

## **EMPLEO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) EN ESTUDIOS DE GRAVIMETRÍA REGIONAL**

César Jacques Ayala<sup>1</sup> y Jorge Ramírez Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geología, UNAM, Apdo. Postal 1039, Hermosillo, Sonora  
(jacques@servidor.unam.mx),

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, BC.  
(jramirez@iing.mxl.uabc.mx)

### **RESUMEN**

Se presentan los resultados del levantamiento topográfico para estudios gravimétricos regionales utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Para el control topográfico se utilizaron antenas Trimble 4600SL, de una frecuencia (L1). Se hicieron levantamientos “fast-static” y “stop & go”. En el primer caso se hicieron mediciones de 20 minutos o más con líneas base de más de 200 km. En el segundo caso se hicieron mediciones de 5 minutos y líneas base de hasta 20 km, trasladando un valor de altitud de la estación fija en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Los resultados en ambos casos fueron satisfactorios para un levantamiento gravimétrico regional, ya que los errores ocurrieron dentro de tolerancia. Si bien el método “fast-static” tiene el inconveniente de requerir de mucho tiempo de observación, es muy confiable cuando la estación fija está a una distancia muy grande o no es posible acceder a ella en vehículo.

Palabras clave: GPS, gravimetría, Sonora, México.

### **ABSTRACT**

Results of a topographic survey for a regional gravimetric study using the Global Positioning System are presented. For the topographic survey were used 4600SL Trimble antennae (L1). Fast-static and stop & go methods were applied. In the first case, recording time was at least 20 minutes with baselines of more than 200 km. In the second case recording time was 5 minutes and baselines as large as 20 km, using the altitude of a fixed base station in Hermosillo, Sonora, Mexico. The results in both cases were satisfactory for a regional gravimetric survey, with errors within tolerance. Even though the fast-static method has the inconvenience of long periods of time for acquisition of data, it is very confident in long baselines or sites where there is no access by vehicle.

Keywords: GPS, gravimetry, Sonora, Mexico

## INTRODUCCION

En levantamientos de gravimetría es muy importante contar con un buen control topográfico, especialmente en la altitud. Hace años, los levantamientos gravimétricos se hacían con barómetro, plancheta, tránsito y/o nivel automático. Después se utilizaron estaciones totales y distanciómetros más sofisticados, pero la operación requería aún de varios operadores y brigadas para realizarla. Estos levantamientos consumían tiempo y los costos eran elevados, especialmente en áreas montañosas con pocas vías de comunicación. Con la llegada del sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) la operación se ha hecho más económica y expedita. Incluso es posible que dos operadores, y en algunos casos sólo uno, haga tanto la medición gravimétrica como la topográfica.

De acuerdo con los fabricantes de antenas GPS, para obtener la precisión garantizada se deben seguir algunas reglas durante el levantamiento de datos. Además se debe utilizar el “método diferencial” (DGPS) con dos antenas, una fija y la otra móvil. Con antenas de una frecuencia ( $L1=1575.42$  MHz) la línea base (distancia entre la estación fija y la móvil) no debe ser mayor de 20 km. Con antenas de doble frecuencia ( $L1/L2$ ;  $L2=1227.60$  MHz) la línea base se puede extender hasta 50 km. La precisión en las alturas para las antenas 4600SL se define como (Trimble, 2003):

$\pm 10$  mm + 2 ppm (partes por millón) de  $x$  ( $\leq 10$  km) en levantamientos “fast static”, y  $\pm 2$  cm + 1 ppm de  $x$  para levantamientos “stop & go”, en donde  $x$  es la longitud de la “línea base” y  $K$  es una constante ( $K=\pm 2$  cm). En estudios de gravimetría regional se considera aceptable un error en altitud dentro del rango 30-50 cm. En regiones montañosas, un metro de error puede ser aceptable. Un error de esa magnitud se compensa con la corrección por efecto topográfico (rugosidad), en el trazo de isolíneas de anomalía de Bouguer o residual y en el modelado (error producido por el ajuste general entre datos observados y calculados, así como en el modelo geológico utilizado).

