

APUNTES DE TOPOGRAFÍA

TEMA 8 - 1° Parte de 2

FOTOGRAMETRÍA

1. VISION BINOCULAR

Proceso de la percepción tridimensional en la visión binocular- Diplopia.

Si consideramos que en el individuo normal ambos ojos trabajan conjuntamente, y si recordamos los conceptos de convergencia y acomodación, podemos afirmar que el ser humano observa el espacio que lo rodea en forma binocular. Es decir, cada ojo registra una imagen particular que difiere ligeramente de la obtenida en el otro, ya que ambos ojos no ocupan el mismo lugar en el espacio.

Es necesario destacar que cuando se está explorando con la vista un determinado campo objeto sin fijarla sobre ningún detalle en particular, juegan un papel importante en la percepción espacial las facultades conexas con la movilidad del ojo, es decir la posibilidad de ejecutar rapidísimos micro-movimientos, la consiguiente y constante variación de la convergencia de los ejes visuales, y, en especial grado, la persistencia de las imágenes retinianas, que permite integrar los microcampos elementales de observación definidos para cada posición de convergencia en una imagen completa y nítida de toda el área correspondiente al campo de visión directa. No obstante, es imposible ver fusionados simultáneamente un punto cercano y uno alejado.

2. VISION ESTEREOSCOPICA

Existe otro medio de lograr, por observación binocular, esa peculiar y característica sensación de corporeidad y espacio que nos produce la visión directa del mundo que nos rodea, y esto constituyó en un momento un hecho importantísimo en el desarrollo de la fotogrametría.

Se trata de la observación con ambos ojos de un par de imágenes planas de un mismo objeto espacial. Es por cierto digno de destacar que esas dos imágenes deberán ser perspectivas geométricas, y cumplir ciertas condiciones para proporcionar la misma sensación plástica que produce la observación binocular directa del objeto. Esta nueva manera de apreciar relieve por observación de dos perspectivas que satisfagan ciertas condiciones, recibe el nombre de VISION O PERCEPCION ESTEREOSCOPICA, y constituye un caso especial de visión binocular, en el que se reemplaza el objeto espacial por las mencionadas dos imágenes planas del mismo.

Supongamos que estamos observando binocularmente un conjunto de puntos P, Q, R, S, .. (fig. 280). con la vista fija en uno de ellos, por ejemplo el R. Cada uno de estos puntos dará lugar a un par de rayos que pasarán respectivamente por el punto nodal objeto de cada ojo. Los puntos nodales N_i y N_d serán por tanto centro de radiaciones que proyectan en forma cónica el espacio exterior. Estos haces están compuestos por pares de rayos homólogos y la intersección de éstos últimos con las retinas respectivas darán lugar a puntos homólogos o correspondientes, como s' y s'' , r' y r'' , etc. Se llaman rayos homólogos aquellos dos que proyectan el mismo punto del espacio desde cada centro de proyección (por ej.: N_iS y N_dS).

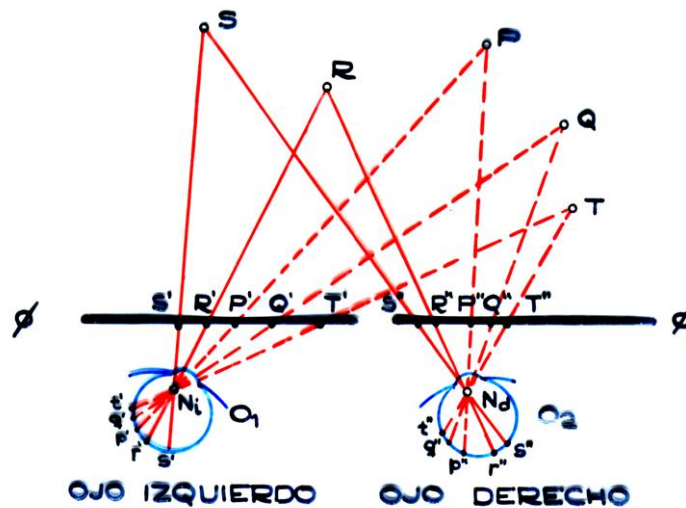


Fig. 280

- Consecuentemente, definiremos como puntos homólogos en dos perspectivas a aquellos que en cada una de ellas representan al mismo punto del espacio. Las radiaciones de los centros N_i y N_d son, pues, proyectivas entre sí. El observador experimentará la conocida sensación de espacio y corporeidad característica de la visión binocular que está efectuando. Si ahora cortamos ambos haces con un plano \emptyset perpendicular a la hoja del papel, obtendremos para cada uno de ellos una perspectiva cuyo centro de proyección en cada caso es uno de los ojos del observador. Ambas perspectivas (la derecha y la izquierda) conservan la relación de proyectividad que ligaba a los haces que les dieron origen, es decir, a cada elemento de una de ellas corresponderá en la otra uno que le será homólogo; estos pares de elementos correspondientes serán precisamente las imágenes de un mismo punto del espacio en ambas perspectivas (P' y P''). Si por último suprimimos los puntos del espacio P, Q, R, S , etc., pero mantenemos las perspectivas que se originaron en \emptyset , el observador no advertirá el cambio, y la percepción, que en un principio era la que hemos denominado binocular, ahora está constituida por la que hemos denominado estereoscópica, manteniéndose la sensación espacial.

- Es necesario destacar que en tanto la percepción binocular se ejerce siempre en base a objetos reales, la visión estereoscópica resulta ser una abstracción, por cuanto el observador examina en realidad una única imagen virtual, tridimensional, que tan sólo existe en su conciencia, y que, si bien es producida por las dos perspectivas planas, difiere completamente de éstas por tener tres dimensiones.

- Podemos definir, por lo tanto, a la **estereoscopia como el conjunto de artificios que por observación binocular permiten la reconstrucción espacial, tridimensional, de un cuerpo en relieve, utilizando dos respectivas del mismo**.

- Sólo se tendrá visión estereoscópica cuando se observen perspectivas homólogas, y se dispongan de tal manera que permitan la observación de puntos correspondientes. Recíprocamente, en percepción estereoscópica únicamente cuando tengamos sensación espacial o tridimensional, estaremos observando puntos homólogos en ambas perspectivas.

3. FOTOGRAMETRIA, DEFINICIONES Y OBJETIVOS

La Fotogrametría se comporta en forma bien distinta a la topografía clásica, ya que no trabaja ya por número finito de puntos, sino por sucesión infinita de puntos (fig. 281), donde cada elemento tiene su situación y en donde es posible pasar de un elemento al infinitamente próximo en forma continua.

Fig. 281

Supongamos un terreno completamente llano que fotografiamos desde el aire (fig. 282) -Aerofotogrametría simple; por la de una sola vista-. Tenemos un centro de proyección que es el objetivo de la cámara aérea y la proyección de los diversos puntos del terreno cortada por un plano -el plano de la vista-, nos da dos sistemas perspectivas.

Veamos ya que el sistema de puntos es obtenido en forma automática, sin independencia de unos puntos con otros. Hemos obtenido un conjunto de puntos y de líneas.

Es posible obtener en forma automática, de la vista aérea, otra igual a la que se hubiere conseguido con el eje principal de la cámara perfectamente vertical.

La Topografía Fotogramétrica ofrece la adaptación del conjunto a cuatro puntos, y será posible obtenerla, si la situación relativa de los cuatro puntos es perfecta.

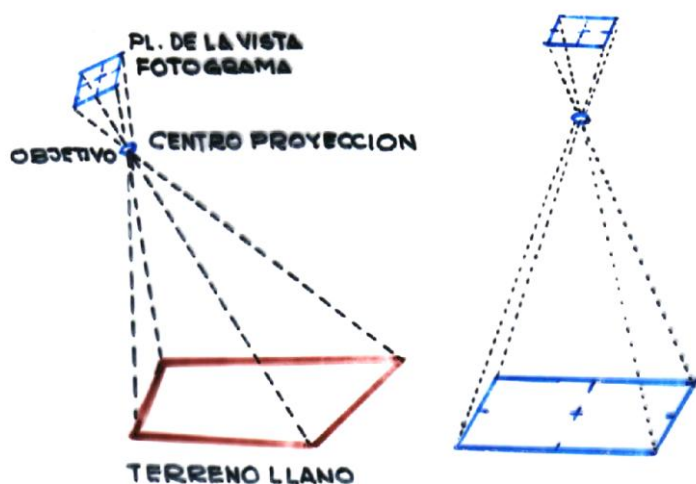
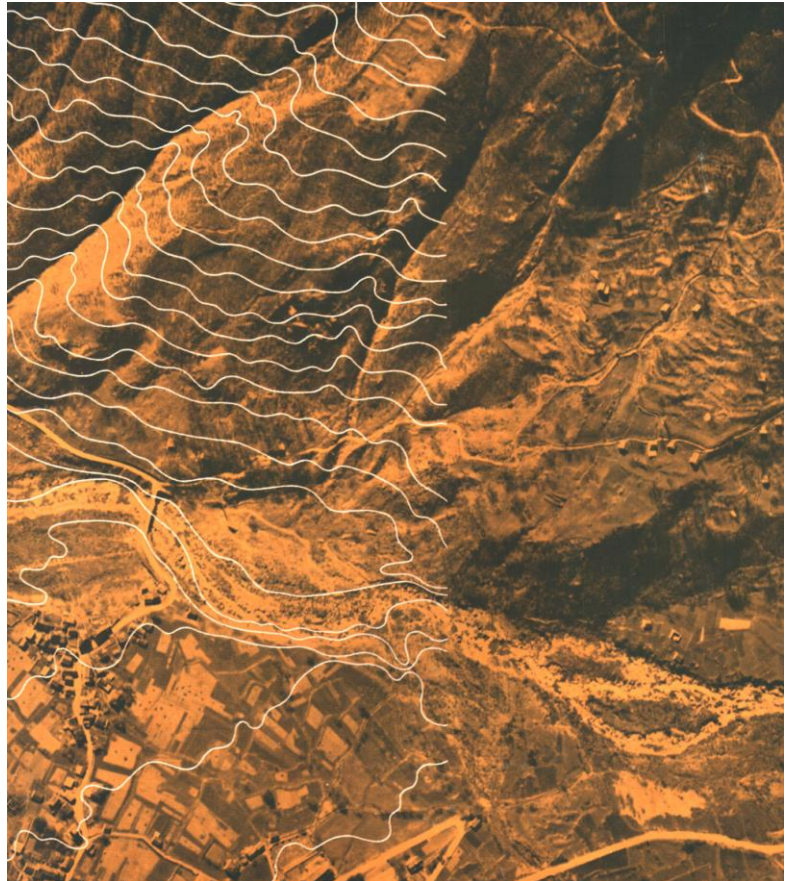


Fig. 282

Veremos los instrumentos y las condiciones teóricas que se deben cumplir para realizar estas transformaciones, los errores provenientes de no tener un terreno completamente llano y las dificultades que existen para lograr prácticamente lo que aquí tan teóricamente se plantea.

- Pero no es este caso, el de la Aerofotogrametría simple, el que ofrece mayor interés para demostrar cómo la Fotogrametría significa un avance técnico en la representación del terreno. Por donde la Fotogrametría ofrece interés, es por el de pares de vistas: por la Fotogrametría estereoscópica.

Supongamos un terreno con todas sus rugosidades y sobre él las líneas rectas o curvas de la planimetría. Dos objetivos fotogramétricos desde dos puntos diferentes obtienen dos proyecciones cónicas diferentes, las que son cortadas por dos planos, los planos de las vistas (fig. 283).



Fig. 283

La situación de los dos sistemas es posible conocerla de antemano con la Fotogrametría terrestre y hay que obtenerla en gabinete en la Aerofotogrametría. Pero lo que de un modo u otro es posible hacer en gabinete es reconstruir por procedimientos inversos los haces de rayos y así, con la visión binocular, obtener un modelo óptico del terreno, por adaptación o más bien por correspondencia perfecta de los pares de rayos correspondientes.

En posición del terreno en gabinete, estamos en condiciones de medir en él. En efecto, sobre el modelo espacial se hace deslizar una marca óptica que titulamos estilóptico, y que cumple la misión del mirero en la topografía. La fundamental diferencia es que el

estilóptico lo podemos deslizar nosotros mismos en forma continua y en la dirección de las tres coordenadas, consiguiendo el dibujo ortogonal del recorrido.

Así se nos hace posible seguir el detalle irregular en forma continua y en cualquier instante, por escalas nonius o tambores, leer las tres coordenadas de cualquier punto espacial.

- La Fotogrametría adquiere más importancia es en el trazado de curvas de nivel.

Es posible, en los aparatos de gabinete, fijar la coordenada Z en un valor determinado, con lo que, deslizando el estilóptico sobre el modelo espacial, se hace posible con el movimiento de las otras dos coordenadas, seguir una curva de nivel. Se cumple así la realización de otra definición que puede darse a la curva de nivel: proyección horizontal del trazo de un punzón que, marchando horizontalmente, se apoya en el terreno. En efecto, se hace posible al estilóptico seguir el terreno, conservándose siempre en un plano horizontal. Obtenemos la representación del terreno por sistemas de curvas y así su composición y la comprobación correspondiente se realiza por adaptación de sistemas de curvas provenientes de diversos pares estereoscópicos. En las figuras 284 y 285 vemos esa adaptación en un trabajo estereofotogramétrico terrestre.

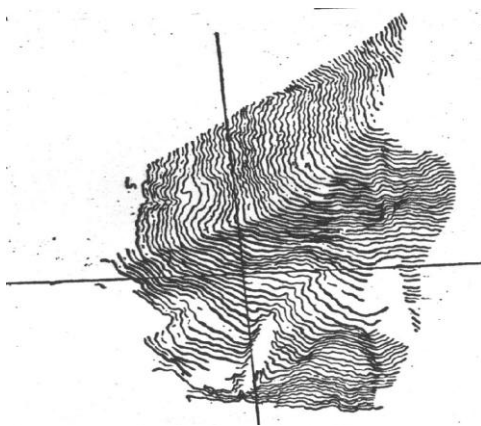


Fig. 284

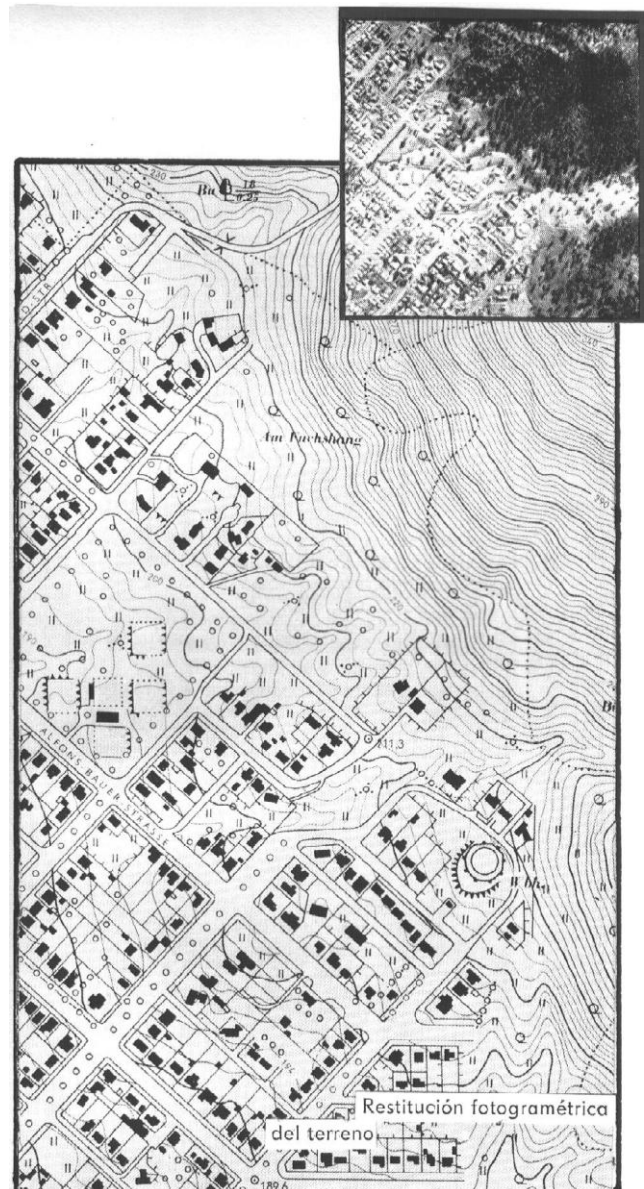


Fig. 285

Esta nueva manera de confeccionar un plano obligará sin duda a ir modelando un nuevo aspecto de la Topografía. Así por ejemplo, independientemente del trabajo por

intersecciones atrás o adelante, no tenemos la posibilidad en Topografía de obtener las coordenadas de un punto si no llegamos a él por medio de una poligonal, es decir, midiendo una serie sucesiva de ángulos y distancias. Y pensemos que generalmente lo que se desea al fin es obtener las coordenadas de ese punto.

En Fotogrametría, es posible proceder de otra manera: colocado el par estereoscópico en un aparato de restitución automática y realizado el ajuste del modelo espacial a un número de puntos terrestres de situación conocida, es posible leer directamente las coordenadas de cualquier punto, ya que para ello esos instrumentos disponen de escalas y tambores en los que se puede leer con la apreciación del 0,01 mm.

Todos los trabajos fotogramétricos no pueden prescindir de los terrestres, ya que les han de servir de apoyo. Lógicamente que la densidad de éstos depende de la categoría de los trabajos a realizar, pero ya significa un avance importante la posibilidad de realizar aerotriangulaciones y aeronivelaciones que, para trabajos de escalas menores, permiten reducir los trabajos terrestres a un mínimo.

Del valor económico puede formarse un juicio sabiendo que los trabajos en el terreno son siempre más costosos y que la Fotogrametría permite realizarlos muy rápidamente. Tiene sin embargo un obstáculo la Fotogrametría: el alto costo del Instrumental y material que debe manejar.

4. CONCEPTOS GENERALES FOTOGAMETRÍA TERRESTRE Y AÉREA

4.1. Supongamos que una vista **fotogramétrica terrestre**. Al decir vista fotogramétrica entendemos una fotografía obtenida con su placa perpendicular al eje principal del objetivo y conociendo la intersección de éste con el plano de la vista, es decir, el punto principal.

Supongamos dos ejes coordenados de la vista (fig. 286), el uno horizontal x y el otro vertical z , suponiendo vertical el plano de la placa. Consideramos en un plano de frente dos ejes XZ paralelos a los de la placa. Un punto A , en el plano de frente, tendrá sus coordenadas XZ en perfecta relación directa con las coordenadas xz de la imagen A' en la vista. Fácil será deducir la precisión de las coordenadas XZ por la precisión con que sea posible leer la xz de la vista, independientemente de la influencia que tenga en esa precisión la tercera coordenada Y , distancia del plano de frente o distancia en profundidad, si es que consideramos el objetivo como origen de coordenadas.

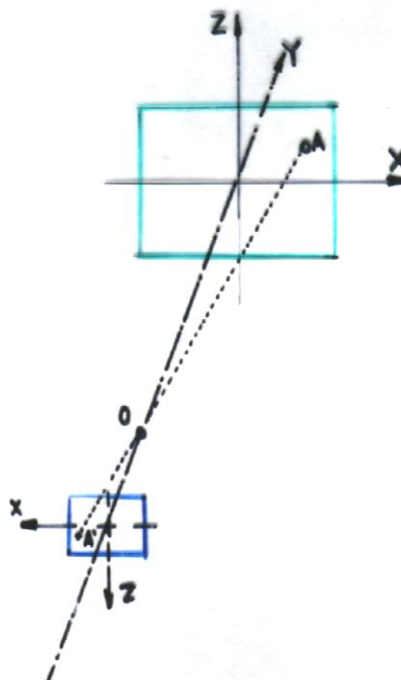


Fig. 286

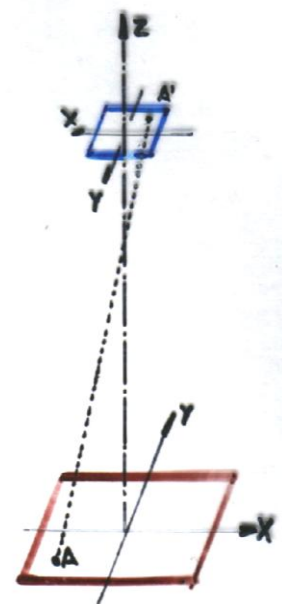


Fig. 287

Pero es precisamente esa tercera coordenada Y la que se obtiene por la intervención de la segunda vista, que con la primera, forma el par estereoscópico. En esa coordenada entra la intervención de la paralaje estereoscópica que es el motivo principal de la preocupación de la Fotogrametría estereoscópica.

Y ya vemos que en la Fotogrametría terrestre las coordenadas del punto en una vista nos dan una coordenada planimétrica y la altimétrica, siendo obtenida la otra planimétrica por la intervención de las dos vistas.

4.2. En Aerofotogrametría diferentemente, las coordenadas de la imagen están directamente relacionadas (fig. 287), por decir así, con las coordenadas planimétricas del punto y es para la tercera coordenada, precisamente para la altimétrica, para la que interviene el par estereoscópico.

En realidad en Aerofotogrametría las cosas no ocurren precisamente así, ya que la placa directora nunca es paralela al plano de frente, que en este caso sería el horizontal.

Pero este análisis sintético nos muestra ya una primera conclusión: una ventaja altimétrica para la estereofotogrametría terrestre y una planimétrica para la Aerofotogrametría.

- Otra cuestión a destacar es: en Fotogrametría terrestre es posible llevar unido a la cámara fotogramétrica un goniómetro (foto-teodolito) que nos permite conocer en gabinete con toda precisión la situación absoluta y relativa de las dos placas que forman el par estereoscópico. En Aerofotogrametría, al contrario, en la imposibilidad de efectuar mediciones en el instante de la toma, se hace necesario utilizar la vista misma para obtener su propia situación. Y desde luego como goniómetro, una cámara aerofotogramétrica es de inferior precisión que un teodolito moderno.

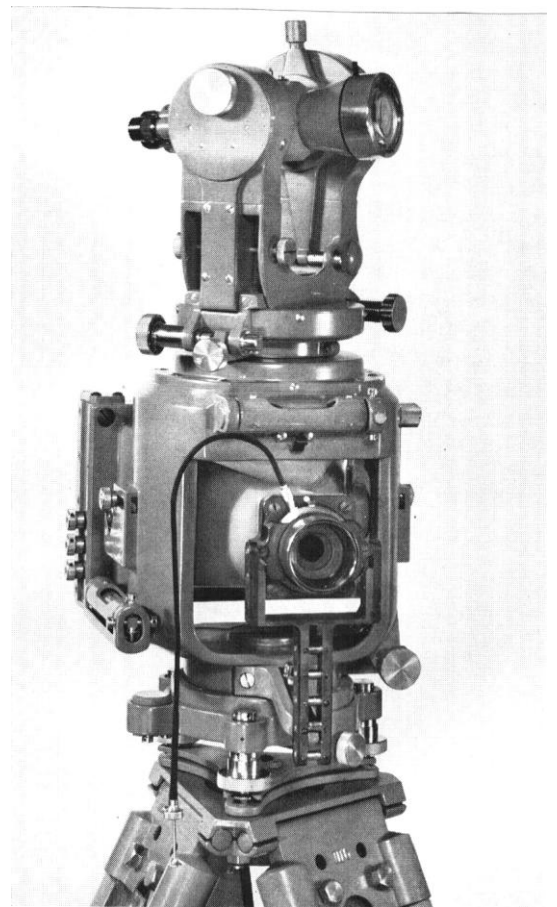
4.3. Obtención de las perspectivas (informativo)

4.3.1. Cámara Métrica terrestre: Es un instrumento de gran precisión destinado a la producción de fotogramas y está constituida por el cono métrico y algunos dispositivos auxiliares. El cono métrico, sin duda la parte más importante, es una construcción metálica rígida de forma piramidal truncada, en cuya cara anterior está el objetivo fotográfico y cuya cara posterior materializa el plano focal. Si el conjunto está bien construido, el eje principal del objetivo será perpendicular al plano focal y cortará a este en el punto principal C, determinable uniendo dos a dos las señales laterales que ineludiblemente se encuentran en el marco de aquél plano y que, posteriormente, aparecerán en los fotogramas impresionados.

4.3.2. Fototeodolito. (fig. 288) Este instrumento es una combinación de teodolito y cámara métrica. El teodolito de un fototeodolito sirve para realizar en el terreno las mediciones angulares destinadas a situar y relacionar planialtimétricamente cada uno de los fotogramas impresionados; tiene que ser de precisión suficiente, y en tal sentido se requieren aparatos de 1" por lectura directa.

La cámara métrica de un fototeodolito es de concepción muy sencilla y consta esencialmente del cono métrico tal como ha sido definido. Fig. 288

El formato de fotogramas que proporciona es casi siempre rectangular y tiene, según los modelos existentes las dimensiones típicas de 9 cm x 12 cm; 10 cm x 15 cm; 13 cm x 18 cm. Las distancias focales (distancias principales) son del orden de 130 mm para 9 cm x 12 cm de formato; 150 mm para 10 cm x 15 cm; y 200 mm para 13 cm x 18 cm. Vale decir, que en todos



estos casos indicados se abarcará un campo angular horizontal de aproximadamente 50° y un vertical de 40° .

Puede ocurrir que el campo angular vertical resulte insuficiente y es por eso que en casi todos los fototeodolitos se dispone de un recurso para amplificarlo, desplazando el objetivo verticalmente y paralelo al plano focal (montaje tipo Zeiss).

Asimismo, para abarcar el terreno horizontalmente, la cámara de un fototeodolito puede girar alrededor de un eje vertical.

