



## **PRINCIPIOS DE FOTOGRAMETRÍA**

### 1. INTRODUCCION

La fotogrametría, como parte de la interpretación de imágenes, es una disciplina que permite formular modelos 3D a partir de fotografías 2D; es una técnica de medición indirecta ya que las mediciones no se efectúan sobre el objeto, sino sobre imágenes del mismo.

La fotogrametría se apoya fundamentalmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva y de la visión estereoscópica que posee naturalmente el ser humano.

Esta técnica de análisis a distancia la convierte en una forma de análisis muy económica. Para los ingenieros es muy útil el conocimiento de estos conceptos ya que en su vida profesional como proyectista en más de una ocasión deberá recurrir a ella.

Es importante destacar que casi toda la cartografía relevada en el mundo ha sido generada a partir de la fotogrametría. Desde sus inicios hasta la actualidad la fotogrametría ha ido de la mano de la tecnología, dando pasos desde la fotogrametría analógica, pasando por la fotogrametría analítica, llegando hoy a la fotogrametría digital.

### 2. DEFINICIONES

La fotogrametría puede definirse como el arte, ciencia y tecnología cuyo fin es el de obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno, mediante procesos de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing- 1979).

La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas del objeto fotografiado (Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos).

La fotogrametría es la técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías (H. Bonneval)

Al interpretar estas definiciones resaltamos el carácter científico y cuantitativo de la fotogrametría, en clara asociación con las dimensiones, forma y posición espacial de los objetos fotografiados.

### 3. HISTORIA

Según Konecny (1981/5) la fotogrametría se desarrolla y evoluciona en cuatro etapas:

- a. Metrofotografía: de partir de 1850 hasta 1900. Se inicia con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue ideado por el coronel francés Laussedat hacia 1851; a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.
- b. Fotogrametría analógica: desde 1900 a 1960, ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y

por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.

- c. Fotogrametría analítica: desde 1969 hasta 1980, ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.
- d. Fotogrametría digital: desde 1980 hasta nuestros días, ciclo iniciado a partir del lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik de origen ruso y por el uso del satélite Landsat de origen estadounidense.

#### 4. CLASIFICACION DE LA FOTOGAMETRIA

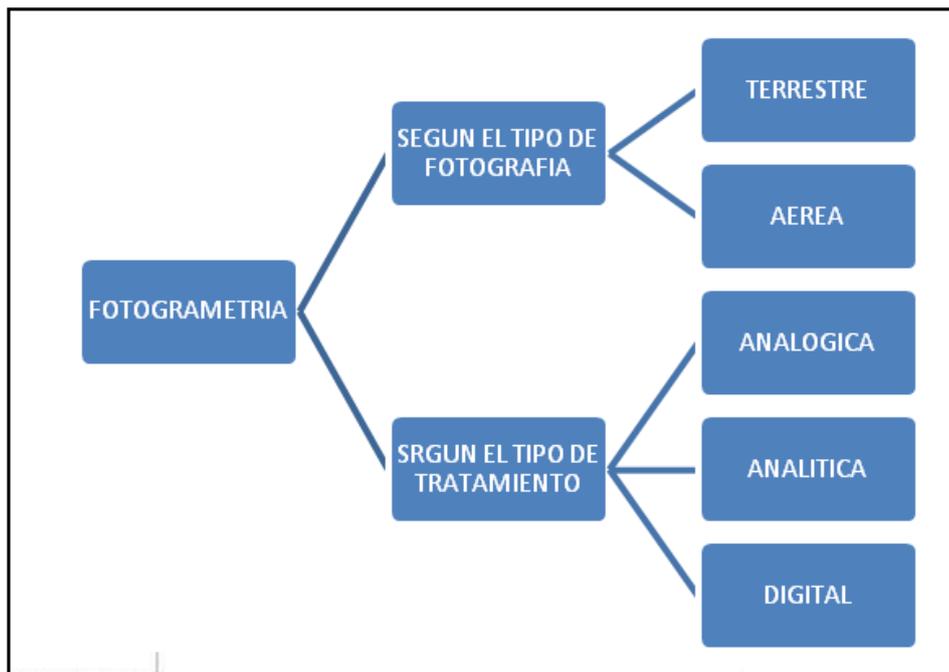


Figura nº 1: Clasificación de la fotogrametría.

- a) Fotogrametría Terrestre: tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología y se basa en el principio de la toma de fotografías desde la tierra, como la hacemos habitualmente; donde la posición de la cámara y el objeto es perfectamente conocida.
- b) Fotogrametría Aérea: es la que utiliza fotografías aéreas tomadas desde una cámara de toma de vistas, ubicada en una plataforma especial (avión).
- c) Fotogrametría analógica: se basa en la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realizaba la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado. Por otro lado la confección de mapas, con información planialtimétrica, se realizaba con el principio de la marca flotante o graficadoras basadas en este principio.
- d) Fotogrametría analítica: con la utilización de los restituidores analógicos y la incorporación de las computadoras se da inicio a la fotogrametría analítica. Se crea al restituidor analítico agilizando los tiempos y logrando niveles de detalle a diferentes escalas. Se posibilita el vuelco de la información a programas de tipo CAD.



- e) Fotogrametría digital: finalmente el avance tecnológico hizo posible llegar a la fotogrametría digital. El uso de las computadoras y los programas ó software aplicados dan origen a los modelos digitales del terreno 3D, etc.

Las imágenes digitales son ingresadas a la computadora y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien la computadora realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato raster o vectorial.

Lo interesante de esta salida (digital) es que puede ser utilizada, como más adelante se verá, como información de base para la generación de los conocidos Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Según su tratamiento es posible resumir lo siguiente (Figura nº 2):

Tipo de fotogrametría	Entrada	Procesamiento	Salida
Analógica	Película fotográfica	Analógico (óptico-mecánico)	Analógica
Analítica	Película fotográfica	Analítico (Computadora)	Analógica
Digital	Imagen digital	Analítico (Computadora)	Digital

Figura nº 2: Fotogrametría según su tratamiento.

## 5. APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRIA

Desde sus inicios fue utilizada con mucho éxito en la generación de mapas (cartas) con curvas de nivel, las cuales proporcionaban información planialtimétrica de una zona determinada. En nuestro país las cartas del Instituto Geográfico Militar (IGM), hoy Instituto Geográfico Nacional (IGN) fueron relevadas en su mayoría por estos métodos.

En la Ingeniería se utiliza esta técnica en el estudio de proyectos de rutas, autopistas, presas, canales, acueductos, oleoductos, gasoductos, obras de arquitectura, relevamientos catastrales, geológicos, agrícolas, uso del suelo, etc.

Las ventajas más relevantes que la disciplina propone son:

- Reducción de costos de proyecto, ya que según estudios económicos la rentabilidad del método frente a la tradicional topografía se hace cada vez mayor a medida que se incrementa el área de estudio (menor tiempo de trabajo).
- Registro multitemporal, en efecto al utilizar fotografías de una zona en un determinado momento, es posible la comparación con otras épocas, de modo que es posible determinar D cambios en el uso del suelo.
- Alternativa (única) para el relevamiento de regiones intransitables, ya sea por problemas topográficos, geográficos o políticos.

Entre las desventajas podemos consideramos:

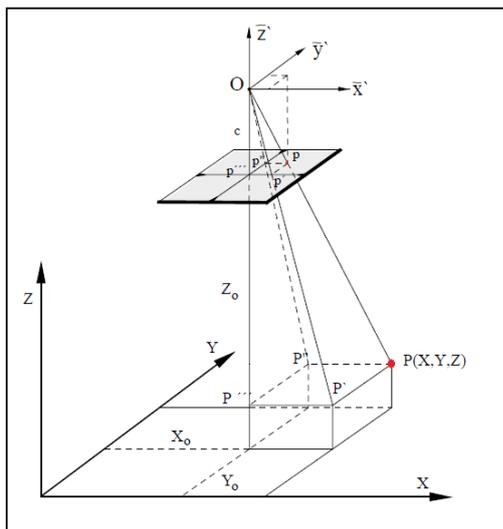
- Costo elevado para trabajos de poca envergadura.

- b. Utilización de personal muy calificado y de experiencia.

## 6. METODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRIA

El estudio de la fotogrametría surge, como sabemos, por la necesidad de obtener información en tres dimensiones a partir de información en dos dimensiones; es decir, se desea conocer el tamaño, las dimensiones y la posición espacial de los objetos.

El método o fundamento de la fotogrametría se basa en la obtención de dos fotografías aéreas verticales sucesivas, que toman un punto común del terreno y a partir de la restitución de los haces de proyección (restitución por aberraciones del objetivo, distorsiones generadas por deformaciones de la película o negativo, distorsiones atmosféricas y otras distorsiones por desviación de la vertical) es posible obtener las coordenadas del punto en ambas fotografías a partir de un eje de referencia relativo y de esta manera obtener semejanzas geométricas entre las dos imágenes.

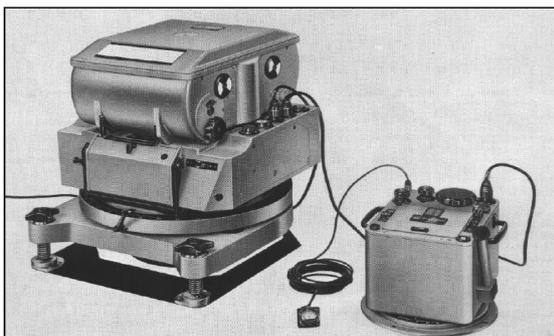


Obsérvese que el punto  $P(x, y, z)$  ubicado en el terreno es proyectado a la fotografía. Obedece al caso general en donde coinciden, en la vertical, el centro de la fotografía y el centro del terreno fotografiado ó nadir (Figura nº 3).

