

XdA: Red de nivelación de Cataluña

M.Cabré, A.Térmens, M.Moysset, M.Soro, M.A.Ortiz, J.Talaya
Institut Cartogràfic de Catalunya
Parc de Montjuïc
08038 Barcelona.

Palabras Clave: Redes geodésicas, nivelación.

Resumen

En zonas de alta dinámica territorial, como Cataluña, la conservación de las redes de nivelación puede convertirse en una difícil tarea. De la antigua la red Nivelación de Alta Precisión (NAP) han desaparecido más del 80% de las señales dejando grandes zonas del territorio prácticamente sin cobertura de nivelación. A pesar de la reobservación por parte del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de parte de la red NAP el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) está llevando a cabo desde el año 1998 una densificación de dicha red para conseguir una cobertura más homogénea y para mejorar la conservación de la red sobre Cataluña, así como la nivelación de las estaciones permanentes CatNet. Está previsto realizar del orden de 100 km de nivelación cada año asegurando una precisión de 1mm por raíz cuadrada de km nivelado. En este artículo se describe la metodología y los trabajos realizados. Dado que una parte de las señales de nivelación se sitúan en ubicaciones óptimas para la observación con GPS la XdA facilita la determinación precisa de perfiles del geoide tanto para la evaluación de su precisión como para su posterior refinamiento.

1. Introducción

Con el objetivo de facilitar la georeferenciación en el territorio de Catalunya el ICC está trabajando en el proyecto SPGIC (Sistema de Posicionamiento Geodésico Integrado de Catalunya) [2]. SPGIC se define como un conjunto de hardware, software, datos, comunicaciones, soporte técnico y normas legales que permiten el posicionamiento sobre el territorio de Catalunya.

Aunque la densificación de la Red de Orden Inferior (ROI) del IGN se realiza mediante técnicas GPS y por tanto son redes tridimensionales la componente vertical está referida sobre el elipsoide. Un objetivo importante del SPGIC consiste en proporcionar alturas ortométricas al usuario. Dichas alturas pueden obtenerse mediante la combinación de alturas elipsoidales y el conocimiento del geoide o bien mediante el despliegue de redes de nivelación. A pesar de disponer de un geoide de Catalunya UB91 [1] en determinadas zonas es necesario mejorar su precisión. Consecuentemente, el ICC está densificando la red de nivelación en Catalunya mediante el subproyecto XdA: (Red de nivelación de Cataluña).

2. Implementación de la XdA – 1999-2002

El proyecto de establecimiento de una red altimétrica de alta precisión en Cataluña (XdA) se inició con la recopilación de información de diferentes redes altimétricas de alta precisión implantadas en países europeos como, la red de nivelación española (NAP) y la red de nivelación suiza (LN02-Landesnivellement). A través del estudio de esta información, de la propia experiencia del ICC en confecciones de redes geodésicas y de la precisión requerida a priori para la futura XdA se realizó una planificación global de la red, se decidió la metodología de trabajo y el equipo tanto humano como material más idóneo para su implementación. La precisión requerida que quedó establecida para la XdA es de $1\text{mm} \cdot \sqrt{\text{km}}$.

La metodología de trabajo se plasmó en un primer pliego de especificaciones técnicas para la monumentación y observación de itinerarios de nivelación de alta precisión de la XdA. Posteriormente se inició la red con un itinerario de pocos km para poner en funcionamiento la gestión y metodología definidas en el pliego, testar la instrumentación y el material escogido y poder sacar conclusiones sobre el rendimiento obtenido en la implantación de la red.

2.1 Diseño de la red

El diseño de los itinerarios de nivelación o de los anillos que compondrán la red XdA se realizó bajo las siguientes cinco premisas:

- Enlace con la red de NAP del IGN perteneciente a las redes geodésicas españolas.
- Integración con la red Red Utilitaria de Cataluña (XU [5]).
- Proporcionar altura ortométricas a puntos singulares (estaciones permanentes GPS).
- Obtención de perfiles de geoide para un posterior cálculo del geoide de precisión en Cataluña.
- Dotar de mayor infraestructura geodésica a las áreas más dinámicas territorialmente.

Según información proporcionada por el IGN, un estudio del año 1992 revelaba que poco más de un 10% de los clavos de la red NAP de Cataluña aún existían. Con los datos de este estudio, el ICC realizó una revisión de campo de los NAP que se consideraron estratégicos para la futura XdA y se seleccionaron para el enlace con la red NAP, según la primera premisa del diseño.

La integración de las redes XdA y XU se consideró y se considera la segunda premisa fundamental, de forma que tanto los vértices de la XU como los clavos de nivelación de la XdA son señales geodésicas integradas dentro del conjunto de la infraestructura geodésica de Cataluña. La red XU es una red tridimensional que se observa con GPS en el sistema de referencia ETRS89 [5] y se obtiene la altura ortométrica a partir de los vértices de la red ROI del IGN y de las ondulaciones del geoide UB91. Por otro lado, la red XdA es una red unidimensional (H) que obtiene su altura ortométrica a partir de la red de nivelación de alta precisión NAP, del IGN. Así que la confluencia entre las redes XdA y XU permite que por una parte la precisión de las alturas de la XdA se transmita a los vértices XU y por otro lado se dota de coordenadas planimétricas de precisión y de altura elipsooidal en ETRS89 a algunos clavos de la XdA, cosa que permitirá densificar y mejorar el modelo geoidal existente. Esta integración se realiza nivelando los vértices más accesibles de la XU y enlazando con bases GPS algunos clavos de la XdA con vértices de la XU.

