogrametría no topográfica. La rectificación diferencial de la fotografía consiste en enderezar y poner en escala, pequeñas unidades geométricas del terreno, que perfectamente ensambladas dan una imagen fotográfica del terreno.

Este nuevo documento fotográfico se denomina ortofotografía, y es tan preciso como un mapa. Para que la transformación de la proyección central de la fotografía a la ortogonal del terreno, sea teóricamente exacta, sería necesario que las unidades geométricas a rectificar fuesen un punto. Esto en la práctica es imposible, utilizándose unidades geométricas de reducido tamaño (*pequeñas zonas de la imagen, que en el caso digital será el píxel*).

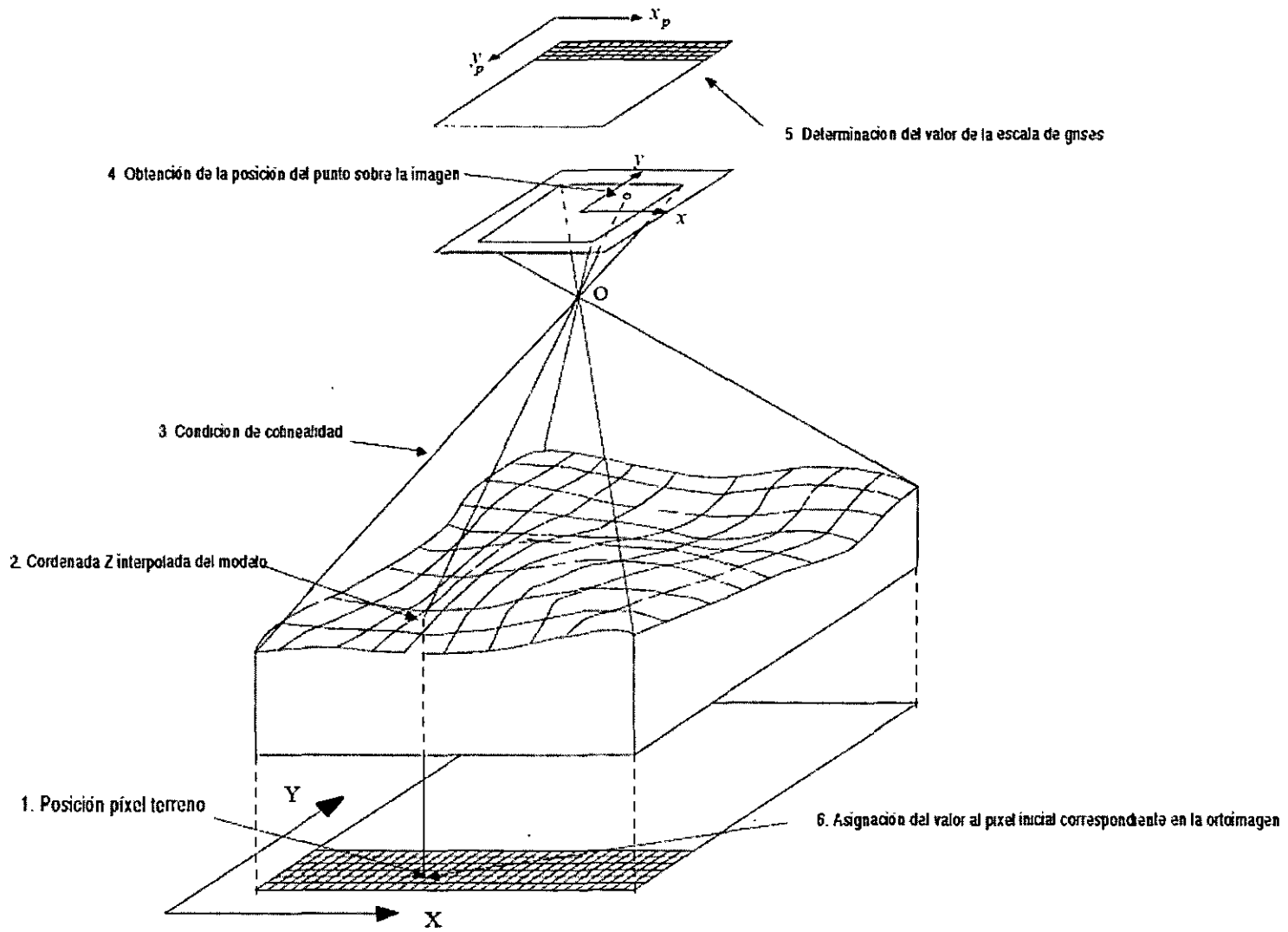
Podemos diferenciar dos tipos de ortofotografías:

- *Ortofotografía óptica*: A partir de la diapositiva de la fotografía original se transmite la imagen ópticamente, en pequeñas unidades geométricas, al negativo final. El producto final es una imagen fotográfica.