Se realizó un levantamiento regional de gravimetría para estudiar cuencas cenozoicas en el norte de Sonora, el cual fue financiado por el CONACYT. Se empleó el método de posicionamiento DGPS usando dos antenas receptoras de 12 canales, L1, marca Trimble modelo 4600SL, con una máscara de elevación a  $15^\circ$ . La precisión que se obtiene en las alturas de acuerdo con el fabricante es de  $\pm 2 + 1$  ppm. Debido a un accidente, una de las antenas resultó dañada por lo que el levantamiento se hizo usando como antena fija una estación ubicada en Hermosillo. Se llevaron a cabo algunas pruebas para verificar la calidad de los resultados. Estos fueron tan buenos que se optó por usar este método con líneas base de más de 200 km. Existen dos estaciones GPS de monitoreo continuo en Hermosillo: una de la Red Geodésica Nacional Activa (RGN) (HER2) y la otra de la empresa Precisión GPS (PPSH), la cual nos proporcionó los datos para hacer el post-proceso de nuestra información colectada.

Adicionalmente se realizó el método de adquisición de datos “stop & go”, para el levantamiento de una sección regional Bahía de Kino–Hermosillo–Mazocahui, en Sonora. Se presentan algunos resultados de ambos levantamientos altimétricos. Uno en el área de Ímuris-Nogales y el otro en el área entre Hermosillo y Mazocahui (Fig. 1). Para la adquisición de datos, en el primer caso se utilizó el método “fast-static” con periodos de lectura de 20 minutos o más en cada estación, con un intervalo de registro cada 15 segundos; en el segundo caso se utilizó el método “stop & go” con tiempos de lectura de 5 minutos y con los mismos parámetros de adquisición de datos mencionados.

En gabinete se procesaron los datos usando el “software” proporcionado por el fabricante (Trimble) para obtener, para cada estación, las coordenadas horizontales ajustadas con proyección UTM Zona 12 Norte y Datum NAD27. Las alturas obtenidas a partir de observaciones

GPS están referidas al elipsoide WGS-84 (Fig. 2) y se les llama alturas elipsoidales. El mismo "software" permite obtener las alturas ortométricas utilizando un modelo geoidal global. En este caso se usó el modelo geoidal

OSU91A (Rapp et al., 1991). En ese tiempo aún no estaba disponible un modelo geoidal regional como el MEX97 o de la serie GGMOX para México, elaborados por el INEGI.



Figura 1. Esquema de localización de las áreas donde se hicieron las mediciones aquí reportadas.

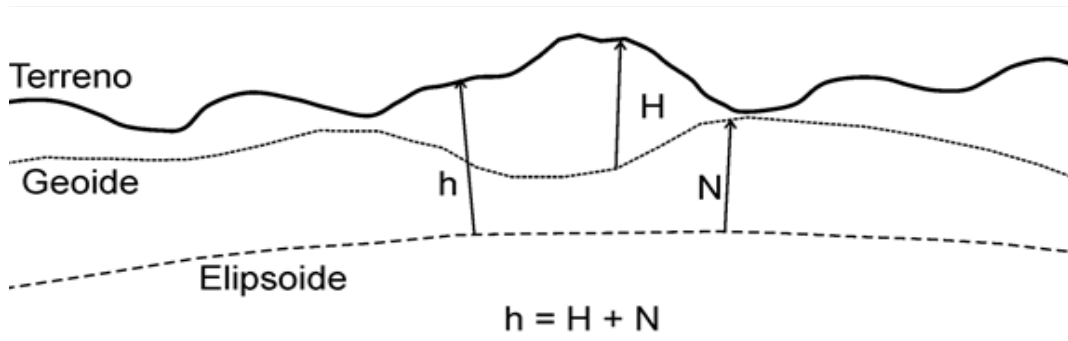


Figura 2. Diagrama que ilustra las tres superficies fundamentales del sistema de posicionamiento satelital GPS. La altura ortométrica,  $H(=h-N)$ , es la altura con respecto al geode.

## RESULTADOS

Para verificar los resultados de nuestro levantamiento regional se utilizaron algunos bancos de nivel del INEGI colocados a lo largo de la carretera Ímuris-Nogales.

En las Tablas 1 and 2 se muestran los resultados comparando los obtenidos por medio de GPS y el modelo geoidal con los datos de los bancos de nivel. Éstos se pueden obtener en la página del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/inventarioPuntos.aspx>)

Se observa que sólo el banco BN-918 tiene una diferencia mayor que la tolerancia permitida en el cálculo de la altura elipsoidal, la cual es función de la distancia de la línea base; sin embargo, estos resultados se consideran aceptables para nuestros fines.

El banco de nivel BN-918 se encuentra en el Centro de Salud de Ímuris. Este banco se usó como punto de inicio y término de la operación diaria del gravímetro. Se fijó el receptor GPS varios días para registrar las variaciones en las alturas; esto es, para ver la repetibilidad de los resultados. En la Fig. 3 se muestran las diferencias obtenidas en 10 días de observación. La diferencia mayor obtenida es de 83.39 cm, con una tolerancia de  $37.53 \pm 1$  cm. El eje Y de la figura es la altura ortométrica del banco. Esta altura ortométrica comúnmente es referida como altura sobre el nivel medio del mar (msnm).