La tercera premisa obliga a tener en cuenta la ubicación de una serie de puntos que se consideró que era importante su enlace con la XdA, como por ejemplo las estaciones de referencia GPS pertenecientes a la red CATNET [3] de Cataluña y al conjunto de mareógrafos ubicados en el litoral catalán.

La cuarta premisa y una de las finalidades importantes que impulsó el desarrollo de la red de nivelación de precisión fue la necesidad de obtener un geoide de mayor precisión que el actual. Existen aplicaciones de posicionamiento con GPS, que han alcanzado unas precisiones más altas que las que se obtienen al transformar las alturas elipsoidales a alturas ortométricas ED50, debido lógicamente a la precisión de las ondulaciones del geoide. Por ello se tuvo en cuenta para el diseño de los anillos de nivelación cuáles eran aquellas zonas del territorio donde se requería mejorar la precisión del geoide existente.

Por último, se determinaron las zonas de mayor dinamismo como prioritarias para ubicar los clavos de nivelación ya que son zonas donde se concentran las modificaciones del territorio, lo que implica más obra civil y más actuaciones cartográficas que hacen necesario un mayor número de señales geodésicas de referencia.

Finalmente, otros factores que influyeron en el diseño global y que tienen que tenerse en cuenta debido a la propia naturaleza de la red, sobre todo por las características de las mediciones de campo, son la orografía del terreno y el trazado de la red viaria. La orografía del terreno se debe considerar puesto que si los itinerarios atraviesan zonas montañosas (con grandes desniveles) se necesita un mayor número de estacionamientos, produciendo automáticamente un incremento de los errores en la medida de itinerarios de nivelación y consecuentemente un aumento de los costes para conseguir la precisión requerida. Por otro lado como que las mediciones de los itinerarios de nivelación se realizan mayoritariamente por las vías de comunicación, carreteras y calles principalmente, es importante evitar en la medida de lo posible las vías con una alta densidad de tráfico por seguridad del equipo de campo y para evitar movimientos del trípode del nivel y de pies de mira.

Considerando los factores se hizo en el 1999, un diseño inicial de la red XdA formado por 14 anillos que sumaban un total de aproximadamente 2000 km. Este diseño inicial ha ido sufriendo algunas modificaciones a lo largo del tiempo, debido principalmente, al proyecto del IGN de observar unos nuevos itinerarios de nivelación y reobservar algunos existentes de la red NAP en Cataluña lo que hizo

que el número de clavos NAP dónde enlazar la red XdA aumentara considerablemente y por tanto se adaptaron los anillos planificados inicialmente a esta nueva situación.

A partir de este diseño global de partida, sufre ligeras modificaciones al abordar cada itinerario en detalle. El diseño puede sufrir modificaciones en el momento en que se planifican los itinerarios en función de las ubicaciones de la monumentación de los clavos, del estado de puentes, de la existencia de túneles, etc. Finalmente también depende de circunstancias temporales y de las prioridades establecidas.

2.2 Estudio de la instrumentación y del material

Para llevar a cabo la red de nivelación de alta precisión XdA se hizo un estudio del material e instrumentación idóneos para realizar las mediciones en campo, así como del software necesario para realizar las mediciones, el control de calidad y el cálculo de los itinerarios de nivelación.

Diseño de los monumentos

Una de las decisiones importantes a tomar era el tipo o tipos de monumentos que se utilizarían para definir las señales geodésicas de nivelación, tanto por la forma que debían tener como por el material del que se fabricarían. La forma es importante en cuanto tiene que cumplir que se pueda anclar en diferentes tipos de materiales de construcción, en fachadas de edificios, en muros de hormigón, en bordillos etc.. y en diferentes posiciones: verticalmente (con el tallo perpendicular al suelo) y horizontalmente (con el tallo paralelo al suelo). Además, cualquiera de estas dos posiciones debe permitir estacionar una mira cómodamente y con precisión. Los clavos tienen que ser fabricados con un material perdurable en el tiempo y resistente a las diferentes condiciones climáticas.

En cuanto al diseño se optó por un único tipo de clavo como monumento de señal geodésica principal de nivelación y se descartó realizar dos tipos de monumentos dependiendo de si el clavo se anclaría verticalmente u horizontalmente. Con un único clavo se conseguía confeccionar un único molde y gestionar el stock de un único tipo de clavo disminuyendo los costes. El único problema podía radicar en la manera de anclar los monumentos horizontalmente y verticalmente pero se encontró una técnica de anclaje que permitía incrustar los monumentos en cualquiera de las dos posiciones fácilmente.

