

De entre las correspondencias candidatas, dadas por los máximos de la función media geométrica, se toma como correcta aquella que, en un entorno mayor, da un mejor valor de correlación. Igualmente, estas correlaciones en entornos mayores son pesadas por factores de similitud de valores absolutos. Evidentemente, sobre el valor de este máximo se imponen dos condiciones: debe superar una cierta cota y no debe existir otro punto en el entorno con un valor de correlación alto.

De esta forma, como se ve, para que un punto sobre la segunda imagen sea adoptado como correspondiente a uno de la primera, deben cumplirse todas las siguientes condiciones:

- a) Ser un máximo (relativo) de la función de correlación cruzada de grises en un entorno pequeño.
- b) Ser un máximo (relativo) de la función de correlación cruzada de derivadas en un entorno pequeño.
- c) Ser el máximo absoluto de la función de correlación de grises en un entorno grande sobre las posiciones candidatas y superar una cierta cota.
- d) No debe existir ninguna otra posición candidata con un valor de correlación, en un entorno grande, cercano al del máximo.

Una vez determinada una correspondencia, el paralaje de ese punto se determina calculando la diferencia entre las coordenadas x del punto en la primera imagen y el centroide del máximo de la función de correlación en la segunda imagen.

Un punto importante de todo este proceso es el relativo a la longitud de los intervalos sobre la segunda imagen utilizados para buscar una correspondencia. Evidentemente, una longitud menor repercutirá en un ahorro de tiempo de cálculo y en una mayor fiabilidad, al contar con un menor número de posiciones candidatas. La manera más sencilla y, probablemente única, de tener intervalos más cortos es conseguir inicialmente buenas estimaciones de los paralajes, para así disponer de un pequeño intervalo cerca de la posición correcta. Con este propósito, se ha adoptado en el tratamiento de las imágenes una estructura jerárquica. Partiendo de imágenes de tamaño reducido (un factor ocho) se consiguen resultados que sirven de estimación en el siguiente nivel de procesado, es decir, sobre imágenes reducidas por un factor cuatro. De igual manera, estos en un factor dos y, finalmente, se procesan las imágenes originales. El tiempo total empleado en este proceso jerárquico es apreciablemente menor que el que sería necesario en un procesado de imágenes digitalizadas a 50 micras (originales) con intervalos de búsqueda grandes. Es decir, una estructura de este estilo permite calcular los paralajes en aproximaciones sucesivas de resolución cada vez mayor, procedimiento que es menos costoso que un rastreo secuencial con la máxima resolución (2).

La estructura jerárquica tiene, además, otra utilidad: dependiendo de los requerimientos de precisión se puede detener el análisis en el nivel más adecuado. Así, a pesar de que las imágenes estén digitalizadas a 50 micras se podría parar el proceso después del análisis de las imágenes reducidas un factor dos, es decir, como si originalmente estuvieran digitalizadas a 100 micras. La determinación de hasta qué nivel de procesado hay que llegar es otro parámetro que debe introducir el usuario del sistema.

(2) Esta afirmación es válida para un terreno de desnivel medio. Estrictamente hablando, hay un caso en el que un proceso jerárquico es más costoso que el secuencial: el terreno llano. Contrariamente, la máxima rentabilidad del sistema aparece en zonas muy montañosas.

Eliminación de errores

A pesar de las precauciones tomadas para garantizar la validez de los paralajes medidos, a veces, el sistema hace corresponder puntos que se asemejan pero que realmente no son homólogos, es decir, no son la proyección sobre ambas fotografías de un mismo rasgo del terreno. Ello es debido, principalmente, al uso de entornos de correlación relativamente pequeños, a la limitada capacidad como discriminador de la propia función de correlación, a la falta de continuidad entre las dos imágenes, que conlleva zonas ocultas, y, como no, al efecto de perspectiva debido a los ángulos de toma que conduce, localmente, a cambios geométricos y radiométricos de los rasgos del terreno que se pretenden medir.

Para discriminar los paralajes erróneos, el sistema hace un análisis estadístico sencillo aprovechando que éstos son un porcentaje pequeño del total de paralajes calculados (inferior al 4 por 100). Básicamente se centra en cinco partes:

- *Inversión de orden.* Debido a la Geometría del efecto estereoscópico la ordenación por su coordenada x de los puntos encontrados en una línea epipolar debe ser la misma en ambas imágenes. Por ello, en un primer análisis, línea por línea, se eliminan los puntos que presentan inversión de orden.
- *Seudo-inversión de orden.* Dentro del análisis por líneas también se eliminan las parejas de puntos que en una imagen están muy próximos y en la otra muy lejanos, pues pensando en términos de entornos de correlación, tal situación indica un comportamiento anormal. El concepto próximo o lejano, en este caso, va en relación al tamaño de los entornos.
- *Análisis global.* Tomando el conjunto de puntos homólogos encontrados, se analizan los histogramas de paralajes en zonas amplias, delimitadas por sus coordenadas x e y , de tal forma, que en cada zona se tengan varios miles de puntos. El estudio de los histogramas permite eliminar aquellos puntos que, siendo pocos, poseen un paralaje bastante distinto del resto. Este filtrado parte de la idea de que en zonas amplias la distribución de paralajes (y, por ello, de alturas) debe ser relativamente continua. En fotografías de escala grande y de zona urbana tal suposición podría no ser correcta, pues la restitución de los edificios, que este sistema automático realizaría, podría introducir discontinuidades.
- *Análisis local.* Tomando la idea del punto anterior, en esta etapa se analiza el paralaje de un punto en función del que tienen sus vecinos más próximos. Así, un punto se eliminará cuando su paralaje difiera en más de una cierta cantidad con respecto a la mediana de los paralajes de sus vecinos. La cota que determina la eliminación o no de un punto y cómo considerar la distribución de los vecinos en el entorno, se ha establecido a partir de un análisis de estos valores sobre diferentes terrenos y, naturalmente, depende del nivel de la estructura jerárquica en que se procesa. En esta comparación entre vecinos se ha adoptado la función mediana frente a la media porque la primera es un valor real, perteneciente a un punto cercano, mientras que la media puede no serlo. De esta manera, la comparación se hace entre vecinos, uno de los cuales, se elige como representante.
- *Puntos aislados.* Por último, los puntos que se consideran demasiado alejados de sus vecinos como para permitir su análisis local también se descartan. El principal motivo para esta actuación es que el sistema quiere garantizar una cierta seguridad sobre la calidad de las correspondencias. El concepto alejado, al igual que antes, tiene relación al tamaño de los entornos de correlación.

Finalmente, en relación con la calidad y para hacer más sólido el análisis, todo este estudio de los paralajes se realiza de manera iterativa, hasta que no queda ninguno por eliminar.