Figura nº 3: Proyección del punto "p" sobre la fotografía.

## 7. CAMARA FOTOGRAMETICA DE TOMA DE VISTAS

Cámara fotogramétrica de toma de vistas: es una cámara fotográfica especialmente diseñada, donde los elementos de orientación interior y su geometría son perfectamente conocidos y además el tipo de proyección central es ideal (Figuras nº4 y 5).



Cuenta principalmente con tres partes:

Almacén: lugar donde se alija el rollo de la película (negativo)

Cuerpo de la cámara: aloja los mecanismos de maniobra de la película, la bomba de vacío que deja perfectamente plano el negativo y las lentes del obturador.

Figura nº4: Cámara fotogramétrica de toma de vistas.

Ensamble del lente u objetivo: en esta parte se encuentran las lentes, el filtro y el obturador, todas estas debidamente calibradas y certificados por el fabricante.

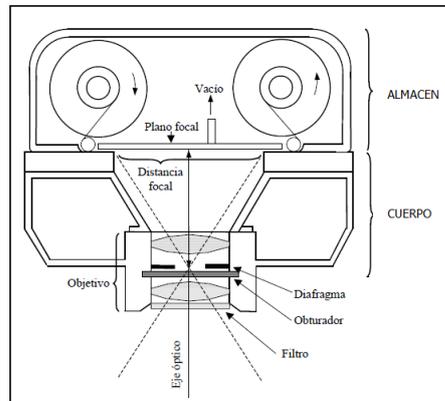


Figura n° 5: Partes de la cámara.

## 8. ELEMENTOS DE FOTOGRAMETRIA

- Plano focal:** representa el plano donde inciden los haces luminosos al obturarse la cámara, y que son plasmados en el negativo, generando así la imagen capturada. Además en él se dispone la información complementaria de la fotografía: marcas fieles y la información marginal.
- Marcas fieles o fuduciales:** son indicaciones en los bordes de la película, normalmente son cuatro flechas, puntos, etc. colocadas en forma opuesta y uniéndolos con una línea indican el punto principal de la fotografía (Figura n° 6).

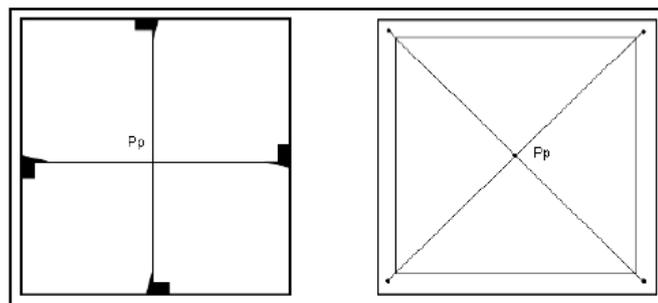


Figura n° 6: Marcas fieles.

- Información marginal:** compuesta por una serie de datos de gran utilidad como la altura de vuelo dada por el altímetro del avión (m.s.n.m.), reloj, nivel esférico de burbuja, identificación de la cámara de toma de vistas, número de fotografía y datos de la misión como la zona y fecha que se realizó el vuelo, entre otras.
- Punto principal:** representa el punto central de la fotografía, se lo obtiene luego de unir las marcas fieles opuestas. En el caso de las fotografías verticales debe coincidir con el nadir (o punto en el terreno directamente debajo de la cámara).
- Distancia focal:** o distancia principal, es la distancia que existe entre el centro de la lente y el plano focal, donde se apoya la película; en otras palabras es la distancia fija que existe entre el centro de la lente y la película (Figuras n° 7 y 8).

- f. **Eje óptico:** es el eje que pasa por el centro geométrico de la cámara y es perpendicular al negativo; en el caso de fotografías verticales es coincidente con la vertical del lugar (Figuras n° 7 y 8).
- g. **Altura de vuelo:** queda definida la altura de vuelo como la distancia que existe entre el terreno fotografiado y el centro de la lente (Figuras n° 7 y 8).
- h. **Escala:** es uno de los elementos más importantes de la fotogrametría (y de la interpretación de imágenes en general). Puede definirse como la relación que existe entre lo que mide un objeto en la fotografía ( $d$ ) y lo que representa realmente en el terreno ( $D$ ), o bien la relación que existe entre la distancia focal ( $f$ ) y la altura de vuelo ( $H$ ) (Figuras n° 7 y 8).

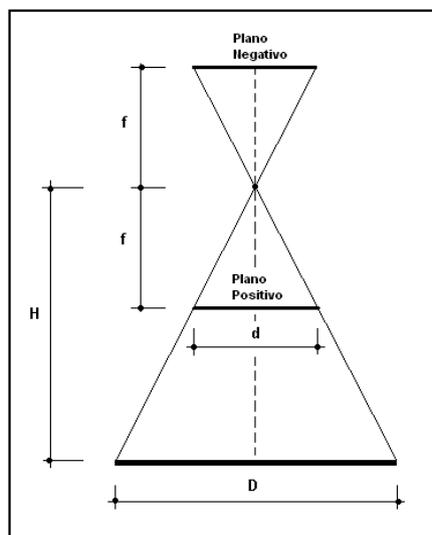


Figura n° 7: Diagrama básico de fotogrametría.

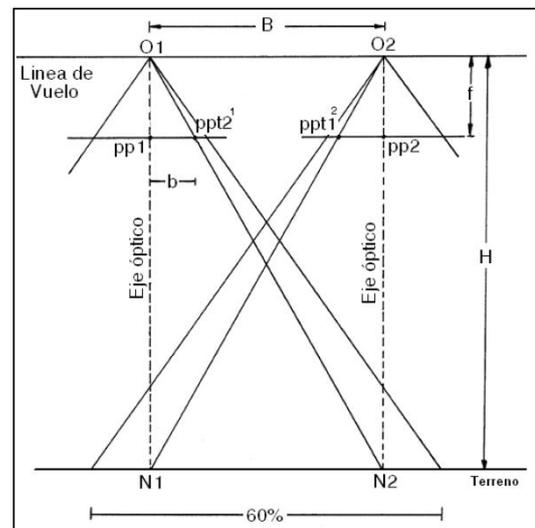


Figura n°8: Otros elementos de fotogrametría.

Analizando la expresión  $E = f/H$  y considerando la existencia de diferentes elevaciones del terreno (como valles y montañas) es posible darse cuenta que la altura de vuelo varía según la elevación del objeto fotografiado, y esto conlleva a decir que en presencia de un terreno accidentado la escala no es constante en todos los puntos de la fotografía.

- i. **Aerobase (B):** es la distancia que existe entre dos tomas sucesivas en el terreno, es decir es la distancia entre dos obturaciones de la cámara de toma de vistas (Figura n° 8).
- j. **Fotobase (b):** es la proyección de la aerobase en la fotografía (Figura n° 8).
- k. **Solape longitudinal:** es el solape necesario entre fotografías aéreas sucesivas que debe ser del 60% (50 a 60%) para permitir la estereovisión (Figura n° 9).
- l. **Solape transversal:** es el solape entre bandas o pasadas del vuelo, debe estar comprendido entre un 5 a 25%; su finalidad es la de permitir unir las fotografías para realizar los denominados foto-mosaicos apoyados o semi-apoyados (Figura n° 9).

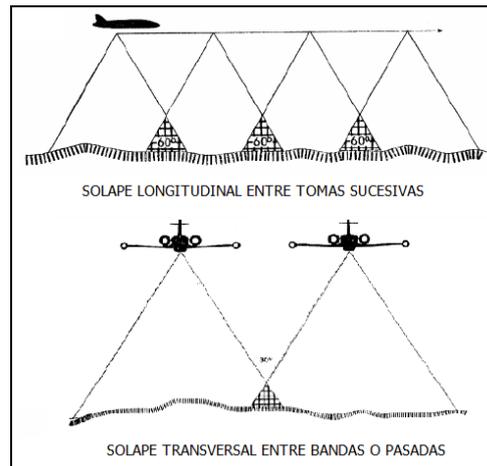


Figura nº 9: Solape longitudinal y transversal

- m. **Línea de vuelo:** queda definida uniendo puntos principales de fotografías sucesivas, es decir para poder realizar esta línea es imprescindible transferir los centros de la fotografía anterior y posterior a la fotografía central.
- n. **Proyección cónica o radial:** es la proyección que utilizan las fotografías, en donde todos los haces luminosos pasan por un punto (lente). Este tipo de proyección implica que un elemento vertical, sobre la superficie fotografiada, como por ejemplo un poste de luz ó un edificio sea representado en la imagen fotográfica como un segmento, orientado desde el centro hacia la periferia (Figuras nº 7 y 8).
- o. **Efecto de deriva:** el efecto de deriva es muy común en la aviación y se da cuando sobre él a avión inciden vientos laterales que tienden a desvíalo. El piloto se ve obligado a realizar una maniobra de compensación a fin de mantener el rumbo establecido o deseado, esta maniobra provoca que el avión tenga un ángulo de ataque respecto de la trayectoria y es por ello que las fotografías del terreno
- p. **Desviación (cabeceo y alabeo):** Efecto que se produce por los movimientos relativos de la plataforma utilizada (normalmente un avión), el cabeceo es el movimiento de la nariz del avión arriba y abajo; mientras que el alabeo es el movimiento de las alas (Figura nº 10).