Así que la forma del monumento geodésico de nivelación de la XdA quedó determinada por un clavo con la cabeza en forma de tronco de cono de 4 cm de altura con una base de 3 cm de diámetro y la otra de 4 cm de diámetro, teniendo ésta última forma esférica. El tallo del clavo es cilíndrico de 8.5 cm con unas estrías horizontales para conferirle una mayor adhesión al resina de enganche.

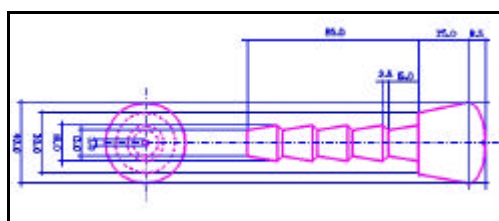


Figura 1: Diseño del clavo de nivelación.

En la cabeza esférica del clavo aparece también una pequeña marca circular para poder hacer puntería con una plomada en aquellos clavos verticales que se integren en la XU. Se gravó la inscripción "*Institut Cartogràfic de Catalunya; Senyal Geodèsic*" dejando un espacio para poner la propia numeración del clavo.

Los clavos son de acero inoxidable y antes de ser anclados se someten a un proceso de pulido para aumentar su resistencia al paso del tiempo. Como clavos secundarios de nivelación, que son aquellos que

se utilizan en el momento de las mediciones de campo de los itinerarios de nivelación, se optó por un clavo estándar de tamaño reducido (diámetro de la cabeza de 2.5 cm y un tallo de 4.4 cm) y con la cabeza esférica para un buen apoyo de la mira.

Estudio de la instrumentación y del material para la de medición

El material que debe utilizarse en la medición de los itinerarios de nivelación está en función de la precisión requerida que para la red XdA es de $1\text{mm} * \sqrt{\text{km}}$ Así que en los inicios de la red XdA se hizo un estudio del instrumental más idóneo del mercado para poder llegar a la precisión requerida en la medida de los itinerarios de nivelación de la XdA. Como instrumento de nivelación se escogieron los niveles digitales que medían sobre miras invar de códigos de barras. Estos niveles realizan una lectura de la mira haciendo una correlación del tramo del código de barras de la mira que se visualiza en cada estacionamiento y esta lectura es registrada automáticamente en una unidad de almacenamiento de memoria para evitar errores de anotación del operador.

Las miras son de material invar (material estable a los cambios de temperatura, ligero) para evitar elongaciones del código de barras que podrían falsear la lectura y de una sola pieza, de forma que se evitan errores por encaje de los diferentes tramos de la mira.

La combinación del nivel digital y las miras escogidas proporcionaban una precisión de $0.4\text{ mm} * \sqrt{\text{km}}$ en condiciones ideales para itinerarios de ida y vuelta, precisión superior a la exigida en itinerarios de nivelación de la XdA. Se diseñó también el material auxiliar necesario en la medición de los itinerarios como son las planchas para el estacionamiento de las miras, los bastones para estacionar las miras, las esferas y soportes para estacionar en clavos planos etc.

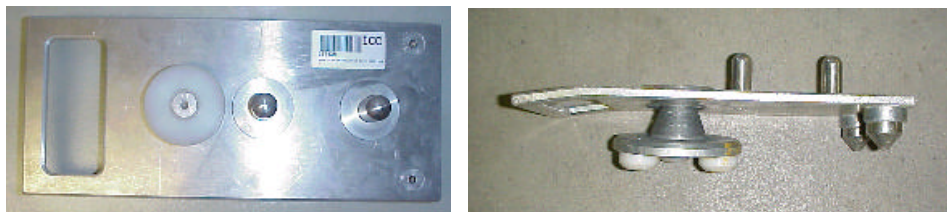


Figura 2: Planchas para el estacionamiento de las miras.

Finalmente se planificó la captura de los datos en campo de manera que fuera lo más automática posible y que los registros de las lecturas no fueran anotados por el operador. Así que se decidió utilizar una libreta electrónica, conectada al nivel, y que lleva incorporado un software de campo que sirve por una parte para registrar las lecturas realizadas a las miras y por otra para controlar la operativa de medición.

2.3 Metodología de monumentación y observación

Una vez realizado el diseño básico de la red y escogido el material se definió la metodología a seguir en la monumentación y observación de itinerarios de nivelación de alta precisión para la XdA y se confeccionó un pliego de especificaciones técnicas (*"Plec d'especificacions tècniques per a la monumentació i mesura d'itineraris d'anivellació de la XdA"*) que engloba toda la metodología a seguir. Se describe a continuación la metodología descrita en el pliego.

Estructura de la red XdA

Se entiende como itinerario el recorrido total que se observa en una determinada actuación. Cada itinerario pertenece a un recorrido mayor ya sea un ramal, una línea o un anillo de nivelación. Se forma un anillo de nivelación uniendo un conjunto de itinerarios empezando y finalizando en el mismo clavo de nivelación. Las líneas son recorridos entre clavos de diferentes anillos y los ramales son pequeños itinerarios que nacen en clavos ubicados fuera de los anillos y de la líneas y finalizan en clavos pertenecientes a los anillos o líneas.