Después de procesar muchos pares estereoscópicos en fase de pruebas, este procedimiento de eliminación de falsas correspondencias ha demostrado ser muy robusto y, únicamente no ha filtrado todos los errores cuando los reflejos solares sobre una superficie de agua han provocado un mal funcionamiento de las funciones de correlación. Lamentablemente, el problema de los reflejos solares sobre superficies reflectantes como el agua todavía no es solventable por un proceso automático que pretenda ser mínimamente rápido.

El sistema actual tiene ajustados sus parámetros de manera que el proceso conjunto de búsqueda y filtrado de correspondencias permite calcular el paralaje del 15 por 100 al 20 por 100 de todos los elementos de la imagen en la zona de solapamiento. Estos porcentajes son independientes del nivel de la estructura jerárquica en que se detenga el proceso y tampoco dependen de la escala de la fotografía. En cambio, sí tiene una importancia sobre este número, la calidad fotográfica de la imagen y la textura del terreno. Así, en el procesado de las imágenes originales, donde la zona de solapamiento puede tener unas dimensiones típicas de 4.100 por 2.600 elementos, el sistema encuentra el paralaje de 1.500.000 a 2.100.000 puntos sobre el terreno. Procesando imágenes reducidas por un factor dos (en ambas dimensiones), el número de puntos es de 400.000 a 500.000.

Como se mencionó en el apartado anterior, todos estos elementos de la imagen con paralaje conocido están distribuidos sobre la zona de solapamiento de manera no uniforme, concentrándose en todos aquellos rasgos del terreno que presentan un ligero cambio de contraste. Un claro ejemplo de este efecto aparece sobre las carreteras o caminos (en fotografías de escala 1:20.000, por ejemplo), donde el sistema encuentra perfectamente todos los bordes de estas estructuras pero no encuentra ninguna correspondencia en su interior.

Modelo numérico del terreno

Una vez filtrada, la lista de paralajes y coordenadas (x, y) sobre una imagen de todos los puntos encontrados se transforma, mediante la aplicación de los parámetros de orientación absoluta, en otra lista de coordenadas (X, Y, Z) referidas al terreno. El sistema de proyección usual es la Proyección Transversal de Mercator (UTM), tomándose como superficie de referencia para las alturas la superficie del mar, cuyo origen se establece como la altura media del mar en un lugar y período determinado.

A continuación, la lista de coordenadas terrestres de los puntos encontrados se coloca sobre una malla o red regular cuyo paso ha determinado el usuario. La asignación a cada nodo de la red se hace colocando cada valor de altura en el nodo de coordenadas (X, Y) más próximo. Como más de un punto puede ser asignado a un mismo nodo, cada valor Z es ponderado de acuerdo al inverso de su distancia planimétrica al nodo.

El paso entre nodos de la red puede ser cualquiera, aunque internamente, el sistema utiliza un paso mínimo equivalente a unas 250 micras a la escala de la fotografía. El motivo de este paso mínimo es garantizar que, cuando termine la asignación a los nodos de la red de la lista completa de coordenadas, queden pocos nodos sin datos.

Partiendo de una red regular con valores altimétricos en la mayoría de sus nodos, el paso siguiente consiste en dar un valor a los nodos que han quedado sin asignar.

Estos nodos son las coordenadas terrestres de las zonas de las imágenes donde los algoritmos de correlación no han sido capaces de encontrar correspondencias. La asignación de valores se hace utilizando una función de interpolación local basada en la media móvil. En cada punto a interpolar se estudia el entorno con una máscara cuadrada hasta que el número y la distribución de los vecinos es adecuada. Entonces, se toma como valor interpolado la media aritmética ponderada de los datos en el entorno. Después de un estudio sobre los resultados de diferentes funciones de peso se ha adoptado para el sistema una función lineal del inverso de la distancia.

El hecho de que el sistema imponga un límite inferior al paso del modelo viene motivado por un compromiso entre dos efectos. Por un lado, utilizar un paso menor permite mantener la resolución planimétrica y altimétrica de los paralajes calculados (en torno a 50 micras a la escala de la fotografía) pero esto conduciría a una red (o modelo) con muchos más nodos y, debido al número de correspondencias encontradas, la fracción de los nodos no asignados sería mayor. Ello implicaría que la interpolación se vería obligada a utilizar entornos mayores y, por lo tanto, su error sería más grande. El tomar como paso mínimo para los modelos unas 250 micras a la escala de la fotografía supone un equilibrio entre el error de interpolación y la pérdida de resolución. Además, modelos más densos pueden presentar graves problemas de almacenaje y, por otro lado, los valores adoptados son suficientes para permitir, partiendo de estos modelos, una aplicación interesante: el trazado correcto de curvas de nivel a escalas cercanas a la de la fotografía.

En realidad, el sistema permite que el usuario demande un paso de red inferior al mínimo usado internamente. Sin embargo, esta red más densa es generada por el sistema en una etapa posterior, interpolando de manera sencilla (remuestreo) el modelo con el paso mínimo. Con ello, a pesar de que un paso menor no significará mayor resolución real, el sistema se hace más flexible.

Cuando el modelo numérico requerido por el usuario tiene un paso entre nodos grande, comparado, por ejemplo, con el paso mínimo, suele ocurrir que las necesidades en cuanto a precisión son menores. En tal caso, estos modelos, llamados perfiles altimétricos, pueden ser generados por el sistema en una etapa temprana del proceso jerárquico, con el consiguiente ahorro de tiempo de cálculo. Típicamente, los modelos numéricos densos se generan con las imágenes originales o con las reducidas por un factor dos, mientras que los perfiles utilizan estas últimas o incluso las reducidas por un factor cuatro.

Para precisar la diferencia que se hace en este escrito entre modelo y perfil, se puede considerar que, partiendo de fotografías de escala 1:20.000, un modelo numérico denso típico tiene un paso entre 5 y 15 metros, mientras que un perfil tiene un paso de 30 a 50 metros.

Una de las principales aplicaciones de los perfiles altimétricos es la generación de ortofotografías. Independientemente de que el sistema sea capaz de producir sus propias ortofotografías, los perfiles (en formato digital) pueden ser introducidos a un ortoprojector clásico. Como se mencionó en la introducción, los modernos aparatos cartográficos, no siendo totalmente digitales, sí admiten datos numéricos en algunas fases del proceso.

Ortofotografía

La ortofotografía es una proyección plana del terreno con apariencia de imagen fotográfica. En contraposición a un proceso aplicado globalmente como es el de rectifi-

cado fotográfico, en la generación de una ortofotografía se corrigen, de manera diferencial, las deformaciones que sobre la fotografía han introducido el relieve del terreno y la perspectiva de la toma. Así, se consigue un enderezamiento, o transformación, que consiste en poner a la misma escala y nivelar todos los píxeles de la fotografía (elementos). La apariencia fotográfica final vendrá dada fundamentalmente por la calidad del proceso de ensamblado de todos los elementos diferenciales.