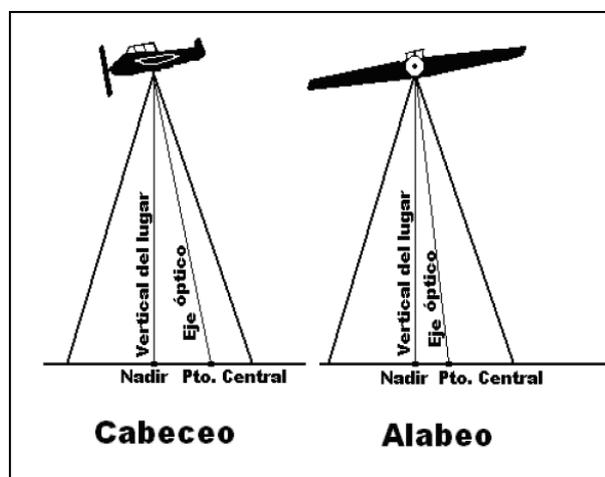


Figura nº 10: Cabeceo y alabeo en la toma.

## 9. COMPARACIÓN ENTRE FOTOGRAFÍAS AEREAS Y MAPAS (CARTAS)

Como sabemos uno de las aplicaciones de la fotogrametría es la de confeccionar cartas a partir del estudio y análisis de fotografías aéreas verticales.

Es importante destacar algunas diferencias fundamentales entre estos documentos, que podemos resumir en el siguiente cuadro (Figura n° 11).

CARTAS	FOTOGRAFÍAS AEREAS
Proyección ortogonal, paralela o vertical	Proyección central, cónica o radial
Escala uniforme o constante	La escala varía en función de la inclinación del eje óptico y por la existencia de diferencias de nivel (relieve)
Las características del terreno se representan a través de símbolos y leyendas, y hasta es posible representar los que no se ve. Es una representación abstracta	Las características del terreno se observan tal cual son en la realidad
No existen distorsiones	Existen distorsiones de la imagen, que se hacen mas evidentes al alejarnos del centro de la fotografía

Figura N° 11: Diferencias entre cartas y fotografías aéreas verticales.

## 10. ESCALA, CONCEPTO Y DETERMINACION.

Como mencionáramos más arriba, la escala es un concepto importantísimo en la interpretación de imágenes.

La escala se define como la relación que existe entre un segmento en la imagen y la verdadera magnitud del mismo en el terreno. Si analizamos la Figura n° 6, puede definirse a la escala como el cociente entre los segmentos  $d$  y  $D$ . Asimismo, si consideramos semejanzas de triángulos podemos decir también que dicha relación es igual al cociente entre la distancia focal ( $f$ ) y la altura de vuelo ( $H$ ) (Figura n° 7).

Nombraremos tres maneras de determinar la escala de una fotografía vertical:

1. Por la relación Fotografía-Terreno: corresponde a la definición clásica en donde la escala de una fotografía se obtiene haciendo la relación entre un segmento " $d$ " medido en la fotografía y lo que representa realmente en el terreno " $D$ ". Para aplicar este concepto es necesario conocer la verdadera distancia " $D$ " en el terreno, como las distancia entre dos ciudades, por ejemplo.



Ejemplo: Se desea determinar la escala de una fotografía, en la cual se observa una ruta, donde la cinta asfáltica es de 7,30 m. Realizando la medición en la fotografía obtenemos un segmento de 2 mm.

$$E = \frac{d}{D} = \frac{0,002m}{7.2m} = \frac{1}{3600}$$

2. Por la relación Fotografía-Carta: Esta forma de determinar la escala necesita apoyarse en una carta de la misma zona. Lo que se hace es relacionar la escala de la fotografía con la escala de la carta, según:

$$\frac{E_{foto}}{E_{carta}} = \frac{d}{dc} \Rightarrow E_{foto} = \frac{d}{dc} \times E_{carta}$$

Ejemplo: Sea una carta con escala 1:50.000 y la distancia entre dos puntos es de  $dc = 5$  cm, en la fotografía la distancia entre esos mismos puntos es de 10 cm. Finalmente la escala de la fotografía es 1:25.000.

3. Por la relación Distancia focal-Altura de vuelo: Otra forma de determinar la escala de una fotografía es conociendo la focal ( $f$ ) de la cámara de toma de vistas utilizada y la altura de vuelo ( $H_v$ ) al momento de la exposición. Esto supone que se conocen estos datos establecidos previamente en la planificación del vuelo aerofotogramétrico, es importante recordar que la altura de vuelo se obtiene restando la cota ( $h$ ) del terreno a la altura dada por el altímetro del avión.

$$E = \frac{f}{H_v} = \frac{f}{H - h}$$

Ejemplo: La distancia focal de la cámara utilizada es de 153 mm, la cota del terreno es 50 m.s.n.m y la altura de vuelo obtenida del altímetro registró 818 m. Finalmente la escala de la fotografía será 1:5.000.

Es importante remarcar que cuando se fotografía un terreno llano la escala puede decirse que será constante en toda la fotografía, presentando mínimas distorsiones cerca del centro de la misma.

Ahora al fotografiar un terreno accidentado, como una zona montañosa es lógico darse cuenta que existirán alturas de vuelo diferentes según el objeto esta más o menos elevado. Esto quiere decir que siendo la focal constante, al variar la altura de vuelo, la escala también lo hará.

Analizando la Figura nº 12, puede observarse que si bien los segmentos M, N, R y S tienen igual magnitud en el terreno, su representación en la foto implican segmentos diferentes ( $m, n, r, s$ ) tal que:  $m = n \neq r \neq s$ .

En el Plano 1 →  $E_1 = \frac{m}{M} = \frac{n}{N} = \frac{f}{H_1}$

En el Plano 2 →  $E_2 = \frac{r}{R} = \frac{f}{H_2}$

En el Plano 3 →  $E_3 = \frac{s}{S} = \frac{f}{H_3}$

⇒  $E_1 \neq E_2 \neq E_3$

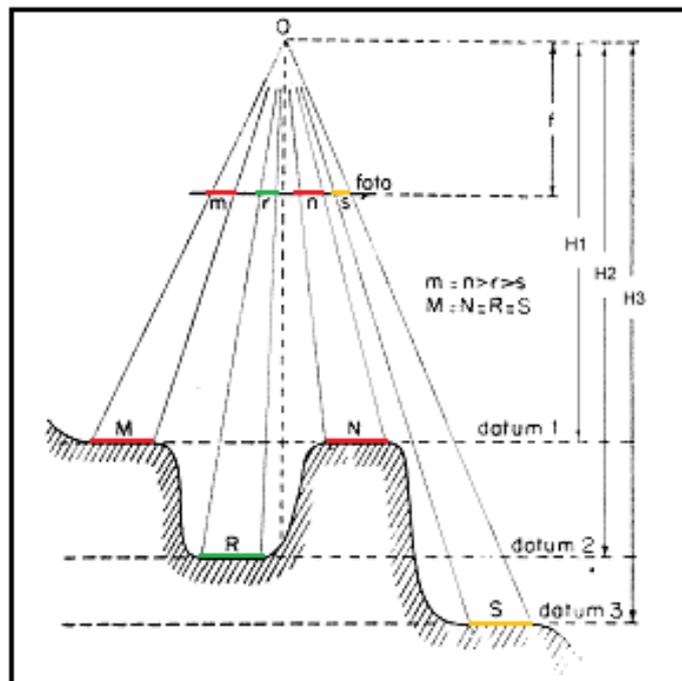


Figura nº 12: Escala variable en la fotografía con presencia de relieve.

Como conclusión podemos remarcar que la escala en una zona con relieve accidentado no es constante en todos los puntos de la fotografía

## 11. DEFORMACIÓN DEBIDA AL RELIEVE

Como sabemos las fotografías verticales son tomadas con una proyección cónica, es decir que los objetos como edificios, chimeneas, pilas de un puente, etc. se verán como acostados en la imagen. (Figura nº 13). Esta característica, dada por el tipo de proyección permite determinar la altura de un objeto, cuando es posible distinguir el punto más bajo y el más alto del mismo.

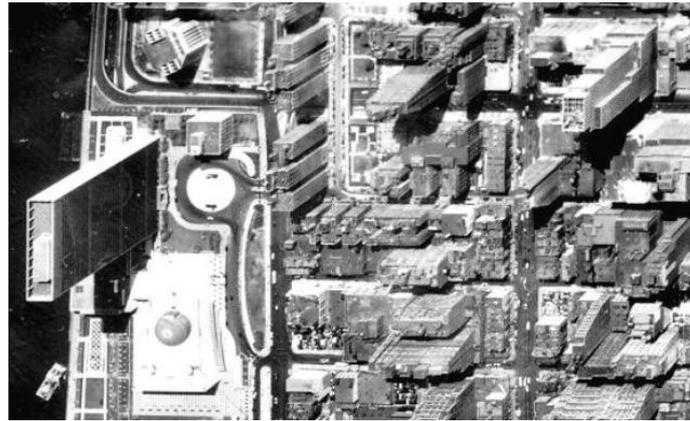


Figura nº 13: Deformación debida al relieve.

Este objeto vertical puede asemejarse a un segmento acostado según una dirección radial desde el centro de la fotografía hacia afuera de la misma, y se lo denomina justamente deformación debida al relieve (**dr**).