En un fototeodolito aparecen los siguientes dispositivos auxiliares característicos:

- Chasis: en donde se cargan las placas fotográficas para impresionar los fotogramas, los que son instalados en la cámara uno por uno.
- Un mecanismo que presiona una placa de vidrio contra el marco metálico que hace las veces de plano focal de la cámara.
- Numerador de fotogramas.
- No es necesario contar con un obturador elaborado, ya que los tiempos de exposición son relativamente grandes (del orden de 1 seg o más).
- Además, todo fototeodolito dispone de los elementos auxiliares propios de un teodolito, entre ellos, los que se destacan, por su mayor sensibilidad, son los niveles con los cuales se procede a calar el instrumento.

4.3.3. Comparador. La necesidad de medir las coordenadas rectangulares de puntos imagen en los fotogramas, se realiza en estereofotogrametría como parte de un proceso de observación y medición estereoscópica.

Comparador Rectangular. Es un aparato destinado a la medición individual de fotogramas, organizado de la manera siguiente:

Un carro principal o carro de las x, portador del fotograma a medir, puede desplazarse a izquierda y derecha guiado por rieles. Situado por encima un segundo carro o carro de las z, se mueve hacia adelante y atrás guiado a su vez por otro juego de rieles, perpendiculares a los anteriores. Solidariamente vinculado a éste y dispuesto verticalmente se encuentra el anteojo colimador con cuyo retículo es posible bisectar cualquier punto de \emptyset , por combinación de los movimientos ortogonales de los 2 carros. El aparato se completa con los dispositivos medidores de las translaciones en x y z, que en nuestro caso suponemos compuestos por índices de referencia I_x e I_z , con sus correspondientes nonios solidarios a los carros A y B, desplazándose junto a las escalas graduadas E_x y E_z , fijas al bastidor del instrumento.

4.3.4. Avión Fotógrafo. Debe reunir por lo menos las siguientes condiciones: poca vibración, gran estabilidad, pequeña velocidad en el vuelo fotográfico y mayor velocidad en el de crucero, buena visibilidad para el piloto, cabina cerrada con capacidad para 2 personas y el instrumental fotográfico, orificio en el piso con buen sostén elástico para fijar sobre él la cámara fotográfica, espacio reservado para un pequeño cuarto oscuro de emergencia y para el transporte del equipaje de efectos del personal; el fuselaje no debe molestar cuando se trate de obtener vistas oblicuas; radio de acción aproximado a los 1.000 km, mientras que el plafond no será menor a 7.000 mts sobre el nivel del mar, altura a la que ha de llegarse con una velocidad ascensional razonable. Velocidad horaria máxima para el vuelo fotográfico de 80 a 100 km / hora.

4.3.5. Cámara Aerofotogramétrica (fig 289)

a. FOTOGRAMA (fig. 290, emulsión fotográfica) puede ser de dos tipos:

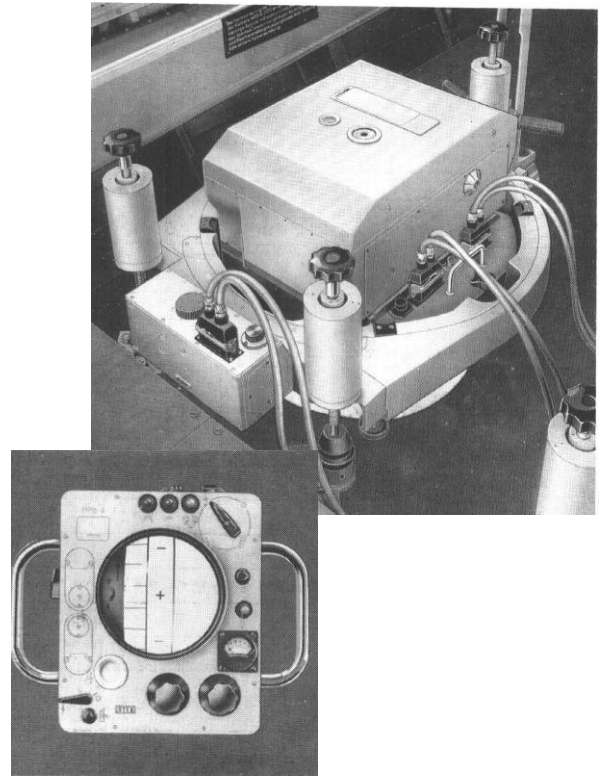
Placa: Es un soporte rígido y plano, pero es engorroso en su manejo y de peso elevado; pero es insuperable para conservar las dimensiones de cuanto en ella queda registrado.

Película: Son de espesor uniforme y lo que hay que tratar es que no sufran dilataciones o contracciones como consecuencia de su inmersión (en laboratorio) en líquidos de relevado, fijado y secado. Es liviana y cómoda en su manipuleo, pero no conservan las dimensiones, para lo que necesitan dispositivos que aseguren una superficie plana. Actualmente esto se logra con un plano de metal al que la película queda aplicada con presión de aire.

b. **OBJETIVO AEROFOTOGRAMETRICO.** Es el reproductor de exactísimas perspectivas o proyecciones centrales impecables, contruidos de tal forma que los rayos incidentes y refractados, son perfectamente paralelos. Hay de 2 tipos:

b.1. Con distancia focal no mayor de 22 cm y un ángulo de campo no superior a 67° todo lo cual conduce a fotogramas resultantes, cuyas dimensiones no pueden sobrepasar de $f \times f$, aproximadamente, limitando la superficie terrestre impresionada. Dicha traba ha tratado de salvarse construyendo cámaras con varios objetivos fotogramétricos dispuestos de tal forma como para reproducir a cada exposición negativos compuestos de tantos fotogramas como objetivos tiene la cámara. Esto es engorroso para el ulterior tratado de cada fotograma, para llegar al plano topográfico.

Fig. 289



b.2. Objetivo gran angular. Cada fotograma recoge una gran extensión del terreno sin ocasionar además mayores complicaciones en las transformaciones en gabinete a que ha de someterse. Tienen un ángulo de campo de 95° y los fotogramas que ellos impresionan, de tamaño muy próximo a $2f \times 2f$, no son aptos para trabajos de alta precisión, pues las distorsiones que presentan, no pueden eliminarse con los medios actuales de la técnica aerofotogramétrica en la medida que la práctica lo exige.

c. **OBTURADOR.** Mecanismo que debe actuar con la suficiente rapidez, para dar paso a luz para que llegue hasta la emulsión sensible, teniendo en cuenta la velocidad del avión portador que recorre cierta distancia, mientras permanece abierto, por cuya razón hay que evitar un fotograma movido, por lo tanto el tiempo de apertura depende de la velocidad del avión y de la relación f / h entre las distancias focal del objetivo fotogramétrico y la altura de vuelo.

Ejemplo: si $f / h = 0,0001$ implica una escala del fotograma 1:10.000; velocidad del avión = 180 km / h. Para que un punto no sea en el fotograma un segmento, y fijando entonces como longitud máxima del segmento = 0,05 mm, se obtiene una apertura del obturador = 1 / 200 segundos.

4.3.6. Emulsiones Sensibles y Filtros: Se necesitan emulsiones tales que se cuenten con las siguientes condiciones: Corta exposición, grandes distancias al terreno, pernicioso capa atmosférica (microcópicas gotas de agua que impliquen radiaciones violetas y azules). Por tal motivo se necesitan emulsiones sensibles con:

- Sensibilidad a las radiaciones visibles de color rojo, amarillo y verde; no a las azules y violetas.
- Gran finura del grano, capaz de registrar detalles ínfimos hasta 0,01 mm.
- Buen contraste en la revelación para poner de manifiesto las menores diferencias de iluminación del terreno; para ello se utilizan filtros.



Fig. 290

5. FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE

5.1. Caso Normal - Paralaje Angular - Paralaje Lineal -

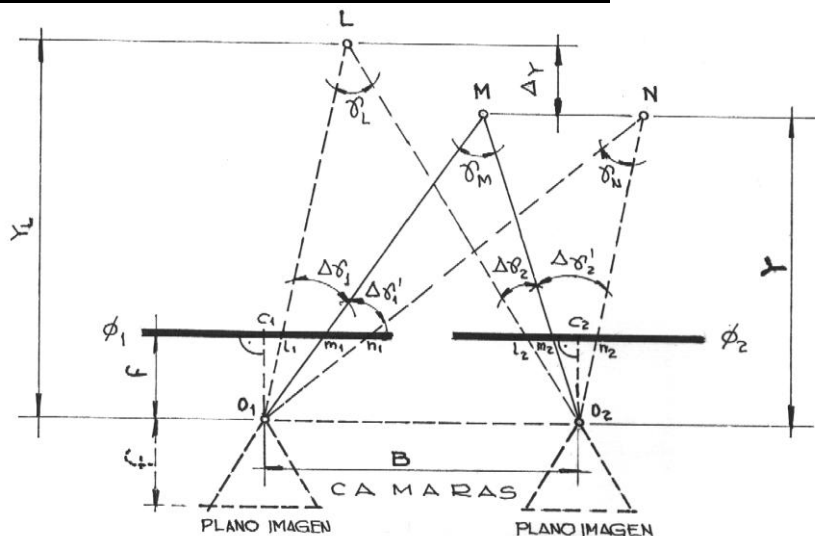


Fig. 291

O_1 y O_2 es la base terrestre cuyos extremos ha ocupado sucesivamente la cámara métrica, de modo que O_1 y O_2 coincidieron en su momento con el centro de proyección de la perspectiva fotográfica, centro que está materializado con suficiente aproximación

por el del objetivo de la cámara. La ubicación de ésta fue tal que su eje óptico, en ambas oportunidades, estuvo horizontal y perpendicular a la base O_1O_2 ; \varnothing_1 y \varnothing_2 son los planos verticales en que fue recogida la imagen en ambos extremos, respectivamente, y deben considerarse en cada caso separados del centro de proyección por una distancia igual a la focal de la cámara de toma.

Puntos situados a distintas profundidades, como el M y el L, ofrecerán un paralaje angular diferencial:

El ángulo paralático (en radianes) es $\gamma_M = B/Y = f(Y) \Rightarrow B = \gamma_M \cdot Y \therefore$ diferenciando

$$d\gamma = -B/Y^2 dY \text{ reemplazando B}$$

$$d\gamma = -\gamma_M \cdot Y/Y^2 \cdot dY \quad (1)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_M - \gamma_L = \Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2 = B/Y^2 \Delta Y$$

Esta paralaje angular diferencial, permite el cálculo del ΔY . A la paralaje angular diferencial corresponderá, en los planos de imágenes \varnothing_1 y \varnothing_2 , una paralaje lineal diferencial dada por la diferencia entre los segmentos que en el plano respectivo intersectan $\Delta\gamma_1$ y $\Delta\gamma_2$. Es decir, la paralaje lineal diferencial, que designaremos $\Delta\pi$, está dada para dos fotogramas conjugados por la siguiente expresión:

$$\Delta\pi = l_1 m_1 - l_2 m_2$$

y se interpreta como paralaje lineal estereoscópica de L respecto de M o diferencia de paralajes lineales entre L y M. Las relaciones métricas que ligan a todos estos parámetros permiten deducir la distancia mutua entre los puntos representados en ambos fotogramas, mediante la medición de paralajes sobre los planos de imagen.

Veamos que pasa, cuando dos puntos están a igual distancia de la base, con la paralaje lineal y angular. Si M y N están situados en un mismo plano frontal a la distancia Y de la base B, tendremos, comparando triángulos semejantes, lo siguiente:

$$\text{Entre los triángulos } \underline{O_1 m_1 n_1} \text{ y } \underline{O_1 MN} \quad m_1 n_1 / MN = f/Y$$

$$\text{Entre los triángulos } \underline{O_2 m_2 n_2} \text{ y } \underline{O_2 MN} \quad m_2 n_2 / MN = f/Y$$

$$\text{comparando las expresiones anteriores, resulta: } m_1 n_1 = m_2 n_2$$

lo que nos dice que la paralaje lineal diferencial entre M y N es nula por definición:

$$\Delta\pi = m_1 n_1 - m_2 n_2 = 0$$

Igualmente se podría demostrar que la paralaje angular diferencial es nula en este caso, aunque obviamente, si en la expresión (1) escribimos así:

$$\Delta\gamma = (B/Y^2) \Delta Y$$

Consideramos $\Delta Y = 0$, por las condiciones iniciales del problema, llegaremos al mismo resultado:

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma'_1 - \Delta\gamma'_2 = 0 \therefore \Delta\gamma'_1 = \Delta\gamma'_2$$

Como conclusión importante podemos expresar que, en el caso que estamos analizando (caso normal: fotogramas en un plano vertical paralelo a la base), la diferencia de paralajes entre dos puntos ubicados en un mismo plano de frente es nula, o dicho en otras palabras, cada plano de frente (es decir, paralelo a la base) tiene un valor de paralaje constante, que caracteriza su ubicación respecto a la base. Según esto, el concepto de paralaje como noción diferencial supone la existencia de lo que podríamos denominar PARALAJE ABSOLUTA, que permite medir no ya diferencia de alejamientos entre dos puntos, sino su distancia a la base.

Vistas las cosas de este modo, ya no hablaremos de paralaje de un punto respecto de otro, sino que, como prioridad básica, atribuiremos "PARALAJE" a cada punto del espacio registrado en ambos fotogramas. Es decir, referiremos todas las medidas tales como l_1m_1 , l_1n_1 , l_2m_2 , l_2n_2 , etc. a un origen en común en cada fotograma; tomaremos un punto ficticio al que sus imágenes sean, por ejemplo, C_1 y C_2 (puntos principales de los respectivos fotogramas). Para cualquier punto genérico, como el L, podremos definir la paralaje lineal como la diferencia entre los segmentos c_1l_1 y c_2l_2 .

Si adoptamos C_1 y C_2 como orígenes para medir las abscisas en cada fotograma, tendremos la ventaja adicional de que nos referimos a puntos fácilmente identificables por las marcas laterales del plano focal. En general, cada punto estará caracterizado por su paralaje lineal longitudinal π como magnitud de la que se puede deducir por fácil cálculo sus alejamientos y respecto de la base.

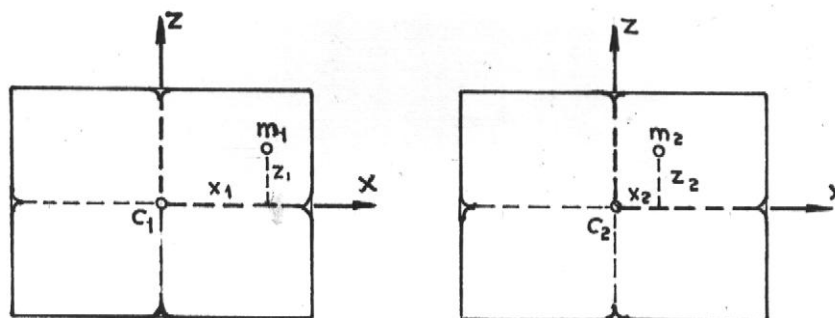


Fig. 292

Si en cada fotograma tomamos un sistema de ejes de referencia con centro en C (fig. 292), de modo que sus direcciones coincidan con las determinadas por las marcas laterales, el eje horizontal será el X y el vertical el Z, y la imagen de cualquier punto del terreno en cada fotograma estará ubicada por sus dos coordenadas de imagen x_1 y z_1 . De acuerdo con lo expresado en el párrafo anterior, la paralaje de un punto será:

$$\Delta\pi = x_1 - x_2$$

Simple relaciones geométricas nos conducen a una sencilla expresión que relaciona los valores de paralaje horizontal o longitudinal con los alejamientos Y, permitiendo la rápida deducción de la posición del punto respecto a la base en función de la paralaje calculada a partir de las coordenadas x_1 y x_2 de sus imágenes en ambos fotogramas, además de otras magnitudes que también son conocidas porque se las ha determinado en campaña o en gabinete. La fórmula es:

$$Y = B \cdot f / \pi \quad (2)$$

FORMULA FUNDAMENTAL DE LA FOTOGRAMETRIA

en la que B es la base medida en el terreno y f la focal de la cámara métrica, controlada en gabinete, los otros dos parámetros tienen el significado ya conocido. Es menester aclarar que el origen de las Y es siempre el extremo izquierdo de la base. Esta expresión evidencia que, en verdad, a cada valor de Y corresponderá un único valor de π , y viceversa, ya que B y f son constantes para una base y una focal determinados, la paralaje lineal no depende más que de la distancia Y.

La fórmula ya expresada (2), llamada FORMULA FUNDAMENTAL DE LA FOTOGRAMETRIA, pone de manifiesto que cuando más grande sea la base, mayor será la paralaje de un punto determinado (Y invariable), con lo cual nos colocamos en condiciones más favorables. Pero no podremos aumentar la base indefinidamente; la buena percepción estereoscópica obliga en fotogrametría terrestre a no sobrepasar los 40 mm en el valor de paralajes lineales, con lo que en relación B/Y, para una focal promedio de 160 mm, asume un valor máximo de 1/4.

Coordenadas X, Y, Z de un punto, según las relaciones (fig. 293):

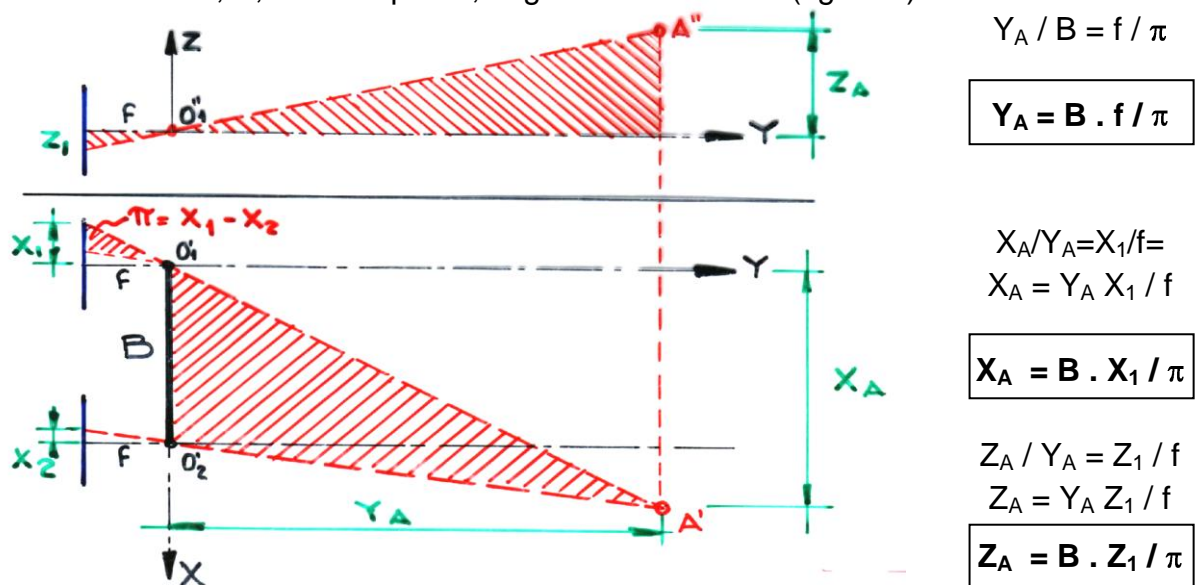
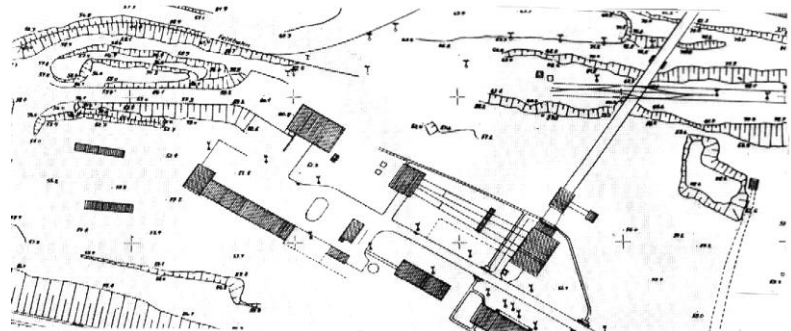


Fig. 293

Restitución de fotogramas Métricos terrestre



5.2. Procedimiento fotogramétrico de intersecciones.

Frente al terreno que se desea revelar se emplaza una base fotogramétrica en los extremos de la cual (O_1 y O_2 , puntos de vista) se obtienen y registran con instrumental y procedimientos, dos perspectivas \varnothing_1 y \varnothing_2 que supondremos verticales (fig. 294).

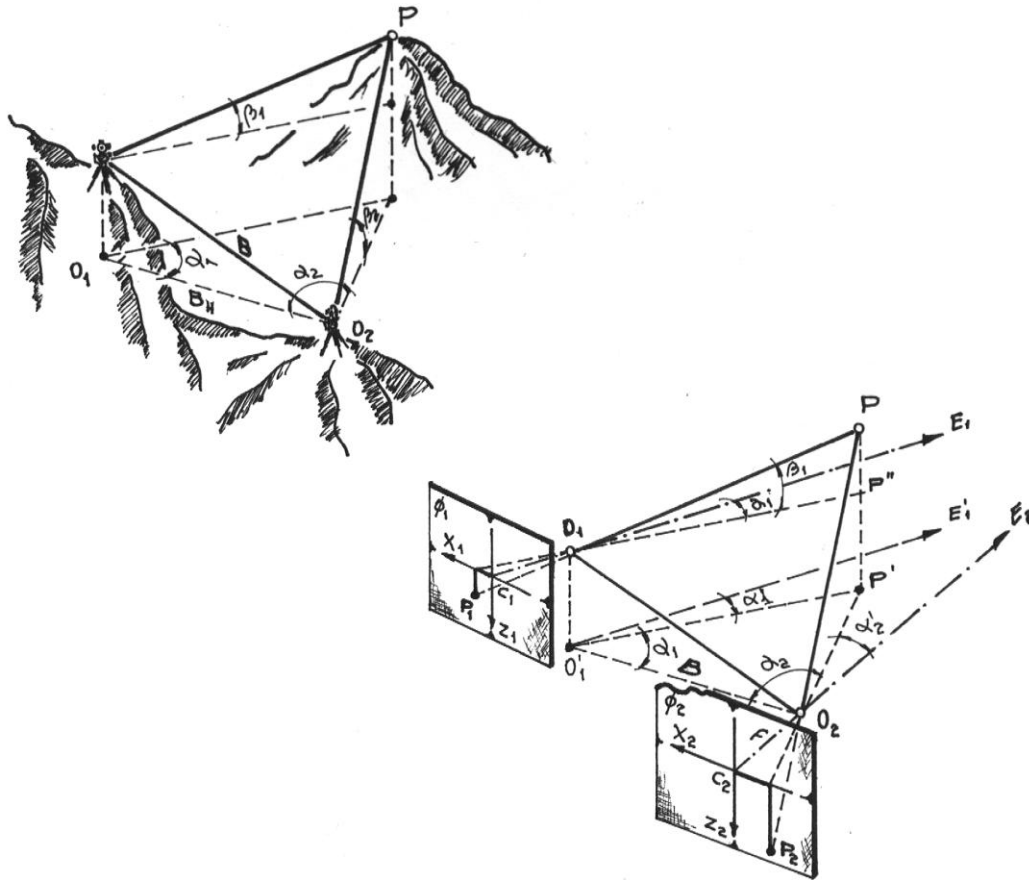


Fig. 294

Cada punto P del terreno genera los rayos proyectantes O_1P , O_2P que intersectan a \varnothing_1 y \varnothing_2 , en los puntos imagen P_1 , P_2 , cuya posición queda bien determinada si en el plano de ambas imágenes perspectivas se definen sendos sistemas de coordenadas planas y rectangulares cuyos centros sean C_1 , C_2 y tales que sus ejes C_1X_1 , C_1Z_1 y C_2X_2 , C_2Z_2 , resulten horizontales y verticales respectivamente. En tal situación es posible escribir las expresiones:

$$\alpha_1 = \varphi_1 - \alpha'_1 \quad ; \quad \text{tag } \alpha'_1 = x_1 / f \quad \therefore \alpha_1 = \varphi_1 - \text{arc tag } (x_1 / f)$$

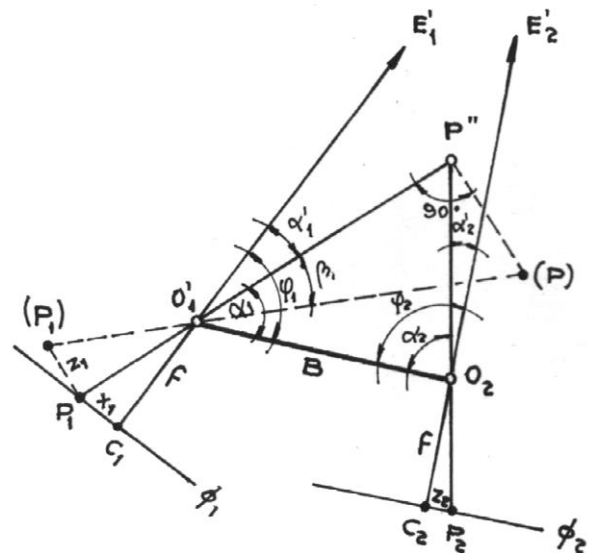
$$\alpha_2 = \varphi_2 - \alpha'_2 \quad ; \quad \text{tag } \alpha'_2 = x_2 / f \quad \therefore \alpha_2 = \varphi_2 - \text{arc tag } (x_2 / f)$$

$$; \text{tag } \beta_1 = z_1 / f \cos \alpha'_1 \quad \therefore \beta_1 = \text{arc tag } (z_1 / f \cos \alpha'_1)$$

de las que se desprende esta importante consecuencia: los ángulos α_1 y β_1 que topográficamente debían medirse con teodolito en el mismo terreno, pueden deducirse ahora analíticamente de estas simples fórmulas. Pero es necesario para aplicarlas conocer f , relacionar los ejes de ambas perspectivas con la base (mediante los ángulos φ_1 y φ_2) y medir en gabinete, sobre \varnothing_1 y \varnothing_2 , las coordenadas x_1 , z_1 , x_2 , z_2 de los puntos imágenes p_1 y p_2 .