Denominamos tramo al recorrido entre dos señales de nivelación principal y subtramo al recorrido entre señal principal y secundaria o entre dos señales secundarias. Por tanto, un itinerario se compone de varios tramos y subtramos. Cada uno está formado por trozos, y un trozo es la mínima división del itinerario, ya que es la distancia entre miras en cada estacionamiento del nivel.

Monumentación de un itinerario de nivelación

La fase de monumentación consiste en anclar una serie de señales geodésicas de nivelación a lo largo de un itinerario. Se llama grupo de señales geodésicas de nivelación al conjunto de señales que se encuentran situadas en la misma zona.

Para decidir la ubicación de las señales se siguen las siguientes indicaciones:

- La separación entre los grupos de señales principales será cada 2 o 3 Km.
- Cada grupo de señales principales constará de 3 señales, 2 horizontales y 1 vertical.
- El anclaje de las señales principales tiene que ser permanente y estable en el tiempo, por tanto las señales se situaran en edificios de construcción sólida (preferentemente edificios públicos), encima de aceras o pavimento estable, muros, etc. en los núcleos de población y vetas de roca, en campo abierto.
- En las señales principales horizontales se tendrá especialmente cuidado en comprobar que nada no entorpecerá el estacionamiento de la mira encima de la señal y además no se situaran muy elevados (a unos 40 cm del suelo), ya que para poder estacionar la mira se el operador debe poder observar el nivel esférico anclado en la misma.
- En las señales principales verticales se tendrá en cuenta que su ubicación tiene que tener el horizonte despejado y estar lejos de obstáculos para permitir la observación con GPS y el estacionamiento con trípode encima de la señal.
- Se situará una señal secundaria cada 300 o 400 m entre los grupos de señales principales.
- Las señales secundarias podrán ser verticales u horizontales.

El anclaje de las señales principales y secundarias se realiza perforando con un taladro y fijando el clavo al agujero de la obra mediante adhesivos especiales con resinas epoxi.

Se referencia las señales de nivelación tanto principales como secundarias dotándolas de coordenadas con una precisión de 5 m. Estos datos sirven para ubicar en un gráfico los clavos de nivelación monumentados y sus identificadores. Además de cada señal principal, una vez nivelada y ajustada, se realiza una reseña que puede ser consultada en la web pública del ICC: <http://www.icc.es/ressenyes/home.html>

Una vez monumentados los puntos, antes de su medición, se realiza un exhaustivo control de calidad para comprobar que cada señal cumple con las condiciones establecidas anteriormente, la metodología de monumentación.

Medición de un itinerario de nivelación

Como medición de un itinerario de nivelación se entiende todos los trabajos que hay que realizar en campo con la finalidad de determinar el desnivel geométrico entre las señales de un itinerario de nivelación. El ICC con la finalidad de homogenizar los datos tomados en campo y la metodología de trabajo exige que la medición de campo se haga utilizando un software específico incorporado en la libreta electrónica.

Un equipo de nivelación estará formado por un Ingeniero Técnico en Topografía, jefe del equipo que manejará el nivel, dos peones portamiras y los peones necesarios para el cumplimiento de la seguridad del trabajo en carretera.

La instrumentación necesaria para realizar nivelaciones de precisión es la siguiente:

- ◇ Nivel digital tipo Na3003 de la casa LEICA o similar.
- ◇ Miras invar de código de barras, del tipo LEICA GPCL3, con certificado de calibración. Llevarán acoplado un nivel esférico y un termómetro.
- ◇ Libreta electrónica provista del software de medición de itinerarios de nivelación.
- ◇ Trípode de patas fijas o rígidas.

- ◇ Planchas para apoyar las miras homologadas por el ICC.
- ◇ Puntales para la fijación de las miras en cada estacionamiento.
- ◇ Una esfera calibrada y homologada con un adaptador al pie de la mira para poder estacionar la mira en clavos planos.
- ◇ Chalecos reflectantes para cada operario.

Previamente a la nivelación debe marcarse el recorrido del itinerario a nivelar con ayuda de una cinta métrica o una cuerda de nylon. Se señalan con una cruz los puntos de estación del nivel y con un trazo las estaciones de mira.

Para la señalización del itinerario deben tenerse en cuenta las siguientes especificaciones:

- ◇ Las distancias entre aparato-mira no superarán los 30 m. En terreno montañoso esta distancia disminuye ya que queda prohibido leer en la mira por debajo de los 50 cm y por encima de los 250 cm, salvo que la distancia nivel mira sea inferior a 10 m, en cuyo caso los límites serán 20 y 280 cm respectivamente.
- ◇ El número de estaciones de aparato entre señales fijas tiene que ser par para poder empezar y acabar cada tramo con la misma mira y eliminar así el posible error de talón de mira.
- ◇ La señalización del tramo debe efectuarse por el lado de la vía de comunicación que presente mayor uniformidad topográfica y climática.

Una vez señalizado el itinerario se procede a la medición de los desniveles geométricos entre los clavos de nivelación siguiendo el recorrido marcado. Antes de cada sesión de medida se debe esperar a que se produzca la estabilización térmica del equipo (aproximadamente 1 minuto por cada grado centígrado de diferencia de temperatura equipo-ambiente) y posteriormente se realiza un test de la instrumentación determinando el error de colimación del nivel. Si el error establecido entra en tolerancia se registra para poder corregir las lecturas realizadas si está fuera de tolerancia se tiene que efectuar una revisión del nivel.