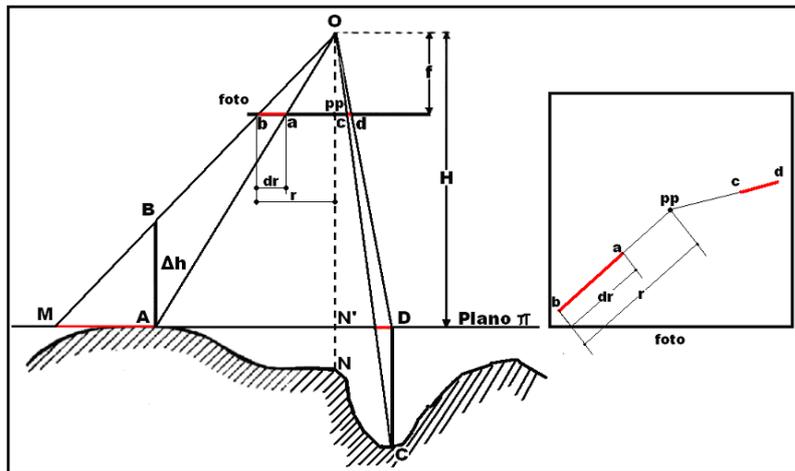


Figura nº 14: Deformación debida al relieve.

Analizando la figura nº 14, los extremos **A** y **B** del objeto de altura  $\Delta h$  (edificio, chimenea, etc.), aparecen representados por los puntos **a** y **b** como un segmento en la fotografía.

Es posible determinar la altura  $\Delta h$  del objeto analizando triángulos semejantes:

Como el triángulo Oab es semejante al triángulo OAM, sus bases son proporcionales:

$$\frac{ab}{f} = \frac{dr}{f} = \frac{MA}{H_{\pi}} \quad \Rightarrow \quad dr \cdot H_{\pi} = f \cdot MA \quad (1)$$

Considerando además la semejanza que existe entre los triángulos ON'B' y MAB:

$$\frac{r}{f} = \frac{MA}{\Delta h} \quad \Rightarrow \quad r \cdot \Delta h = f \cdot MA \quad (2)$$

Igualando (1) y (2):  $\Rightarrow \quad dr \cdot H_{\pi} = r \cdot \Delta h$



$$\Rightarrow \boxed{dr = \frac{r \cdot \Delta h}{H_{\pi}}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta h = \frac{dr \cdot H_{\pi}}{r}}$$

Analizando las fórmulas anteriores puede concluirse lo siguiente:

1. La deformación debida al relieve (**dr**) es directamente proporcional a la distancia que se encuentra la parte superior del objeto del centro de la fotografía (medido por el segmento **r**). Esto implica que la deformación debida al relieve será mayor en los márgenes que en el centro de la foto. En el Nadir (centro de la foto), donde **r** es nulo, **dr** también resultará nulo.
2. La deformación debida al relieve (**dr**) es directamente proporcional también a la diferencia de altura entre A y B ( $\Delta h$ ). Por lo tanto, si el relieve es plano ( $\Delta h = 0$ ) la deformación debida al relieve será nula.
3. La deformación debida al relieve (**dr**) es inversamente proporcional a la altura de vuelo  $H_{\pi}$ . A mayor altura de vuelos menores serán las deformaciones. Esto explica por ejemplo, porqué resultan más útiles las fotografías aéreas que las imágenes satelitales para estimar diferencias de alturas.

#### 11.1. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA MEDIR **dr**

Para estimar la altura de un objeto vertical observado en una fotografía se puede seguir el siguiente procedimiento:

1. Conocida la escala media de la fotografía establecida para el plan de vuelos y la distancia focal de la cámara, se estima la altura de vuelo:  $H_{\pi} = E \times f$
2. Se miden en la fotografía los segmentos **r** y **dr** según se observa en el Figura N° 15.

3. Se aplica la expresión: 
$$\Delta h = \frac{dr \cdot H_{\pi}}{r}$$

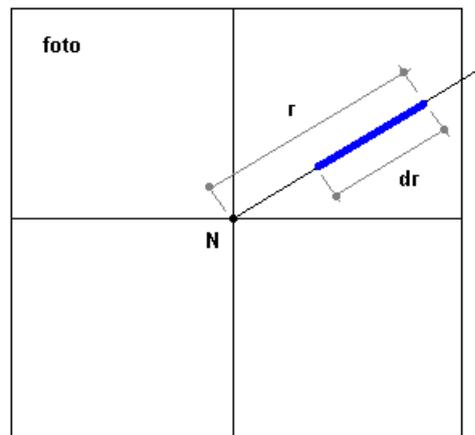


Figura n° 15: Procedimiento práctico.

## 12. DIFERENCIA DE PARALAJE

La fórmula de deformación debida al relieve vista en el tema anterior permite estimar diferencias de alturas entre dos puntos observados en la fotografía que se encuentran en una misma vertical. Cuando es necesario estimar la diferencia de altura entre dos puntos que no se encuentran en una misma vertical se debe aplicar otro procedimiento conocido como **Fórmula de la Diferencia de Paralaje**.

Si recordamos los conceptos dados en "Introducción a la percepción remota" llamamos **paralaje** de un objeto, al desplazamiento relativo que sufre dicho objeto al ser observado desde dos puntos de vista diferentes. Es posible verificar lo anterior realizando un ejercicio que consiste en observar alternadamente un lápiz con un ojo y luego con el otro, así es posible distinguir ese desplazamiento relativo.

Además matemáticamente se define como paralaje de un punto P cualquiera, a la diferencia en valor absoluto de las coordenadas del punto medidos en dos fotografías sucesivas, a partir de un sistema de ejes coordenados donde el eje "x" coincide con la línea de vuelo y el eje "y" pasa por el punto principal de cada fotografía.

Por otro lado es importante conocer el concepto de fotobase ajustada a un plano. Si recordamos la distancia entre dos tomas sucesivas, sobre el terreno, se denomina Aerobase (B) y la proyección de dicha aerobase en la fotografía se denomina fotobase (b) (Figura n° 15).

### 12.1. FOTOBASE AJUSTADA A UN PLANO

Por lo visto en temas anteriores, si el terreno es perfectamente plano, la escala será constante en toda la fotografía. Si consideramos que la escala es la relación entre un segmento en la fotografía y su verdadera magnitud en el terreno, la escala puede definirse entonces como la relación de la fotobase (b) y la aerobase (B).

$$\Rightarrow E = \frac{f}{H} = \frac{b}{B}$$

Como la aerobase es una constante para una fotografía (ya que es la distancia entre tomas sucesivas), y si la escala es constante en todos los puntos de un plano horizontal, la fotobase ( $b$ ) será también constante (Figura n° 16).

⇒  $b = B \times E = \text{constante}$

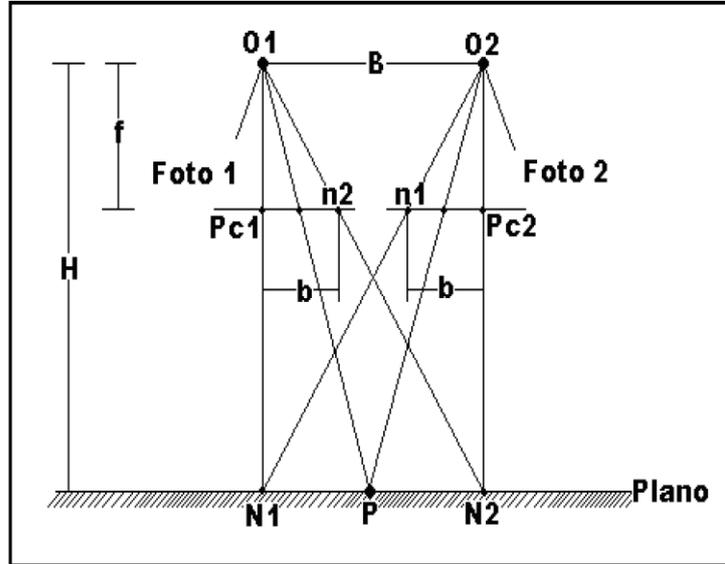


Figura 16: Fotobase ajustada a un plano.

Por otro lado si existe relieve topográfico, habíamos concluido que la escala no resulta constante en todos los puntos de una fotografía ( $E_i \neq$  en cada plano). De esta manera, aunque la aerobase ( $B$ ) sea una constante debido al relieve topográfico existirán distintas fotobases, una para cada plano horizontal considerado. Es decir, existe una Fotobase ( $b_i$ ) Ajustada a cada plano  $\pi_i$  considerado.

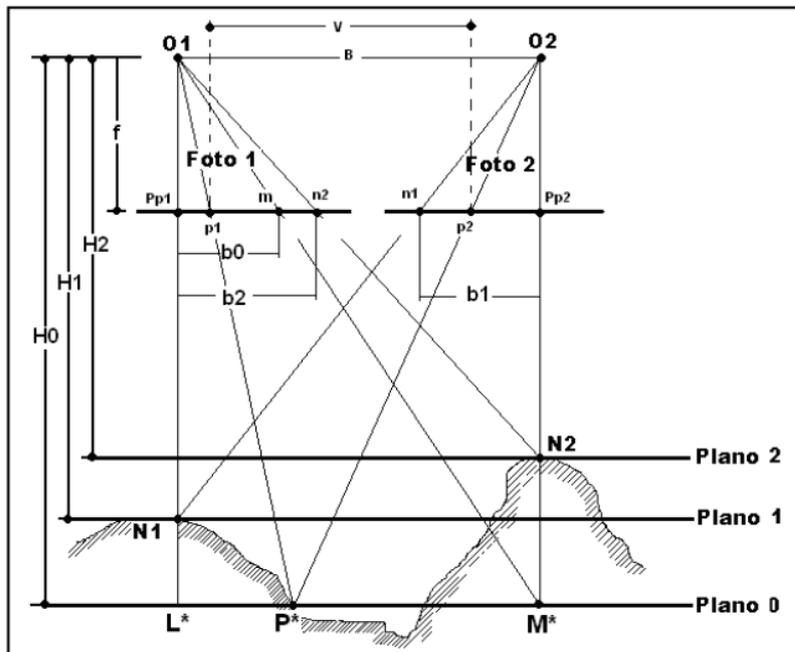


Figura 17: Fotobases de los planos 1 y 2.