Con α y β y las coordenadas de O_1 y O_2 , se resolverá el problema de intersecciones planteado determinándose, por tanto, la posición planialtimétrica de P. Repitiendo las operaciones para distintos puntos del terreno distribuidos convenientemente, se estará en condiciones de preparar un plano de puntos acotados, en que posteriormente, por interpolación, se trazarán las líneas de nivel que darán forma al documento final. Los trabajos referidos pueden realizarse también gráficamente.

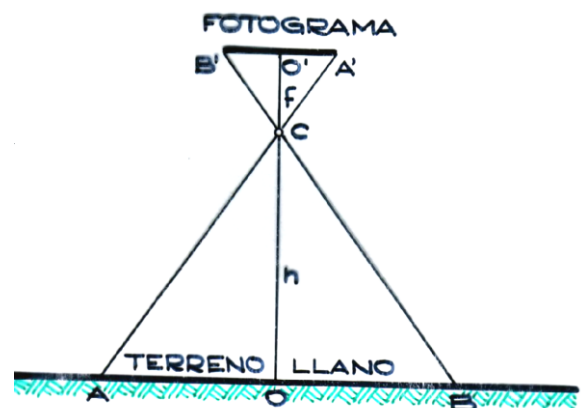
En tal caso, se ubican planialtimétricamente sobre la hoja en que se va a ejecutar el plano, previo trazado de la cuadrícula de referencia a la escala prevista, los extremos de la base O_1 y O_2 (por sus coordenadas planas) y las trazas de las perspectivas ϕ_1 y ϕ_2 (mediante los ángulos φ_1 , φ_2 y el segmento f). Luego efectuando proyecciones y abatimientos que surgen con claridad de la observación de la figura 295, se "restituye" la posición planimétrica de P y su cota $P''(P)$ referida, por ejemplo a la de O_1 . Las tareas prosiguen, como en el caso del procedimiento analítico, con la producción del correspondiente plano de puntos, trazado de líneas de nivel, etc. Fig. 295



6. AEROFOTOGRAMETRIA

6.1. Caso aerofotogramétrico elemental

Iniciemos el estudio con la figura 296 que presenta esquemáticamente una cámara fotográfica $A' B' C$ con el eje $00'$ principal de su objetivo, dispuesto perpendicularmente a la EMULSION fotográfica $A' B'$ y al terreno AB . La emulsión se supone extendida sobre un soporte absolutamente plano y al terreno se le considera más que llano: un perfecto plano geométrico. Fig. 296



En estas ideales condiciones, emulsión fotográfica y terreno, son superficies planas paralelas que cortan a la radiación de centro C (punto principal del objetivo) a distancias f y h de dicho centro, respectivamente. Según esto, la relación métrica entre cuanto aparece en la fotografía y la región correspondiente del terreno, no puede ser más sencilla: como $(A' B' / AB) = f / h$, basta multiplicar cualquier segmento de la fotografía por h / f para obtener la correspondiente medida del terreno; o se podrá restablecer h si se conocen f y AB para que resulte $A' B'$ de una longitud determinada. En otras palabras: la fotografía así obtenida es una reproducción exacta del terreno a

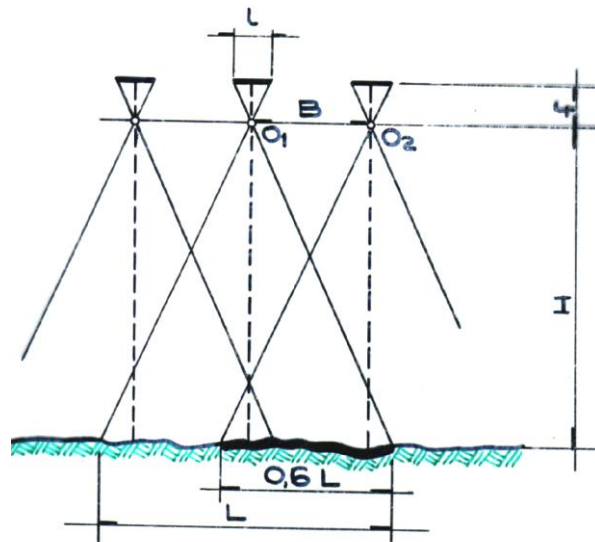
la **escala f / h** , y ésta puede fijarse a voluntad variando h convenientemente, f es la distancia principal de la cámara fotográfica y h la altura sobre el suelo del punto principal del objetivo en el momento de impresionarse la emulsión sensible (altura de vuelo).

Acoplado cuidadosamente cuantas fotografías de esta clase fueran necesarias, se formarán de inmediato la mejor planimetría que pudiera exigirse de la región elegida.

6.2. Obtención de aerofotogramas horizontales

La cobertura fotográfica de una zona de terreno se ejecuta mediante líneas de vuelo rectas y paralelas (corridas fotográficas), de modo que un par de lados del fotograma (siendo su formato cuadrado) sea paralelo al eje de la corrida (fig. 297). Cuando los fotogramas se impresionan a una cadencia tal que dos de ellos, sucesivos, presente una superposición adecuada (usualmente 60 %), es posible proceder a un examen estereoscópico de la zona de terreno común a ambos.

Fig. 297



Los fotogramas que constituyen este par han sido obtenidos desde dos puntos de vista diferentes \varnothing_1 y \varnothing_2 que determinan una base aérea. Si la superposición ha sido regulada correctamente, y si los fotogramas sucesivos de la corrida fotográfica son numerados correlativamente, el 1 y el 2 formarán el 1° par; el 2 y el 3 el 2°; los 3 y 4 el 3°, y así sucesivamente. Una superposición mayor del 50 % proporcionará continuidad estereoscópica en toda la corrida: TODO el terreno fotografiado podrá ser visto sucesivamente en relieve, sin "huecos" estereoscópicos. Una segunda serie de fotografías paralelas a las anteriores constituye la segunda corrida, que debe presentar un ligero recubrimiento con la primera (generalmente el 30 %), cumpliendo las siguientes corridas con la misma exigencia. En la práctica, las trayectorias del avión fotógrafo (ejes de corrida) no resultan nunca enteramente rectilíneas ni perfectamente paralelas y equidistantes. De ello resulta que los bordes de dos fotogramas sucesivos no son jamás rigurosamente paralelos en el espacio, en el momento de la toma (la alineación de las sucesivas bases no es constante).

6.3. Condiciones a cumplir para un examen estereoscópico correcto

Observando la figura 298, los puntos A^1 y A^2 son puntos homólogos. Si se disponen los dos fotogramas del par uno sobre el otro, de modo que todos los puntos homólogos estén sensiblemente superpuestos, la recta que une los dos puntos principales dará la dirección sobre el terreno de la base aerofotogramétrica (fig. 299).

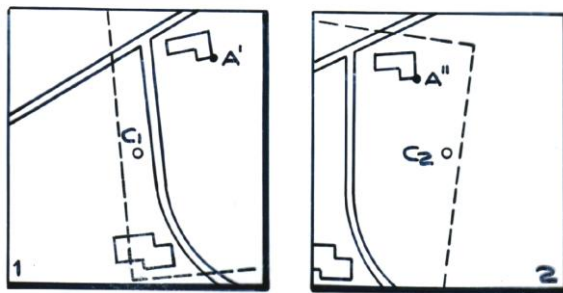


Fig. 298

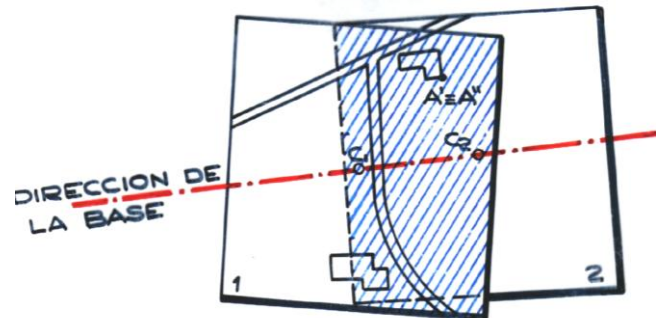


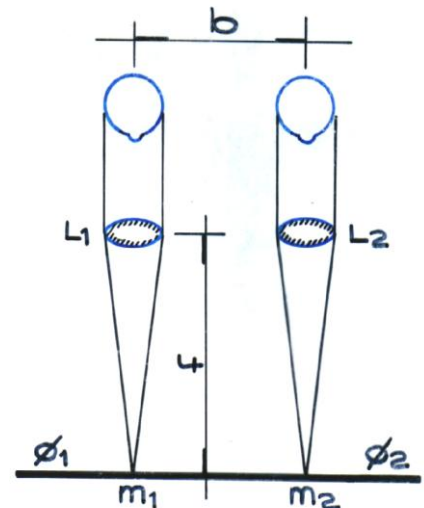
Fig. 299

Una vez definida la base para un par de aerofotogramas, serán aplicables al mismo las condiciones establecidas, para su examen estereoscópico.

6.4. Estereoscopio Simple

Consiste en intercalar (fig. 300) entre el ojo y la correspondiente perspectiva fotográfica una lente convergente adecuadamente montada. De este modo, colocando el plano de los fotogramas ϕ_1 y ϕ_2 en las inmediaciones del plano focal de las lentes L_1 y L_2 , estas funcionarán como lupas, produciendo imágenes suficientemente alejadas como para considerarlas en el infinito. Es decir, los ojos recogerán haces de rayos prácticamente cilíndricos de cada punto observado, pudiendo acomodar sin esfuerzo debido a la escasa convergencia que ofrecen los pares de puntos homólogos.

Fig. 300



En otras palabras, convergencia y acomodación se corresponden, gracias a este artificio. Un aparato así concebido se denomina estereoscopio simple. Consta de 2 oculares de igual distancia focal f , montados de modo que la separación entre sus centros ópticos sea igual a la distancia interocular promedio (63 a 65 mm). Estos oculares pueden tener cualquier valor de aumento, aunque generalmente no pasan de 4x ó 5x; lo usual es 2x ó 3x. Si el aumento es grande (lo que equivale a decir focal corta) subsisten las ventajas del aumento óptico: imagen mas detallada y mejor apreciación de los pequeños relieves. Pero paralelamente, pesarán los inconvenientes derivados del reducido campo que abarcan las lentes de este tipo. Además, las tolerancias en el montaje del estereograma serán mucho mayores: pequeñas desviaciones o paralajes transversales residuales que con aumentos más débiles pasarían desapercibidos, serán aumentados hasta invalidar quizá el estereograma. Por lo tanto, en los estereoscopios simples que sólo se usarán para exploración del estereograma con finalidad informativa, o para entrenamiento, se prefieren aumentos

pequeños y focales largas. Algunos modelos recientes vienen provistos de registro para modificar el ajuste de la distancia interpupilar.

Con cada par formado, será posible observar estereoscópicamente toda la zona común, pero el estereoscopio simple no permite explorar un ancho mayor que la distancia interpupilar. Ello indica que para aprovechar íntegramente el par habrá que ampliar la base de observación.

6.5. Estereoscopio de espejos ó estereoscopio catóptrico

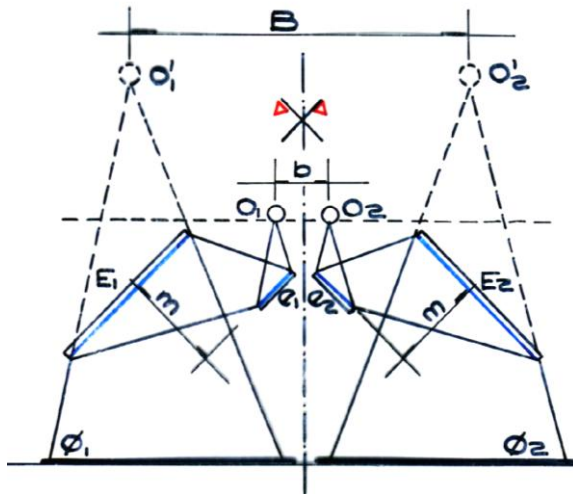
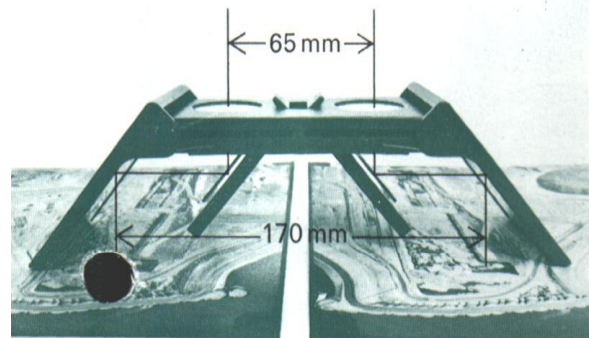


Fig. 301



Resuelve el problema planteado anteriormente.

Está constituido por dos espejos grandes (fig. 301) E_1 y E_2 inclinados a 45° , y dos espejos pequeños e_1 y e_2 , paralelos a los primeros y a la misma distancia m ; el conjunto es simétrico y constituye una sola pieza que se coloca sobre el tablero en que están ubicados los dos fotogramas del par ϕ_1 y ϕ_2 . La línea de los ojos O_1O_2 es paralela al plano, y aquellos se ubican simétricamente respecto al plano bisector del conjunto de los espejos. De este modo hemos podido ampliar artificialmente la base interocular b , a un valor B' varias veces mayor. Todo ocurrirá como si los ojos del observador estuvieran ubicados en O_1' y O_2' , respectivamente.

La relación entre la base de observación B' y la base interocular b , es en la mayoría de los modelos, alrededor de 5.

De este modo obtenemos un aparato cuyo campo estereoscópico angular permite abarcar toda la zona común de un par de fotogramas aéreos, cualquiera sea su formato. Los espejos e_1 y e_2 , pequeños, son reemplazados a menudo por prismas de vidrio. En cuanto a los espejos grandes, es conveniente que la reflexión se produzca sobre su cara anterior, es decir, que el trayecto óptico no atraviese el espesor del espejo para encontrar la superficie reflectante. Con la finalidad, se usan láminas de vidrio espejadas en su cara frontal y recubiertas de un enduido protector. La evidente ventaja de permitir el examen de pares aéreos completos sin mover los fotogramas, que presenta este tipo de estereoscopio, está contrabalanceada por un pequeño inconveniente: la distancia entre los ojos ficticios O_1' y O_2' el plano de los fotogramas es relativamente grande. Esto impide explotar al máximo el alto poder resolutivo que proporcionan los fotogramas, para identificar detalles y pequeños relieves. Por tal motivo, muchos fabricantes agregan como accesorios un visor óptico de aumento que

se puede intercalar entre los pequeños espejos y los ojos. Por supuesto se trata de un visor doble constituido por un pequeño gemelo prismático con posibilidad de ajuste para la distancia interpupilar. Con distintos visores binoculares se puede seleccionar el aumento a voluntad. Generalmente, no sobrepasa los 4x ó 5x.

6.6. Influencia de los Desniveles del Terreno

El triángulo A'B'C (fig. 302) representa la cámara aerofotogramétrica de distancia focal f y APB el terreno que ha aparecido en el fotograma A'B' cuando el centro principal del objetivo de aquella se encontraba en C, a la altura h del plano de comparación AB, se observa de inmediato que un punto como P, situado Δh sobre AB, da en el fotograma su imagen P' , la cual, de no existir la rugosidad representada, hubiera correspondido a la del punto P_0 del plano AB. En cambio, la proyección P_1 de P sobre este plano, que es precisamente la que nos interesa para la determinación planimétrica de P, hubiera dado en el fotograma su imagen en P_1' .

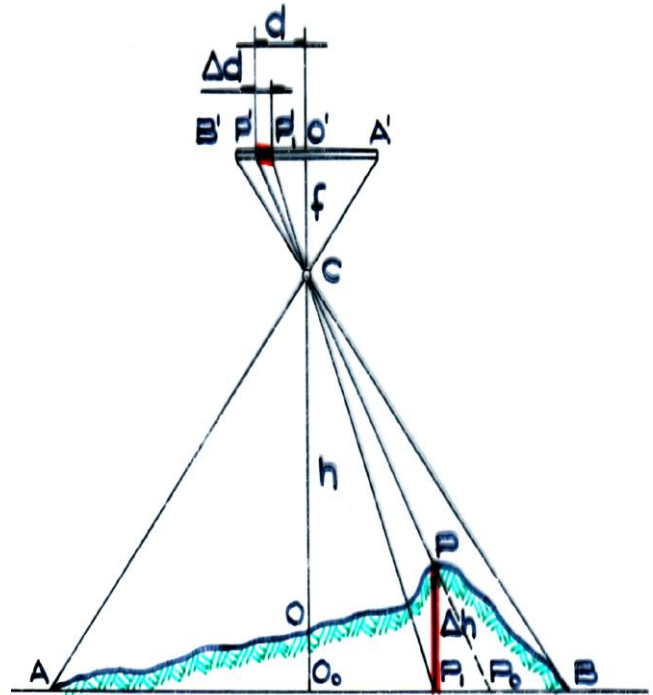


Fig. 302

La irregularidad Δh se ha traducido, pues, en el fotograma en un pequeño segmento $P'P_1'$ de una recta que pasa por el punto nadiral (O' en este caso), y cuyos extremos son, la imagen de P y la que de P debió obtenerse si se hubiera tratado de terreno perfectamente plano. Veamos cómo se determina la medida $P'P_1'$. Con ella tendremos de inmediato exacto conocimiento de la perturbación que el desnivel del terreno introduce en los fotogramas y en la razón de semejanza f/h que debería resultar entre las medidas de éstos y las de los correspondientes elementos retratados. Llamando d a la distancia entre el punto O' nadir del fotograma y la imagen P' de P; y Δd al segmento $P'P_1'$ cuyo valor queremos establecer, vemos sin dificultad que:

$$\Delta d / f = P_1P_0 / h$$

$$\Delta d = (f / h) \cdot P_1P_0$$

$$\text{y como } P_1P_0 = \Delta h \cdot (d / f)$$

$$\text{resulta } \Delta d = (\Delta h / h) \cdot d$$

fórmula por demás sencilla, cuyo importante contenido es el siguiente:

- 1) El valor Δd , contra todo lo que pudo creerse a priori, es independiente de la distancia principal f de la cámara aerofotogramétrica.
- 2) Δd varía en razón directa del desnivel Δh del punto P considerado y la distancia d de la imagen P' de aquél al nadir O' del fotograma.

- 3) A igualdad de otras circunstancias, Δd varía en razón inversa de la altura h de vuelo en el momento de impresionarse el fotograma.
- 4) Todos los puntos del terreno situados sobre el plano de comparación a igual altura que P están más próximos de C en la medida de Δh , resulta que la semejanza entre el fotograma y el terreno de cota Δh no responde más a la escala expresada por la relación f / h sino a otra dada por $f / (h - \Delta h)$, la cual varía con Δh para cada plano que contenga puntos del terreno y sea paralelo al AB de comparación. Teniendo en cuenta que a cada uno de estos planos pertenece precisamente una línea de nivel del terreno, se comprende que de haber materializadas éstas sobre el suelo antes del vuelo fotográfico, aparecerán en el fotograma todas a distintas escalas, tanto mayor cuanto más elevada fuera la cota respectiva. Importante conclusión que nos pone de manifiesto la necesidad de proceder con cautela y estudiar la forma de utilizar fotogramas para construir planos con líneas de nivel.

- Estamos pues, ante el hecho de que los fotogramas encierran desplazamientos planimétricos en los detalles que reproducen, desplazamientos cuya magnitud es desconocida ya que son consecuencia de sus variados desniveles Δh respecto del plano de comparación elegido. Por tanto, es necesario fijar límites de errores a las planimetrías que se construirán con fotogramas, pues únicamente así será posible determinar los valores de Δh admisibles para que la perturbación que originen sea inferior a la que establezcan nuestras tolerancias planimétricas.

- Si admitimos para éstas un valor medio de Δd de 0,2 mm ó 0,5 mm, la expresión : $\Delta h = (\Delta d / d) \cdot h$ deducida de la fórmula expuesta, nos proporcionará los Δh que buscamos para las diversas condiciones de altura de vuelo h y apartamiento del nadir del fotograma d .

Ejemplo:

Si $\Delta d = 0,2 \text{ mm}$; $d = 1 \text{ cm}$ y $h = 1000 \text{ m}$ implica que $\Delta h = 20 \text{ m}$

Por lo tanto, si se hace una tabla con estos valores de la expresión, ***no podremos admitir en los fotogramas errores planimétricos superiores a 0,1 mm, cosa que si $d = 0,10 \text{ m}$, o sea un círculo central de 0,10 m de diámetro y siempre que los desniveles no excedan de 4 m.***

Si $\Delta d = 0,1 \text{ mm}$; $d = 10 \text{ cm}$ y $h = 4000 \text{ m}$ implica que $\Delta h = 4 \text{ m}$ Escala 1:25.000

Todo esto pone de manifiesto que los desniveles del terreno son un serio obstáculo para la utilización directa de los fotogramas con fines planimétricos de mediana precisión y podemos afirmar rotundamente, por tal causa, que pretender construir planimetrías fotográficas (MOSAICOS o FOTOPLANOS, como se llaman corrientemente), de regiones montañosas, es intento absurdo por completo, salvo que las exigencias métricas contengan tolerancias especialmente amplias.

6.7. Inclinación del Fotograma

La cámara aerofotogramétrica, instalada en el avión, sobre una perfecta suspensión cardánica, con dispositivos para mantener la emulsión sensible lo más horizontal

posible, ha originado los más variados ensayos mecánicos. Pero los vaivenes, cabeceos e inclinaciones del avión, aunque amortiguados, llegan a afectarla, siendo de eficacia giróscopos, amortiguadores ultrasensibles, niveles de doble burbuja centrales a voluntad que se retratan simultáneamente con el terreno, basculadores eléctricos autorregistradores, etc; pero a pesar de todo ello casi todos los fotogramas resultan inclinados (fig. 303).

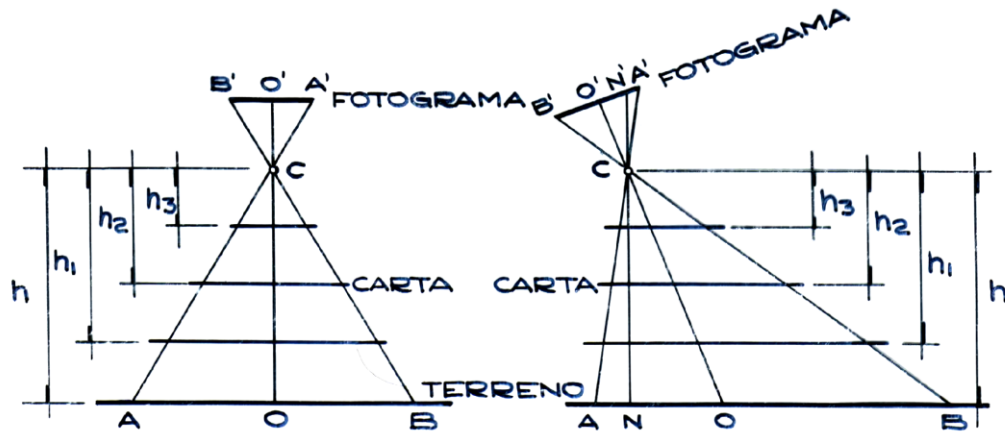


Fig. 303

Admitido esto, resulta que carta o plano y terreno son figuras geoméricamente semejantes como secciones planas horizontales del haz de rayos que resulta, proyectando desde el centro óptico C del objetivo aerofotogramétrico, los infinitos puntos del fotograma A'B' obtenido allí mismo.

La razón $h_i = h$ es, en cada caso, la escala E del plano. De las medidas de éste se pasa a las del terreno multiplicándolas por $1 / E$. y estas breves consideraciones nos permiten concluir que todas las relaciones métricas que puedan establecerse entre fotograma y plano serán válidas entre fotograma y terreno, puesto que de aquellas podremos deducir éstas introduciendo convenientemente el factor de escala necesario. Referiremos pues, los puntos del fotograma a un sistema de coordenadas planas rectangulares $P'(x', y')$ y los puntos del plano a otro sistema análogo $P(x, y)$ y para resolver nuestro problema trataremos de establecer las ecuaciones que nos permitan pasar de las coordenadas x'_1, y'_1 de un punto del fotograma a las x_1, y_1 de su correspondiente en la carta o plano.

- **A continuación se tratan brevemente un conocimiento resumido y mínimo.**

Examinando las figuras 304, \emptyset es el plano del fotograma; π el de la carta. Ambos se cortan en l-l formando un diedro cuya medida angular es \angle . Si C es el centro del objetivo, vemos que F'F' es la recta de fuga de π en \emptyset y FF' la de \emptyset en π . Las rectas FF', F'F' e l-l son, como se sabe, paralelas y respectivamente perpendiculares a las de máxima pendiente de los planos que las contienen. Así, elegiremos como ejes del sistema $P'(x', y')$ ya citado, a la recta de máxima pendiente de \emptyset que contenga el punto principal O' y una paralela a F'F' que pase por P' (origen cuya elección se comprenderá más adelante), que es el punto de intersección con \emptyset de la bisectriz del ángulo \angle según el cual también se cortan el eje principal del objetivo O'CO y la vertical N'CN que pasa por C.