La medida del desnivel entre las señales del itinerario alimétrico se hará siguiendo el método del punto medio. En este método se debe situar el nivel a la misma distancia de las dos miras cosa que permite la eliminación en gran medida de los errores de colimación, esfericidad y refracción. Para controlar la posición del nivel en cada estacionamiento el software de campo controla la excentricidad de la distancia a las miras, entendiéndose como excentricidad la diferencia entre la distancia a la mira de espaldas menos la distancia a la mira de frente. En cada estacionamiento la excentricidad no tiene que superar los 0.30 m. Al final de cada tramo la suma de las excentricidades en distancia no debe superar los 0.20 m.

La nivelación será doble, es decir, cada tramo se observará de ida y de vuelta. La ida y la vuelta de un mismo tramo se realizarán con equipos de nivelación diferentes y en días diferentes. Como equipos de nivelación diferentes entendemos diferente instrumental (nivel y miras) y personal diferente (como mínimo el operario que lleva el nivel). La tolerancia establecida para el cierre de un itinerario (comparación del desnivel entre la ida y la vuelta) se establece en $1 \text{ mm} \cdot \sqrt{k}$ en general y en algunos casos especiales donde el itinerario transcurre por zonas con mucho desnivel se establece en $2 \text{ mm} \cdot \sqrt{k}$ siendo k la distancia del tramo en km.

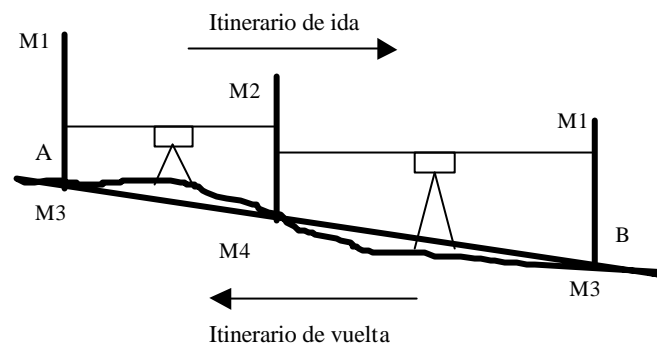


Figura 3: Esquema de observación.

Siguiendo el software específico de campo tanto en el itinerario de ida como en el de vuelta se observarán dos veces el desnivel en cada tramo, siendo una lectura a la mira de espaldas, después a la mira de frente, otra lectura a la mira de frente y después a la de espalda (método Förstner). Se comparan los dos desniveles obtenidos y si su discrepancia no supera la tolerancia admitida se prosigue la medida del itinerario, en caso contrario se repetirá la observación de este tramo. La tolerancia para un doble medida del desnivel de un tramo se establece en 0.2 mm.

Para estacionar el nivel, este se monta sobre el trípode sujetándolo fuertemente con el tornillo de fijación. Los tornillos de la plataforma nivelante deben encontrarse a medio recorrido para que no sean forzados en cada puesta de estación.

El estacionamiento se debe hacer sobre terreno firme sobre la cruz previamente marcada en el suelo evitando el terreno asfáltico cuando haya altas temperaturas, las patas del trípode no se deben hincar contra el terreno para evitar la reacción de este sobre el trípode. A continuación se procede a la nivelación del aparato previa orientación del nivel perpendicularmente a la línea de nivelación.

Las miras se estacionan directamente sobre los clavos de nivelación si estos son de cabeza esférica o sobre la plancha en el caso de estacionamientos intermedios, calando el nivel esférico y fijándola con dos puntales. Si los clavos son planos (vértices XU) se estaciona la mira sobre una esfera calibrada de 2 cm de diámetro que se apoya sobre el clavo y en la base de la mira. La lectura que se realiza sobre la mira se corrige posteriormente descontando el diámetro de la esfera.

Para la medición de un itinerario deben tenerse en cuenta las siguientes especificaciones:

- ◇ Cada sesión de medida debe acabar en un clavo de nivelación principal
- ◇ La medición de un trozo de un tramo tiene que durar el menor tiempo posible para evitar el hundimiento de la mira de espalda.
- ◇ Si durante el transcurso de las observaciones se produce alguna anomalía (golpes a las miras o al nivel, asentamientos imprevistos de las planchas etc.) es necesario comenzar el tramo de nuevo a partir del último clavo de nivelación.

2.4 Implementación del itinerario

El proceso de implementación, consiste en la planificación in situ del itinerario definitivo, anclar las señales, observar el itinerario y posteriormente realizar un control de calidad de los datos, para una vez calculado el itinerario o anillo ajustar las mediciones. Este proceso se realiza siguiendo estrictamente el pliego de especificaciones técnicas, descrito en el apartado anterior.