Si se dispone de un modelo numérico del terreno (o perfil altimétrico) y de una fotografía, con los parámetros de orientación perfectamente conocido, la generación de una ortofotografía es un problema relativamente sencillo. Para ello, hay que determinar para cada punto del terreno (X, Y) con una altura cualquiera Z , cuál es su posición sobre la fotografía. Con esta información se toma de la fotografía el valor de la intensidad (o densidad) luminosa en ese punto y se construye una red asignando ese valor al nodo de coordenadas (X, Y). De esta forma, una vez barrido con el paso deseado todo el plano $X—Y$ abarcado por la fotografía, se obtiene una información numérica similar a la del modelo pero en la cual, el valor de la altura ha sido sustituido por el valor de la luminosidad del terreno en ese punto.

Básicamente, en la generación de una ortofotografía, el sistema parte de una lista de coordenadas fotográficas y paralajes y , al igual que en el apartado anterior, genera automáticamente un perfil altimétrico. A continuación, tomando una de las fotografías utilizadas en el cálculo de correspondencias (y , por lo tanto, de orientación conocida) genera una ortofotografía siguiendo el proceso descrito en el párrafo anterior.

Finalmente, mediante técnicas de tratamiento de imágenes, el aspecto de la ortofotografía así generada es mejorado digitalmente. Los algoritmos aplicados son dos: un resalte de bordes laplaciano y un estiramiento lineal del histograma de grises. Con este tratamiento se gana en contraste y en definición.

La información digital que constituye la ortofotografía puede ser representada en una pantalla gráfica de ordenador o ser reproducida en material fotográfico mediante un dispositivo fotoimpresor. Estos dispositivos, totalmente automáticos, actúan de forma inversa a como lo hacen los digitalizadores, descritos someramente en el segundo apartado. La intensidad del haz de luz se modula según el valor del nodo de la red (ortofotografía) que se está leyendo y , mediante una rendija muy pequeña, se hace incidir sobre la emulsión de un negativo fotográfico. La posición del haz de luz sobre el negativo debe estar en consonancia con las coordenadas del nodo de la red de donde se está tomando el valor de gris. El tiempo de producción de un negativo a partir de una ortofotografía digital dependerá, obviamente, del tamaño de ésta pero, de manera general, es similar o un poco mayor al tiempo de digitalización de una fotografía.

Una de las ventajas de disponer de una ortofotografía generada digitalmente es la posibilidad de integrarla de forma natural en otros sistemas digitales de representación gráfica o de edición. Hoy en día, los modernos ordenadores ponen a nuestro alcance unos sistemas gráficos y de edición que nos dan una enorme capacidad interactiva de corrección de defectos fotográficos, trazado de lindes y carreteras, rotulación, superposición de curvas de nivel o impresión de cualquier otra información.

Tiempo de cálculo y precisión

Al hablar de tiempos de cálculo y precisión de un sistema de restitución automática digital, se hace imprescindible precisar las condiciones técnicas en que se desenvuelve. Los tiempos de cálculo empleados en una restitución dependen directamen-

te de la velocidad del ordenador en que se ejecute el proceso y, la precisión del resultado es función, principalmente, del volumen de datos involucrados (básicamente, depende del paso de digitalización y del número de puntos de los cuales se quiere obtener una correspondencia). Evidentemente, para un mismo volumen de datos, una mayor precisión también conduce a un mayor tiempo de proceso. Teniendo esto en mente, un término que define mejor el comportamiento de un sistema es el de rentabilidad, o lo que es lo mismo, cuál es la producción y a qué coste. Al margen de una evaluación puntual de estas cantidades, una ventaja intrínseca al sistema descrito en estas páginas es su automatismo e independencia del ordenador sobre el que se ejecutan los procesos. De esta manera, cualquier evolución positiva en el mercado de los ordenadores que repercuta en los costes o en la capacidad de manejo de un volumen grande de datos, mejorará la rentabilidad del sistema.

Por el momento, el sistema ya es competitivo en los tres campos que se han tratado: modelos numéricos de densidad media-alta, perfiles altimétricos y ortofotografías, partiendo de pares estereoscópicos de fotografías aéreas de escalas medias y pequeñas.

El sistema se ha desarrollado y está entrando en producción sobre un ordenador Micro VAX-3.600 de *Digital Equipment Corporation*. Sobre este ordenador, el tiempo empleado en la restitución de un par de fotografías aéreas digitalizadas a 50 micras y procesadas a 50 micras está en torno a 14 ó 15 horas. Si se procesan a 100 micras (segundo nivel de precisión de la estructura jerárquica) el tiempo es inferior a cuatro horas y, procesarlas a 200 micras (tercer nivel) lleva aproximadamente una hora. Sobre el resultado de esta restitución, la producción de un modelo numérico denso o un perfil sólo añade unos 15 minutos al proceso, siendo muy ligeramente dependiente del paso y del nivel jerárquico de la restitución. La generación de una ortofotografía con un paso cercano al de digitalización, partiendo también del resultado de la restitución, implica unos 50 minutos.

La precisión altimétrica y planimétrica detallada para todos los niveles de procesado y todas las escalas de fotografía está todavía por llevarse a cabo. Sin embargo, de las pruebas realizadas se puede concluir que el comportamiento del sistema es el esperado en cada uno de los casos, es decir, la precisión es función directa del tamaño de píxel que se utilice en el cálculo de los paralajes.

El estudio más preciso que se ha hecho hasta la fecha viene del procesado de 47 pares estereoscópicos de escala fotográfica 1:30.000. El desnivel del terreno en la zona es importante, llegando a ser, en algunos pares, de hasta 950 metros. Todos los pares se procesaron en el segundo nivel, es decir, con un píxel de 100 micras. Los modelos se generaron con un paso de red de 5 metros, por lo que cada uno de ellos tiene, aproximadamente, unos 800 por 1.300 nodos (4 por 6,5 km) y el mosaico construido a partir de todos ellos lo forman unos 3.700 por 5.700 nodos (18,5 por 28,5 km). El tiempo medio total empleado en la restitución y producción de cada modelo fue de cuatro horas y dos minutos.

Considerando los 293 puntos de apoyo existentes en toda la zona, se comparó la altura de cada uno de ellos con la dada por el modelo numérico en el nodo más próximo. El resultado de esta comparación refleja una desviación estándar para las diferencias de alturas de 3,1 metros.