De la figura n° 17 obtenemos:

En la fotografía 1 proyectamos el nadir  $N_1$ , al cual, en la fotografía, le corresponde el punto principal  $Pp_1$  y el punto  $N_2$ , que le corresponde  $n_2$ .  
El segmento  $n_2Pp_1$  representa la fotobase ajustada al plano  $2$ , denominada  $b_2$ .

En la fotografía 2 proyectamos el nadir  $N_2$ , al cual, en la fotografía, le corresponde el punto principal  $Pp_2$  y el punto  $N_1$ , que le corresponde  $n_1$ .  
El segmento  $n_1Pp_2$  representa la fotobase ajustada al plano  $1$ , denominada  $b_1$ .

Comparando las fotobases  $b_1$  y  $b_2$ , es posible ver que son distintas en magnitud, en efecto  $b_2 > b_1$ ; esta diferencia de magnitud puede ser relacionada con la altura del plano que contiene al punto estudiado, es decir que comparando fotobases estamos comparando diferentes planos, los cuales están separados una cierta distancia, en otras palabras será posible determinar la diferencia de altura entre estos planos, de modo que será posible conocer la altura de diferentes puntos tomando como base un plano cualquiera.

Otra conclusión es que todo punto contenido en un plano cualquiera posee una única fotobase, la cual es constante. Es decir, si estudiamos muchos puntos que tengan como resultado fotobases iguales decimos que se encuentran contenidos en el mismo plano, lo cual nos permite trazar curvas de nivel al unir los mismos.

## 12.2. FORMULA DE DIFERENCIA DE PARALAJE

Si analizamos el punto  $P$  (en la fotografía 1) éste posee una fotobase ajustada al plano que lo contiene, es decir  $b_0$ , que se representa por el segmento  $mPp_1$ ; pero como el punto  $M^*$  no se lo puede ver en la fotografía (ya que se encuentra dentro de la montaña) podemos expresar la fotobase al plano 0 como:

$$b_0 = Pp_1p_1 + p_1m$$

Observando los triángulos semejantes  $PO1M^*$  y  $PO2M^*$ , como poseen igual base ( $PM$ ) y altura de vuelo  $H_0$ , podemos ver que el segmento  $p_1m$ , en la fotografía 1 es igual que el segmento  $p_2Pp_2$  en la fotografía 2, entonces:

$$b_0 = Pp_1p_1 + Pp_2p_2 = B - V \text{ (ver figura n° 18)}$$

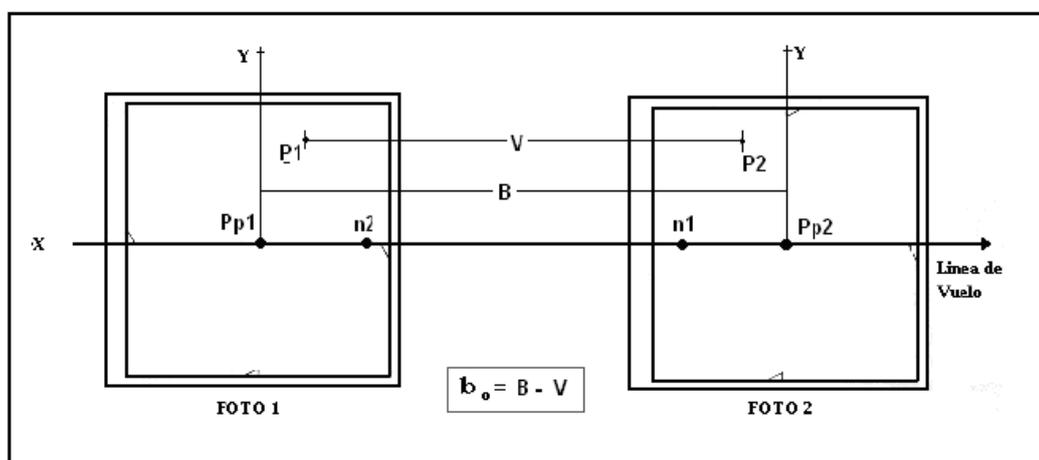


Figura n° 18: Determinación de la fotobase ajustada a un plano.

Supongamos que se desea conocer la diferencia de altura ( $\Delta h$ ) que existe entre un punto P cualquiera y otro punto Q, también genérico. El punto P se encuentra ubicado en un plano con una altura de vuelo H y el punto Q sobre otro plano con altura de vuelo  $H_0$  de manera que la diferencia de altura entre ambos planos resulta  $\Delta H = H_0 - H$  (Figura n° 19)

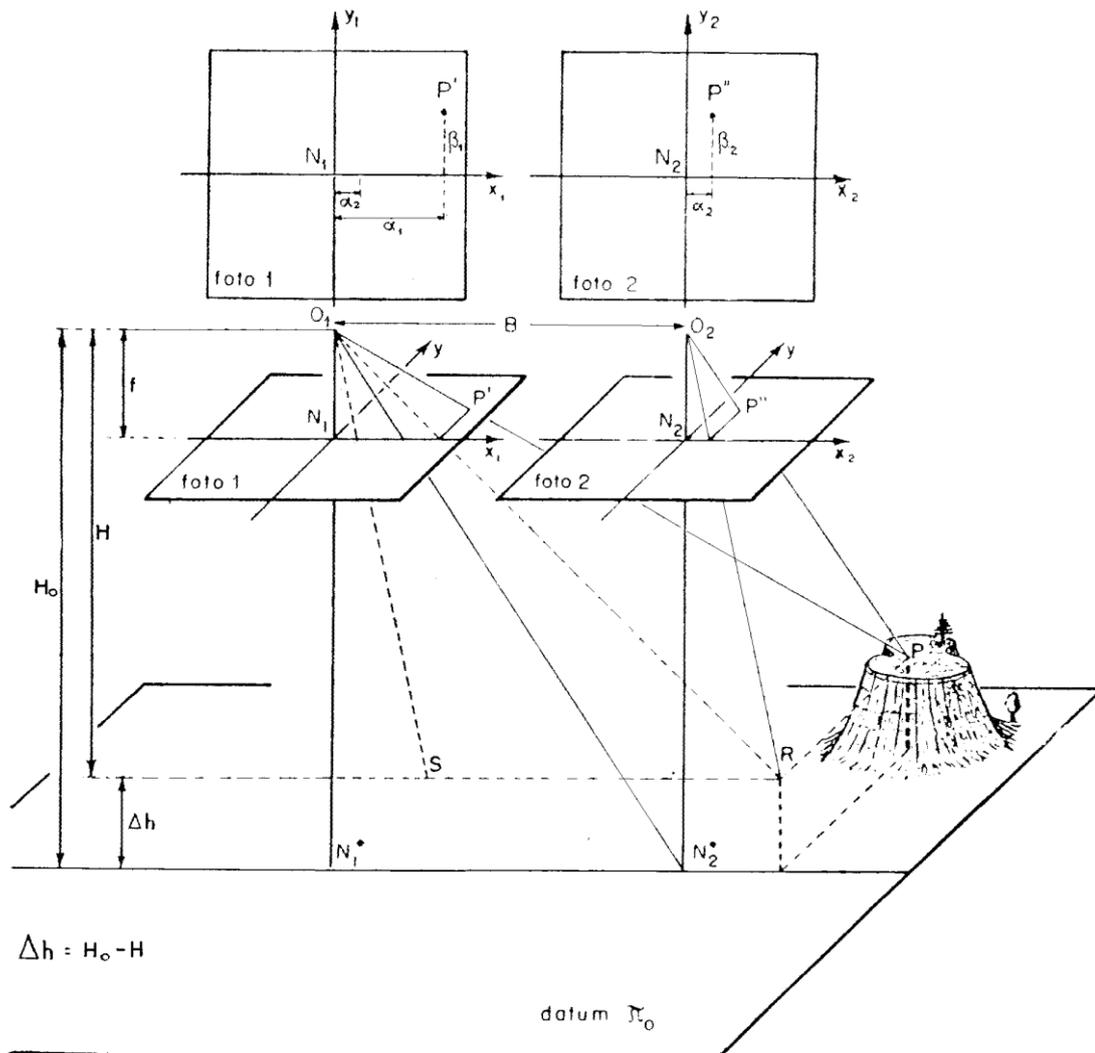


Figura 19: Diferencia de altura entre el P y Q.

Para determinar la diferencia de altura ( $\Delta h$ ) se utilizará el siguiente procedimiento:

1. Se definen ejes cartesianos ( $x, y$ ) en cada foto, de manera que el eje x coincida con la línea de vuelo.
2. Se define el punto genérico P y sus coordenadas en ambas fotos:  
Foto 1  $\Rightarrow P' (\alpha_1, \beta_1)$   
Foto 2  $\Rightarrow P' (\alpha_2, \beta_2)$
3. Se define como Paralaje Estereoscópico del punto P al valor absoluto de la diferencia algebraica entre las dos abscisas:

$$px = |\alpha_1 - \alpha_2|$$



4. Si consideramos al segmento  $O_1S$  paralelo al segmento  $O_2R$  y analizamos semejanzas entre triángulos tendremos:

$$\frac{|\alpha_1 - \alpha_2|}{f} = \frac{B}{H} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_x}{f} = \frac{B}{H} \quad \Rightarrow \quad p_x = \frac{B * f}{H}$$

Es decir, la paralaje de P no depende de las coordenadas de P, sino de B, f y H.