Planificación por itinerarios

Para realizar la planificación por itinerarios, en primer lugar se analiza la cartografía por la que transcurre el itinerario del diseño global. Se redacta una minuta de campo en la que aparecen los municipios por los que pasa el itinerario, se especifica en cuales se monumentaran clavos principales, se anota si existen puntos de la red XU y NAP cerca del itinerario y se señalan las vías de comunicación que unen los diferentes municipios. En cada vía de comunicación se especifica el tipo de vía, la densidad de tráfico, las zonas de sol y sombra, la anchura de los arcones, el número de kilómetros entre poblaciones, si en el trayecto existe algún puente o túnel y todo aquello que pudiera obstaculizar la observación del itinerario de nivelación.

Una vez decididos los municipios en los que se anclan los grupos de señales de nivelación se contacta con las alcaldías para informar de los trabajos a realizar por el ICC y obtener los correspondientes permisos de monumentación.

Para determinar definitivamente el itinerario a seguir por el equipo de nivelación, se circula en coche por las diferentes vías de comunicación anotadas en la minuta, inspeccionando y analizando todas las ventajas y desventajas encontradas en ruta.

Trabajos de campo

Los trabajos de campo consisten en la monumentación de los clavos de nivelación y la observación del itinerario. Dentro de lo posible el anclaje de las señales geodésicas de nivelación se realiza en compañía de una persona del gabinete técnico del propio ayuntamiento, para coordinar la ubicación final de la señal. Este proceso se realiza como mínimo, dos semanas antes de la observación del itinerario para asegurar que la correcta estabilidad del clavo. La observación del itinerario se realiza siguiendo la metodología descrita en el apartado anterior. Previamente al proceso de medición, el jefe del equipo de medición debe recorrer el itinerario con una cinta métrica y las herramientas necesarias para ubicar y anclar los clavos secundarios. Para minimizar los errores sistemáticos se requiere que diferentes equipos realicen los itinerarios de ida y de vuelta y en diferentes días. Además no se permite finalizar un día de trabajo en un punto secundario, sino que se empieza y acaba en un clavo principal. En rendimiento medio de observación es de 1.3 km diarios.



Figura 4: Itinerarios observados de la red XdA a principios del 2003.

Validación de los datos de campo

Las mediciones de campo se realizan utilizando una controladora de campo tipo GPC1 mediante el software NA3M (modificación del software PCNIV de swisstopo) con la finalidad de homogeneizar los datos tomados y la metodología de observación (la secuencia de lectura en cada estacionamiento es el método Förstner, R1-V1-V2-R2). Las medidas de campo vienen guiadas por el funcionamiento de NA3M, con el cuál es posible realizar algunas comprobaciones in-situ y repetir al momento posibles mediciones erróneas.

Una vez realizadas las observaciones y antes de realizar el ajuste por mínimos cuadrados con GeoTex/ACX, se procede a analizar los datos observados, con la finalidad de poder detectar errores groseros; obtener una primera estimación de la precisión de las observaciones; aplicar las correcciones de temperatura y calibración de las miras, si son requeridas; y transformar los datos al formato GeoTeX/AdIL correspondiente. Toda esta validación de las medidas se realiza con el programa GeoTeX/NAADIL v.3.0.

Algunas de las comprobaciones se realizan estacionamiento a estacionamiento -2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 que son repeticiones de las comprobaciones que se realizan en las mediciones con el programa NA3M-

mientras que otras -1, 10, 11, 12 y 13- permiten controlar y asegurar que las medidas realizadas estén dentro de las tolerancias requeridas, antes de realizar el ajuste mínimo -cuadrático.

Las comprobaciones que se realizan en GeoTeX/NAADIL v.3.0 son:

1. El identificador de la mira asociado a la señal inicial ha de ser igual al identificador de la mira R del primer estacionamiento.
2. El identificador de la mira V de un estacionamiento ha de ser igual al identificador de la mira R del siguiente estacionamiento.
3. El identificador de la mira asociado a la señal final ha de ser igual al identificador de la mira V del último estacionamiento.
4. El identificador de la mira R y el identificador de la mira V de un mismo estacionamiento tienen que ser diferentes.
5. Las distancias del instrumento a las miras, en cada estacionamiento, han de ser inferiores a la tolerancia deseada (por defecto para el nivel NA3000, 30 m).
6. Una de las lecturas ha sido realizada en el extremo superior de la mira. Se comprueba que no sea un caso de puntería extrema. En estos casos, los niveles digitales como el NA3000, realizan una correlación de una imagen incompleta y la lectura obtenida puede ser errónea. El límite superior a observar es sustraer el valor de la distancia en metros a la mira de 300 cm de longitud. Sólo es posible aceptarlo en casos muy excepcionales.
7. Una de las lecturas ha sido realizada en el extremo inferior de la mira. El límite inferior, en este caso similar al anterior, es el valor de la distancia a la mira en metros.
8. Los dos desniveles observados en un estacionamiento no pueden diferir más de 0.2 mm. Con esta comprobación se controla que la observación del estacionamiento ha estado realizada correctamente.
9. Cada uno de los dos desniveles observados en un estacionamiento no puede ser inferior 1 mm. Aviso para evitar posibles lecturas erróneas.
10. La excentricidad de las distancias a las miras para el conjunto de estacionamientos no puede ser superior a la tolerancia deseada (por defecto, 20 cm). Comprobación para asegurar que algunos errores sistemáticos (colimación, curvatura terrestre, refracción) han sido cancelados por el buen seguimiento del método de observación del punto medio.
11. El número de estacionamientos ha de ser un número par. Con esta comprobación se asegura que se han cancelado posibles errores sistemáticos de lectura de las miras, ya que se asegura que la mira en el punto inicio y final sea la misma.
12. La diferencia entre desniveles no puede ser superior a la desviación típica del instrumento por la raíz cuadrada de la distancia en kilómetros.
13. El cierre del tramo con su inverso ha de ser inferior a la tolerancia deseada (por defecto 0.25 mm) por la raíz cuadrada del número de estacionamientos.