Cuando se aplican los parámetros de orientación a los puntos de control medidos por el operador sobre las fotografías, también se obtiene un conjunto de puntos de coordenadas terrestres conocidas, aunque con menor precisión que los puntos de

apoyo. Estos puntos, sólo tienen el error debido al digitalizado y a la orientación, y, por ello, también pueden ser empleados para estimar el error altimétrico. El conjunto es de 1.086 puntos y de la comparación de sus alturas con las del modelo numérico en el nodo más próximo se obtiene una desviación estándar de 3,1 metros, igualmente.

Otra comparación interesante realizada con estos modelos ha sido ver cuál es la diferencia entre modelos consecutivos en su zona de terreno común. Esta comparación nos informa de la consistencia interna del sistema y de posibles errores sistemáticos. Como el conjunto de pares estereoscópicos forman un bloque, todos los modelos tienen un solapamiento importante con los adyacentes. Teniendo en cuenta la densidad de las modelos (un punto cada 5 metros), el número de puntos involucrados en una comparación entre dos modelos es de varios cientos de miles. Esto da una idea, cuando se manejan los 47 modelos, del valor estadístico del estudio. La desviación estándar de la diferencia de alturas entre modelos consecutivos es de unos 5 metros.

Como conclusión final sobre la calidad altimétrica se desprende, de estos estudios, que el mosaico completo tiene un error altimétrico respecto del terreno del orden de 4 metros (desviación estándar). Hasta ahora, este es el valor más fiable que se ha obtenido.

Para dar una idea intuitiva de las dimensiones del mosaico construido con todos los modelos, se puede decir que, con un punto-dato de altura cada 5 metros, tiene unas dimensiones terrestres semejantes a las cubiertas por una hoja del mapa 1:50.000, lo que supone más de 20 millones de puntos. Si el mosaico se representara con una escala 1:50.000 en cada milímetro cuadrado cabrían 100 datos de altura. Y si se construyera un mapa con un valor numérico de altura en cada milímetro de su superficie, debería tener unas dimensiones de 3,7 por 5,7 metros para contener a este mosaico.

Para la evaluación de la precisión planimétrica se han estudiado los errores que sobre las coordenadas (X, Y) del mosaico puede introducir el proceso de orientación. Los resultados indican que el error planimétrico está en torno a 1 metro.

La utilización del mosaico para generar curvas de nivel también permite estimar su calidad. Así, un programa de ordenador de trazado automático de curvas de nivel aplicado a este mosaico ha demostrado que la calidad de las curvas es similar a la del mapa 1:50.000 de la zona. La superposición de las curvas sobre mapas más detallados todavía no se ha hecho.

La precisión de las ortofotografías es más difícil de evaluar pues sobre ellas no sólo influyen los errores planimétricos, sino también los errores altimétricos del perfil utilizado en su generación. Por otro lado, los errores del perfil tienen muy poca importancia en la zona central, pero contribuyen en gran medida al error planimétrico en las zonas externas de las ortofotografías. A partir del estudio realizado se deduce que, de manera general, un valor representativo del error planimétrico de una ortofotografía es de 1,5 metros. Esta ortofotografía se supone obtenida a partir de fotografías de escala 1:30.000 y con un perfil generado en el tercer nivel de la estructura jerárquica, es decir, con un píxel de proceso de 200 micras.

Como resumen de los tiempos de cálculo y precisión se ve que:

- a) Es posible obtener un modelo numérico de densidad media-alta en unas cuatro horas y media, con una precisión (desviación estándar) equivalente a unas 150 micras a la escala de la fotografía.

- b) La generación de un perfil altimétrico, con una precisión en torno a 250 micras a la escala de la fotografía, se puede realizar en una hora y cuarto, aproximadamente.
- c) La producción de una ortofotografía de escala cercana a la de la fotografía original supone algo menos de dos horas, y si la escala es mucho mayor que la de la fotografía y se requiere precisión, es necesario un poco menos de cinco horas.

Todos los tiempos dados son dependientes directamente del ordenador en que se han procesado los pares: micro VAX-3.600. Una serie de pruebas preliminares han mostrado que estos tiempos pueden ser reducidos por un factor dos sobre un puesto de trabajo SPARC *station 1* de SUN *Subsystems*.

Conclusiones

Hemos visto que la restitución digital automática es una realidad. Los tiempos de producción y calidad del sistema descrito en estas páginas demuestran que su implantación en el mercado es perfectamente viable, al menos, en los campos mencionados. Asimismo, el sistema tiene la posibilidad de su integración dentro de una cadena moderna de producción por métodos clásicos.

Ahora mismo, este sistema sólo requiere del operador la medida de la posición sobre las imágenes de: las cuatro marcas fiduciales del negativo, los cuatro o cinco puntos de apoyo y unos veinte puntos de control. A partir de ahí todo el proceso es automático. Como los datos medidos por el operador entran al sistema como un fichero de ordenador, no es necesario su presencia durante la ejecución del proceso, de hecho, la medida de coordenadas de los puntos de apoyo y control puede hacerse previamente con otro ordenador más modesto. Una ventaja de este procedimiento es que puede estar ejecutándose las veinticuatro horas del día y, la preparación de los ficheros de entrada y extracción de los de salida, puede realizarse durante la jornada normal de trabajo. Al margen de los conocimientos básicos de informática que debe tener el gestor de este sistema, la función del operador para la medida de puntos de control y apoyo no requiere ninguna formación especial.

Como puntos débiles, este sistema automático presenta los mismos que cualquier otro al que se le empiecen a exigir labores menos simples. En este sentido, el procesado de fotografías de escalas grandes que contengan zonas urbanas puede presentar problemas, pues el sistema no es capaz de identificar los edificios y resolver las zonas ocultas que se generan. En zonas boscosas espesas cualquier algoritmo de restitución automática dará las alturas de las copas de los árboles y no la del terreno. Cuando este efecto pueda ser importante se tendrá que corregir posteriormente editando el modelo numérico del terreno. Una forma sencilla de hacerlo es marcar sobre el modelo (por ejemplo, con ayuda de la ortofotografía) el contorno de la zona boscosa y reducir sistemáticamente la altura en esa zona, dependiendo del tipo de árboles involucrados.

Otra carencia de los métodos automáticos es que no dan la posibilidad de una restitución inteligente. No es posible, por ejemplo, adaptar la capacidad resolutoria del método para que se ajuste al interés cartográfico de cada zona de terreno.

En el lado de las ventajas, aparte de los rendimientos y de las utilidades concretas que tiene el disponer de un modelo numérico del terreno y de una ortofotografía en forma digital, es de destacar el potencial que supone su posible integración inmediata en una base de datos geográfica de uso general, donde esta información pue-

da ser gestionada junto con la ya existente, sea gráfica o alfanumérica. Todo ello, teniendo en cuenta que la información queda inalterada con el tiempo y que su mantenimiento y actualización no requiere repetición de esfuerzos.