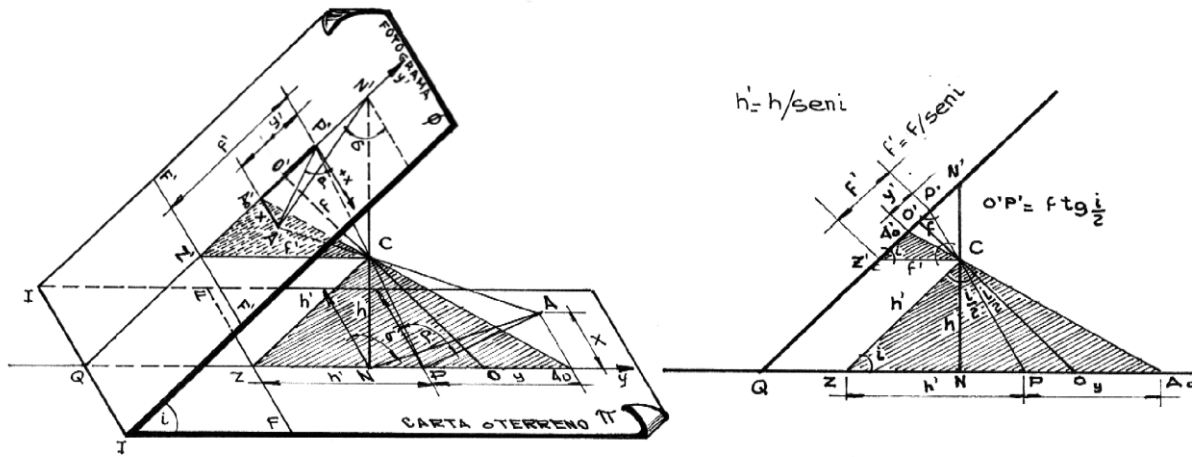


Fig. 304

El sistema de coordenadas de π será, para mayor simplicidad, el que se determina con las rectas que en π corresponden a los ejes de \emptyset , siendo su origen P, también correspondiente de P'. Si se comparan los triángulos semejantes: $A'A_0C - AA_0C$ y $Z'A_0C - ZA_0C$, se obtiene:

$$h' / (f' - y') = x / x' \quad ; \quad h' / (f' - y') = (y + h') / f'$$

de las que resulta y se deduce inmediatamente:

$$\begin{aligned} x &= x' - h' (f' - y') & h' &= h / \text{sen } i \\ y &= y' - h' (f' - y') & f' &= f / \text{sen } i \end{aligned} \quad (1)$$

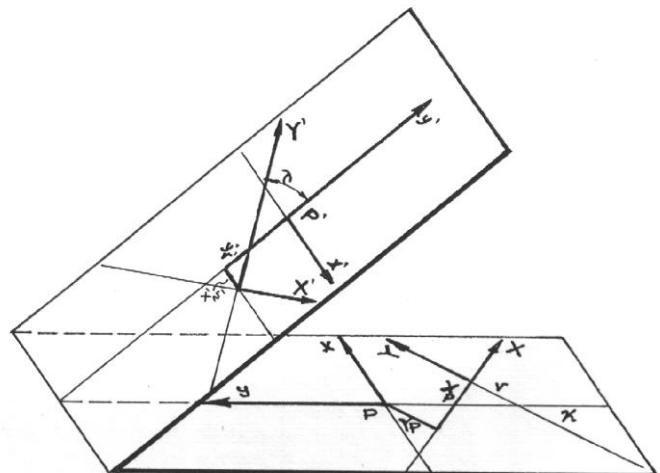
Estas simples ecuaciones no tienen, sin embargo, más que un valor puramente teórico. En efecto, los sistemas de coordenadas elegidos para referir los puntos del plano y los del fotograma no tienen sentido en la práctica, ya que excepcionalmente han de coincidir respectivamente con el que se establezca de antemano para construir el plano, y con el que las marcas de las cámaras fotogramétricas dejan grabado en el fotograma. Esta dificultad tiene la solución siguiente:

Suponiendo que el sistema en que se construye el plano es el $V(X,Y)$, el cual forma un ángulo κ con el $P(x,y)$ cuyo origen P tiene en aquél las coordenadas X_P, Y_P , las conocidas fórmulas de paso de un sistema a otro serán en tal caso (fig. 305): Fig. 305

$$\begin{aligned} X &= x \cos \kappa - y \text{ sen } \kappa + X_P \\ Y &= y \text{ sen } \kappa - x \cos \kappa + Y_P \end{aligned}$$

y análogamente, si el sistema grabado en el fotograma por la cámara fotogramétrica es el $V'(X',Y')$ que forma un ángulo λ con el $P'(x',y')$ en el cual las coordenadas de V' son x'_V e y'_V , se pc

$$x' \text{ en } X' \cos \lambda - Y' \text{ sen } \lambda + x'_V$$



$$y' \text{ en } Y' \text{ sen } \lambda + X' \text{ cos } \lambda + y'_v$$

Efectuando la doble sustitución en las fórmulas (1) y simplificando convenientemente, se llega a obtener las siguientes:

$$X = \frac{a_1 X' + b_1 Y' + c_1}{a_0 X' + b_0 Y' + 1}$$

$$Y = \frac{a_2 X' + b_2 Y' + c_2}{a_0 X' + b_0 Y' + 1}$$

en las cuales X e Y (coordenadas de los puntos del plano o carta) son función de X' e Y' (coordenadas de los puntos del fotograma en el sistema grabado en él) y además de los coeficientes $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$ dependiente estos últimos, a su vez, según se ha visto, del valor de los parámetros $\kappa, \lambda, x_v, y_v, x'_v, y'_v, f'$ y h' .

- El problema planteado queda en tal forma resuelto y se vé que son ocho las variables que intervienen en su solución.

Será, pues, necesario **conocer la correspondencia de cuatro pares de puntos (8 ecuaciones)** para poder establecer en cada fotograma los ocho coeficientes de su transformación homográfica, la cual así podrá hacerse punto por punto con laboriosos cálculos, que supone una tarea abrumadora; que en la construcción de un plano con fotogramas exige un procedimiento más rápido y sencillo, que se puede lograr por proyección óptica-perspectiva y por aparatos que proporcionan automáticamente esta transformación del fotograma en el plano, llamados **PROYECTORES AUTOMATICOS**).

- Consecuentemente, la proyección óptica perspectiva del fotograma para formar el plano respectivo a una escala determinada sólo será posible si se dispone de cuatro puntos en la carta cuyos homólogos puedan encontrarse con exactitud en el fotograma. Ubicados aquellos en el plano, la transformación óptica-perspectiva se conseguirá cuando las imágenes proyectadas de los puntos individualizados en el fotograma coincidan en absoluto con los correspondientes de la carta. Por lo tanto **es necesario cubrir previamente el terreno a retratar con mediciones topográficas y señales de tal forma** (según la altura de vuelo, campo del objetivo y recubrimiento de los fotogramas), **que en cada uno de los fotogramas aparezcan no menos de 4 de los puntos medidos**, los que se utilizarán para el ajuste de la transformación óptica-perspectiva.

6.8. Triangulación Radial

De las fórmulas ya vistas (1), dividiendo sus miembros ordenadamente obtenemos:

$$X / y = x' / y' = \text{tg } \rho \quad (2)$$

y además:

$$(y + h \cdot \text{tg } 1/2 \text{ i}) / x = (y' + (f' - y') \text{ tg } i/2 \cdot \text{sen } i) / x' = \text{tg } \sigma \quad (3)$$

(esta última sustituyendo x e y en la primera por sus valores expresados en la (1))

La igualdad (2) dice que los ángulos ρ medidos en el fotograma alrededor del punto P' son iguales a los que se miden en el punto P del terreno del cual aquél es imagen; y la expresión (3), que los ángulos σ medidos en el fotograma alrededor del punto nadiral N', son independientes de la altura h de vuelo, o, lo que es equivalente, de los desniveles del terreno.

Si el fotograma se ha obtenido aproximadamente horizontal, los puntos N', P' y O' son casi coincidentes, por tal razón si no es posible establecer en el fotograma la situación precisa de P'

o de N' , puede tomarse el punto principal O' como vértice de los ángulos que determine con cualquier par de puntos A'_j , del fotograma, puesto que, según lo que acabamos de decir, tales ángulos, con pequeño error, serán iguales a los que se hubieran medido desde el punto O del terreno hacia los puntos A_j de los que aquellos son imágenes.

- Ante esta conclusión, se vislumbra la manera de proceder para poder prescindir de la ímproba tarea de señalar y medir sobre el terreno la suficiente cantidad de puntos como para que aparezcan cuatro en cada fotograma (fig. 306).

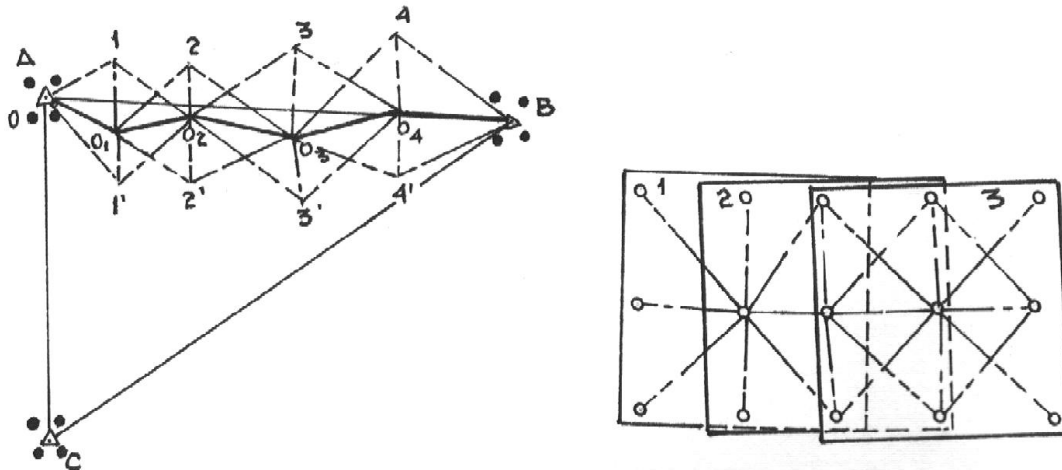


Fig. 306

Si se observa la figura 306 y se considera A, B y C como los vértices de una triangulación distantes entre sí una veintena de kilómetros, puede procederse a la densificación de puntos fijos en la siguiente forma: en A se señalan y miden cuatro puntos que aparecerán en el primer fotograma del recorrido aerofotográfico entre A y B. En B Se procede en forma análoga que en A. Efectuando el vuelo fotográfico, es siempre posible individualizar en cada fotograma puntos característicos que aparezcan también en fotogramas vecinos. Se eligen estos puntos y se marca muy cuidadosamente en los fotogramas de tal manera que puedan establecerse radiaciones de centro O_i como las que aparecen en las figuras, radiaciones cuyos ángulos se miden con el mayor esmero y exactitud. Concluidas estas mediciones se forma la cadena de triángulos que resulta del acoplamiento ordenado de los sucesivos fotogramas y en esta forma se va desde A, donde existían los cuatro puntos de partida conocidos, hasta B, donde se encontrarán cuatro puntos de llegada que permiten comprobar las operaciones efectuadas.

El ajuste de la triangulación radial se hace sobre la longitud A - B.

- De esta forma se vincula por medio de una cadena de triángulos cuantos puntos se desee, y se dispone de los 4 puntos necesarios en cada fotograma para ajustar su transformación óptica perspectiva. Los ángulos se miden con coordinatómetros de precisión, rectangulares o polares y se conocen con el nombre de **TRIANGULADORES RADIALES** (miden segmentos con una precisión de 1/100 mm y ángulos a los 30"). De esta forma se construyen fotogramas adosados (previa transformación óptica-perspectiva sobre puntos determinados por triangulación RADIAL y bases terrestres) y planimetrías con las constancias de un fotoplano.

6.9. Planialtimetrías Aerofotogramétricas

El principal inconveniente que se opone a la construcción de planos, fotoplanos o mosaicos, de zonas onduladas o quebradas son los desniveles del terreno, ya que los mismos han de resultar falseados planimétricamente en forma inadmisibles como consecuencia de las rugosidades del terreno que se haya impresionado en los respectivos fotogramas.

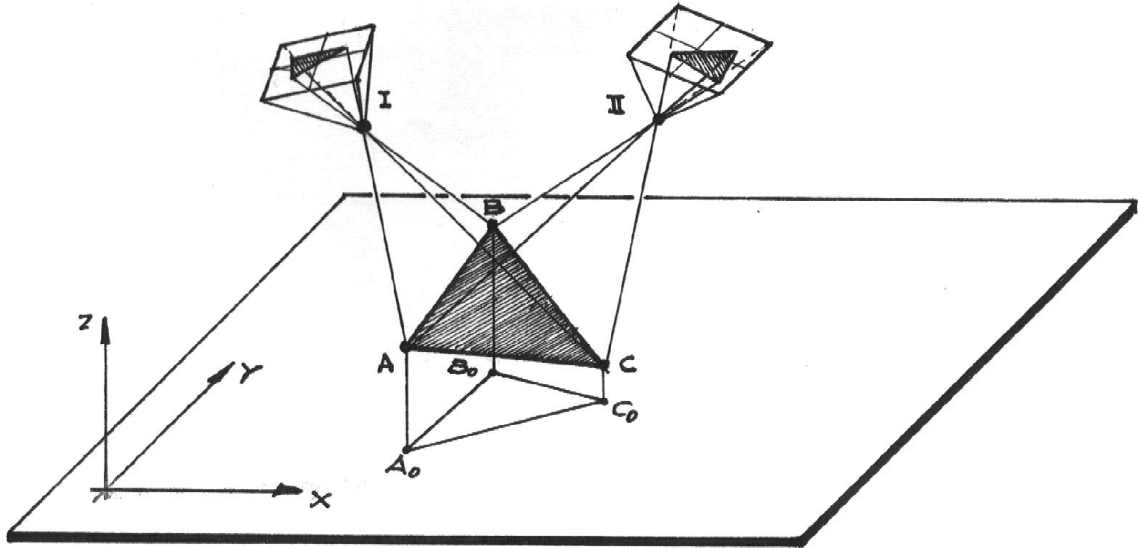


Fig. 307

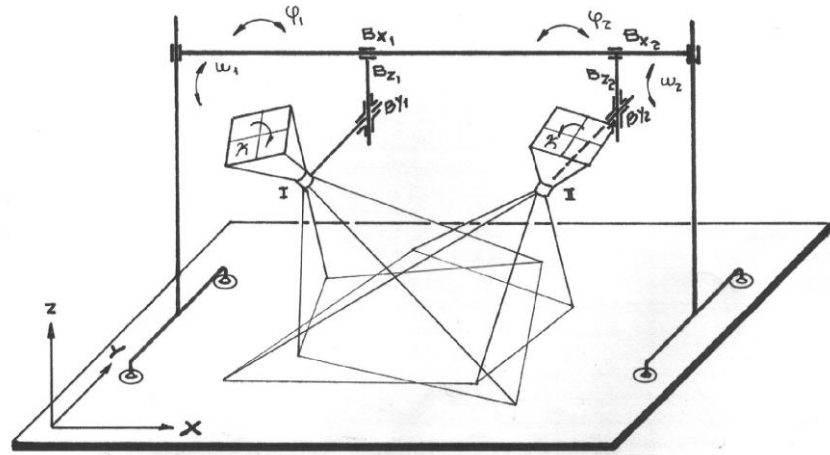
Observando la figura y suponiendo que los puntos A, B, C, todos a distintos nivel, pertenecen a un terreno bien accidentado cuya planialtimetría queremos construir. Desplácese sobre tal terreno a cualquier altura un avión portador de cámara aerofotogramétrica con la que se obtenga un fotograma en I y, poco después, otro fotograma en II. Es evidente que si en nuestro gabinete poseemos dos cámaras fotogramétricas idénticas a las del avión y logramos colocar en ellas los fotogramas impresionados en I y II emplazando ambas cámaras en soportes apropiados de manera que se reconstruya su situación relativa correspondiente a la obtención de los fotogramas, la intersección de los pares de rayos correspondientes a los puntos dados (IA-IIA, IB-IIB, IC-IIC) nos determinará la situación en el espacio de A, B, C. Esta reconstrucción en el espacio podrá además hacerse a escala E con sólo dar el segmento I-II longitud conveniente. Y finalmente, mediante las perpendiculares AA₀, BB₀, CC₀, al plano elegido para el dibujo de la carta, se obtendrá sobre ésta en A₀, B₀, C₀, la planimetría exacta de ABC a escala E, resultando de la medida de los segmentos AA₀, BB₀ y CC₀ a igual escala, las cotas de ABC referidas al plano de comparación.

Estamos, sin duda alguna, frente a la solución integral del problema, lograda brillantemente mediante la reproducción espacial en gabinete de las condiciones de obtención de un par de aerofotogramas, para restablecer por intersecciones la situación de todos los puntos comunes a los mismos. Y esta nueva modalidad se denomina AEROFOTOGRAMETRÍA ESTEREOSCÓPICA, al igual que la terrestre con la cual, desde ya, mantiene estrecha e inseparable vinculación.

6.10. Orientación Recíproca - Proyectiva en el Espacio y la Orientación Absoluta

Fig. 308

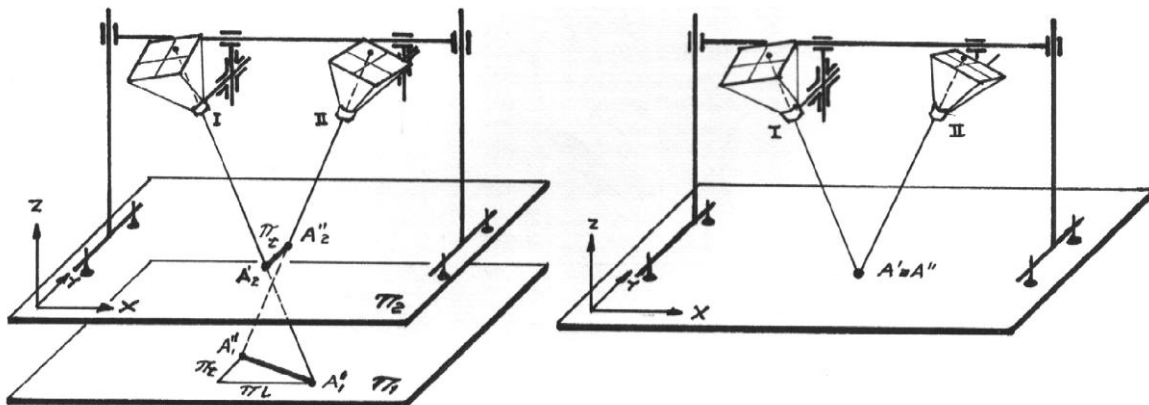
El instrumento, para tal operación, comprende un soporte general en el que se disponen dos cámaras fotogramétricas que son fidelísima reproducción de aquellas que se obtuvieron los fotogramas. Estos se colocan dentro de dichas cámaras, en idéntica posición a la del momento



de su impresión y luego se les ilumina por detrás. Y así sobre el tablero se recoge la proyección luminosa de estos. Cada cámara puede desplazarse según tres direcciones normales X,Y, Z (3 grados de libertad) y puede rotar en torno de esos tres ejes φ , ω , κ (3 grados de libertad) lo que hace un total de 12 grados de libertad, para los dos proyectores. Como aditamento cómodo el conjunto puede girarse también alrededor de tres ejes normales (Φ , Ω , K). Por lo tanto el aparato reúne las condiciones exigidas.

- **Orientación recíproca:** Observando la figura 309, en ella aparecen los dos proyectores, de los cuales emergen sendas rectas que representan un par de rayos correspondientes, que debían cortarse en un punto del espacio. Pero en la posición del dibujo, dichos rayos no lo hacen y ponen de manifiesto la desorientación de los haces a que pertenecen. La sección de los rayos con el plano π_1 que recibe su proyección está dada por los puntos A'_1 y A''_2 . El segmento que estos determinan puede descomponerse, según las direcciones X e Y, en π_1 y π_t . Si subimos paulatinamente el plano π_1 (o lo que es igual bajáramos el conjunto de los proyectores) se alcanzará una posición π_t en la cual queda anulada la componente π_t del segmento $A'_1A''_2$. En tal momento intentaremos un movimiento de uno de los dos proyectores para anular la única componente π_t del nuevo segmento $A'_2A''_2$ y cuando lo hayamos logrado estaremos ante el primer par de rayos correspondientes que se cortan en un punto del espacio.

Fig. 309



Este resultado pone con toda claridad en evidencia que la componente π_t -PARALAJE LONGITUDINAL- es el elemento que regula la altura del plano π_i en que hallaremos el

punto de intersección; mientras que la componente π_t -PARALAJE TRANSVERSAL- nos proporciona el criterio para variar la orientación de los proyectores hasta conseguir que se encuentren en la debida posición, que produzca la intersección. Nada cabría agregar sino que con repetir el procedimiento para 5 puntos cualesquiera del par de fotogramas proyectado, éstos quedarían recíprocamente. Pero para conseguir la intersección del 2°, 3°, 4°, par de rayos se perderá la conseguida para los precedentes. Pero, si sistematizamos en forma tal que la orientación relativa de dos fotogramas sea una operación que se termina con exactitud; a lo más, en tres tanteos sucesivos, que no insumen en total arriba de quince minutos.

6.11 La Triangulación y Nivelación Aerofotogrametricas

Para la orientación de pares de fotogramas aéreos, se exige el conocimiento previo de la planimetría de dos puntos y la cota de un tercero. Pues bien, un procedimiento comparable al de la Triangulación Radial, con el cual la Aerofotogrametría pudo ayudarse a sí misma proporcionando la densificación necesaria de puntos conocidos hasta llegar a los cuatro exigidos para efectuar correctamente la transformación óptica-perspectiva de cada fotograma, ha permitido a la Aerofotogrametría doble, encontrar también mediante ingeniosos procedimientos, el modo de disminuir la densidad del trabajo terrestre en que forzosamente ha de apoyarse.

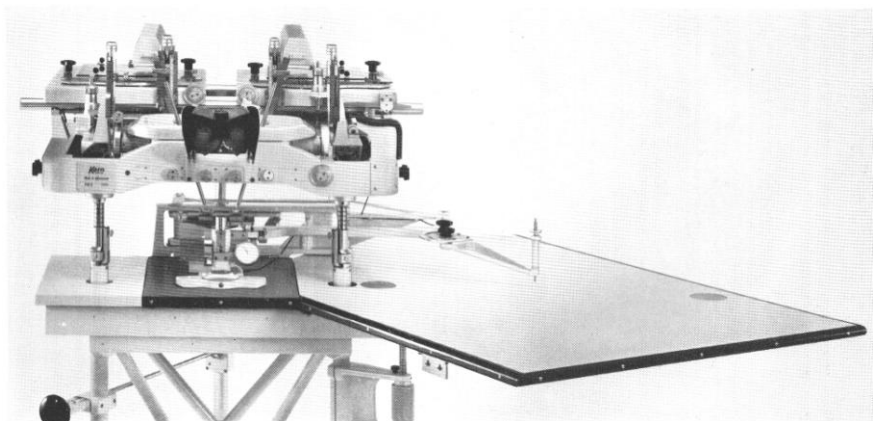
Efectuando la orientación recíproca de una pareja de aerofotogramas y, sin moverlos, haciendo lo propio entre el 2° par y el 3°, un 4°, etc. hasta conseguir una veintena de éstos correctamente dispuestos entre sí, será posible efectuar la orientación absoluta del conjunto sobre tres puntos, los cuales pueden distribuirse en el primero y último fotograma utilizados. Es evidente que, después de esto, podemos conocer las tres coordenadas X, Y, Z de cualquier otro punto que aparezca en el terreno comprendido entre los fotogramas extremos y que en tal forma puede completarse el trabajo terrestre básico, suministrando elementos planialtimétricos donde sean útiles y convenientes. Si tal operación se lleva a cabo entre vértices de triangulación de 1° orden, manifiestamente podrán multiplicarse los del canevas geodésico y proporcionar los necesarios para el mejor apoyo de todas las operaciones topográficas o fotogramétricas posteriores.

7. INSTRUMENTOS DE RESTITUCION

7.1. Restituidores estereoscópicos

Fig. 310

Kern PG2



Los instrumentos de restitución estereoscópica son utilizados para la confección y corrección de mapas y planos topográficos a escalas grandes, con la utilización de fotografías. La orientación y restitución se realizan por los métodos fotogramétricos utilizados. La lectura de los valores de todos los elementos de orientación se hace con micrómetros y con la suficiente exactitud para poder introducir valores conocidos de operaciones anteriores, por ejemplo de aerotriangulación, lo que reduce considerablemente el tiempo necesario para la orientación relativa y absoluta en la fase de restitución. La lectura de las alturas se toma en una esfera graduada de un instrumento montado en el carro base. Las fotografías se observan ortogonalmente. Los movimientos de exploración horizontales son transmitidos al tablero de dibujo por medio de un pantógrafo polar de gran estabilidad, pudiendo hacer ampliaciones o reducciones.

Fig. 311

Kern PG3
digital

Restituidor Digital Estereoscópico Kern DSR1 – Fig. 311

7.2. Estación de fotogrametría digital o restituidor digital de video

“Digital Video Plotter”: DVP



Son estereorrestituidores analíticos para trabajos en que los requerimientos de exactitud son menos estrictos. Consisten en sistemas totalmente digitalizados, con un soporte lógico que funciona con cualquier computador personal (PC) e introducen la captación de datos tridimensionales y la operación en CAD. Elaboran mapas topográficos en escalas 1:25.000 e inferiores. Se los puede combinar con los sistemas fotogramétricos universales, para aerotriangulación, mapas de áreas urbanas, agricultura, geología, ingeniería (carreteras), arquitectura, etc.

Las imágenes digitalizadas se distribuyen a izquierda y derecha de la pantalla y son inspeccionadas mediante cuatro espejos pequeños, similares a un estereoscopio de espejos, montado sobre un brazo regulable y fijado al monitor.

Las marcas de medición en pantalla se obtienen al “pintar” algunos pixel de rojo. La “marca flotante” que resulta de ello puede ser movida usando el cursor de una mesa digitalizadora de 12”, permitiendo así la medición con las coordenadas X e Y. La coordenada Z se obtiene ajustando el paralaje, mediante el teclado o mejor con el “trackball”.