2.5 Ajuste de los datos de campo

Los desniveles observados no se corresponden estrictamente con los desniveles calculados a partir de las alturas ortométricas oficiales, debido a que el no paralelismo de las superficies equipotenciales no se ve reflejado en las observaciones de campo. La diferencia entre la altura observada y la altura ortométrica entre dos señales es lo que se conoce como corrección ortométrica. Para poder calcular esta corrección es preciso disponer de valores de la gravedad en los clavos de nivelación, lo que justifica que se proceda a observar la gravedad para cada señal XdA o, en algunos casos, interpolarla mediante un ajuste de colocación mínimo cuadrática con el software GRAVSOFT/GEOCOL a partir de la base de datos gravimétricos existentes. Aunque existen más de 15000 datos gravimétricos en Cataluña, por el momento, se procede a observar, como mínimo, cada uno de las señales XdA que han de ser integrados en la XU. Además, si se pretende que XdA siga las recomendaciones del IGN basadas a su vez en las directrices EUREF sobre EVRS (*European Vertical Reference System*), se ha de poder determinar las alturas normales -o equivalentemente los números geopotenciales- de cada uno de las señales, por lo que el conocimiento de la gravedad en el punto es esencial.

Recordemos que la relación entre el desnivel observado entre dos puntos y las diferencias de potencial gravitatorio viene dada por la siguiente ecuación:

$$DL = 2 \cdot 10^{-6} (C_2 - C_1) / (g_1 + g_2)$$

donde, DL es el desnivel observado expresado en metros, C_i el número geopotencial de la señal P_i en g.p.u. y g_i es la gravedad en el punto P_i expresada en mGal.

Además, la relación entre el desnivel observado y las diferencias de cotas ortométricas viene dada por:

$$DL = 2 [H_2 \cdot (g_2 + g_0) - H_1 (g_1 + g_0)] / (g_1 + g_2)$$

donde DL es el desnivel observado en metros, H_i la cota ortométrica de la señal P_i en metros, g_i la gravedad en el punto P_i expresada en mGal y $g_0 = 0.0424$ mGal/m correspondiente a la aproximación de Helmert para determinar la gravedad media a largo de la línea de plomada desde el punto P_i .

Estos dos modelos matemáticos han sido implementados en el software GeoTeX/ACX del ICC –junto con el simple modelo de desniveles ($DL = H_2 - H_1$)– para poder ajustar las observaciones de la XdA por el método de mínimos cuadrados con el tipo de altura que sea conveniente, siempre apoyándose en los clavos NAP existentes.

Al integrar posteriormente XdA con XU, es posible combinar cualquiera de estos modelos matemáticos con los modelos asociados a las observaciones XU y realizar en cualquier momento un ajuste global (en el sentido de un mismo ajuste combinado) con GeoTeX/ACX.

3. Integración XU-XdA: perfiles de geoide

Como ya se ha indicado, una parte de las señales de nivelación se sitúan en ubicaciones óptimas para la observación con GPS permitiendo obtener observaciones combinadas de GPS-nivelación y, a su vez, de perfiles del geoide de calidad. Estos perfiles observados se han utilizado, en un primer lugar, para estudiar la precisión del modelo local geoidal existente UB91 [1]. La metodología que se sigue es: el GPS determina alturas elipsoidales h , mientras que la nivelación determina alturas ortométricas H . De esta manera la ondulación viene determinada por $N = h - H^o$.

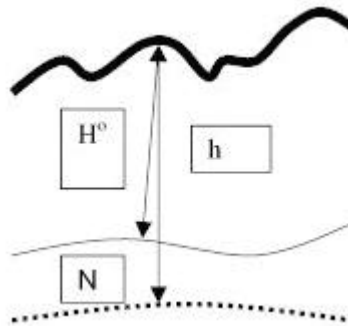


Figura 5: Relación entre altura ortométrica H^o , altura elipsoidal h y ondulación del geoide N .

Hasta el momento, a medida que avanza el establecimiento de la XdA, se va realizando el enlace de algunos puntos con la XU. Hasta el momento, se dispone de 23 puntos, entre ellos 2 estaciones permanentes GPS de la red CATNET (EBRE y LLIV). Los residuos muestran una precisión relativa del geoide UB91 del orden de 2 ppm y absoluta del orden de 0.8 m (Fig 6 y Fig 7) [3].