El sistema descrito en este trabajo permite la producción rápida de modelos numéricos densos, ortofotografías y perfiles altimétricos de precisión variable y puede ser potencialmente aplicado a otras áreas de la Fotogrametría (industrial, imágenes de rayos X, imágenes microscópicas, etc.). Este sistema ha sido íntegramente desarrollado en el Instituto de Astrofísica de Canarias y en él han intervenido de manera directa J. M. Carranza Ruipérez, M. F. Gómez Reñasco y C. Martín Díaz. El coordinador del proyecto ha sido P. Álvarez Martín.

La realización práctica del mosaico de los 47 modelos numéricos a que se hace referencia en este capítulo y las pruebas de superposición de curvas de nivel a mapas y ortofotografías se deben a la empresa Galileo Ingeniería y Servicios S. A., quien actualmente está explotando el sistema comercialmente.

CESEDEN

EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

D. JOSÉ LUIS PROVENZA GUIU

TCol. de Artillería.

EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

NAVSTAR (*The Navigation Satellite Timing and Ranging*) y GPS (*Global Position System*) desarrollado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. proporcionará nuevas oportunidades para la Topografía y Geodesia.

Facilita nuevos medios numéricos y técnicas para la medición que las que venían realizando los geodestas en épocas anteriores. Las técnicas GPS requieren no sólo el conocimiento operativo de los receptores sino un amplio conocimiento de los fundamentos matemáticos para un mejor control de calidad de los resultados. Por el momento y sin que todavía se hayan desarrollado nuevas experiencias además de las geodésicas y topográficas de aplicación militar se ha utilizado el sistema GPS para:

- Navegación en tierra.
- Navegación en mar.
- Navegación en aire.
- Navegación espacial.
- Navegación en ríos.
- Navegación en puertos.
- Navegación en vehículos de recreo.
- Hidrografía.
- Alta precisión cinemática.
- Guía de robots y otras máquinas.
- Topografía catastral.
- Densificación de redes geodésicas.
- Fotogrametría.
- Deformación terrestre.
- Control activo de estaciones.

Esta previsto que sean 24 satélites GPS los que formen la constelación final con objeto de eliminar áreas con capacidad de navegación mermada. Esta constelación completa se espera que esté en órbita para el año 1991.

Los satélites transmiten en frecuencias $L1=1.575,42$ Mhz y $L2=1.227,60$ Mhz moduladas con dos tipos de código y con el mensaje de navegación.

Los dos tipos de código son el P y el C/A. Hay dos formas de observación de interés para el usuario una de ellas es "el seudorange" con distancias iguales entre el satélite y el observador y un término correctivo para los errores en tiempo del receptor; dan la posición geométrica de los satélites (efemérides satelitarias) cuatro seudoranges son suficientes para computarizar la posición del receptor y su error cronológico.

La segunda forma es la diferencia entre la fase de la señal transmitida por el satélite y la fase de la señal del oscilador del receptor en el momento de la medida.

Los receptores son programados para hacer observaciones de fase en los mismos intervalos de tiempo. Además los receptores trazan el número de ciclos completo recibidos desde el principio de las mediciones.

Las aproximaciones sucesivas que se siguen son las especificadas en la figura 1.

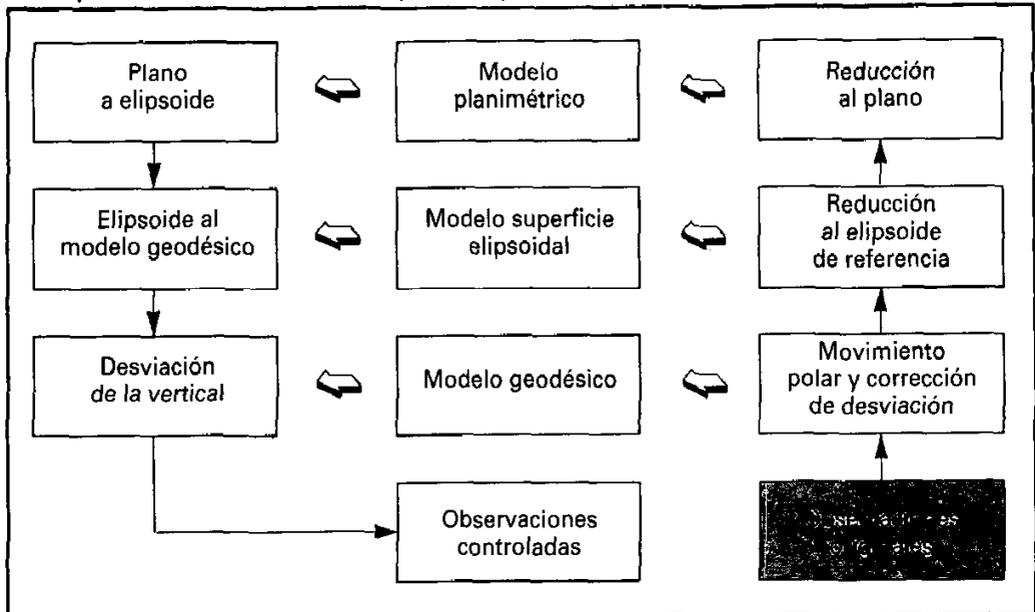


Figura 1.—Aproximaciones sucesivas.

Las medidas satelitarias requieren un conocimiento integrado de disciplinas tales como: Estadística, Astronomía, Geodesia y Electrónica. Porque en el movimiento del satélite en el espacio es necesario relacionar el sistema de coordenadas espaciales y terrestres.

El entendimiento de las capacidades y limitaciones del GPS requiere también el conocimiento de la mecánica del movimiento orbital y algunos fenómenos que afectan el camino de los satélites.

Para obtener un sistema de medidas con la mayor precisión el problema más importante es la elección de un sistema de coordenadas con dos opciones que pueden configurar estos sistemas para una tierra prefijada y para un espacio prefijado.

Antes el modelo de tierra utilizado era un sólido rígido en el que se estudiaba la rotación de ejes en el Espacio teniendo en cuenta la gravedad, pero ahora son necesarios modelos más realistas, modelos elásticos o modelos con masa líquida en su centro.

Las técnicas LLR (*Lunar Laser Ranging*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), VLBY (*Very Long Baseline Interferometry*) y GPS requieren un sistema de coordenadas definido Sistema Geocéntrico.

El movimiento del interior de la Tierra (mareas terrestres) han llevado a una mayor precisión en la determinación del eje rotacional terrestre que al considerarla como un sólido rígido. Un sistema de coordenadas geocéntrico está sometido a los siguientes movimientos: *precesión y mutación* además del movimiento del Polo, las

causas del movimiento polar no son todavía explicadas plenamente, las modernas técnicas de la Geodesia espacial pueden conducir a un mejor conocimiento de este fenómeno.