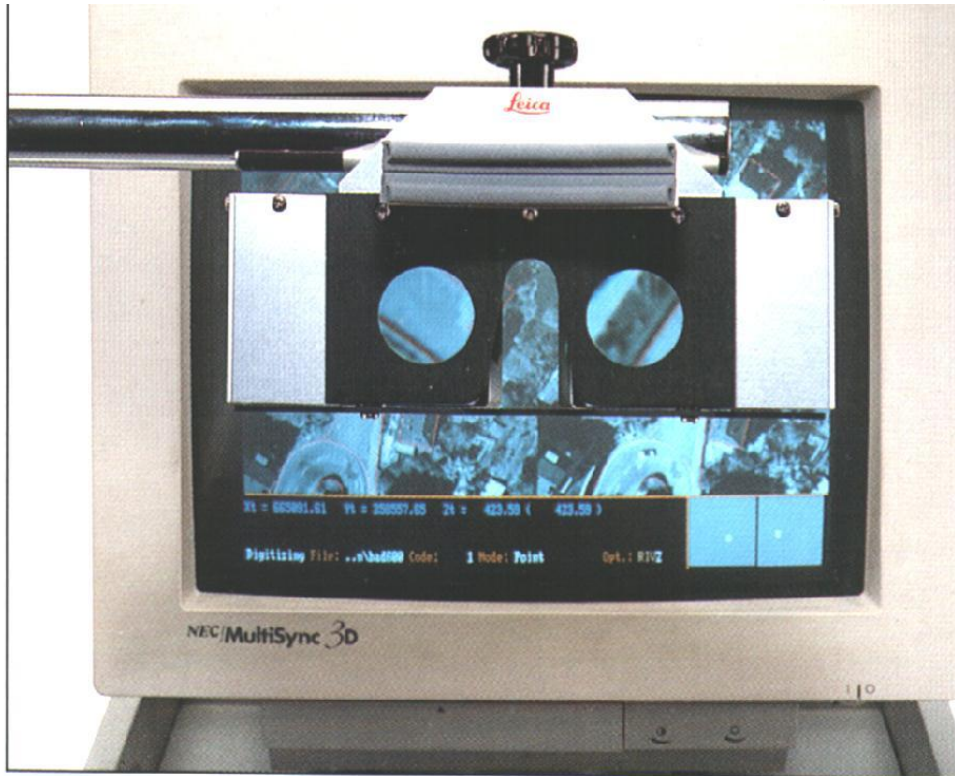
Utiliza fotografías digitales en vez de negativos originales, diapositivas o impresos.

El soporte lógico es guiado por un menú que incluye módulos para orientación relativa y absoluta y para el cálculo de coordenadas en las tres dimensiones. La captación de datos incluye puntos, líneas, arcos, círculos, polígonos cerrados.

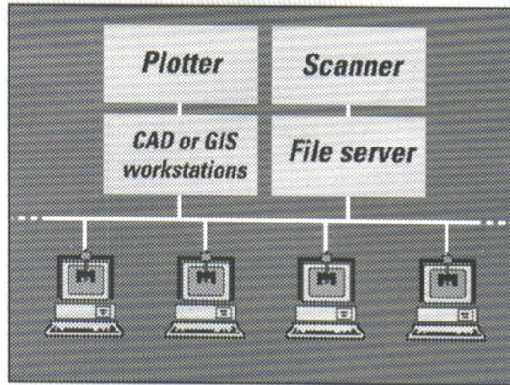
Los módulos del software permiten transmitir los datos capturados a un software de edición gráfica, transformando los datos en formatos compatibles con varios sistemas SIG y CAD conocidos (AutoCad, etc).

La precisión en fotogrametría depende sobre todo en la escala de los fotogramas, y en el DVP la precisión se ve afectada por la resolución de las imágenes digitalizadas.

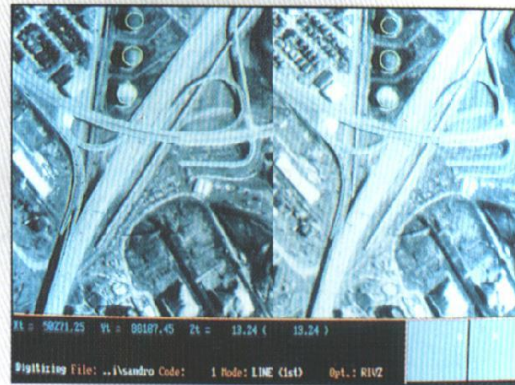
Pueden lograrse en planimetría y altura precisiones de un 70% del tamaño del pixel, con lo que representan unos 30 micrómetros a una escala de fotogramas de 600dpi.



Trabajo en red con DVP



Superposición estereoscópica



dpi ¹	ESCALA FOTO				FILE ² MB	PIXEL ³ μm
	1/5 000	1/10 000	1/15 000	1/20 000		
300	0.30	0.60	0.90	1.20	7	85
400	0.22	0.45	0.67	0.90	13	64
450	0.20	0.40	0.60	0.80	16	56
500	0.18	0.36	0.54	0.72	20	51
600	0.15	0.30	0.45	0.60	29	42
800	0.11	0.22	0.34	0.45	52	32
METROS						

Precisión planimétrica

- 1 dpi (puntos por pulgada) es la resolución del INPUT del scanner
- 2 FILE MB es el tamaño de un fichero que contiene una imagen en megabytes
- 3 PIXEL μm es el tamaño del Pixel en μm

7.3. Estereocomparador

Los dispositivos de lectura del Estereocomparador son: en x y z, escalas medio milimetradas y nonios con los que se puede leer directamente 0,02 mm y por estima 0,01 mm; el tornillo micrométrico de paralajes es de paso milimétrico y su tambor graduado tiene 100 divisiones, de manera que los valores de π pueden obtenerse hasta 0,01 mm por lectura directa, y hasta 0,005 mm (5 μ) por estima. Por lo tanto con este aparato es posible determinar coordenadas de imagen y la paralaje con los siguientes errores medios:

$$M_x = \pm 0,01 \text{ mm} = \pm 10 \mu$$

$$M_y = \pm 0,01 \text{ mm} = \pm 10 \mu$$

$$M = \pm 0,005 \text{ mm} = \pm 5 \mu$$

TEMA 8 - 2° Parte 2

MEDICION SATELITAL - GPS

FUNDAMENTOS BASICOS GPS

1. ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL GPS

El Sistema de Posicionamiento Global, posee tres segmentos básicos:

Módulos o segmento espacial.

Módulos o segmento de control.

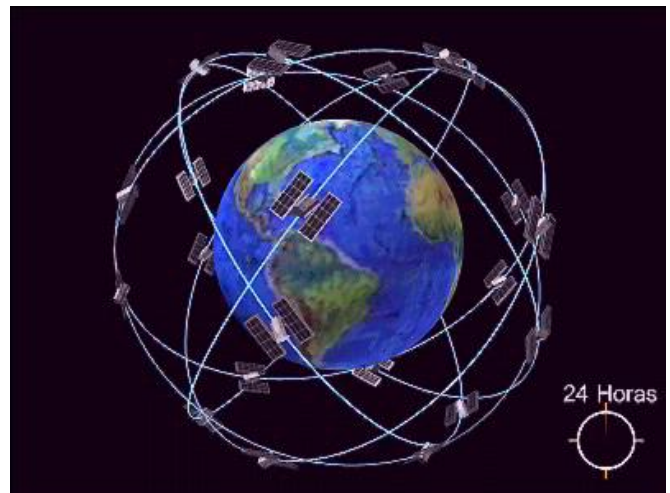
Módulos o segmento usuario.

1.1. Módulos en el espacio: (*) Ref.: Atlas

Geografico de la Rep. Arg. IGM – 2000

El sistema de posicionamiento global NAVSTAR GPS estaba compuesto por 24 satélites divididos en 6 órbitas a razón de 4 satélites por órbita (fig.312). Hoy son 36. Cada satélite describe dos órbitas por día con una velocidad tangencial de 3,9Km/seg.

Fig. 312



Órbitas:

Los satélites están distribuidos a razón de 4 satélites por órbita (fig.313). Esta última a 55° del ecuador y concéntrica al centro de masa de la tierra. Esta disposición permite contar con al menos cuatro satélites en todo momento en cualquier parte del globo.

Fig. 313

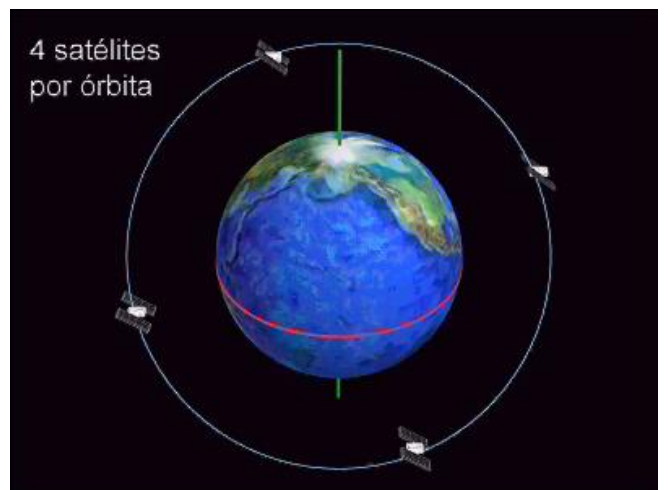
Con esta constelación de satélites se consigue tener una cobertura de mas

de 4 satélites simultáneos, por encima de los 15 grados de elevación sobre el horizonte; para cualquier lugar del planeta durante las 24 horas. Cada modulo espacial o satélite (en adelante SV = satélite = Space Vehicle) órbita a unos 20200 km de la superficie terrestre.

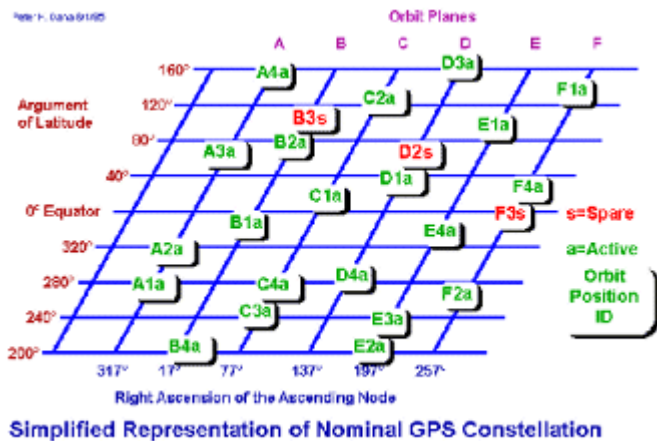
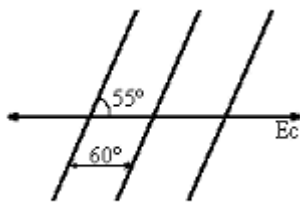
Existen 3 tipos diferentes de SV. Estos son; el Bloque I, Bloque II y Bloque III.

Se lanzaron 11 satélites del Bloque I entre 1978 y 1985, pero la vida útil de estos SV fue de solo 4,5 años y su inclinación de 66 grados. El Bloque II consiste de 22 SV y los 3 auxiliares, sus lanzamientos comenzaron en 1989 mediante vectores DELTA II.

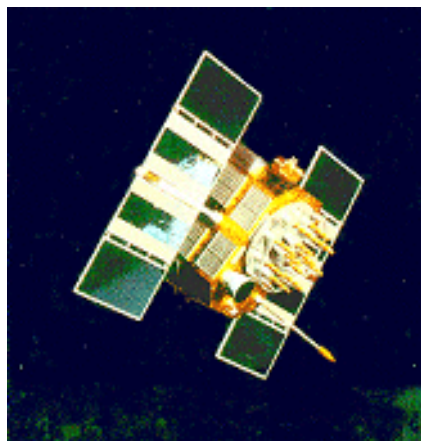
El Bloque III, son los programados para reemplazar a los del Bloque II. Estos últimos comenzaron a ser lanzados durante 1995 y tienen una esperanza de vida en órbita de 10 años.



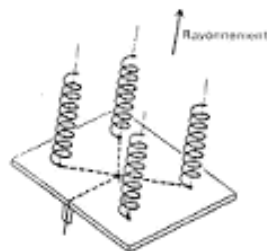
Las órbitas de los satélites son casi circulares, con una excentricidad de 0.03 a 0.3
 Están situadas a una altura de 20180 km.
 Tienen una inclinación respecto al plano del ecuador de 55°.
 La separación entre las órbitas es de 60°.
 El periodo de los satélites es de 11h 58m.
 Hay 6 efemerides que caracterizan a las órbitas.



Satélites del sistema NAVSTAR_GPS



Emiten con una potencia de 700W



La antena:

- Es un array helicoidal
- Emiten con polarización a derechas.
- Su ganancia es de 15dB.
- Incorporan un reloj atómico muy estable y preciso.
- Su vida media es de aproximadamente 7.5 años, al cabo de este tiempo hay que sustituirlo.

1.2. Módulos de control en tierra: Son estaciones terrestres que monitorean la posición de todos los satélites GPS y transmiten efemérides actualizadas, error de reloj, correcciones, estado del satélite, etc.

La estación central de control y las estaciones de monitoreo se ubican (fig. 314) en:

- La estación central que está situada en Colorado Springs, se encarga de calcular las efemérides de cada uno de los satélites.

Estaciones de carga, transmiten datos (mensaje de navegación, Se emplea la banda S (canal ascendente: 1783.74MHz, canal descendente: 2227.5 MHz)) y reciben las señales que los satélites envían a estas estaciones:

- Ascensión (Atlántico Sur)
- Diego García (Índico)
- Kwajalein (Pacífico Occidental)

Estaciones monitoras, Controlan el estado y posición de los satélites. Reciben las señales transmitidas por los satélites y a partir de ellas obtienen información para poder calcular las efemérides de los satélites. Esta información es transmitida a la estación maestra de control que es la encargada de calcular las efemérides y obtener así la posición de los satélites con una posición muy buena:

- Hawaii (Pacífico Oriental) y Colorado Spring.

Fig. 314

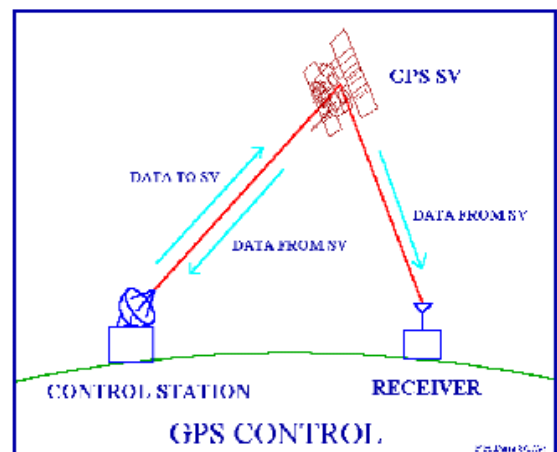


La figura 314, muestra las primeras estaciones de control, ya que actualmente se utilizan 10 estaciones para controlar el sistema y producir las efemérides, las 5 originales representadas en la figura, más 5 nuevas estaciones, una de ellas ubicada en Migueletes, Buenos Aires.

Las estaciones de control (fig. 315), monitorean la ubicación de cada satélite, computan y predicen órbitas, y verifican el estado y salud de cada satélite. La información, se recibe y se inyecta en cada satélite para que este la transmita, en el mensaje de navegación, a cada uno de los receptores del segmento usuario.



Fig. 315



1.3. Módulos de usuarios: Son los receptores comerciales, que computan la posición del usuario por medio de las señales recibidas.

Los receptores para navegación y posicionamiento autónomo, pueden llegar a pesar menos de 250 gramos y caber en la palma de la mano del usuario (fig. 316).

Fig.316



Sus funciones principales son las siguientes:

- Sintonizar las señales emitidas por los satélites
- Decodificar el mensaje de navegación
- Medir el retardo de la señal (desde el transmisor hasta el receptor) a partir de los cuales calculan la posición.
- Presentar la información de la posición en la que se encuentra (en 3D ó en 2D)

Otras funciones complementarias son

- Ayuda a la navegación.
- Almacenamiento de datos.
- Presentación más sofisticada (mapa de fondo)

Prestaciones de los receptores civiles (c/A)

- 1ª posición 2D en menos de 2 minutos.
- 1ª posición 3D en menos de 2.5 minutos.
- Actualizaciones de la posición de 0.5 a 1 segundos.
- Precisión en torno a 15 m.
- Medida de la velocidad del usuario, precisión de 0.1m/s aproximadamente.
- Referencia temporal, precisión de 100ns aproximadamente.

Estructura general del equipo:

- Antena: LNA, para no degradar la sensibilidad
- Receptor: Traslada la señal a frecuencia intermedia.
Demodula y decodifica el mensaje de navegación
- Microprocesador: Calcula la posición.
Controla todos los procesos que debe realizar el receptor.
- Unidad de Control: Permite la comunicación entre el usuario y el microprocesador, por ejemplo para elegir el tipo de presentación, introducir la posición inicial aproximada
- Almacenamiento de datos: Rutas, posiciones.
- Presentación
- Teclado...

2. PRINCIPIO FUNCIONAMIENTO SISTEMA POSICIONAMIENTO GLOBAL - GPS

El sistema NAVSTAR-GPS se basa en la medida simultánea de la distancia entre el receptor y al menos 4 satélites.

Fig. 317

El sistema ofrece las siguientes informaciones (fig. 317):

- Posición del receptor.
- Referencia temporal muy precisa.

Las distancias entre el receptor y el satélite se obtienen por medio del retardo

temporal entre que el satélite envía la señal hasta que el receptor la recibe

- Se obtiene la ecuación de un esferoide (1 ecuación por cada satélite).
- La intersección de todos estos esferoides da la posición del usuario. (fig. 318)

Los satélites emiten dos portadoras a la misma frecuencia. Estas portadoras están moduladas en fase (BPSK) por diferentes códigos pseudoaleatorios.

Fig. 318

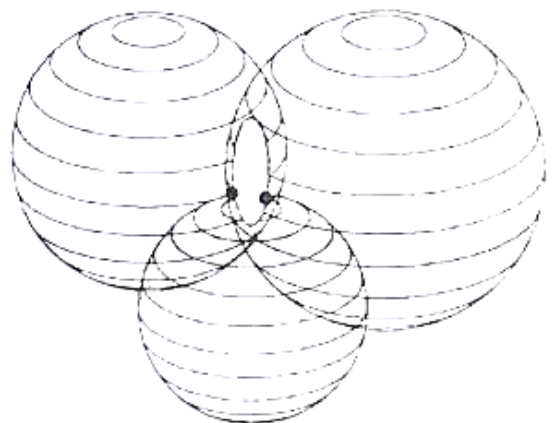
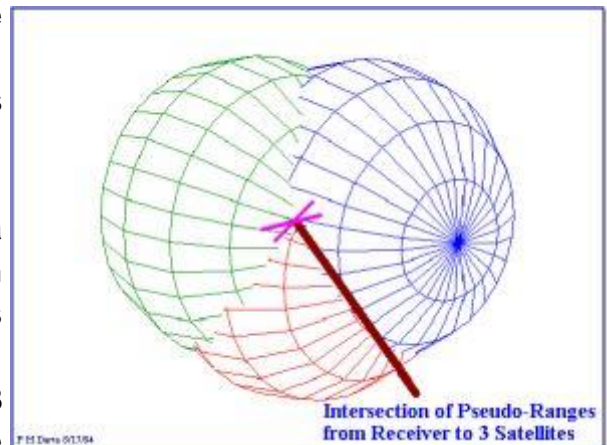
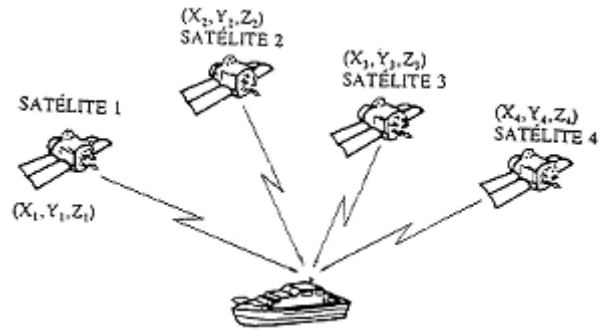
El receptor GPS calcula la correlación entre el código recibido y el código del satélite cuya señal pretende detectar,.

Idea Básica de Determinación: determina la posición sobre la Tierra mediante la medición de distancias a un grupo de satélites en el espacio. Estos satélites actúan como puntos de referencia precisa (fig. 317).

Ahora vamos a suponer que nosotros nos hallamos perdidos y necesitamos ubicarnos. Si supiéramos que nos hallamos a 21.000 km del satélite 1. Podríamos afirmar que nos hallamos en algún punto de una superficie esférica; donde el centro de la misma es el mismo satélite A y cuyo radio es de 21.000 km. Ahora, si conociéramos la distancia a un segundo satélite 2; supongamos 22.000 km. Restringiríamos nuestra posición a un círculo determinado por la intersección de las dos superficies esféricas generadas por ambos satélites.

Fig. 319

Con el conocimiento de la distancia a un tercer satélite 3 ya podríamos ubicarnos puntualmente. Debido a que conocemos la distancia de 23.000 km a un tercer satélite C, habría solo dos puntos en el espacio donde nosotros podríamos encontrarnos. Esos dos puntos estarían determinados por la intersección de las tres superficies esféricas generadas por el radio medido a cada uno de los tres satélites (fig.319).



Para discernir cuál de esos dos puntos es nuestra verdadera locación, podríamos efectuar la medición a un cuarto satélite; o podríamos asumirlo ya que uno, de esos dos puntos, es una ubicación absurda (fuera del radio de la superficie terrestre).

Por lo tanto:

- **La posición es calculada mediante la medición de distancias a los satélites.**
- **Matemáticamente, se requieren 4 mediciones para determinar la posición exacta.**
- **Serían suficientes tres mediciones si tuviéramos un método para eliminar la respuesta absurda; pero en realidad, por razones técnicas requerimos de otra medición.**

2.1. SISTEMA DE MEDIDA UTILIZADO POR LOS GPS

Con el fin de conocer su posición el GPS debe saber la distancia a la que se encuentra de los distintos satélites. Para ello el GPS mide el tiempo que le tarda en llegar la señal de radio enviada por los satélites



2.1.1. Medición de Distancia a un Satélite

Como el GPS requiere conocer la distancia desde el receptor al satélite; el concepto básico de medición se basa en el principio de determinación de "tiempo de desplazamiento" de una onda determinada.

Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000 km por seg.). Por lo tanto si se pudiese determinar el momento exacto en que el satélite emite esta onda y en qué momento se recibe; se podría determinar la longitud que separa al receptor del satélite:

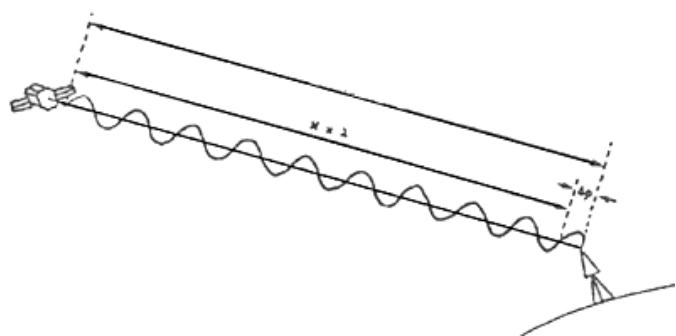
velocidad x tiempo = Distancia

Si se multiplica el tiempo en que tardó el recorrido de la onda en llegar de un lado a otro, por la velocidad de la onda, se obtiene la distancia deseada. (recordando que este proceso se debe efectuar mediante tres satélites como mínimo).(fig. 320)

Ahora bien, los relojes deberán ser de muy alta precisión para poder determinar el tiempo de ida y vuelta de una señal que se desplaza tan rápido como la velocidad de la luz.

Fig. 320

De hecho, un error de un microsegundo (que es un error chico para el tipo de relojes que tienen los



receptores) implicaría un error de 300 metros en la medición de la distancia. La alta tecnología con que dispone el GPS, hace que los satélites posean relojes atómicos de precisión que permiten medir el tiempo con una resolución del nanosegundo. Siendo 1 nanosegundo igual a 0,000000001 segundo. Sin embargo, el elevadísimo costo de relojes tan precisos hace que no sea posible su instalación en los receptores, los que están equipados con relojes de mucho menos precisión. Por esta razón el estado del reloj del receptor debe ser determinado junto con las coordenadas del lugar.

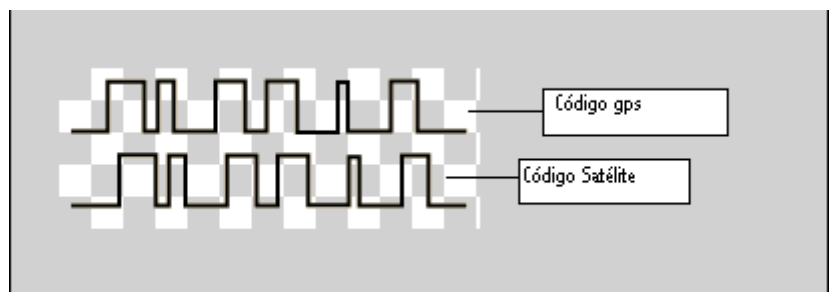
La parte más importante que juega en la medición del tiempo de recorrido de la señal se centra en determinar cuándo la señal abandona el satélite. Para solucionar este dilema, los diseñadores del GPS tuvieron la idea de:

- Sincronizar todos los satélites y receptores de tal forma que generen el mismo código en el momento exacto. Luego, todo lo que se debe hacer es recibir los códigos de un satélite y cotejarlos con los que generan en el receptor. La diferencia en tiempo entre uno y otro es exactamente el tiempo en que la onda tardó en recorrer la distancia hasta nosotros.
- Para efectuar una imagen figurada de cómo trabaja, imagine a Ud. y un amigo parados en opuestos finales de una cancha de fútbol. Ahora supongamos que ambos comienzan a contar hasta diez en exactamente el mismo momento. Tanto Ud. como su amigo cuentan gritando.