Los resultados obtenidos en la comparación del geoide con datos XU-XdA demuestran que es necesario disponer de un modelo del geoide con una precisión superior a la actual, cabe recordar que uno de los principales objetivos de la XdA consiste en conseguir perfiles del geoide de muy alta precisión para posteriormente realizar una nueva determinación del geoide en Cataluña. Es sabido que al usar las ondulaciones del geoide obtenidas a partir de este tipo de observaciones, los errores de ondulación debidos a longitudes de onda grandes pueden ser suprimidos y que las diferencias del sistema de referencia inherentes pueden eliminarse.

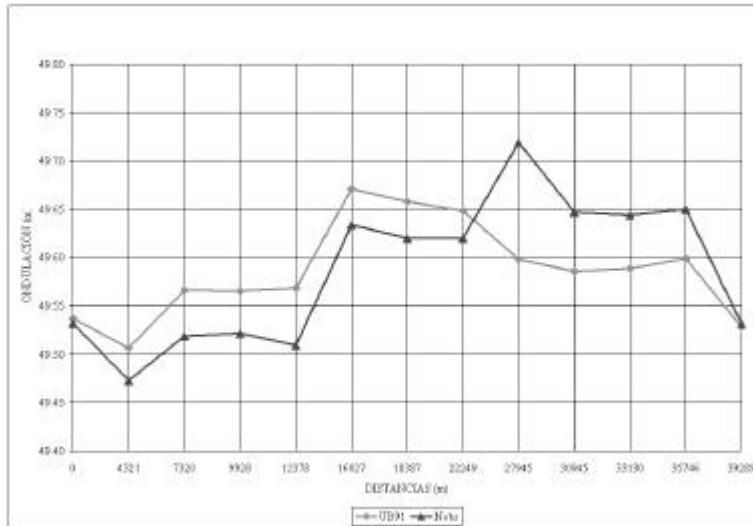


Figura 6: Comparación absoluta en un itinerario XdA.

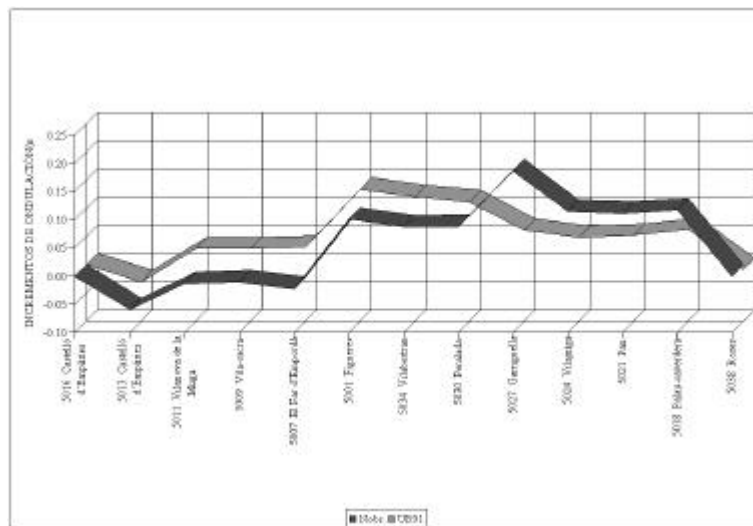


Figura 7: Comparación relativa en un itinerario XdA.

4. Conclusiones

El ICC está implementando la red XdA, dentro del marco del proyecto SPGIC, con el objetivo de densificar la red de nivelación del IGN y para facilitar la integración del sistema de alturas ortométricas y la red tridimensional XU basado en cotas elipsoidales.

Se ha definido toda la metodología a seguir para la implementación de la red, que a finales del 2002 se compone de 456 km observados, continuando su observación a razón de 100 km anuales.

Agradecimientos

El ICC agradece la colaboración de los Ayuntamientos implicados en el despliegue y posterior mantenimiento de la XdA.

Referencias

- [1]. Andreu,M.A.,Simó,C. 1992. Determinació del geoide UB91 a Catalunya. Monografia tècnica, núm. 1. Institut Cartogràfic de Catalunya.
- [2]. Colomina,I., Térmens, A., Ortiz,M.A., Talaya,J., 1995. SPGIC: Integrated Geodetic Positioning System of Catalonia. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) XXI General Assembly, 2.7.95 -- 14.7.95 Boulder, (Colorado – EEUU).
- [3]. Moysset,M, Gabela,I. 2001. Determinació de perfils del geoide utilitzant GPS i anivellació i la seva comparació amb l'UB91. PFC Escola d'Enginyeria Tècnica en Topografia. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4]. Parareda,C., Bosch,E., Térmens,A., Ortiz,M.A., Talaya,J., 2003. CATNET: Servicios de posicionamiento de alta precisión y su integración en las nuevas tecnologías de la información. 5ª. Setmana Geomàtica de Barcelona "Cartografía, Telemática y Navegación". 11-14.2.2003, Barcelona.
- [5]. Soro,M., Térmens,A., Ortiz,M.A., Talaya,J., 2003. XU: Red Utilitaria de Cataluña. 5ª. Setmana Geomàtica de Barcelona "Cartografía, Telemática y Navegación". 11-14.2.2003, Barcelona.