Otro de los problemas con el que se encuentra esta técnica es el tiempo, es decir generar una secuencia de intervalos constantes, en la actualidad se utilizan las escalas de oscilación del cristal de cuarzo o los estados de transición de átomos. En Geodesia y Navegación estas escalas de tiempo han de ser relacionadas con la rotación terrestre. Al fin y al cabo la distancia topocéntrica a un satélite está directamente relacionada con la posición rotacional de la Tierra que es una función del tiempo. Porque los relojes atómicos generan escalas de tiempo independientes es necesario coordinar estos tiempos, cuadro 1.

Cuadro 1.—Desafío entre la rotación de la Tierra y los eruditos en materia de medición de tiempos.

<i>Tipo de reloj</i>	<i>Frecuencia de oscilación Ghz</i>	<i>Estabilidad por día</i>	<i>Pérdida de un segundo. (Años)</i>
Cristal de cuarzo	0,005	10^{-9}	3×10^4
Rubidio	6.834,682	10^{-12}	3×10^7
Cesio	9.192,63177	10^{-13}	3×10^8
Hidrógeno maser	1.420,405751	10^{-15}	3×10^{10}

Movimiento de la órbita del satélite

Este movimiento es el resultado de la atracción gravitacional terrestre y otras fuerzas que actúan sobre el satélite como son la atracción de Sol, la de la Luna y la presión sobre el satélite causada por el impacto de partículas de radiación solar. Matemáticamente las ecuaciones del movimiento de los satélites son ecuaciones diferenciales que son resueltas por integración numérica sobre el tiempo. Los algoritmos de la Leyes de Kepler son usados a menudo para definir la posición del satélite en el Espacio. El actual camino del satélite en el plano orbital es una elipse en el más estricto sentido matemático.

El punto focal de la órbita elíptica está en el centro de la Tierra. Las órbitas normales son particularmente usadas para entender y visualizar el movimiento espacial de los satélites.

Las soluciones de las ecuaciones del movimiento pueden ser dadas por simples expresiones analíticas, porque las subsodichas órbitas son función de la posición central del campo gravitacional terrestre que es por demás la mayor fuerza que actúa sobre él. Uno de los usos más comunes de este tipo de órbitas es para la construcción de las partes visibles de la trayectoria del satélite.

El movimiento normal de los satélites está completamente determinado por las Leyes de gravitación de Newton.

El movimiento topocéntrico de un satélite es el movimiento del satélite visto por un observador en la superficie terrestre. Al estar relativamente cerca de la Tierra comparado con las estrellas los movimientos topocéntricos y geocéntricos han de ser cuidadosamente diferenciados. El tiempo entra no sólo en la determinación de la posición del satélite en el sistema de referencia celeste sino para fijar la posición rotacional de la Tierra.

Fuerzas de distorsión son todas aquellas que producen la desviación de la órbita normal simple del satélite, son causadas principalmente por la no esfericidad del potencial gravitacional, la atracción del Sol y de la Luna y la presión de la radiación solar. Los satélites más próximos a la Tierra son afectados por fuerzas adicionales como los arrastres de residuos atmosféricos. Las ecuaciones de movimiento son expresadas en un sistema de coordenadas inerciales correspondientes a la época en que son dadas las condiciones iniciales.

Desde el año 1960 el posicionamiento basado en el Espacio ha sido una meta perseguida por el Departamento de Defensa y la NASA en los EE.UU., uno de los sistemas precursores fue el TRANSIT. Desde sus logros para usos comerciales en el año 1967 el sistema de posicionamiento TRANSIT encontró innumerables aplicaciones en Topografía, y mediciones geodésicas, se estableció una extensa red con estaciones a lo largo del Globo.

El sistema de satélites TRANSIT fue el más instrumental en el establecimiento de modernos datos geocéntricos y en el enlace entre datos nacionales y locales a referencia geocéntrica. Desgraciadamente este sistema no es adecuado para pequeñas mediciones. Da precisiones inferiores al metro sólo cuando las observaciones son de más de un día. Sólo hay seis satélites TRANSIT para una posible cobertura global. Por consiguiente es preciso esperar el paso entre satélites más de hora y media. Los satélites TRANSIT están sólo 1.100 km por encima de la Tierra, por lo que están muy afectados por el campo local gravitacional, variable de un punto a otro, lo que no ocurre en órbitas de mayor altura como las del GPS.

La transmisión del satélite TRANSIT a (150-400 Mhz) es más susceptible a la ionosfera y a las distorsiones que las de mayor frecuencia de transmisión del GPS. Finalmente la tecnología de los cronos ha evolucionado en los últimos años hasta conseguir una transmisión estable desde los satélites.

En el año 1974 un diputado de Defensa de EE.UU. requirió un comprensivo informe referente a la navegación militar futura y elección de las necesidades; es entonces cuando nació NAVSTAR y GPS.

Paralelamente a estos esfuerzos se interesaron del Congreso de los EE.UU. sobre la proliferación de los sistemas de navegación y costes asociados. El Plan Federal de Radionavegación fue desarrollado conjuntamente por el Departamento de Defensa y Transporte. Noticias lanzadas por el Departamento de Defensa —28 de junio de 1983— anunciaron una revisión al sistema NAVSTAR y GPS para usos ajenos al Departamento. Se especifica que la precisión de posicionamiento del GPS, SPS (*Standard Positioning Service*) estaría disponible al tiempo que el sistema llegara a ser completamente operativo. También especifica que el PPS (*Precise Positioning Service*) proporcionando más alta precisión sería restrictivo para los EE.UU. y aliados militares exclusivamente teniendo un carácter altamente selectivo. Detalles, procedimientos y condiciones para la provisión GPS/PPS capacidad y servicios para selección a usos civiles se dieron en el año 1986 en el Plan Federal de Radionavegación publicado por el Departamento de Defensa y Transporte.

Se anticipa que para aplicaciones en mediciones, donde la posición relativa de las estaciones está determinada, la degradación de la señal no tendrá efectos negativos. Hay finalmente dos formas para obtener mayor precisión GPS, la primera posibilidad llamada SA (*Selective Availability*) es introducir errores en tiempo para deliberadamente modificar la estabilidad en el reloj atómico de a bordo y cambiando el mensaje de navegación transmitido por los satélites. La segunda posibilidad lla-

mada AS (*Anti-Spoofing*) implica que el código P transmitido será introducido. Diferenciando las señales del satélite en dos estaciones eliminamos la mayoría de los errores de reloj. Por consiguiente SA no tendrá probablemente ningún efecto adverso en las medidas donde la separación de las estaciones sea pequeña (menor que 100 km).

La mayoría de los receptores usados en mediciones tiene el código de los receptores C/A y no es afectado por el AS.