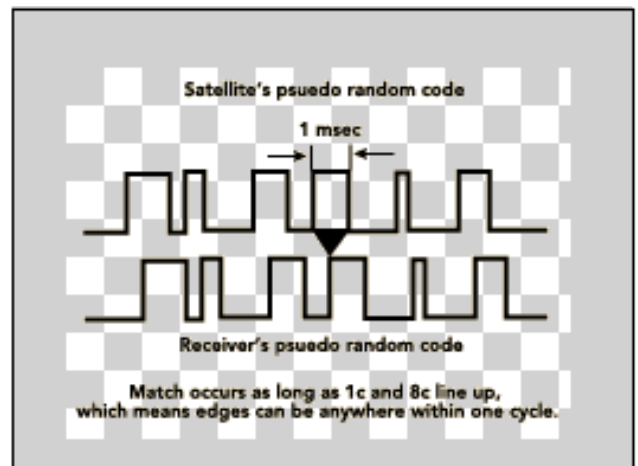
Así, Ud. escuchara a su voz que dice "Uno...dos...tres..." y un lapso después se oirá a la voz de su amigo diciendo "Uno...dos...tres". Ese tiempo de desfase será el tiempo en que la onda del sonido tarda en recorrer el estadio. Así es como básicamente trabaja el GPS.

La ventaja de usar un juego de códigos o caracteres numéricos es que Ud. podrá efectuar la medición de desfase en el momento que lo desee. Ud. no necesariamente necesita medir el desfase cuando Ud. dice uno y su amigo repite uno, sino que lo podrá hacer cuando se dice seis y se repite el seis o cuando se dice ocho y se repite ocho. Pudiendo determinarlo en el momento que más lo desee y mejor todavía, cuantas veces lo quiera, para luego efectuar un promedio.

Códigos emitidos por el GPS y satélite. Fig. 321



Cómo el código se emite cada milisegundo por comparación entre el emitido por el GPS (superior) y el emitido por el satélite (inferior), el GPS conoce cuándo partió la señal del satélite. Fig. 322



Códigos pseudo-random (seudoaleatorio):

Lógicamente el GPS no utiliza palabras o números. Tanto el satélite como el receptor generan un juego de códigos digitales complejos, llamados pseudo-random y están diseñados de tal forma de ser fácilmente comparados. Los impulsos son realmente secuencias pseudo-aleatorias que se repiten cada milisegundo, por ello se le conoce como código "seudo-aleatorio". Los códigos responden a un criterio binario



2.1.2. Medición de Diferencia de Fase

Se trata de un método que requiere complicados procesos de cálculo y largos periodos de observación que impiden su utilización en tiempo real, pero por el contrario es el método más preciso y por ello se aplica en las mediciones geodésicas y topográficas de precisión.

El principio de este método es que se compara en fase (no en tiempo) la emisión electromagnética del satélite, con frecuencia y posición conocida, con una frecuencia de referencia obtenida por el oscilador del receptor.

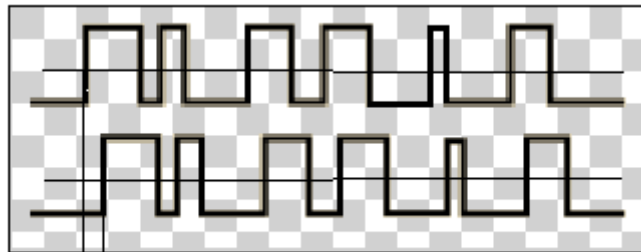
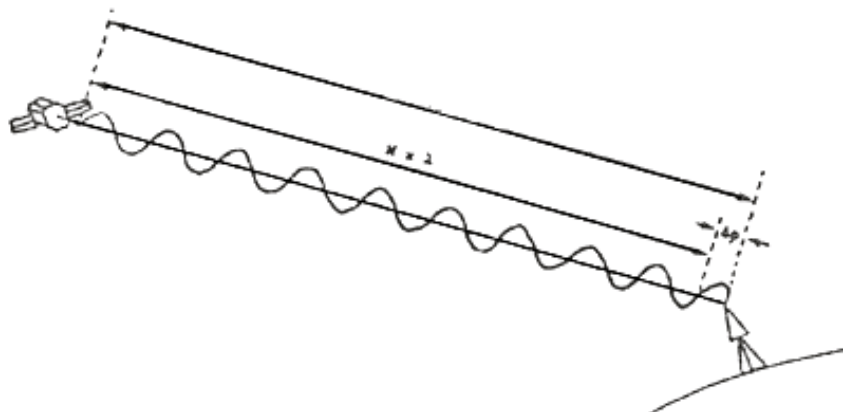


Fig. 323

El sistema asume que la longitud de onda es constante y se observa continuamente la evolución del desfase que varía según la distancia a la que se encuentre el satélite

Fig. 324

Cuando llega la onda al receptor habrá recorrido una cierta distancia D que será igual a un número entero de longitudes de onda N más una cierta longitud de onda, que se suele representar con D_j , y es el desfase que se mide continuamente (fig.324).



$$D = IN + ID_j$$

D: distancia recorrida por la onda

N: número entero de longitudes de onda (incógnita)

I: longitud de onda (constante)

D_j: parte fraccional de la longitud de onda (varia constantemente pero lo conocemos porque es la variable que se mide)

Como el **D_j** se puede medir con una precisión del 1% y la longitud de onda de la portadora L_1 es de 20 centímetros, la resolución en las mediciones pueden llegar al orden de milímetros. Para conocer el número de longitudes de onda (nuestra incógnita) se aplica un proceso de cálculo complejo.

Por lo tanto:

La distancia entre el satélite y nuestro receptor satelital se determina midiendo diferencias de fase de una señal codificada emitida por el satélite.

Se asume que, tanto los satélites como los receptores generan los códigos exactamente al mismo tiempo.

2.2. SINCRONISMO:

La onda portadora de la señal codificada se desplaza a la velocidad de la luz, si el receptor y el satélite se hallan fuera de sincronización por centésimas de segundo, la medición de distancia podrá diferir en cientos de kilómetros.

Para que el receptor y el satélite estén generando el mismo código en el mismo momento, los satélites poseen **cuatro relojes atómicos a bordo**, y son increíblemente precisos. Son cuatro relojes atómicos para garantizar que siempre habrá uno funcionando. No utilizan energía atómica para funcionar; solo llevan su nombre debido a que utilizan como generador patrón del reloj, a las oscilaciones de un átomo en particular. Siendo la referencia más estable y precisa que el hombre pudo desarrollar para la determinación del tiempo.

Técnica basada en la medida de los retardos temporales. En principio se podría pensar que calculando los retardos temporales entre 3 satélites y el usuario ya se tendría la posición deseada (X_i, Y_i, Z_i) , puesto que tres esferoides que se cortan definen un punto.

¿Por qué son necesarios entonces 4 satélites si parece que basta con 3 para obtener la posición?

La respuesta a esta pregunta es que, efectivamente, bastaría con sólo 3 satélites para determinar la posición. Pero esto exige una precisión muy buena y una gran estabilidad de los relojes, tanto del satélite como del receptor. Si bien los satélites cumplen estas dos condiciones, pues tienen relojes atómicos (que son muy precisos y muy estables), este no es el caso de los receptores puesto que su precio sería desorbitado, para lo cual utilizan relojes del tipo cuarzo

La solución a este problema es introducir una nueva incógnita en el sistema (además de las tres coordenadas espaciales del receptor) debido a la deriva que existe entre el reloj del satélite y el reloj del usuario. Y es por esto que se necesitan 4 satélites como mínimo, y no 3 como parecía en un principio. Así, la medición de una distancia extra puede obviar la imperfección de sincronismo que se pueda presentar en el reloj de cuarzo del receptor.

Con 3 satélites se dispone de un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas (X, Y, Z) ; con un satélite adicional se formará un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas $(X, Y, Z + \text{Tiempo})$. Con este cuarto satélite para medir otra distancia, se va a poseer superabundancia de mediciones para resolver la intersección.

Los microprocesadores que poseen los receptores GPS, se hallan programados de tal forma que, cuando una serie de mediciones no poseen solución única, se autodetecta que algo está funcionando mal, y asume que el problema se halla en la sincronización del reloj interno.

Así, el computador del receptor inicializa un programa iterativo que adiciona y sustrae pequeños intervalos de tiempo a su reloj hasta que la solución en la intersección con 4 satélites sea única y en un solo punto.

Sistema de 4 ecuaciones y 4 incógnitas (Ecuación de la esfera y velocidad por tiempo) (fig. 317)

$$d_1 = \mathbf{v} \times \Delta t = [(X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2 + (Z-Z_1)^2]^{1/2}$$

$$d_2 = \mathbf{v} \times \Delta t = [(X-X_2)^2 + (Y-Y_2)^2 + (Z-Z_2)^2]^{1/2}$$

$$d_3 = \mathbf{v} \times \Delta t = [(X-X_3)^2 + (Y-Y_3)^2 + (Z-Z_3)^2]^{1/2}$$

$$d_4 = \mathbf{v} \times \Delta t = [(X-X_4)^2 + (Y-Y_4)^2 + (Z-Z_4)^2]^{1/2}$$

Por lo tanto, para efectuar mediciones en 3D, se necesitan como mínimo, poseer 4 satélites sobre el horizonte y así formar un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas.

3. CATEGORIAS DE USUARIOS

En particular, se clasifican los tipos de usuarios en dos clases: MILITARES y CIVILES.

3.1. MILITARES: El sistema GPS NAVSTAR fue originalmente diseñado para uso estrictamente militar. La idea de uso es que cada sistema de defensa; misil, avión, buque, vehículo y tropas; lleven incorporado un receptor GPS. El GPS ya ha sido probado con sorprendente eficacia durante la Guerra del Golfo. El Departamento de Defensa de Estados Unidos, prevé el uso exclusivo de un código especial. Este código es el llamado **P** y ningún receptor de uso civil o comercial puede disponer de esta capacidad o código. Por ello, en estos momentos el código P se halla encriptado como código Y.

3.2. CIVILES: El uso civil del GPS fue permitido mucho tiempo después de haber sido desarrollado. El accidente aéreo de un avión de aerolínea Coreana sobre territorio Soviético, condujo a liberar el uso y comercialización de receptores GPS. Así, en los primeros años, su uso, se focalizó en la navegación. Hoy, el principal mercado de receptores son los navegadores de mano y en segundo lugar los de uso geodésico. Se espera que en los próximos años la utilización civil de mayor crecimiento sea el control y administración de flotas de vehículos por GPS y las aplicaciones Geomáticas. Los agrimensores ya utilizan GPS para determinar puntos de control, batimetrías, replanteos en tiempo real, mensuras, inventarios, posicionar el centro de cámaras fotogramétricas en vuelos para reducir la cantidad de puntos de control en Tierra, etc. El GPS, también es utilizado por botes y veleros, aplicaciones recreacionales, etc. Fabricantes de automóviles ya están ofreciendo vehículos con unidades de posicionamiento satelital, con mapas que muestran la posición al conductor, y sistema de seguimiento de automóviles por telefonía celular y GPS.

4 SEÑAL DE LOS SATÉLITES - CLASIFICACION DEL SEGMENTO USUARIO POR LOS OBSERVABLES

El GPS mide el tiempo que tarda la señal de radio enviada por el satélite en llegarle, calculando posteriormente la distancia. El tiempo utilizado por el sistema GPS es el Tiempo Universal Coordinado (UTC) definido por el Observatorio Naval de los Estados Unidos mediante relojes atómicos de Hidrógeno. La unidad de tiempo es el segundo atómico internacional y tiene su origen coincidente con el UTC a las cero horas del 6 de enero de 1980.

4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES DE RADIO.

En términos básicos; la transmisión del satélite GPS consiste de:

- **Portadoras (Las ondas encargadas de transportar la información).**
- **Códigos de distancia (ranging).**
- **Mensajes de navegación y/o efemérides transmitidas**

El satélite emite dos ondas portadoras L1 y L2. Al utilizar dos frecuencias se puede determinar por comparación del retraso de cada frecuencia el retardo ionosférico, para ello es necesario disponer de receptores bifrecuencia.

Sobre estas ondas se modulan dos códigos C/A y P además de un mensaje con los parámetros orbitales del satélite y el estado del reloj interno. Este mensaje se modula entre las portadoras de los códigos a baja frecuencia 50 Hz.

En el sistema de posicionamiento global GPS la información que se modula sobre L1 y L2 son los códigos y los mensajes de navegación o efemérides transmitidas. En la práctica L1 y L2 no llevan la misma información; la forma en que se distribuyen los códigos y los mensajes es la siguiente:

- L1 posee el código C/A, el código P y los mensajes de navegación, mientras que,
- L2 solo posee el código P y el mensaje de navegación.

Es decir, L1 llevará toda la información posible que emite el satélite y L2 solamente el código preciso también llamado P.

El **código C/A (Clear/Access)** está declarado de uso civil y libre adquisición. Es una moduladora a 1,023 Mhz que se repite cada milisegundo.

El **código P (precise)** es secreto y de uso militar. Para que el receptor pueda determinar en qué momento ha empezado a recibirlo, el código contiene la palabra denominada HOW.

Los códigos son utilizados para hallar la distancia entre el satélite y el receptor. El código **C/A** se utiliza en el posicionamiento estándar y permite precisiones nominales decamétricas. El **P** se usa en el posicionamiento preciso y aporta precisiones nominales métricas.

Para que el usuario pueda obtener el posicionamiento en tiempo real (autónomo), necesita disponer al mismo tiempo del mensaje de navegación. El mensaje de navegación contiene:

- Las efemérides de satélites predecidas (efemérides precisas).
- Los parámetros de corrección del reloj del satélite en cuestión.
- Información del estado de salud del satélite.



El segmento de control en Tierra del Sistema de Posicionamiento Global actualiza e inyecta ésta información constantemente en cada vehículo espacial, para que éste la retransmita a los usuarios que posean receptores por medio del "mensaje de navegación". Se transmite a 50Hz en seis grupos. Cada grupo tarda 30 segundos, por lo que la recepción del mensaje completo es 12 minutos 30 segundos.

4.2. CLASIFICACIÓN

En función del tipo de señal recepcionada del satélite, que se procesa, utiliza y/o almacena un receptor; se clasifican por sus observables en equipos de:

Código C/A

Código C/A y Fase de portadora en L1

Código C/A y Fase de portadora en L1 y L2

Las mediciones, de alta precisión (un par de centímetros, o menos), se logran con receptores del tipo geodésico.

4.2.1. Código C/A. Este código es el que utilizan "todos" los receptores GPS de uso civil para determinar las coordenadas directamente en la pantalla del usuario y en forma autónoma (un solo receptor y en forma instantánea o segundo a segundo). Este código es de libre utilización civil ya que se permite el conocimiento de su formato a todo usuario o fabricante de receptores GPS. El receptor genera internamente, una replica, de los códigos que esta transmitiendo cada satélite. Mediante la correlación del código generado internamente, con el mismo código transmitido por el satélite y que esta ingresando a la antena del receptor, se puede calcular el desfase, obteniendo el desplazamiento del código en el tiempo. Con esa información, se obtiene la pseudodistancia, entre el satélite y receptor.

Debido a que esta determinación de distancia, por correlación del código interno y el recepcionado, posee un error de sincronismo de reloj, la distancia medida no es precisa, por lo tanto, se determina una "**pseudodistancia**" o "**distancia con error de sincronismo**".

4.2.2. Receptores Geodésicos de Código C/A y Fase: La mayoría de los receptores geodésicos, durante el periodo de 1985 a 1992, usaban el código C/A para adquirir y fijar la portadora L1. Casi todos estos instrumentos tienen un mínimo de 6 canales y diseños mas avanzados llegan a disponer de 12 canales. Estos receptores realizan las mismas operaciones que los descritos anteriormente con la adición de almacenar en algún tipo de memoria el observable de código y el de fase L1 y/o L2; según se trate de equipos de frecuencia simple o de doble frecuencia.

Mediante la técnica de "cuadratura", se pueden utilizar receptores que capturan observables de fase en L1 y en L2. Estos receptores son los llamados en ingles "codeless". La ventaja de disponer observables en L1 y en L2 es la de poder efectuar mediciones a gran distancia eliminando el efecto de error ionosférico. La desventaja de los receptores "codeless" es que solo consiguen obtener media longitud de onda en L2.

Estos pueden ser usados para todo tipo de mediciones de alta precisión incluyendo los métodos geodésicos llamados Estáticos y Cinemáticos.

4.2.3. Receptores de Código P: Los primeros receptores de este tipo fueron llamados de código P; pero la realidad es que en la actualidad no se puede trabajar con este código (Referirse a Anti-Spoofing). Existen receptores de máxima precisión para uso geodésico que

utilizan técnicas que logran filtrar el código P (P = código preciso, para uso exclusivamente militar) y obtener el observable de fase L2 con longitud de onda completa. En síntesis, consiguen capturar los observables de código C/A, y fases en L1 y L2 puros. Estos receptores son también conocidos como P (Y), o tipo Z simplemente Y.

La ventaja de disponer longitud de onda completa en L2 es la de poder aplicar la técnica de procesamiento llamada Wide-Lane (Combinación lineal de L1 y L2 para formar la llamada banda ancha). La técnica Wide-Lane permite efectuar mediciones de pocos centímetros de precisión con solo algunos minutos de estacionamiento en un punto. Además, estos receptores logran obtener grandes precisiones, incluso con vectores de más de 100 km. (cosa que los receptores geodésicos de frecuencia simple L1 o doble frecuencia Codeless no pueden lograr). Otro detalle importante de esta categoría de receptores es la de brindar la máxima capacidad de operación con programas de resolución de ambigüedades en movimiento (OTF = On The Fly resolution; método Cinemático OTF).

5 CLASIFICACION DE LOS RECEPTORES POR SU APLICACIÓN (SEGMENTO USUARIO)

Los receptores GPS o GLONASS, se pueden clasificar por varios calificativos distintivos, como por ejemplo; Cantidad de canales, precisiones, aplicación en que se pueden utilizar o por su tipo. De todas ellas, a continuación, se los clasifica por su tipo ya que es la mas general de todas.

Tipos de Receptores:

Aviación. Los receptores de posicionamiento satelital para uso en aviación, se utilizan principalmente para navegación y determinación de condición espacial de la aeronave. Existe una gran variedad de receptores para cubrir las distintas necesidades y requerimientos de los usuarios de navegación aérea. Los hay del tipo de mano que aceptan cartuchos con datos de coordenadas de aeropuertos y radio ayuda, hasta equipos que permiten la aproximación y hasta aterrizaje con alto grado de precisión (Categorías de aterrizaje I, II y el tipo III para aterrizaje automático).

En plaquetas de ordenador. Estos receptores se fabrican bajo el concepto de ser insertados en la plaqueta principal (Mother Board) de una computadora. Actualmente se dispone en el mercado plaquetas de posicionamiento autónomo o diferencial únicamente por código C/A.

De mano (Handheld). En la actualidad coexisten una gran variedad de marcas con receptores de este tipo, principalmente orientadas a propósitos de navegación recreacional. También se los encuentra para mapeo de gran escala con precisiones en modo dinámico diferencial de 1 metros a 5 metros en tiempo real. En este tipo de equipos, el rango de características es muy diverso con costos de adquisición que oscilan desde los U\$S 250 hasta U\$S 4.000 cada uno.

Mapeo y GIS. Este tipo de receptores se especializan en la determinación de mapeos en general y colección de datos georreferenciados para alimentar bases de datos GIS. Todos ellos son capaces de trabajar en modo diferencial de código o código y fase. Como condición para ser clasificados en este rubro, deben poseer la habilidad de almacenar información de texto y cadenas de menú con cada entidad de terreno medida. Las entidades de terreno que relevan estos equipos pueden ser puntos, líneas y polígonos.

Módulos OEM. Los módulos OEM son plaquetas de receptores GPS, fabricadas con el fin de ser intercambiadas con otras industrias y así ser integradas a distintas aplicaciones de uso masivo. Un ejemplo de ello sería la ubicación automática de vehículos o la industria automotriz. Por lo general no disponen de teclado y pantalla comunicándose con la aplicación o tercera parte por medio de puertos de comunicación asincrónica serie.

GPS en Tarjeta PC (PCMCIA). Para conexión externa a ordenadores del tipo portátiles (Notebook). En todo el mercado actual, se conocen tres modelos, donde dos de ellos son para posicionamiento autónomo y el restante capaz de aceptar diferencial. Para estas tarjetas, la computadora portátil hace las veces de teclado, pantalla, microprocesador y alimentación.

Marinos. Son para uso exclusivo en la navegación con el requisito de aceptar correcciones diferenciales a tiempo real (RTCM) y enviar indicaciones a servos de pilotos automáticos u otros equipos electrónicos marinos mediante el formato NMEA 183. Algunos disponen de pantalla grafica para presentar una carta náutica como mapa de fondo al recorrido o la posición actual de la embarcación.

Espaciales. Estos equipos se utilizan para auxilio y control de navegación de satélites, hasta donde se conoce, sus características son bastante similares a los receptores utilizados en tierra. Una de las funciones propias es la de poder enviar la información de posicionamiento a estaciones de monitores en tierra.

Agrimensura, Topografía e Ingeniería. Estos equipos se utilizan para la obtención de "mediciones", mas que "posiciones". De todos modos, el componente que permite a la topografía obtener sus mediciones, es en primer lugar las posiciones y el tratamiento de las mismas requiere de extremado cuidado en cuanto a Datums de referencia y formas de su representación en los planos. Estos tipos de equipos requieren de técnicas Diferenciales y fundamentalmente con observables de una o dos fases (L1 o L1 y L2). Se proveen en un mínimo de dos equipos (diferencial) y generalmente el paquete del fabricante incluye software avanzado de post-procesamiento. Los hay para modo post-procesamiento y/o Tiempo Real con precisiones de 1 o 2 centímetros. Algunos fabricantes ofrecen estos receptores con soluciones que también incorporan o prevén la colección de datos para Sistemas de Información Geográfica (Mapeo y GIS).

Agricultura. Algunos fabricantes de cosechadoras y otras maquinas agrícolas, entregan sus maquinas con GPS a bordo. El fin de estas unidades es la generación de mapas de rendimiento o control de aplicación de semillas o agroquímicos durante el laboreo agrícola. Otros receptores, se proveen dentro de ordenadores robustos especialmente diseñados para soportar las condiciones de trabajo agrícola y cumplir con todos los ciclos de trabajo (desde mapeo de limites, suelos, siembra, aplicación y hasta cosecha) de una nueva era agrícola que se da en llamar Agricultura de Precisión. Generalmente estas unidades operan con DGPS a tiempo real.

Tiempo y sincronismo de frecuencia. Estos receptores se fabrican con el único propósito de generar sincronismo de alta precisión en tiempo, mediante una salida digital de Un Pulso Por Segundo (1 PPS). Algunos de ellos incorporan, internamente, relojes atómicos de Cesio o Rubidio para mejorar la estabilidad interna a corto y largo plazo. El principal usuario de este tipo de unidades es la industria de mantenimiento de redes telefónicas y los Servicios de la Hora de cada región o país.

6. PRINCIPALES VENTAJAS DEL SISTEMA GPS.

En los párrafos anteriores se describió, en forma resumida, el principio de funcionamiento de un receptor GPS y la forma en que se determinan las posiciones en modo autónomo (un solo receptor o modo navegación).

El sistema GPS, posee una serie de características particulares, que lo distinguen de otros métodos de posicionamiento. A continuación se describen sus principales ventajas en el uso civil.

- Posicionamiento preciso en 3 coordenadas. Además, entrega tiempo con alta claridad y precisión.
- Disponibilidad durante las 24 horas. La constelación, entrega cobertura durante las 24 horas con mas de 4 satélites sobre el horizonte.
- Cobertura similar para todo el planeta. Las señales de satélites GPS se hallan disponibles en cualquier lugar del planeta y a toda hora.
- Operación en cualquier condición climática.
- Puede abastecer a un numero limitado de usuarios. De la misma manera que una estación de radio FM, el GPS no posee limites de capacidad de uso. Lo puede utilizar, virtualmente, infinitos usuarios con solo disponer de un receptor.
- Los sistemas de posicionamiento convencional en topografía (como teodolitos o estaciones totales) requieren de línea de bisección entre puntos. El receptor GPS, en modo autónomo o diferencial post-procesado, no posee este tipo de limitante.
- Posicionamiento dinámico. El GPS rastrea satélites y entrega posiciones al usuario a intervalos típicos de un segundo, sin importar la velocidad a la que se desplaza el usuario.
- Servicio gratuito. Un decreto del presidente Estadounidense (Bill Clinton) garantiza el mantenimiento del servicio GPS en modo autónomo, a la comunidad civil de todo el globo y sin cargo o pago de ningún tipo.

7.- GPS Y TIPOS DE MEDICION

Se considera observable a toda aquella información de los satélites que es utilizada; por los receptores o en un posterior procesamiento en PC; para computar la posición o resultado GPS. Podemos definir como observables a los códigos C/A, P y las fases L1 y L2. Existen distintas metodologías de medición de terreno en función de los observables que pueda capturar nuestro receptor GPS. Esas metodologías se pueden clasificar, en una primera aproximación, como:

Metodologías de medición	AUTONOMAS	se caracteriza por utilizar <u>un único receptor</u> y obtener las coordenadas sin posterior procesamiento
	RELATIVAS Requieren de <u>un mínimo de dos receptores</u> , donde uno de ellos es la estación de referencia o estación base	Diferencial con Código
		Diferencial por Fase de Portadora (también llamadas GEODESICAS)

7.1 OBSERVABLES USADOS EN MEDICION AUTONOMA

Los receptores GPS, conocidos como navegadores utilizan los códigos para lograr coordenadas, segundo a segundo, directamente en la pantalla, utilizando un solo instrumento, en cualquier lugar del globo y en todo momento.