- *Ortofotografía digital:* Se parte de imágenes generadas en forma digital o imágenes fotográficas que previamente se han escaneado. Estas imágenes están divididas en elementos rectangulares denominados píxeles. La corrección de los errores debidos al relieve y a la falta de verticalidad del eje de toma, hasta obtener una nueva imagen digital se realizan analíticamente. El resultado es una nueva imagen digital corregida, que puede ser reproducida fotográficamente.

Esquema de la generación de ortoimágenes

Se parte de la premisa de disponer de los datos vistos en el apartado anterior (imagen digital, certificado de calibración, modelo digital, etc.). En la figura se muestran los pasos a seguir en la generación de una ortofotografía digital. Se parte de una imagen "vacía", formada por un conjunto de píxeles sin asignación de valor de tonalidad (N_d), caracterizados por estar referidos al sistema de referencia terreno y por poseer un cierto tamaño físico, que constituye la resolución de la ortoimagen. Aplicando en sentido inverso (transformación inversa) las ecuaciones de colinealidad, se rellenará dicho valor de tonalidad.

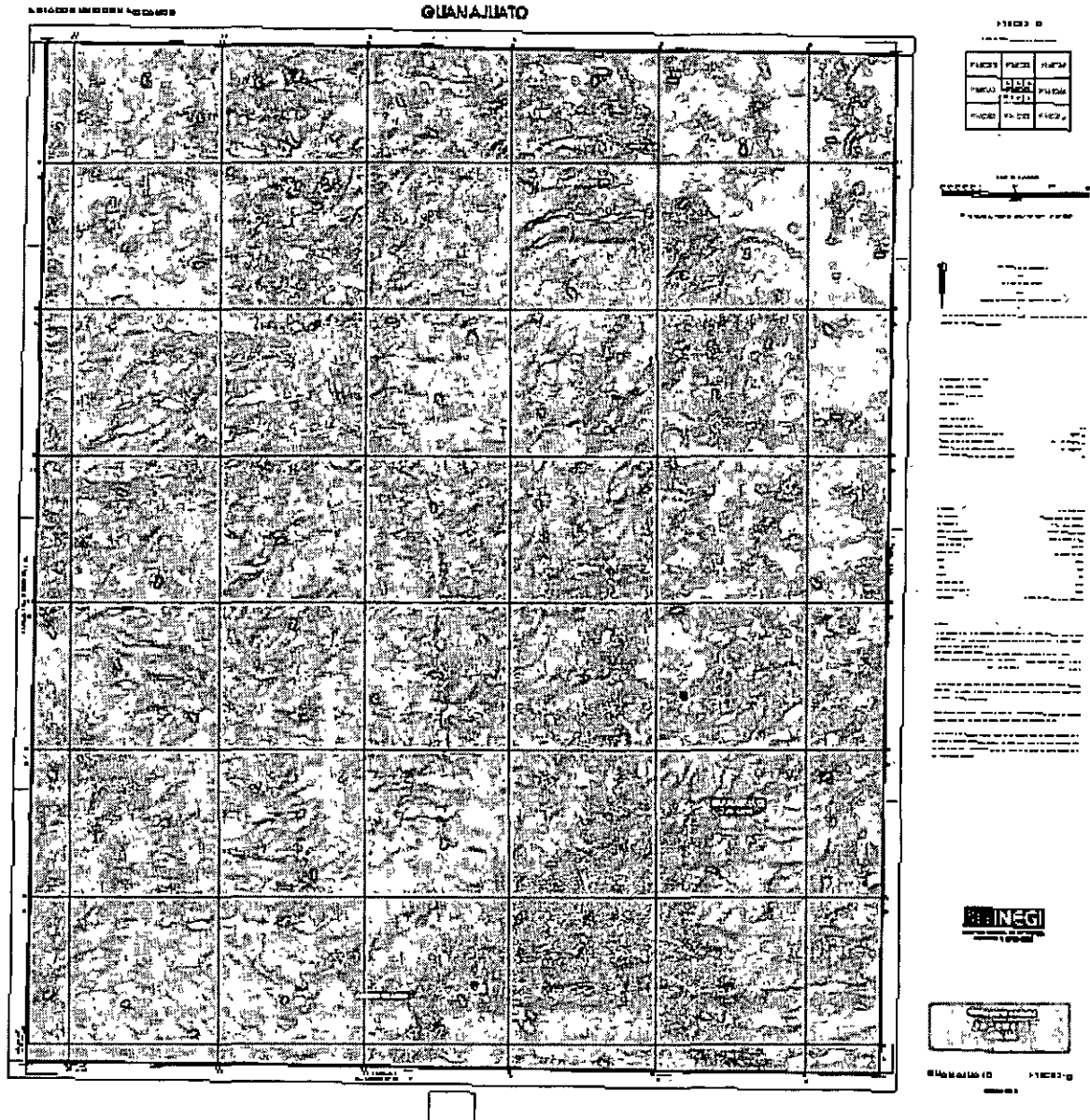


Propiedades de las ortofotos digitales

- Las ortofotos digitales están geocodificadas y ofrecen al menos la misma precisión que los mapas de línea. Cada píxel tiene una posición claramente determinada en el sistema de referencia empleado (UTM, Lambert, etc.)
- Están calibradas respecto a los colores y por medio de los módulos de ajuste radiométricos y de formación de mosaicos se pueden fundir dos o más ortofotos y producir una imagen de color homogénea de mejor calidad que la fotografía aérea original.
- Las ortofotos digitales son multitemporales. Los vuelos fotográficos con frecuencia se interrumpen por causas atmosféricas durante largos periodos, al cabo de los cuales pueden haber cambiado las condiciones de iluminación y los aspectos de los cultivos. Con esta tecnología pueden obtener documentos homogéneos sin las discontinuidades de color resultantes en los métodos clásicos. Gracias a esta cualidad, las ortofotos digitales pueden utilizarse para poner al día de una forma rápida los mapas existentes.
- Las ortofotos digitales pueden adoptar escalas variables, así como es posible fundir dos ortofotos digitales, también es posible.
- Las ortofotos digitales pueden adoptar escalas variables; a partir de una escala de consistencia se pueden formar ortofotos a distintas escalas (menores)
- Las ortofotos digitales son multispectrales. Al ser imágenes de tipo raster se pueden aplicar técnicas de clasificación a las fotos ya sean en color o en infrarrojo color. Las propiedades de multitemporal, multiescala y multispectral son exclusivas de las ortofotos digitales, y no existen en los documentos analógicos.
- Debido a sus propiedades multispectrales y multiescalares pueden compararse con datos provenientes de teledetección con objeto de completar el proceso de interpretación con otros canales multispectrales.
- Permiten la sobreimpresión de mapas de línea o temáticos para la formación de documentos más claros y precisos.
- Es obvio decir que se pueden utilizar para hacer cálculos de superficies, distancias, desplazamientos...etc.
- Se pueden adaptar a la superficie de un DTM para formar perspectivas, a menudo utilizadas en estudios de impactos ambientales.