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de varios bancos de nivel. Sólo el banco BN-918 tiene errores mayores que la tolerancia. Estos resultados se consideran aceptables para nuestros fines. Otra prueba consistió en colocar en una estación dos antenas receptoras simultáneamente con el fin de observar la constancia de los resultados. En la Tabla 3 se muestran las diferencias de altura obtenidas después del procesado. Los resultados obtenidos son aceptables y permiten confiar en ellos.

En cuanto al perfil regional en Sonora central (entre Hermosillo y Mazocahui, Fig. 1), se usaron las mismas antenas 4600SL, L1. En este caso se trasladó la altura ortométrica de la estación fija PPSH de la empresa Precisión GPS en segmentos de 40 km, colocando una antena fija a la mitad del mismo segmento. De esta manera, la línea base siempre fue de 20 km o menos. En el poblado de Mazocahui (Fig. 1) se tiene el banco de nivel BN-236, el cual se usó para verificar los resultados. En un ejercicio para comparar resultados se hizo el cálculo de alturas tomando como base fija una de nuestras estaciones y la estación fija PPSH. En otras palabras, la estación 1113, ocupando el banco de nivel, se corrigió con respecto a dos bases fijas. Se tomó el banco de nivel BN-236, de altura conocida y se hizo el ajuste con respecto a la estación PPSH y nuestra estación 1103, estación fija de ese segmento de la línea regional. El tiempo de toma de datos fue de 5 minutos. En la Tabla 3 se muestran los resultados de las alturas. En el cálculo con respecto a la estación PPSH se tiene un error ligeramente mayor que la tolerancia, mientras que el error con respecto a la estación 1103 es pequeño. Tómese en cuenta que el tiempo de captura de datos fue de 5 min.

En conclusión, para un estudio de gravimetría regional es posible utilizar equipos receptores GPS de una frecuencia (L1), cuyo costo es mucho menor que el de un equipo de doble frecuencia (L1/L2). Sin embargo, deben seguirse todas las indicaciones dadas por el fabricante con el fin de obtener los mejores resultados. En el caso de que sea necesario tener una mayor línea base, es indispensable ampliar el tiempo de adquisición de datos. También deben anotarse todas las posibles fuentes de error para poder estimar la validez de los datos. En estudios gravimétricos, en los que se estime o espere 1 mGal de error en el cálculo de la anomalía de Bouguer, se pueden usar antenas de una frecuencia, siempre y cuando se dé tiempo suficiente de adquisición de datos para obtener buenos resultados.

Tabla 1. Comparación de las alturas en metros sobre el nivel del mar entre bancos de primer orden y datos obtenidos mediante GPS

Banco de nivel	Longitud de la línea base (km)	Altura (msnm) por nivelación diferencial	Altura (msnm), GPS	Diferencia (m)	Tolerancia (m) $\pm 0.010$
BN-20	220.199	1078.6783	1078.6352	-0.0431	0.4404
BN-911	229.200	1150.9450	1151.0606	+0.1156	0.4584
BN-912	224.370	1107.3340	1107.5397	+0.2057	0.4487
BN-913	218.425	1070.9870	1070.7810	-0.2060	0.4368
BN-916	200.357	931.3850	931.6248	+0.2398	0.4007
BN-918	187.678	855.5210	854.9752	-0.5458	0.3753

Tabla 2. Determinación de la altura (msnm) usando simultáneamente dos antenas L1 en una misma estación. En los tres casos la línea base es mayor a 200 km.

Estación	Antena 1	Antena 2	Diferencia
214	1322.3251	1322.3385	0.0134
238	1274.1453	1274.1938	0.0485
242	1357.7169	1357.7211	0.0042