5. Como la aerobase (B) y la distancia focal (f) son constantes para una fotografía, y la altura de vuelo (H) es constante para un plano determinado, se concluye que la paralaje  $p_x$  es constante para todos los puntos del plano al que pertenece el punto P.
6. Si consideramos ahora otro punto genérico Q sobre el plano  $\pi_0$  que posea las siguientes coordenadas en los ejes cartesianos (x,y) definidos:

$$\text{Foto 1} \Rightarrow Q' (\gamma_1, \delta_1)$$

$$\text{Foto 2} \Rightarrow Q'' (\gamma_2, \delta_2)$$

Si seguimos el mismo procedimiento aplicado a P resultaría que la paralaje de Q es:

$$p_{x_0} = \frac{B * f}{H_0}$$

$\Rightarrow$  La paralaje de cualquier plano es igual a la Fotobase Ajustada a al plano que lo contiene, entonces:

$$b_0 = \frac{B * f}{H_0}$$

7. Considerando lo visto anteriormente, la Diferencia de Paralaje entre dos puntos genéricos P y Q ubicados en los planos  $\pi$  y  $\pi_0$  respectivamente resulta:

$$\Delta p_x = p_x - p_{x_0}$$

8. Si la paralaje de un punto es constante para todos los puntos de ese plano, la **Diferencia de Paralaje** entre dos planos también será **constante**.

$$\text{como } p_x = \frac{B * f}{H} \quad \text{y} \quad p_{x_0} = \frac{B * f}{H_0}$$

luego:

$$\Delta p_x = \frac{B * f}{H} - \frac{B * f}{H_0} = \frac{B * f * H_0 - B * f * H}{H * H_0} = \frac{B * f * (H_0 - H)}{H * H_0} = \frac{B * f * \Delta h}{H * H_0}$$

$$\Rightarrow \Delta p_x = \frac{B * f}{H_0} * \frac{\Delta h}{H}$$



recordando que la fotobase ajustada al plano  $b_o$  es igual a  $b_o = \frac{B * f}{H_o}$  la expresión anterior resulta:

$$\Delta p_x = b_o * \frac{\Delta h}{H}$$

Como  $H = H_o - \Delta h$ :

$$\Delta p_x = b_o * \frac{\Delta h}{H_o - \Delta h}$$

Operando matemáticamente para despejar  $\Delta h$ :

$$\Delta p_x * (H_o - \Delta h) = b_o * \Delta h$$

$$\Delta p_x * H_o - \Delta p_x * \Delta h = b_o * \Delta h$$

$$\Delta p_x * H_o = b_o * \Delta h + \Delta p_x * \Delta h$$

$$\Delta p_x * H_o = \Delta h * (b_o + \Delta p_x)$$

$$\Rightarrow \Delta h = \frac{\Delta p_x * H_o}{b_o + \Delta p_x}$$

### 12.3. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA MEDIR LA DIFERENCIA DE PARALAJE

Supongamos que queremos determinar el desnivel entre dos puntos cualesquiera P y Q que aparecen en una fotografía según la expresión:

$$\Delta h = \frac{\Delta p_x * H_o}{b_o + \Delta p_x}$$

Como la paralaje de cualquier plano es igual a la fotobase ajustada a dicho plano, la diferencia de paralaje es justamente la diferencia de fotobases entre los planos que contienen al punto P y al punto Q.

Observando la Figura N° 20, la fotobase el punto P se obtiene como diferencia entre B y V.

$$b = B - V$$

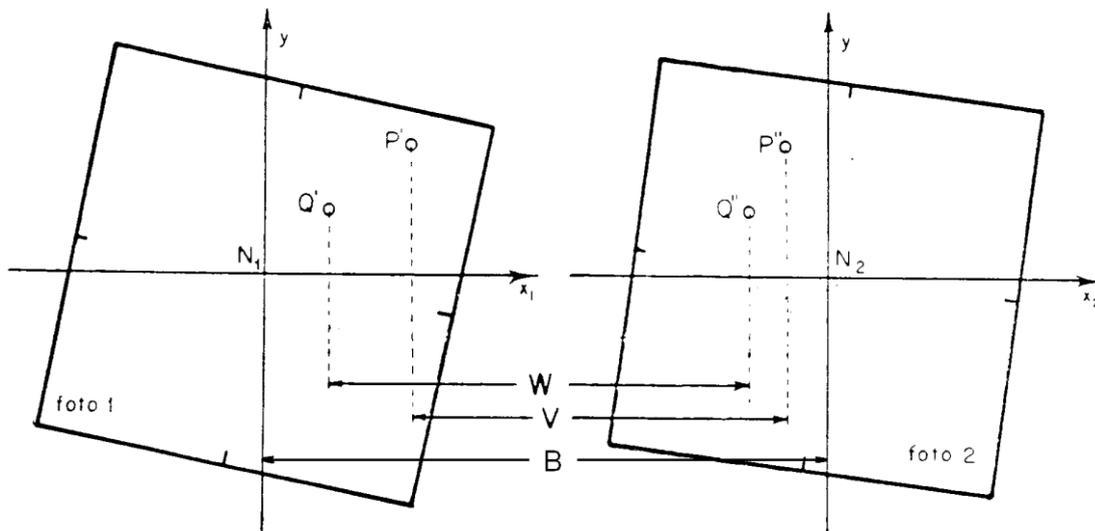


Figura n° 20: Determinación práctica de la diferencia de paralaje.

De la misma manera podríamos proceder para determinar la fotobase ajustada al plano del punto Q:

$$b_o = B - W$$

Luego la diferencia de paralaje para calcular  $\Delta h$  resultaría:

$$\Delta p_x = p_x - p_{x0} = b - b_o = (B - V) - (B - W) = W - V$$

Es decir, puede utilizarse el siguiente procedimiento para determinar la diferencia de altura entre dos puntos P y Q:

1. Marcar los centros de cada foto siguiendo sus marcas fiducias ( $N_1$  y  $N_2$ )
2. Transferir dichos centros a las fotos contiguas ( $N'_1$  y  $N'_2$ )
3. Definir la línea de vuelo de cada fotografía
4. Montar las dos fotografías respetando la alineación de vuelo y fijarlas a una determinada distancia genérica.
5. Identificar dos puntos P y Q entre los cuales se desee determinar la diferencia de altura. El punto Q debe pertenecer a un plano del que se conoce la altura de vuelo ( $H_o$ ) y la fotobase ajustada ( $b_o$ ).
6. Medir la distancia (V) entre  $P'$  y  $P''$  según una dirección paralela a la línea de vuelo (ver Figura N° 10)
7. Medir la distancia (W) entre  $Q'$  y  $Q''$  según una dirección paralela a la línea de vuelo (ver Figura N° 10).
8. Calcular:  $\Delta p_x = W - V$

Conocidos  $H_o$  y  $b_o$  del plano que contiene a  $Q$ , calcular:

$$\Delta h = \frac{\Delta px * H_o}{b_o + \Delta px}$$

### 13. INSTRUMENTOS PARA OBSERVAR Y MEDIR

El elemento que permite la visión estereoscópica es el llamado Estereoscopio o estereoscopio, entre los variados modelos existentes individualizaremos el de bolsillo y el de espejos.

Los **estereoscopios de bolsillo** tienen dos lentes separadas entre sí, por una distancia igual a la interpupilar (6,50 cm aproximadamente), montadas en un marco plástico o metálico soportado por patas, de forma tal que las fotografías son observadas a través de dichas lentes.

La distancia entre las lentes y las fotografías sobre las cuales se apoya el estereoscopio, corresponde a la distancia focal, de forma tal que la observación se realiza al infinito y con ejes paralelos.

Estos instrumentos normalmente son pequeños y compactos, así como livianos; siendo en su gran mayoría diseñados para su uso en el campo, teniendo patas plegables que transforman la unidad en un paquete no mayor a un estuche de anteojos, es por ello que son utilizados en campo por su fácil transporte (Figura n° 21)

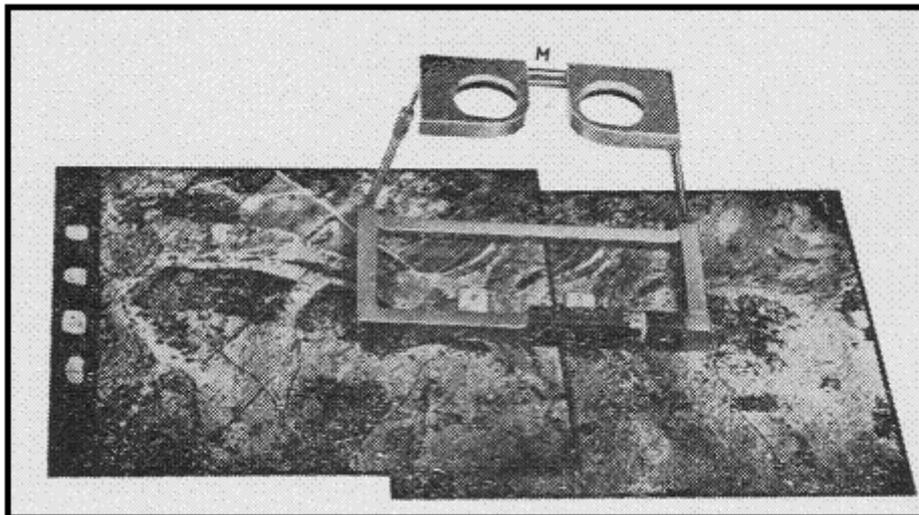


Figura n° 21: Estereoscopios de bolsillo. Obsérvese la superposición de las fotografías montadas.