El más importante logro del GPS es su alta precisión en la determinación de la posición y la velocidad en tres dimensiones, la cobertura del Globo, la capacidad operacional en todo tiempo, la continua disponibilidad, posibilidad para una serie de usos ilimitados —porque este es un sistema pasivo—, habilidad para encontrar las necesidades de un amplio espectro de usuarios. Estos son los logros del Departamento de Defensa frente a otros sistemas de navegación electrónica como TACAN, VOR/DME, OMEGA, LORAN-C y TRANSIT en vehículos militares. La Administración de Aviación Federal (FAA) está estudiando el uso del GPS para la navegación civil en el espacio nacional. Se espera que para el año 1992 GPS será utilizado como una herramienta de navegación y que será el único medio para el año 1995.

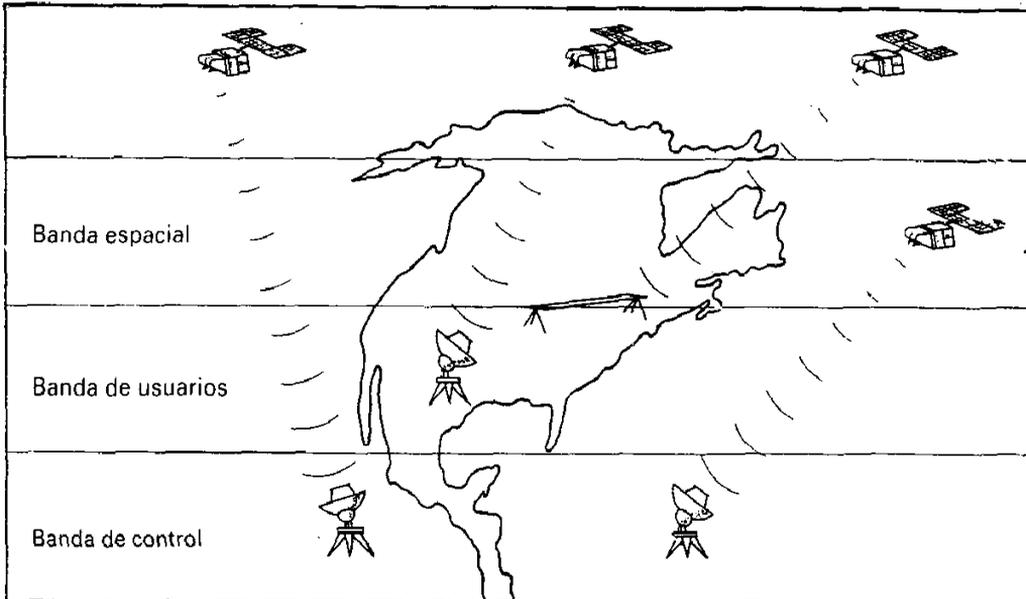


Figura 2.—Bandas de los componentes del sistema de posicionamiento global.

La figura 2 y el cuadro 2, p. 88, dan una idea de la mayoría de los componentes del sistema de posicionamiento global. El espacio segmentado tiene los satélites GPS que transmiten señales en dos frecuencias moduladas. Estas transmisiones son cuidadosamente controladas por un reloj atómico muy estable dentro de los satélites. Los satélites también transmiten un mensaje de navegación que contiene entre otras cosas, datos de posición para todos los satélites. El segmento de control consta de una estación principal de control localizada cerca de Colorado Springs y algunas estaciones de monitores localizadas alrededor del mundo. El propósito del segmento de control es dirigir continuamente la transmisión del satélite, predecir las efemérides del satélite, calibrar los relojes del satélite y enviar periódicamente el mensaje de navegación. El segmento de uso simplemente permanece para la totali-

dad de usos comunes, el usuario observará y registrará la transmisión de algunos satélites y aplicará los algoritmos de solución para obtener la posición, velocidad y tiempo.

Cuadro 2.—Exposición de la mayoría de los componentes del sistema de posicionamiento global.

Banda	Entrada	Función	Salida
Espacio	Mensaje de Navegación	Generar y transmitir código, transporte y mensaje de navegación	Código P, Código C/A Portadoras L1, L2 y mensaje de navegación
Control	Código P, observaciones tiempo (HTC)	Produce tiempo GPS, predicción de efemérides control y vehículos espaciales	Mensaje de navegación
Usuarios	Código observación, fase transporte, observación y mensaje de navegación	Solución navegación y solución medidas	Posición, velocidad y tiempo

Satélite GPS

Los satélites de la generación Block II son ensamblados en *Rockwell International Satellite System Division*, Seal Beach, California.

El diseño de este tipo de satélites ha durado 7,5 años. El peso del satélite GPS es de 854 kg en el momento de su inserción en la órbita final. Los paneles solares desplegados cubren un área de 7,2 m².

La superficie de los paneles solares permanece perpendicular a la dirección del Sol. Hay tres baterías de níquel-cadmio a bordo para proporcionar energía durante los períodos de eclipse. El tiempo generado dentro del satélite está basado en dos relojes atómicos de rubidio y otros dos de cesio.

Configuración orbital

La constelación orbital final para el satélite GPS está todavía por decidir. Los planes originales lo estiman en 24 satélites, otras consideraciones reducen este número a 21 de los cuales tres son considerados de reserva. Recientes estimaciones vuelven a la constelación original de 24 satélites para conseguir una total cobertura. Hay seis planos orbitales cada uno de los cuales tiene una inclinación de 55°. Habrá tres o cuatro satélites en cada plano orbital.

El camino orbital será cuasi circular con un semieje mayor de cerca de 26.000 km. Por aplicación de la tercera Ley de Kepler se obtiene un período orbital ligeramente menor de 12 horas. Los satélites completan dos revoluciones orbitales mientras la Tierra gira 360° —un día sideral—. Los satélites adelantarán 4 minutos aproximadamente cada día, ya que el período orbital es un múltiplo exacto del de rotación de la Tierra.

La trayectoria del satélite sobre la Tierra —la traza del vector geocéntrico del satélite sobre la superficie de la Tierra— se repite diariamente. Se considera que un incremento de 50 km, en la órbita del satélite haría innecesario el adelanto de los 4 minutos diarios.

Por la gran altitud de los satélites GPS pueden verse simultáneamente desde gran parte de la Tierra. Usualmente los satélites son observados sólo una vez, tienen un cierto ángulo vertical denominado "ángulo de enmascaramiento", generalmente de 10° .

La razón para el uso del ángulo de enmascaramiento es que los efectos de la troposfera en la propagación de la señal son especialmente inapreciables para altitud del centro de la región de ocultación.