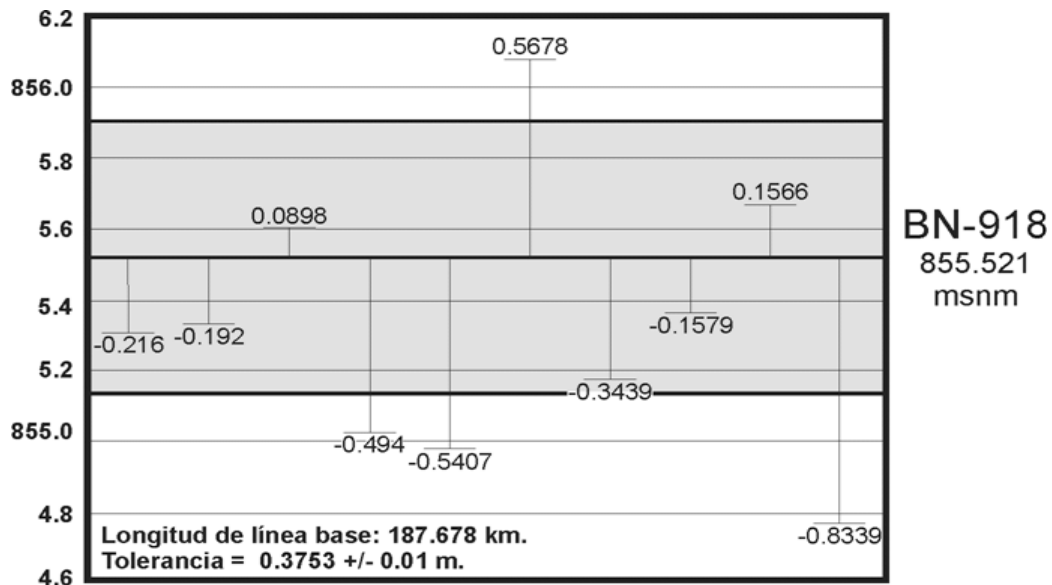


Figura 3. Errores obtenidos en la medición de alturas ortométricas en 10 días diferentes, del banco de nivel BN-918, ubicado en el Centro de Salud de Ímuris.

Tabla 3. Resultado de la determinación de altura del banco de nivel BN-236 con respecto a la base fija PPSH y la estación fija 1103 del levantamiento regional. El tiempo de observación es el mismo en ambos casos.					
Estación fija	Longitud de la Línea base (m)	BN-236 (msnm)	Altura con GPS (msnm)	Diferencia (m)	Tolerancia (m)
PPSH	94,567.42	497.837	497.950	0.113	.1891 ± 0.01
1103	17,743.77		497.832	-0.005	.0377 ± 0.02

Finalmente, el sistema GPS es lo mejor para estudios de exploración geofísica. Tiene muchas ventajas sobre métodos tales como los distanciómetros, barómetros y de nivelación. En los casos que reportan Marín et al. (1998), así como Sabah y Nashwan (2008), se obtuvieron resultados muy pobres porque utilizaron antenas receptoras de mano, las cuales no permiten, hasta ahora, hacer trabajo DGPS ni los ajustes adecuados para determinar alturas ortométricas. Se requiere equipo de levantamiento topográfico, el cual es mucho más preciso aún cuando resulta en una inversión inicial más fuerte. Un equipo L1 para DGPS puede costar, incluyendo el software, aproximadamente \$20,000 dólares estadounidenses. Un equipo L1/L2 puede costar el doble o más. Es un poco más preciso, pero al reducir el tiempo de adquisición, la productividad se quintuplica. Una forma de incrementar la precisión y la productividad, es usando GPS diferencial (DGPS), en la que se usan dos antenas simultáneamente: una fija y la otra móvil, funcionando continuamente.

## AGRADECIMIENTOS

El equipo GPS se adquirió por medio del proyecto 3185p-t, financiado por el CONACYT. Se agradece al Ing. José Ramos Herrera, de la empresa Precisión GPS por proporcionarnos la información para el procesado de nuestros datos, además de su apoyo técnico en la operación del equipo. De la misma manera, se agradece al árbitro anónimo

que amablemente revisó este trabajo. Gracias a él se mejoró significativamente, tanto el texto como el aspecto técnico.

## REFERENCIAS

- Marín, L.E., Pérez, X. y Rangel, E., 1998: Comparison of three surveying techniques applied to hydrogeological studies: level, barometric and GPS: Geofísica Internacional, vol. 37, pp. 127-129.
- Rapp, R.H., Wang, Y.M. y Pavlis, N.K., 1991: "The Ohio State 1991 geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models": Report 410, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Sabah Hussein Ali y Nashwan Kamal-Aldeen, 2008: Using of GPS and leveling techniques for determining the orthometric heights inside Mosul University: Al-Rafidain Engineering, vol.16, No.3, p. 132-142.
- Trimble, 2003: 4600 LS and Trimble Digital Fieldbook: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-148058/022543-059A\\_4600LS\\_DS\\_1103\\_lr.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-148058/022543-059A_4600LS_DS_1103_lr.pdf)

Manuscrito recibido: 23 de marzo, 2012

Recepción del manuscrito corregido: 12 de septiembre, 2012

Manuscrito aceptado: 27 de septiembre, 2012