- Debido a su carácter multidisciplinario, constituyen una fuente de datos muy útil para usuarios de GIS; por esta razón las ortofotos constituyen un complemento esencial de cualquier tipo de aplicación GIS al ofrecer información temática específica en formato vectorial y raster.

Fotomapas

Cada fotomapa escala 1:20 000, cubre un área de 6 minutos 40 segundos de longitud por 7 minutos 30 segundos de latitud. Seis fotomapas corresponden a una hoja escala 1:50 000. El fotomapa contiene una ortofoto con resolución de dos metros, los nombres de las principales localidades, los rasgos orográficos e hidrográficos de importancia, las curvas de nivel maestras y ordinarias, el caneavá y doble cuadrícula UTM, una referida al Datum NAD27 y otra al Datum ITRF92.



5.4 Mosaicos

Cada ortofoto se produce con un cierto grado de recubrimiento con respecto a sus vecinas. Durante el paso anterior se han eliminado las diferencias en el balance de color pero pueden aparecer otras perturbaciones como son:

- Diferencias en la orientación de las sombras (en edificios, bosques, etc.).
- Pequeñas discontinuidades geométricas como las que se presentan en puentes y edificios, relacionadas con efectos de paralaje. Recordemos que los modelos digitales de terreno definen la superficie topográfica y no tienen en cuenta las altitudes de puentes y edificios.
- Diferencias fenomenológicas en fotografías tomadas en las diferentes estaciones del año.

- Diferencias de reflectancia en zonas de agua (embalses, ríos, lagos). arenosas o de nieve.

En esta fase del proceso de imágenes solo se tienen en cuenta las zonas de recubrimiento entre las dos ortofotos consideradas. El área común se centra con respecto a unos límites reales comunes y a continuación comienza un proceso interactivo mediante el cual se define una trayectoria de corte en la zona común de tal modo que solo se va a guardar en la base de datos la parte correspondiente a cada una de las dos ortofotos. Esto tiene las ventajas de:

- Minimizar los efectos visuales de la paralaje.
- Minimizar los efectos visuales de las sombras.
- Realizar una representación homogénea en los casos de diferencias fenomenológicas.

La ausencia de la tercera dimensión en las ortofotos puede suplirse con ayuda de las *esteroortofotos*, necesitamos otra imagen que haga de par estereoscópico.

El principio básico puede observarse en la figura. Suponemos que tenemos un modelo tridimensional del terreno que nos sirven para generar la ortofoto y su par estereoscópico. Para la ortofoto, que es una proyección ortogonal de la superficie terrestre, los puntos de la malla se transforman mediante la transformación tridimensional de semejanza en puntos en la imagen creando una malla deformada de cuadriláteros en el sistema x, y de la imagen.

El mismo modelo tridimensional del terreno se somete a una proyección paralela inclinada y los vértices de la malla deformada en la imagen se determinan de la forma siguiente:

- Se genera una malla cuadrada en el plano XY con un tamaño de cuadrado igual que el del modelo digital del terreno.
- Generamos un modelo digital con una dirección inclinada con respecto al eje Z pero paralela al plano XZ .
- Realizamos la proyección de estas coordenadas XYZ en la imagen original.