El pequeño porte del instrumento impide tener una visión total del modelo estereoscópico. (Normalmente no brindan un campo de visión muy extenso, observándose sólo una porción del modelo a la vez.)

La reducida distancia entre las lentes, combinada con la observación ortogonal de las fotos, hace necesario que éstas deban ser colocadas muy juntas o aún solaparlas (dependiendo de su formato), quedando áreas ocultas a la observación lo que puede obligar a doblar una fotografía para poder trabajar en la zona cubierta.

A pesar de estas pequeñas desventajas, el estereoscopio de bolsillo es uno de los más usados en fotointerpretación, con la ventaja de ser de bajo costo.

Los estereoscopios de bolsillo tienen lentes con un aumento entre 1.5X y 4X, lo que permite un estudio suficientemente detallado con un campo no demasiado reducido.

Los modelos de mayor aumento, por ejemplo: 3X o 4X que pueden ayudar en la observación de detalles pequeños, pero por el hecho de requerir distancias focales más cortas, tienen el inconveniente de tener una posición más baja y cercana a las fotografías, con los consiguientes problemas de iluminación y dificultades para la anotación.

Para su uso, las fotografías deben colocarse alineadas siguiendo la línea de vuelo, con las imágenes homólogas separadas una distancia igual o ligeramente menor a la distancia interpupilar del observador, debiendo realizarse la observación con el estereoscopio también alineado con la línea de vuelo, desplazándolo, en caso necesario, paralelamente a ésta.

Los **estereoscopios de espejos** consisten en cuatro espejos ubicados de tal manera que las imágenes se transmitan por reflexión a los oculares, realizándose la observación de las fotografías en forma ortogonal, es decir alineando verticalmente el eje óptico del observador. Las fotografías se ubican a una distancia de 25 cm, con lo que se evita la superposición de las imágenes, ampliando el campo de visión estereoscópica (Figura n° 22)

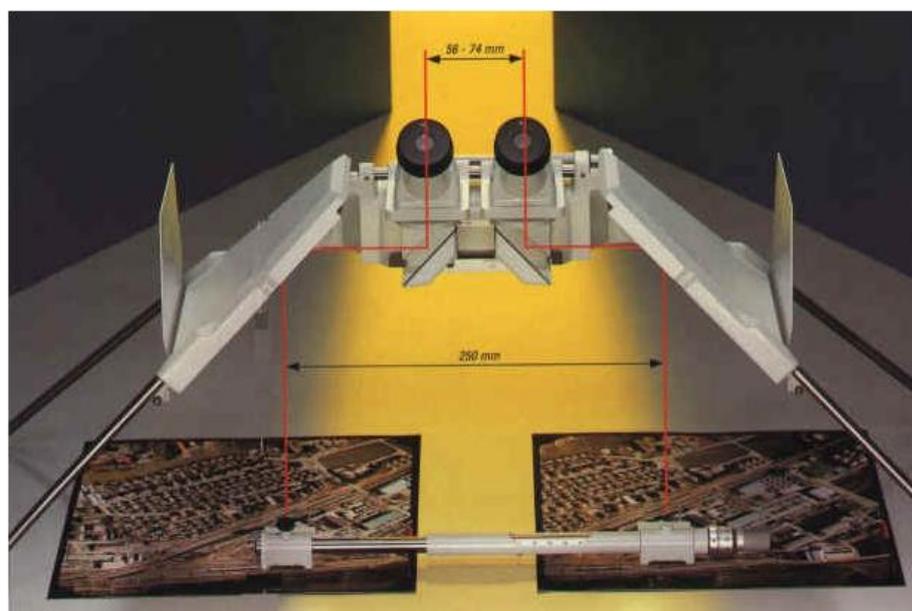


Figura n° 22: Estereoscopio de espejos.

Las fotografías se colocarán, como ya se ha dicho, alineadas según la dirección de vuelo, separando las imágenes homólogas una distancia igual a la llamada "distancia de base" del estereoscopio, colocándose éste alineado según la línea de vuelo y las imágenes a observar en el centro de los campos de visión.

La distancia de base del estereoscopio es la que corresponde a la distancia entre las intersecciones de los caminos ópticos de los pares de espejos con la superficie de observación, normalmente de 25 cm.

Dado que estos estereoscopios son normalmente voluminosos, no son fáciles de transportar, estando diseñados para uso en la oficina sobre mesas amplias.

Brindan imágenes claras sin distorsión. Poseen campos de visión amplios (cuando se usan sin oculares de aumento), que posibilitan la observación de la totalidad del modelo estereoscópico.

Normalmente se les puede adicionar oculares de aumento, por ejemplo: 3X, 6X, 8X. El aumento de la potencia de los oculares, obviamente reduce el campo de visión. No resulta conveniente, excepto para observaciones muy detalladas, el trabajar con aumentos superiores a 3X o 4X, por lo reducido del campo visual y la posible observación del grano de las fotografías.

La **barra de paralaje** es un elemento de medida que tiene dos placas transparentes con marcas de referencia idénticas en ellas (puntos, círculos, cruces, etc.), unidas por un sistema mecánico, que permite separar las placas entre sí, siendo la izquierda fija y la derecha móvil; midiéndose una cantidad directamente referida a la distancia entre ellas, mediante una escala y un micrómetro.

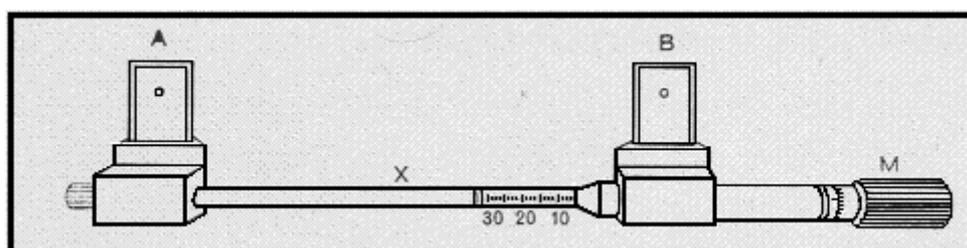


Figura n° 23: Barra de paralaje

Manteniendo la barra paralela a la dirección de vuelo y estando las fotografías correctamente emplazadas para observación bajo el estereoscopio de espejos (separadas 25 cm) se busca un punto homólogo, luego la placa transparente solidaria al micrómetro puede ser movida, hasta lograr que la marca se fusione (las cruces se superponen al observar estereoscópicamente las fotografías). Cuando se obtiene la sensación de que esa "marca flotante" se encuentra apoyada en el terreno, habremos puesto las marcas sobre elementos homólogos, pudiendo realizar la lectura de la barra.

El repetir el procedimiento sobre otro punto y hacer la diferencia de las lecturas, nos dará la paralaje relativa de un punto con respecto al otro ( $B - V$  o  $B - W$ ); valor que ingresaremos en la fórmula de diferencia de paralaje, para el cálculo de la diferencia de nivel entre ellos (Figura n° 23).

#### 14. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

La fotogrametría digital surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos utilizando computadoras y software especiales.

A partir de la era digital aumentaron las posibilidades de explotar las imágenes extrayendo mucha información, permitiendo la generación de modelos digitales de elevación del terreno, orto-imágenes, estéreo-imágenes, visualización tridimensional del terreno, obtención de perfiles transversales, etc.

La simplicidad del formato digital hace muy fácil el tratamiento de las imágenes para restituir las; las imágenes digitales son ingresadas al computador y mediante la visualización en pantalla el operador ubica los puntos para realizar el proceso de orientación en forma matemática.

Esto permite que el operador realice manualmente la restitución (supervisada) o bien lo haga la computadora en forma automática (no supervisada).

Cuando operamos con imágenes digitales la salida puede ser en dos formatos, el Raster o el Vectorial.

#### 14.1. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL

La **entrada de datos** empieza con la toma de la imagen sea cual sea su origen: fotografías aéreas escaneadas en un sistema de gran precisión o bien imágenes de satélite capturadas con sensores (SPOT, Landsat), y por último imágenes digitales capturadas con cámaras digitales.

Luego es necesario realizar el proceso de **orientación interna** (realizado por el operador) que consiste en el cambio de coordenadas pixel, es decir de filas y columnas, a coordenadas imagen, usualmente dadas en mm, referidas a un sistema de ejes coordenados cuyo origen está en el centro de proyección.

Para ello se trabaja con las marcas fuduciales, las cuales se identifican y localizan.

Luego se realiza una **orientación externa**, trabajando entre fotogramas, se identifican y localizan puntos de apoyo, puntos homólogos y de control, de los que se conoce sus coordenadas (x,y,z) en el terreno.

La generación del modelo digital en 3D resulta de relacionar geoméricamente las coordenadas de los puntos de apoyo, homólogos y de control, proceso que realiza el software automáticamente. De esta manera es posible obtener los denominados modelos digitales de terreno, de elevaciones, de superficies, etc. (Figura n° 24).