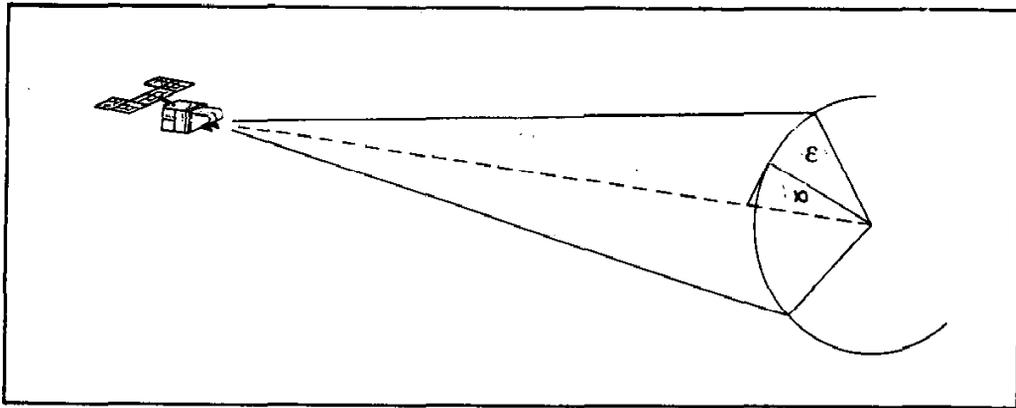


Figura 3.—El ángulo de enmascaramiento = ϵ limita la región de visibilidad.

El ángulo con el centro de la Tierra está directamente relacionado con el ángulo de enmascaramiento. Cálculos simples dan las siguientes relaciones entre ambos ($\epsilon = 0, \alpha = 152$) ($\epsilon = 5, \alpha = 142$) ($\epsilon = 10, \alpha = 132$). El ángulo desde el satélite es aproximadamente de 27° en todos los casos.

Finalmente por causa de las órbitas terrestres alrededor del Sol serán dos los períodos por año en que el satélite atraviese la sombra de la Tierra, esto ocurre cuando el Sol está cerca o en el plano orbital. La sombra es la región del cono que no recibe luz del Sol y penumbra es una región donde la recibe parcialmente.

Mientras el satélite atraviesa las regiones de sombra, la fuerza de las radiaciones solares actúa sobre el satélite. Estos cambios en fuerza han de ser tenidos en consideración en el modelo orbital. El movimiento de los satélites a través de la región de las sombras es menor de 60 minutos.

Transmisión del satélite

Todas las transmisiones satélite están coherentemente derivadas de la frecuencia fundamental 10,23 Mhz, hecha posible por los relojes atómicos de a bordo.

Multiplicando la frecuencia fundamental por 154 da 1.575,42 Mhz, que es la frecuencia para la L1 onda de transporte y multiplicando por 120 da 1.227,60 Mhz de frecuencia para la onda portadora L2. El ratio para el código P es la misma frecuencia fundamental 10,23 Mhz y el ratio del código C/A es 1.023 Mhz es decir la fundamental por 100.

El código P de precisión es el fundamental para la navegación. Es un PRN (*Pseudo Random Noise*) código generado matemáticamente por la mezcla de otros códigos. El código P no se repite durante 37 semanas. Esto es posible por asignación de porciones semanales de este código a los satélites. Como resultado todos los saté-

lites pueden transmitir en la misma frecuencia L1 y puede ser distinguida por la transmisión de un código de secuencias mutuamente excluyentes. Todos los códigos son inicializados una vez por semana en la media noche del sábado al domingo, esto crea en efecto la semana GPS como una mayor unidad de tiempo. Siendo menos de 37 satélites GPS los que están en órbita, alguna frecuencia semanal del código P permanece sin usarse. Las L1 y L2 ondas portadoras son moduladas con el código P.

Uno de los sistemas de identificación del satélite usa el PRN número semanal. Por ejemplo si nos referimos al PRN 13 o SV 13, esto quiere decir que el satélite GPS que transmite es el de la porción semanal, decimotercera del código PRN. Otro sistema de identificación es el número de secuencia de lanzamiento. Por ejemplo el número de secuencia de lanzamiento para el PRN 13 es NAVSTAR 9.

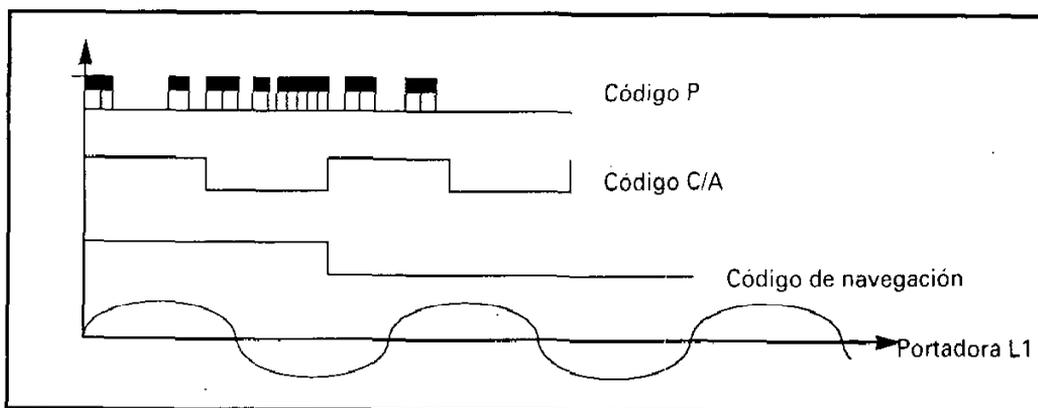


Figura 4.—Exposición de los códigos y la onda portadora L1.

El código C/A es sólo de un msec. El ratio es de 1.023 Mbps (megabites por segundo). El tiempo del código C/A está sincronizado con el código P. Cada satélite transmite códigos C/A mutuamente excluyentes, lo que hace posible distinguir las señales recibidas simultáneamente desde los satélites. El código C/A puede ser usado para la rápida adquisición del código P o como medida de precisión de la señal de navegación. La mayoría de los receptores usados en la medición de distancias no usan el código P. El código C/A es muy socorrido porque da precisión al tiempo de sincronización y a la lectura del mensaje de navegación. El código C/A es factible en la onda portadora L1, como una opción de control terrestre puede colocarse también en la onda L2.

El mensaje de navegación está modulado en ambas ondas L1 o L2 y su ratio es de 50 bps. Contiene información sobre las efemérides de los satélites, tiempo GPS, comportamiento del reloj y mensajes del estado del sistema.

Los efectos relativos son importantes en las mediciones por GPS pero afortunadamente pueden ser calculados con precisión. Las frecuencias normales atómicas en los satélites GPS son afectadas por dos relatividades especiales —la velocidad del satélite— y la relatividad general —la diferencia de potencial gravitacional de la posición del satélite y la relativa al potencial en la superficie de la Tierra—.

Jorguensen (1986) da una discusión en forma de leyes de estos efectos e identifica dos partes distintas en la corrección de la relatividad. La parte principal es común a