- Navegadores de uso civil: Se valen del observable de pseudodistancia por código C/A (la exactitud que se logra en la actualidad con la configuración espacial GPS completa es menor de 100 metros en 2D en un 95% de las veces, fig. 325).
- Navegadores de uso militar: Utilizan el observable de pseudodistancia por código P.



Fig. 325



7.2 OBSERVABLES USADOS EN DIFERENCIAL DE CODIGO (RELATIVA)

Esta técnica es del tipo relativa y se basa en la utilización del código C/A. Por ser relativa se requieren al menos dos receptores GPS o GLONASS, donde uno de ellos deberá ser estacionado sobre un punto de coordenadas conocidas. El segundo receptor es utilizado como unidad de relevamiento de puntos (Estático) o recorridos (Dinámico).

Si asumimos que el C/A, nos brinda una distancia aproximada al satélite (por ello se habla de pseudodistancia al satélite), la posición obtenida poseerá un error inherente al código C/A. Por ello se desprende que todos los receptores que trabajan o se hallan rastreando los mismos satélites, estarán afectados de un error de igual magnitud y sentido. GPS y GLONASS brindan una posición segundo a segundo, y si el equipo base se estaciona sobre un punto de coordenadas precisas (conocidas previamente); podrá computar segundo a segundo el error o "Diferencia" entre la posición calculada y las coordenadas verdaderas. Cualquier otro receptor de posicionamiento satelital que opera en un radio no mayor de 100 Km. de la base, tendrá visibilidad o rastreo de exactamente los mismos satélites y por ello el mismo error. Si, segundo a segundo, corregimos cada una de las posiciones de los receptores, que se hallen operando en dicho radio, con la corrección diferencial computada en la base; lograremos mejorar la precisión de nuestra medición en el orden de unos 5 metros de exactitud (método Diferencial dinámico por código). Si el receptor rotador permanece estático en el punto a medir por unos minutos, se puede efectuar un promedio de las observaciones

corregidas (de 5 metros) desde la base obteniéndose una exactitud de 2 metros o menos (Diferencial estático por código).

En definitiva el único observable utilizado en este método es el código C/A. Muchos fabricantes y vendedores clasifican erróneamente a este tipo de receptores como L1, C/A, pero en realidad se debería hablar de observable de código C/A y nada más. Por supuesto el receptor captura L1 por ser la portadora de este código pero no procesa información de fase de portadora. Existen equipos que suavizan o mejoran el código C/A mediante la fase en L1 (de todas maneras el observable utilizado sigue siendo el código y no la fase).

El concepto de medición diferencial por código, abastece un gran número de aplicaciones, donde la precisión de 1 metro puede ser suficiente.

A continuación se tratan brevemente algunos de los aspectos técnicos (un conocimiento resumido y mínimo)

7.3 OBSERVABLES GEODESICOS (RELATIVA)

El circuito de conexión de retardo mantiene el enganche con el satélite y en el proceso deja disponible la onda portadora pura; sin código. La portadora L1 tiene una longitud de 19 cm y el uno por ciento de dicha longitud (1% de 19 cm = 1,9 mm) es la exactitud de sincronización del receptor. Los receptores geodésicos (Como por ejemplo; equipos ASHTECH, entre otros), miden y registran la medición de la onda portadora fraccionada a 1 mm. Por este motivo, se pensó en utilizar las fases de portadora como un observable más, que incluso brindaría mas precisión que el mismo código P.

7.3.1. Medición Estática Geodésica Relativa:

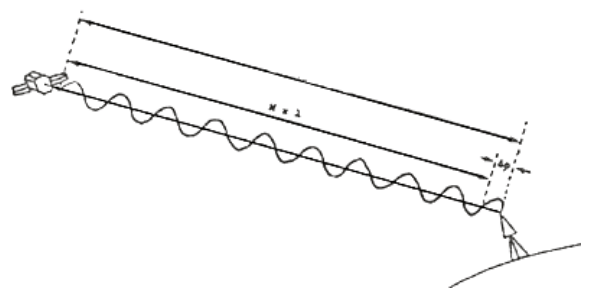
Así, se planteó este método que permite obtener grandes precisiones y no compromete el uso militar del sistema NAVSTAR GPS o GLONASS; en primer lugar por ser una medición relativa (al menos dos receptores) y un límite de operación en distancia al receptor estacionado en el punto de coordenadas conocidas (principio de medición relativa).

Por lo tanto, disponemos de dos observables adicionales a los códigos que se conocen como Fase de portadora en L1 y Fase de portadora en L2. Si se pudiese establecer o conocer en un instante dado, la cantidad de ciclos completos entre antena y cada satélite, se puede ir acumulando las porciones de fases medidas en el receptor. La cantidad de ciclos completos entre antena y receptor se conoce como **AMBIGÜEDAD DE LA FASE** y el intervalo de tiempo en que los receptores geodésicos registran datos en su memoria se conoce como **EPOCA**.

La recepción continua de señales le permite al receptor

rastrear el número entero de ciclos de la onda portadora desde la primera medición y medir el cambio en la distancia de época en época.

Hay dos tipos de método diferencial. No es lo mismo el modo diferencial para la fase de portadora que el modo diferencial para el código; ya que en el primero no se computan errores o diferencias en la distancia al procesar fases. Mediante la diferenciación los errores comunes se compensan y los podemos eliminar de nuestras mediciones.



El secreto para poder medir en forma relativa utilizando la fase de las portadoras se halla en algoritmos que eliminan la incógnita de la ambigüedad de la fase. Originalmente estos algoritmos se basan en métodos del análisis diferencial, teniendo en cuenta el diferencial simple, doble y triple.

El diferencial simple puede ser entre satélites o receptores. Si diferenciamos las mediciones hechas entre dos receptores y un solo satélite tendremos un diferencial simple de receptor. Esta podrá cancelar errores comunes asociados con el satélite en cuestión. Por otro lado, si diferenciamos entre un receptor y dos satélites tendremos un diferencial simple de satélite que permite eliminar errores del receptor.

Combinando linealmente dos diferenciales simples en un único diferencial doble, cancelará todos los errores comunes

Combinando dos diferenciales dobles se forma un diferencial triple. Cuando el algoritmo procesa los observables y llega a formar el diferencial triple estará removiendo de las ecuaciones la incógnita de la ambigüedad de la fase, ya que esta ambigüedad es común tanto en la primera época como en las sucesivas, entonces con las diferenciales triples, no se resuelve la ambigüedad de la fase sino que se la elimina del sistema de ecuaciones. En realidad, primero se realiza un diferencial triple para que las posteriores diferenciales dobles se hallen libres de la ambigüedad de la fase. Se da un arranque y luego mientras no se pierda el enganche (lock) con los satélites, todo el cálculo permanecerá con los mismos valores iniciales. Los ciclos de fase perdidos (cycle slips) durante la medición obligarán a determinar un nuevo diferencial triple en el cálculo para reparar esa pérdida

Este método, se utiliza en la determinación de métodos de terreno estáticos, en los cuales se necesita que se tomen varias observaciones y los satélites cambien su posición en la esfera celeste.

En la actualidad se han perfeccionado los algoritmos a un nivel en que no influyen las pérdidas de ciclos perdidos sobre la ambigüedad, ni se requiere que los satélites se hallan movido en la esfera celeste. Estos nuevos algoritmos se conocen como "resolución de ambigüedad en movimiento". (OTF - On The Fly), que se destacan por brindar gran productividad, ya que, el receptor no necesariamente debe permanecer estático. El método OTF, forma parte de las técnicas de procesamiento dinámico.

7.3.2. Dinámicos Geodésicos - Cinemático OTF Y RTK

Definición general de cinemático OTF

Los algoritmos de cálculo On The Fly han sido desarrollados, originalmente, para generar posiciones de alta precisión como resultado del post-procesamiento de portadoras de fase, doble frecuencia y datos L1 y L2 de longitud de onda completa. Las posiciones son obtenidas por un receptor GPS rotador (rover) relativo a otro receptor GPS cuya antena se halla estacionada sobre un punto de coordenadas conocidas. Si bien el software de cálculo y fijación de ambigüedades en movimiento (OTF) se clasifica en la categoría de Procesamiento Diferencial (debido a que remueve errores comunes por dobles diferencias), es ampliamente diferente al procesamiento Diferencial convencional que se utiliza en estático, estático rápido o métodos cinemáticos convencionales. Además, las técnicas de terreno son diferentes y mucho menos restrictivas.

La principal diferencia es que el método OTF utiliza un filtro recursivo KALMAN para estimar de posiciones, permitiendo resolver ambigüedades a medida que el rotador se halla en movimiento y de esa manera computar las coordenadas para cada posición. Cuando se utilizan datos de doble frecuencia y longitud de onda completa en L1 y L2 no será necesario ningún tipo de inicialización estática o traslocación de antena y el receptor rotador no deberá retornar a un punto conocido para el caso de ocurrir una pérdida de ciclos. De todas maneras, si solo se disponen de datos de frecuencia simple L1

también se podrá procesar utilizando las técnicas de iniciación y fijación de ambigüedades en movimiento OTF.

7.3.3. El Concepto del Filtro Kalman (Cinematico Otf)

Conceptualmente, el filtro Kalman puede ser pensado como un programa de predicciones que aprende y se perfecciona a medida que mide, predice y comprueba.

Considere una medición común, donde el receptor base se estaciona sobre un punto conocido y el rotador efectúa (dinámicamente) una trayectoria; ambos receptores efectuando grabaciones con el mismo intervalo (por ej: 5 segundos). A una velocidad promedio (caminando) de 6 km/h el intervalo de grabación de 5 segundos generará una posición cada 8,33 metros a lo largo de la trayectoria.

Durante el post-procesamiento, el filtro Kalman utiliza la diferencia entre las posiciones calculadas por doble-diferencias y la primer posición y la próxima para así poder predecir la tercera posición. En base a un criterio de estima basado en que se conoce el desplazamiento como "Caminando", las predicciones iniciales estarán limitadas a un radio de 9 metros. Luego el método OTF contrasta la posición predecida de la tercera posición contra la calculada por doble diferencias usando la primera y la segunda posición (con doble diferencias se halla libre de efecto ionosférico). Así, para esa posición, dispondrá de correcciones para ser aplicadas a futuras predicciones y refinando cada vez más cada una de las estimas estadísticas, al ir conociendo mejor las correcciones que se deben aplicar. Este proceso o ciclo con filtro Kalman se repite constantemente hasta que la posición predecida es consistente en los límites del ciclo L1 o 19 cm.

Como ya mencionamos anteriormente, OTF ha sido desarrollado para trabajar con datos de longitud de onda completa en L1 y L2 (receptores de máxima calidad, doble frecuencia y código P(\square)). En las condiciones de terreno, es muy fácil que ocurran pérdidas ocasionales de fijación a satélites; para estos casos donde se requiere una adquisición rápida (o readquisición) el mejor rendimiento posible lo brindan los receptores de doble frecuencia y código P(\square); llegando a precisiones de un par de centímetros en menos de 1 minuto de haber sido encendido y recuperado la fijación a los satélites.

Los receptores de frecuencia simple (L1), también se pueden usar con OTF pero poseen el inconveniente de requerir mayores tiempos de "Settling down" y "refinamiento con ambigüedades" (Para receptores de alta calidad de frecuencia simple se logra fijar ambigüedades en un tiempo 10 veces mayor que con doble frecuencia). Los motivos principales que hacen disponer de menor rendimiento a los equipos L1, se debe a que no disponen del beneficio de Banda Ancha (Wide-Lane) y los datos L1 resultan con mucho ruido por no poder suprimir los errores ionosféricos.

7.3.4. CINEMATICO OTF = PRODUCTIVIDAD

En la actualidad, y salvo para trabajos de redes, el método más productivo en el terreno y que otorga muy buenas precisiones es el Cinemático OTF. Este método a desplazado a los anteriores métodos dinámicos geodésicos como: Cinemático, Pseudo-Cinemático y Stop and Go. La gran ventaja, es la de poder realizar mediciones con precisión inferior a los 10 centímetros en las tres coordenadas (X, Y, Z), incluso en movimiento o trayectoria. El método Cinemático OTF, permite validar el concepto de que los receptores GPS son digitalizadores en escala 1:1, que se desplazan directamente sobre el terreno y en un sistema de coordenadas del mundo real. En este último caso, con precisiones inferiores a los 10 centímetros.

Es indudable, que la practicidad de poder desplazarse al mismo tiempo que se releva y se mide, logra reducir ampliamente los tiempos de terreno e incluso el personal de campo. Una sola persona podría realizar la medición con solo desplazarse, y dependiendo del tipo de

relevamiento, llegar a superar los tiempos de producción del instrumental topográfico convencional unas seis (6) veces.

Los últimos avances y desarrollos en posicionamiento satelital, buscan desarrollar técnicas de trabajo en terreno que permitan realizar relevamientos y replanteos con solo desplazarse en el terreno y con mínima o ninguna espera sobre un punto (determinación de puntos de terreno en forma, virtualmente, instantánea). Por ello, las únicas técnicas sobrevivientes desde la primera generación de técnicas de trabajo de campo, son los métodos "Estático" y "Estático Rápido". Las técnicas estáticas, siguen en uso, debido a que no han podido ser superadas en términos de precisión. Los métodos dinámicos que se buscan en la actualidad son los siguientes:

8.. FUENTES DE ERROR EN LAS MEDICIONES GPS

A pesar de los esfuerzos de los creadores del sistema GPS para hacerlo muy preciso, hay errores que no pueden ser totalmente eliminados. El GPS diferencial ofrece una forma de corregir estos, aunque pequeños, molestos errores.

La degradación de la precisión del sistema se debe a los siguientes factores:

8.1. Errores debidos a los satélites:

Reloj interno: La medición del tiempo es crítica para el GPS. Aunque los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de cesio o de rubidio, sin embargo ningún reloj, incluso el atómico es perfecto. Pequeñas imprecisiones en la medición del tiempo tienen su reflejo en una determinación de posición menos exacta.

Errores en los parámetros orbitales: Las efemérides transmitidas por los satélites tendrán asociado un error a causa de que es imposible predecir exactamente sus posiciones. Las órbitas que describen los satélites se encuentran a gran distancia de la tierra y están libres de las perturbaciones producidas por la capa superior de la atmósfera, pero aun así, todavía sufren ligeras desviaciones de las órbitas previstas y esto genera también error.

8.2. Errores debidos a la atmósfera:

Los satélites GPS envían la información a través de ondas electromagnéticas. La luz sólo se transmite a una velocidad constante en el vacío, en el mundo real la velocidad de estas ondas se ve afectada por las distintas capas de la atmósfera que debe atravesar hasta llegar a nuestros receptores.

Así pues, las partículas cargadas de la ionosfera y el vapor de agua de la atmósfera producen un retardo en la señal. Como la velocidad de propagación de la señal es crítica para calcular la distancia este retardo se traduce en un error en la posición calculada. A mayor recorrido de las ondas por la atmósfera mayor será el retardo

Algunos receptores añaden un factor de corrección suponiendo un tránsito típico por la atmósfera terrestre. Esto es una ayuda pero no es definitivo ya que la atmósfera varía según nuestra posición y de un momento a otro, por tanto, ningún modelo atmosférico puede compensar con precisión el retraso real.

También conocido como **error ionosférico** es función de la longitud a la base. Existe una proporcionalidad inversa entre los errores causados por dos frecuencias diferentes que atraviesan la ionosfera. El disponer de doble frecuencia permite eliminar errores ionosféricos.

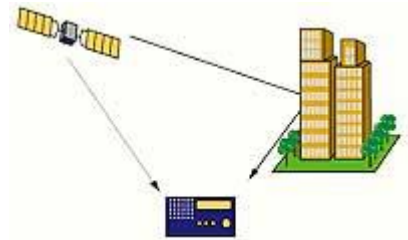


Los receptores de frecuencia simple no se pueden beneficiar de la eliminación de este error. Así, las longitudes a la base mayores de 20 km poseen grandes errores para los receptores de frecuencia simple. De hecho, si la ionosfera posee altos grados de actividad (tormentas magnéticas, actividad solar, etc), el alejamiento del receptor base debe ser menor a los 10 km o a lo sumo 15 km.

Para el caso de la resolución de ambigüedades en movimiento, incluso los equipos de doble frecuencia, deberán trabajar a no más de 20 km de la base, para obtener resultados de alta precisión y poder, ante una pérdida de la señal, fijar ambigüedades en 1 minuto, o menos.

8.3. Error multisenda:

Una vez que las ondas emitidas por los satélites han atravesado la atmósfera todavía no están libres de perturbaciones. El efecto **multisenda o multipath** es causado principalmente por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas al receptor. El nombre se debe a que efectivamente el receptor recibe la señal por varias sendas. Primero la antena recibe la señal directa y posteriormente las señales reflejadas. Estas señales reflejadas pueden interferir la señal directa produciendo ruidos en la recepción. Los buenos receptores incorporan software que evita que el GPS reciba las radiaciones con ángulos no procedentes del espacio.



8.4. Error del receptor:

Los receptores tampoco son perfectos y pueden introducir errores. La precisión del GPS está en función del precio. Para precisiones centimétricas se requieren equipos costosos.



8.5. Disposición de los satélites:

La geometría de los satélites también va a influir en la precisión de las medidas y una misma disposición puede ser buena para unas medidas y mala para otras. Por ejemplo, si todos los satélites están cercanos al Cenit la precisión planimétrica será buena, pero la altimétrica no. A la inversa, si los satélites están distribuidos regularmente por el horizonte, la medición planimétrica será mala y buena la altimétrica.

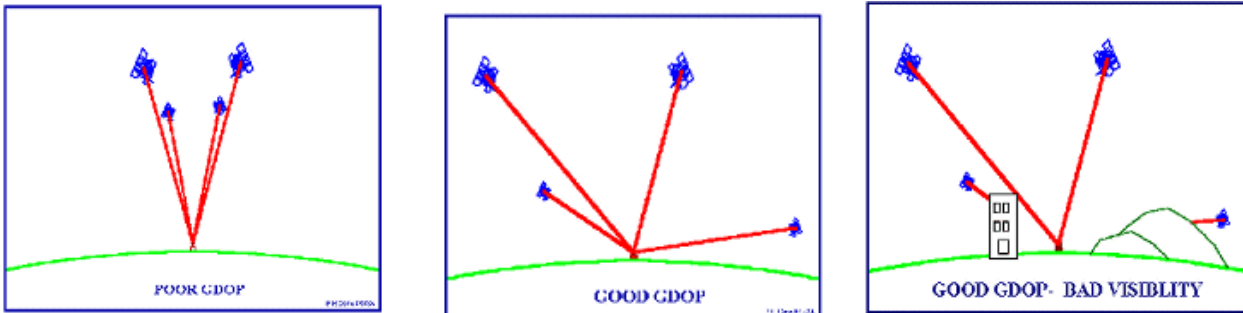
De forma general la posición más desfavorable para observar un satélite es cuando está cercano al horizonte por el efecto de la refracción atmosférica. Los GPS suelen incorporar una máscara que elimina los satélites que tienen una elevación sobre el horizonte menor de 10° . La bondad de la distribución de los satélites para realizar una medición se evalúa por medio de un factor adimensional llamado DOP.



DOP (Dilution Of Precision): depende de la geometría de los satélites en el momento del cálculo de la posición. No es lo mismo que los 4 satélites estén muy separados (mejor precisión) que los satélites están más próximos (menor precisión). El DOP se divide en varios términos:

- GDOP (Geometric DOP), suministra una incertidumbre como consecuencia de la posición geométrica de los satélites y de la precisión temporal.
- PDOP (Position DOP), incertidumbre en la posición debido únicamente a la posición geométrica de los satélites.
- HDOP (Horizontal DOP), incertidumbre en la posición horizontal que se nos da del usuario.

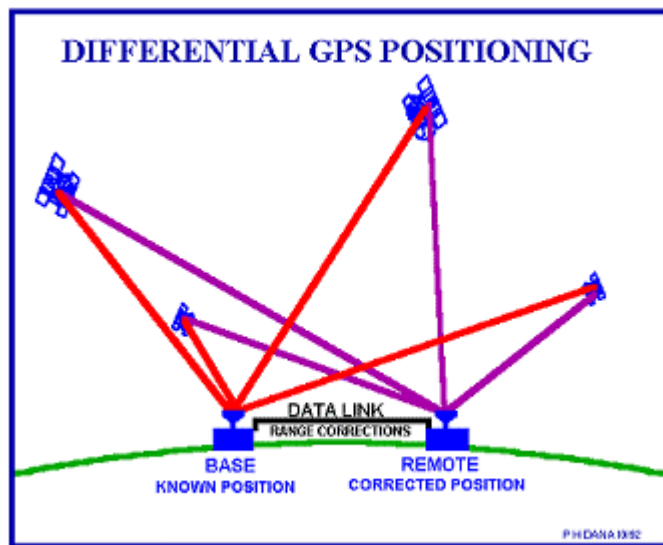
- VDOP (Vertical DOP), suministra una información sobre la incertidumbre en la posición vertical del usuario.



De forma general se establece que para que una medición sea aceptada como buena el valor del DOP debe ser inferior a 1,5.

Con este sistema DGPS se pueden corregir en parte los errores debidos a:

- Disponibilidad selectiva.
- Propagación por la ionosfera - troposfera.
- Errores en la posición del satélite (efemérides).
- Errores producidos por errores en el reloj del satélite.



8.6. DISTANCIA DEL ROTADOR A LA BASE

Siempre habrá errores inherentes a la medición GPS que no pueden ser removidos. Estos consisten de la combinación de un error base y un error lineal. Para poder considerar este error nominal, la mayoría de los fabricantes presentan la precisión de los receptores en el siguiente formato:

$$L1 \text{ (Frecuencia simple)} = 1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$$

$$L1, L2 \text{ (código P) onda completa} = 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$$

(Nota: Las expresiones anteriores solo son validas para los valores horizontales, en vertical aumentan por un factor de 1.5 veces).

Las expresiones anteriores nos indican que cada kilómetro de separación entre el receptor y la base se adiciona un milímetro en el error. Podemos decirlo de otra forma; cada 10 km se adiciona 1 cm. Así, a los 10 km los errores inherentes son significantes. Además, este tipo de expresiones no consideran los errores ionosféricos.

9. PUESTA EN ESTACION

Los cuidados al momento de instalar la antena sobre el punto a medir. básicamente son los mismos que se debe tener con un Teodolito o Estación Total:

- Se debe realizar un correcto centrado de la antena sobre el punto, mediante el uso de una base nivelante con una plomada óptica (pensemos que un equipo geodésico

determina una línea geodésica con precisión de 5 mm + 1 ppm y el mal centrado de antena puede superar el límite buscado).

- Medir la altura de antena al inicio de la sesión y al finalizar, para verificar que no se halla movido la misma y que las lecturas de altura tomadas sean correctas.
- Seleccionar las estaciones en lugares con la mínima obstrucción posible y evitar superficies que provoquen efecto multitraectoria (como frentes o laterales de edificios, techos a dos aguas de chapa, etc.).

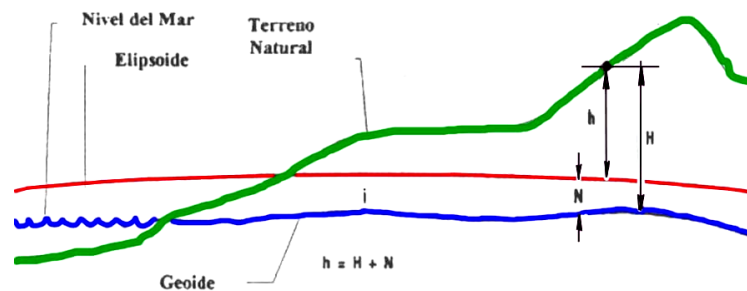
10. LOS ELEMENTOS DE LAS ALTURAS CON POSICIONAMIENTO SATELITAL:

La precisión en la componente Z de las coordenadas obtenidas con posicionamiento diferencial es una vez y media mayor que las respectivas coordenadas planimétricas. De todas maneras, la precisión de 1.7 cm +1.7 ppm, obtenida con receptores geodésicos doble frecuencia, es un valor óptimo para muchísimos trabajos. Lógicamente, no puede superar la precisión que se obtiene con un nivel óptico y nivelación geométrica (milímetros), y tampoco obtener los mismos resultados de altura ya que la nivelación geométrica permite la obtención de cotas ortométricas y los sistemas de posicionamiento satelital brindan elipsoidicas.

Conscientes de ello, cualquier medición con posicionamiento satelital puede derivarse a cota ortométrica si se aplica la siguiente ecuación y elementos de las alturas:

$$h = H + N$$

La próxima figura, representa los elementos involucrados en las alturas y el posicionamiento satelital, con GPS o GLONASS.



ELEMENTOS DE LAS ALTURAS MEDIDAS CON GPS o GLONASS

De la gráfica de la figura, se desprenden los siguientes elementos:

h = Altura Elipsoidal = Altura de la estación GPS sobre el elipsoide.

H = Altura Ortométrica = Altura sobre el geoide = aproximadamente al nivel del mar.

N = Altura geoidal = Altura del geoide sobre el elipsoide.

Por lo tanto, si se conociera el valor de N , sobre el punto medido con receptores satelitales, se puede conocer la cota ortométrica de dicho punto. El valor de N , se puede obtener de modelos de geoide, disponibles para todo el globo o para ciertas regiones particulares. Los modelos de geoide globales, por lo general, no cubren las necesidades de precisión (+/- 1 metro para el 65% del globo) y los modelos regionales son extremadamente escasos.