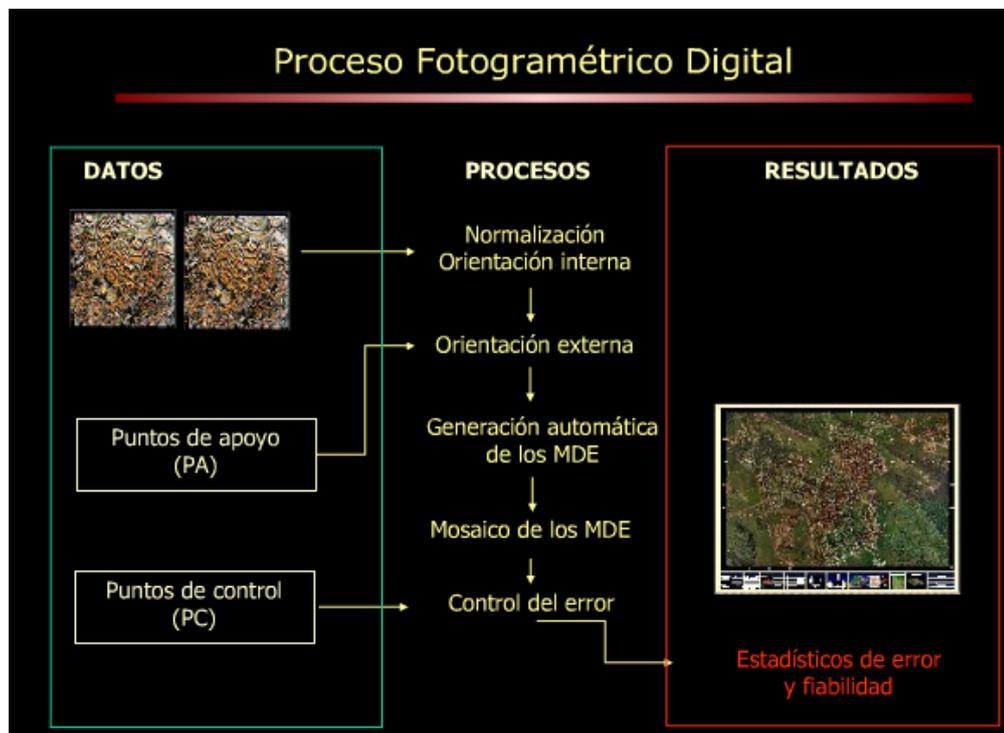


Figura n° 24: Proceso fotogramétrico digital.

### Modelo digital de terreno:

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, es decir se conocen las coordenadas (x,y,z) referidas a un sistema de coordenadas de referencia (Figura nº 25)

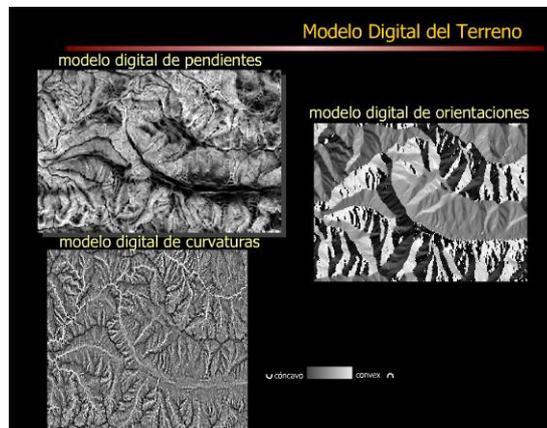


Figura nº 25: MD Terreno.

### Modelo digital de elevaciones:

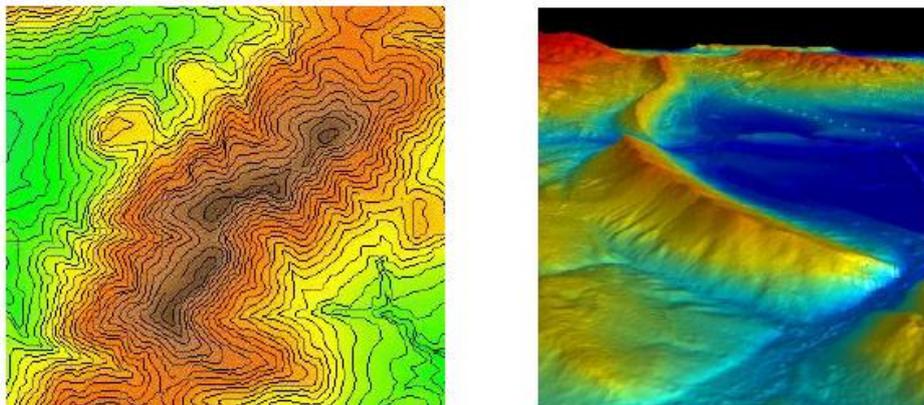


Figura nº 26: MD Elevaciones.

### Modelo digital de superficie:

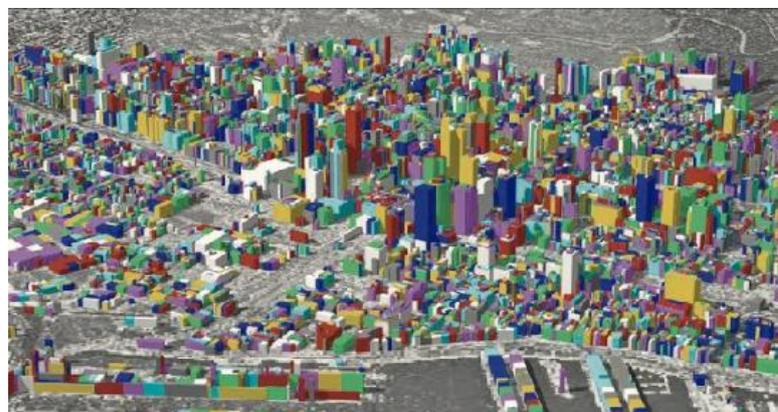


Figura nº 27: MD Superficie.

### Generación de Orto-imágenes:

Una ortoimagen es una imagen digital que ha sido procesada para corregir desplazamientos debido a la perspectiva del sensor y al relieve, es decir que se restituyen las distorsiones existentes. De manera que la imagen obtenida tiene las características de una carta topográfica, pasando de una proyección cónica a una proyección ortogonal.

La calidad de la imagen depende principalmente de la calidad del modelo digital de terreno elaborado y del tipo de algoritmo de restitución utilizado (para pasar de la proyección cónica a la ortogonal)

La imagen siguiente en formato analógico, ha sido escaneada y convertida a formato digital, para poder ser tratada con un software de fotogrametría digital.

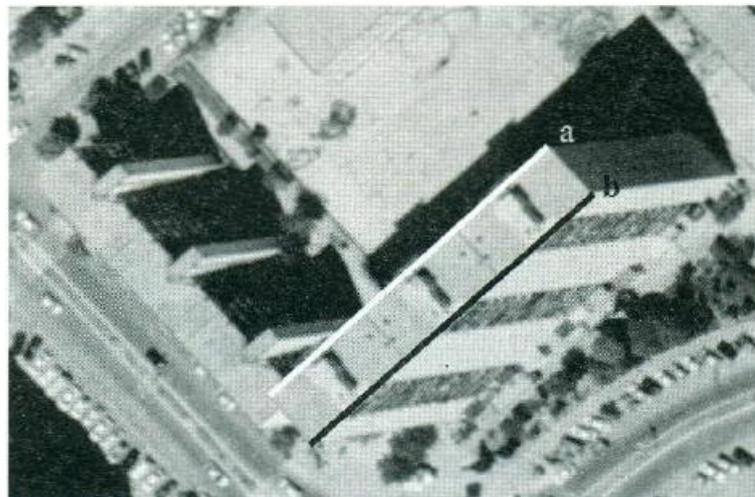


Figura n° 28: Fotografía aérea vertical.

La imagen siguiente es el resultado del trabajo fotogramétrico, donde se genera la imagen ortogonal y no se ha realizado el proceso de ocultación de la imagen original.

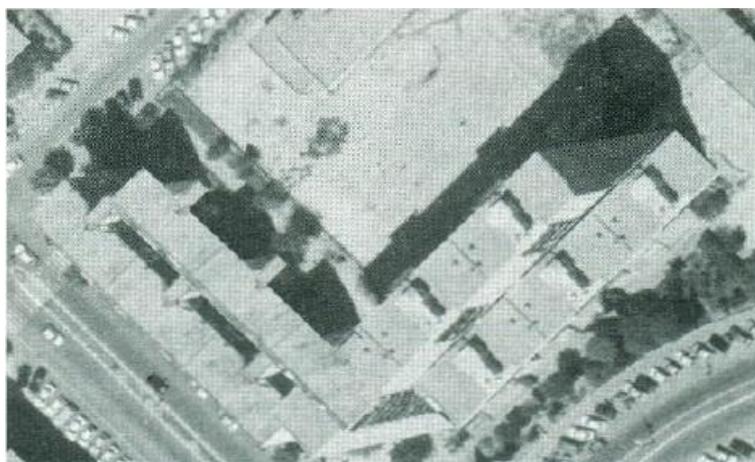


Figura n° 29: Ortoimagen digital.



## 14.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.

Podemos enumerar una serie de ventajas y desventajas de la fotogrametría digital.

<b>FOTOGRAMETRÍA DIGITAL</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Imágenes de gran estabilidad dimensional	Requiere un elevado volumen de almacenamiento (actualmente los procesos son más rápidos)
Facilidad de visualización y de encontrar los puntos homólogos	Es una técnica reciente y aún en desarrollo.
El tratamiento de la imagen requiere de software	
Es posible automatizar los procesos	
Salida digital de la información	