Logicamente; si el área de cobertura del trabajo no es muy extensa, es suficiente una precisión inferior a 10 cm, la zona no es exageradamente quebrada (el geoide se presume paralelo al elipsoide en toda la región de trabajo) y no se requieren cotas ortométricas, se podrán utilizar directamente el elipsoide como superficie de referencia altimétrica. En estos casos, y dependiendo del destino del trabajo, se pueden lograr muy buenos resultados con precisión inferior a los 10 centímetros (diferencial y receptores geodésicos, simple o doble frecuencia).

La verdadera forma de tratar las cotas GPS, para derivarlas a ortométricas en zonas donde no se disponen de modelos de geoide, es generar su propio modelo geoidal para su región de trabajo.

11. CREACION DE UN MODELO DE GEOIDE LOCAL:

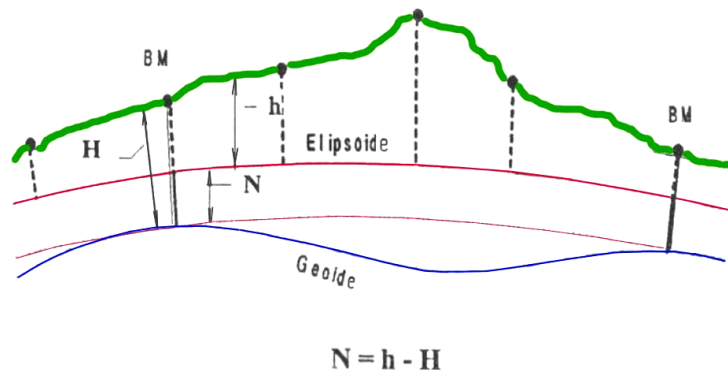
Durante mucho tiempo, las determinaciones de puntos ortométricos se realizaron mediante nivelación geométrica. Los levantamientos altimétricos en general, no han encontrado hasta el momento un método mas preciso que el nivel óptico y la nivelación geométrica. El uso de posicionadores satelitales GPSo GLONASS en modo diferencial, presenta grandes ventajas en relación a la nivelación geométrica por tiempo y costo, sin embargo, exige conocer las alturas geoidales.

A continuación se describen los pasos necesarios para generar un modelo de geoide local o regional que permita interpolar las cotas ortométricas sobre otros puntos medidos de la región.

Si realizamos una medición diferencial con receptores geodésicos sobre un punto de cota ortométrica conocida, podemos obtener el valor de N , para ese punto. Si este mismo procedimiento, se repitiera para una gran cantidad de puntos de una zona o región, se obtendría una serie de valores de N , para cada uno de esos puntos. En síntesis; mediante GPS se logra obtener cota elipsóidica, previamente se conoce la cota ortométrica, se aplica la fórmula

$$N = h - H,$$

obteniendo las distintas diferencias elipsoide/geoide para cada punto observado.



Una vez que se logran obtener, todos los valores de N , para cada punto de la región, se deben enviar los datos de posición planimétrica y su respectivo valor de N a un software de generación de modelos digitales o curvas de nivel. (Esta operación significa, reemplazar la cota ortométrica o elipsóidica de cada coordenada, por los valores de N de cada uno de esos puntos).

Las curvas de nivel, reflejan el modelo de geoide para dicha zona cubierta por curvas de nivel o puntos utilizados para su generación.

Luego, para cada nuevo punto medido con posicionadores satelitales, dentro de la región con modelo geoidal, se puede interpolar el valor de N , desde el plano de modelo regional de geoide (en forma de curvas de nivel) y aplicar, la siguiente fórmula para conseguir la altura ortométrica del nuevo punto medido:

$$N + h = H$$

De esta manera, se logra solucionar el problema de las alturas con posicionamiento diferencial de receptores del tipo geodésicos.

12. TECNICAS GEODESICAS DE MEDICION EN TERRENO

Existen varios métodos de medición GPS, entre los que se pueden realizar las siguientes clasificaciones:

METODOS ESTATICOS.

METODOS CINEMATICOS.

El método estático, fue uno de los primeros en haber sido desarrollados, y en la actualidad no ha podido ser superado en cuanto a nivel de precisión. Una variante, del método estático convencional, es la técnica de Estático Rápido, que entrega menor precisión que el estático convencional, requiere de equipos de doble frecuencia y líneas de base cortas, pero, requiere menor tiempo de ocupación por punto. Los métodos estáticos, solamente se pueden utilizar en modo post-procesamiento.

Por otro lado los métodos Cinemáticos (también llamados Dinámicos geodesicos), ofrecen alto grado de productividad, en cuanto a cantidad de puntos que se pueden relevar. Brindan precisiones de un par de centímetros o menos y permiten el modo post-procesamiento y tiempo real RTK.

12.1. METODO ESTATICO

La técnica estática es el método clásico de las mediciones GPS, en post-procesamiento. El termino estático se ha aplicado; debido a que; los receptores ocupan estaciones por sesiones prolongadas (de una hora o más). Una sesión consiste de un período de tiempo donde dos o más receptores están en funcionamiento y captando información al mismo tiempo e intervalo de grabación. Para finalizar una sesión, los receptores son desconectados y los archivos se cierran en la memoria del receptor.

Generalmente, un receptor será ubicado en un punto de coordenadas previamente conocidas, mientras que los otros receptores se estacionan sobre nuevos puntos a determinar. La cantidad de sesiones diarias, depende de la disponibilidad de la ventana satelital, de la geometría satelital (DOP), la precisión que se requiere en la medición y el tiempo de traslado entre estaciones.

Lo que se busca a través de la observación por períodos de una hora o mas, es el cambio de la geometría de observación. El movimiento de los satélites y su cambio de posición en el espacio, permiten resolver las anbigüedades en la fase de la portadora (observable geodésico). El método estático se sigue utilizando en la actualidad para proyectos de densificación donde las observaciones cinemáticas no son prácticas y principalmente, en la determinación de puntos de primer orden, o de puntos de apoyo para posterior densificación. También, el método estático se utiliza en trabajos donde la precisión requerida es de unas pocas partes por millón o menos, como por ejemplo; en estudios sobre las deformaciones y movimientos de placas tectónicas, deformaciones y control en obras de ingeniería, redes geodésicas de alta precisión y apoyo terrestre a la fotogrametria.

12.2. METODO ESTATICO RAPIDO

Con la posibilidad que ofrecen los equipos geodésicos modernos, de utilización de toda la información disponible de los satélites, es decir, ondas portadoras en L1 y L2 y los

códigos C/A y P(y), se han desarrollado métodos que permiten aun mayor productividad al minimizar el tiempo de ocupación estática.

El método estático rápido, requiere de la utilización de equipos de doble frecuencia y código P(y). En la práctica es idéntico al método estático convencional, pero en este caso se considera suficiente un período de 10 minutos para líneas de hasta 5 km, aumentando en dos minutos por cada kilómetro adicional. En el método estático rápido, se recomienda no medir vectores mayores a los 10 kilómetros.

Su aplicación se encuentra en la densificación rápida de puntos, donde las condiciones topográficas son adversas y los trayectos entre estaciones son obstruidos, no permitiendo un trabajo cinemático.

12.3. METODO CINEMATICO CONVENCIONAL

El método cinemático, lleva su nombre por relacionarse con un receptor móvil en movimiento. Por lo general, un receptor se ubica en un punto conocido mientras que el otro, o los otros, receptores se desplazan de punto en punto. Se calcula un resultado por cada época registrada. Para el posicionamiento de recorridos, basta con desplazarse grabando épocas al intervalo mas adecuado, en cambio, la determinación de puntos se logra promediando una serie de observaciones de no más de un par de minutos.

Comúnmente cada estación se ocupa por uno o dos minutos. El método cinemático es un método de medición eficiente para coleccionar la información de los puntos medidos. Al mismo tiempo es el método más exigente y frágil. Se necesita inicializar la medición por algún método y mantener la conexión con 4 satélites comunes entre receptor base y móvil durante toda la sesión. Si en cualquier momento están disponibles menos de 4 satélites, será necesario reinicializar la medición en el último punto medido.

El método cinemático se basa en la resolución de ambigüedades enteras al comienzo de la medición. Las ambigüedades calculadas al inicio se usan y arrastran durante toda la medición. En caso que existan menos de cuatro satélites comunes disponibles en cualquier momento de la medición, o se pierda momentáneamente el rastreo de la fase de portadora (ciclos perdidos), no se pueden usar las ambigüedades determinadas al inicio o arranque de la medición. Por lo tanto, es un método que requiere de un operador muy cuidadoso y evitar situaciones donde se pudiera llegar a perder la recepción de los satélites.

Esto ocurrirá siempre al pasar por debajo de un puente o pasos bajo nivel. Este problema también ocurre en zonas urbanizadas, debido a las edificaciones altas y árboles. Las ciudades y los bosques no son áreas recomendables para las mediciones cinemáticas convencionales. Sin embargo, áreas abiertas como el desierto, son aptas para aplicación del método cinemático convencional.

El otro inconveniente que presenta el método cinemático convencional, es la resolución inicial de las ambigüedades, y para ello se requiere la inicialización sobre líneas de base conocidas.

La línea de base conocida, se puede establecer a priori de iniciar la medición por cualquiera de los siguientes métodos:

- Una línea de base conocida, determinada anteriormente por método estático de 1 hora.
- A través del método de intercambio o traslocación de antenas.
- Por la utilización de un par de puntos con coordenadas geodésicas conocidas.

Inicialización por intercambio de antena:

El método más confiable para inicializar una medición cinemática convencional, es mediante el intercambio de antenas.

El procedimiento, sería: encender un receptor (A) sobre el punto base de coordenadas conocidas y poner el nombre de sitio BASE. Encender el segundo receptor (B), sobre cualquier punto cercano a la base, poner el nombre de sitio, SWAP (o cualquier otro nombre). Grabar datos por el término de 3 minutos. Luego, avisar a ambos equipos que se pasa al modo trayectoria. Desplazar el receptor (A) al punto SWAP y el receptor (B) al punto base. Colocar en cada receptor el nombre de punto que está ocupando cada uno (receptor (B) = BASE, Receptor (A) = SWAP). Colectar datos, por el término de 3 minutos. Sin apagar los receptores, se deben poner en modo trayectoria, e intercambiarlos nuevamente de punto, colocando el nombre del punto en el que se estaciona cada receptor. Finalmente, el equipo (A) ocupa el punto BASE y el receptor (B) ocupa el punto SWAP, nuevamente.

Una vez realizado este proceso, el equipo (B), debe realizar una observación sobre el punto SWAP para luego, recién, comenzar a desplazarse para realizar la medición cinemática.

En realidad, el procedimiento de intercambio de antena, no forma parte de la medición cinemática, simplemente se utiliza para determinar y fijar las ambigüedades sobre la línea de base conocida.

Inicialización por medio del método estático:

Otro método es observar estáticamente por un periodo de una hora o más, una línea base, antes de hacerlo en forma cinemática. A través de una hora de observación, se obtendrá la línea base que se utilizara para fijar ambigüedades en el procesamiento cinemático. Estas ambigüedades se fijan y se usan durante toda la medición cinemática (salvo, pérdida de ciclos o de señal), en que el equipo móvil, deberá retornar y estacionarse más de 1 minuto sobre el punto medido durante la trayectoria.

Inicialización sobre puntos previamente conocidos:

Es la forma más rápida de inicializar una medición cinemática convencional. Esta línea de base, debe ser muy precisa, del orden de 3 milímetros más 3 partes por millón. Esta línea de base, además, debiera ser corta, se recomienda menos de 2 kilómetros. El receptor base se coloca sobre uno de los puntos conocidos y el receptor móvil en el otro. Se colecta información común por el término de más de 1 minuto y luego el receptor equipo móvil inicia el modo trayectoria para realizar la medición cinemática.

Cierre para Cinemático, convencional:

Al final de cada medición cinemática se debe llevar a cabo el cierre de información, no importando el método de inicialización utilizado, en otras palabras, para una observación cinemática convencional, los receptores móviles debieran regresar a su punto de partida antes de apagar los receptores y culminar la sesión.

Si el operador completa un circuito en el punto de inicialización con el receptor móvil, se da lugar a una revisión para la continuidad de las ambigüedades. Esto constituye el cierre de la información, sin embargo, no proporciona el cierre de la medición (ya que el método descrito constituye una radiación). Puede haber casos donde los puntos llegan a resultar no tan exactos como se desea, ya que puede haberse tenido solo 4 satélites, una geometría pobre, interferencia de multipath, etc.

El método que se recomienda para la revisión de las estaciones cinemáticas es volver a visitar las estaciones al día siguiente usando una estación base diferente. Esto ayudara en la revisión de los satélites de la base de control, además de las estaciones cinemáticas.

12.4. COMBINACION DE METODOS GEODESICOS

La combinación de los métodos lo pueden llevar al resultado más eficiente en cualquier proyecto importante. Lo que destaque a un buen operador será reconocer cuando y donde aplicar cada método para obtener la mejor relación precisión / productividad. La planificación del proyecto es la clave para un resultado exitoso en la medición de una red con posicionamiento satelital. Tener la visión general del proyecto y decidir que

estaciones serán medidas por un método en especial, es una de las tareas más importantes en la planificación exitosa de los trabajos con GPS o GLONASS. No solo es una cuestión de reconocer el lugar y el tiempo que toma el viaje de un punto a otro, sino también se debe considerar la visibilidad satelital en la ruta. En los proyectos de medición con posicionadores satelitales geodésicos, el reconocimiento de la ruta puede ser tan importante como el reconocimiento del lugar.

12.5 POSICIONES A TIEMPO REAL POR METODOS NO GEODESICOS (DGPS y DGLONASS)

Existe, un gran número de aplicaciones donde no se requiere alta precisión (llamado alta precisión a posiciones mejores de los 10 centímetros en X, Y, Z). Por ejemplo, hay un espectro muy amplio de aplicaciones (inventario GIS, cartografía, relevamiento de rutas y caminos, o hasta incluso realizar mapas de rendimiento de cosecha en agricultura, etc.), que se satisfacen con precisiones en la posición en el orden de 1 metro. Para este tipo de trabajos, donde la precisión no es exigente, pero no basta el posicionamiento autónomo de 20 a 100 metros de error, se utilizan las técnicas Diferencial GPS, o Diferencial GLONASS (en adelante DGPS y GLONASS, respectivamente).

El método diferencial a tiempo real, al igual que el método RTK, requiere que exista un enlace de comunicación entre el equipo base y el móvil. Para esto el equipo base debe conectarse a un radio módem transmisor que permita enviar la información que está recogiendo. Mientras tanto, el equipo móvil debe ser conectado a un radio - módem receptor que capta la información de la base. Esta información debe ser combinada por el equipo móvil con la propia, para así calcular coordenadas en tiempo real.



Otra posibilidad de trabajo en modo DGPS, es utilizar únicamente un equipo móvil (equipo móvil) y valerse de servicio de correcciones diferenciales transmitidas por radio o satélite. Este último caso, si su trabajo tiene lugar donde existe cobertura de un servicio DGPS de estas características.

Aplicando este método, no hay mayores restricciones al modo de trabajo en el terreno. Simplemente, moverse y relevar las características encontradas en el terreno.

La única restricción sería dada por el receptor base: Si un usuario, instala su propia base DGPS, en modo post-proceso dispone de un radio de trabajo de aproximadamente 400 km. a la base, En cambio, para el modo DGPS a tiempo real, el límite de cobertura de la base estará restringido por la potencia y tipo de radio módem utilizado en la base.

Si se utiliza un servicio de correcciones diferenciales, habrá que preguntar a quien lo provee cuál es la cobertura de trabajo.

Aplicando esta metodología, se logran precisiones por debajo de 1 metro o de 2 a 5 metros. Dependiendo del tipo de receptores que se utilizan como base y equipo móvil.

Se llama método DGPS o DGLONASS aquel que utiliza únicamente el observable de código C/A y no siendo



necesaria la resolución de ambigüedades. Existen receptores de alta calidad, que suavizan el código C/A en base a información de la portadora de fase. Estos receptores, entregan precisiones de 30 cm a 1,5 metros. En cambio, los equipos que usan simplemente el código C/A, logran precisiones de 2 a 5 metros en coordenadas horizontales.

Todos los receptores GPS, GLONASS o GPS + GLONASS, generan algún nivel de ruido interno. El "ruido", en este caso, se refiere a las variaciones intrínsecas del resultado de la posición final. Se puede observar mediante la monitorización de la salida de posición, en DGPS a tiempo real, mientras el receptor esté inmóvil. La posición se moverá más o menos constantemente. El movimiento es causado por variaciones (errores) en las mediciones de pseudo-distancias a los satélites GPS. Estas variaciones pueden ser causadas por muchos factores, incluyendo el diseño "final" del receptor, la antena, y el software interno que calcula la posición. Todos ellos contribuyen a lo que generalmente se conoce como "ruido" del receptor. En un receptor GPS no-diferencial (medición autónoma), los efectos debidos a la disponibilidad selectiva (SA) son tan grandes que generalmente, no se pueden detectar los errores internos. En equipos con correcciones DGPS, se eliminan la mayoría de los efectos debidos a SA, y el ruido interno se hace muy aparente. Aparece como si fuera casi un cambio constante en la posición que puede llegar a ser hasta de 10 a 15 metros, y tan bajo como la fracción de un metro en los receptores GPS de tipo geodésico. Los errores internos en un receptor GPS corregido diferencialmente, por lo general, son factores determinantes en relación al tiempo que sea necesario para lograr el nivel de precisión deseado de una medición. Obviamente, un sistema (receptores GPS, calculo, transmisión y aplicación de correcciones diferenciales) ruidoso requiere más tiempo para eliminar por promedio los errores debidos al ruido interno.

Probablemente no es ninguna sorpresa que los sistemas menos ruidosos sean los más costosos.

Receptores GPS

Pathfinder Pro XRS Sistema de posicionamiento y mapeo GPS diferencial de alta precisión TRIMBLE, de USA equipado con estructura electrónica de microprocesadores GPS MAXWELL de alta ganancia y bajo ruido, tecnología EVEREST de reducción del efecto Multipath, software de planificación, procesamiento y mapeo PATHFINDER OFFICE, desarrollado para correr bajo Windows (95, 98 o NT), y accesorios.

- Canales: 12 en paralelo / secuencial.
- Tracking: hasta 12 satélites simultáneamente en L1 código C/A y FASE.
- Tipo de posicionamiento y/o navegación: Terrestre, Aéreo, Marítimo.-
- No necesita inicialización.-
- Modo de Medición: Estático y Dinámico, ambos métodos en autónomo y diferencial.-
- Frecuencia de medición: desde 1 seg. por medición (programable), con promedio de posiciones.-

Sistema de coordenadas Gauss Kruger (Argentina), UTM y Latitud, Longitud y Altura (mundiales).

Controladora - Colectora TSC-1 con 2 Mb. de memoria (más de 20 Hs. diferenciables a nivel submétrico tomando posición segundo a segundo). expandible con tarjetas PCMCIA. (Disponible también con controladora PocketPC con software Terrasync.)

Display de 8 líneas x 20 caracteres iluminable.-

La controladora TSC-1 incluye un programa residente (Asset Surveyor) para posicionamiento estático, dinámico y captura de información geográfica con atributos para tareas profesionales de levantamiento de mapas y GIS.-

Sistema de coordenadas seleccionable por usuario.-

140 datums de apoyo, incluido Campo Inchauspe (Argentina), más datum configurable por usuario.-

Modo RTCM - SC104: Permite recibir posiciones corregidas vía radio-modem para posicionamiento diferencial a tiempo real.-

Permite además realizar corrección diferencial en post proceso y/o a tiempo real vía MSK Beacon y por corrección diferencial satelital del servicio OMNISTAR y RACAL utilizando una única antena GPS/Beacon/Satélite integrada.-

Precisión autónoma: 12 mts RMS (sin S/A).-

Precisión diferencial (Estático/Dinámico):

Código C/A: mejor de 50 cm cálculo instantáneo (segundo a segundo)

Fase L1: centimétrica con firmware standard (incluido)

Precisión diferencial a tiempo real DGPS: submétrica (mejor de 50 cm).-

Funciones de navegación completas, incluido abatimiento transversal XTE, distancia, rumbo, velocidad, tiempo estimado de arribo, etc.-

Tipo de datos en memoria: Archiva puntos, líneas y áreas, con atributos.-

Permite ingresar manualmente Offset para atributos puntuales, lineales y areales.-

Permite utilizar medidores láser para ingresar información de offset automáticamente.-

Ingreso rápido de atributos repetitivos (quickmark).-

Ingreso de atributos segmentados por tiempo.-

Capacidad de revisar y editar atributos directamente en el campo.-

Estructura de receptor: compacto portable, con mochila de transporte, controlador TSC-1 y antenageodésica de domo microstrip de alta ganancia, desacoplable (no necesita orientación), resistente al agua, polvo y golpes.-

Interfase incorporada para recolectar datos de sensores externos: ecosondas, distanciómetros láser, magnetómetros, etc; asociados a posiciones GPS.

Temperatura de operación:

Receptor: - 30° C + 65° C

Controladora: - 30° C + 65° C

Doble port de comunicaciones: RS-232C / NMEA.-

Configurable ya sea como base o como receptor móvil.-

Indicación en display de cantidad de satélites observables, geometría de satélites observados: PDOP, HDOP, VDOP, elevación de cada satélite, URA; SNR, azimut, etc.-

Selección automática de los 4 mejores satélites de los observados simultáneamente, proporcionando más tiempo de buen PDOP durante el día, que otros receptores supuestamente similares.-

Actualización automática cada 1 segundo de las constelaciones de satélites observados.-

Ingreso de características y atributos mediante diccionario de datos creado en PC con software PATHFINDER OFFICE.-

Receptor GPS de doble frecuencia (L1/L2) de 24 canales, alta precisión, para medición en **modo Post Proceso**, marca **TRIMBLE**, de USA,

El **GPS 5700** de TRIMBLE es el sistema de posicionamiento, replanteo y mapeo GPS con precisión geodésica para modos estático y cinemático.-

La versión descrita incluye la posibilidad de operar en modo **post-proceso** para medición de vectores de gran longitud con precisión geodésica y sesiones de corta duración con un fácil y rápido procesamiento en PC a través del software integral de planificación, análisis y edición, totalmente en castellano, Trimble Geomatics Office desarrollado en WINDOWS (95, 98, NT y 2000).- Posibilidad de ampliación a los modos en tiempo real RTK / eRTK / DGPS

Los receptores 5700 del sistema incluyen: estructura electrónica **MAXWELL-4** de bajo ruido y consumo, antena Zephyr, software residente **EVEREST** para eliminación del efecto multipath, procesador interno de 32

Puede ser operado íntegramente por una sola persona.-

Puede ser operado con lluvia, niebla, de noche y no necesita inter visibilidad entre la base y el operador.-

Puede medir y grabar posiciones con precisión de centímetro en forma continua siguiendo líneas (rectas o curvas), para luego ser graficadas con códigos, atributos y descripciones.-

No posee piezas frágiles o que requieran de ajuste continuo. La Estación Total GPS es totalmente electrónica de estado sólido.-



El sistema ofrece coordenadas geográficas o locales de usuario Norte, Este y Z; Acimutes, distancias, parámetros de navegación, navegación gráfica (a puntos de replanteo), etc..-

El sistema ejecuta fácilmente una calibración automática, en la oficina, de coordenadas geográficas a coordenadas planas permitiendo obtener resultados iguales a la de una estación total convencional.-

Ante cualquier pérdida de señal de satélites, el sistema permite ser inicializado en cualquier punto desconocido en forma estacionaria o en movimiento mediante el sistema ON THE FLY (OTF).- La inicialización inclusive puede ser efectuada con solo 4 satélites, y el tiempo del mismo no supera en la mayoría de los casos los 30 segundos.-

Receptores 5700:

El 5700 es un receptor de doble frecuencia, ideal para aplicaciones donde se necesita tener la antena separada del receptor GPS para su instalación en un tripode, bastón o inclusive en un vehículo (auto, buque, avión) para posicionamiento cinemático.-

Instrumento de alta precisión apto para mediciones geodésicas a nivel de milímetros operando en modo post-proceso y en tiempo real RTK (opcional).- Equipado con exclusiva tecnología electrónica modular de microprocesadores MAXWELL-4, de muy bajo ruido, bajo consumo, extremadamente veloz (MULTI BIT) y actualizable permanentemente con versiones superiores de Firmware (Software interno).-

- Equipado con 24 canales de rastreo continuo de todos los satélites a la vista en frecuencias L1 y L2, código C/A, código P en L1 y L2, y fase completa en L1/L2.-
- Totalmente operable en forma automática durante períodos de código P encriptado (código Y). De esta manera es posible obtener precisiones en líneas de base corta o largas con la misma rapidez y precisión aun con código Y.-
- El receptor 5700, incorpora los últimos adelantos técnicos para seguimiento y procesamiento de las señales GPS tal el caso de la tecnología SUPER-TRACK que permite el rastreo de señales GPS muy débiles ocasionadas por alta radio interferencia o zonas de topografía difícil como áreas montañosas, entre edificios, arboledas, etc.-
- Esta nueva generación de receptores también incorpora arquitectura electrónica MULTI BIT de alta velocidad de procesamiento y la nueva técnica EVEREST de reducción matemático del efecto Multipath, logrando un rendimiento inmejorable en posicionamiento cinemático en post proceso.



Precisiones:

Modo Precisión / Tiempo

Autónomo a tiempo real sin (S/A) mejor de 10 m (1 seg)

Diferencial a tiempo real DGPS con L1 C/A mejor de 30 cm. (1 seg.)

Diferencial Estático para una o varias bases mejor de 5 mm + 1 ppm (45 min/1h) simultáneamente con post-proceso TGO

Diferencial FAST STATIC uno o varias bases mejor de 5 mm + 1 ppm (5 / 15 min) simultáneamente con post proceso TGO

Diferencial kinemático STOP and GO, continuo mejor de 2 cm + 1 ppm (1 seg) (con OTF).

Azimuth

En modo estático: 1 arco segundo + 5/longitud de la base (km)