

Aplicación del sistema de posicionamiento satelital G.P.S. en la medición de deformaciones de muros de embalses y estructuras mineras

V. Herrera y H. Contreras

Universidad de Santiago de Chile. Casilla 10233 - Correo Central Santiago, Chile

Telex: 441674 USACH CZ - Fax: (562) 681-1213

RESUMEN

El propósito de este trabajo es demostrar la potencialidad de la tecnología GPS en el campo de la ingeniería, realizando mediciones de alta precisión bajo condiciones adversas. La investigación consistió en efectuar mediciones sobre un embalse minero localizado en el sector de Los Bronces en la cordillera de Los Andes, aproximadamente a 50 Kms al este de Santiago, Chile.

Los equipos empleados en las mediciones del embalse trabajaron con visibilidad cero y bajo condiciones meteorológicas extremas. La estadística de datos obtenida muestra que el embalse se está moviendo debido a cambios en el volumen de agua contenida en función de la época del año. En comparación con medidas originales el sistema de posicionamiento de medidas GPS resultó indispensable para permitir la observación y el estudio de importantes alteraciones del embalse en un difícil medio ambiente de trabajo.

Usando estas mediciones los riesgos de deformaciones han sido minimizados gracias al reforzamiento de la pared sur del embalse usando material de la mina de alta resistencia para mejorar la estabilidad.

PALABRAS CLAVE: GPS, Ingeniería, muros de embalses.

ABSTRACT

The purpose of this work is to demonstrate the potential of GPS technology in the engineering field, providing precise measurements under adverse conditions. The research involved measurements at a mining dam located in Los Bronces sector in fue Andes Mountains, approximately 50 Kms east of Santiago, Chile.

The technology involved making consistent measurements of the dam with zero visibility and extrem weather conditions. The statistics obtained show the dam is moving due to changes in the water volume depending upon the season. Compared to original information the positioning system GPS measurements were indispensable in allowing observation and study of important alterations in the dam in this harsh environment.

Using these measurements the deformation risks have been minimized by fortifyng fue south wall of fue dam using high resistant mining material to improve stability.

KEY WORDS: GPS, engineering, dam.

INTRODUCCIÓN

El comienzo de la actual década ha masificado el uso de instrumentos de posicionamiento satelital. Sin embargo, al romperse los esquemas tradicionales de lo que ha sido el desarrollo tecnológico de la topografía tradicional, se ha dado motivo para mirar con cierta cautela el uso de tal instrumental por parte del usuario.

El presente trabajo ha pretendido utilizar esta tecnología de punta en condiciones físicas adversas de alta montaña y, a la vez, realizar mediciones de alta precisión que permitan visualizar y determinar tendencias en las deformaciones de muros de embalses (Hollmann, 1992) pertenecientes a la actividad minera.

La necesidad de contar con instrumentos satelitales radica en el hecho de no tener problemas con el trabajo de campo si las condiciones meteorológicas son malas. Eri otro sentido, el rendimiento y la calidad de los resultados

la calidad de los resultados obtenidos iguala, y en algunos aspectos supera, las técnicas y métodos tradicionales de mediciones topo gráficas. No obstante, la tecnología de punta presenta el inconveniente de su alto costo, hecho que limita la difusión de estos equipos, pero por otra parte se realiza el valor de investigación referente al tema en cuestión, fundamentado en la búsqueda por optimizar y mejorar las actuales técnicas de georreferenciación sobre la superficie terrestre.

ANTECEDENTES Y DATOS

La investigación se inserta en el marco de cooperación Universidad-Empresa, pues existe la necesidad por parte de la empresa de contar, en forma confiable, con datos proporcionados por mediciones *in-situ*, que controlen y permitan asegurar la estabilidad de embalses (Ayala, 1986) para las operaciones de producción. A esto se suma la

tarea de la Universidad de investigar en áreas de ingeniería y poder certificar dicha confiabilidad.

Esta investigación se realiza en la cordillera de Los Andes, al Este de la ciudad de Santiago, aproximadamente en las coordenadas geográficas lat: 33°08' S Y long: 70°17' W, en el sector denominado Los Bronces, a una altitud de 3.500 m S.N.M.M y en el embalse perteneciente a la Cia. Minera Disputada de Las Condes. Los receptores utilizados corresponden al tipo Ashtech MD-XII (Barán, 1992), los cuales fueron usados para medir y calcular coordenadas a monolitos (puntos de control) ubicados sobre el muro del embalse, siendo la longitud construida de éste último de aproximadamente 350 metros, con un ancho del coronamiento de 6 metros (ver Fotos 1 y 2). La configuración del muro la podemos apreciar en la Figura 1, al igual que la ubicación de los puntos de control.

La base de datos está conformada, en primer lugar, por una estadística proporcionada por la empresa, correspondiente al período Octubre 1993-Abril 1995. Estos datos fueron obtenidos con distanciómetro desde un punto de referencia (P.R.)



Foto 1. Mediciones sobre el muro de embalse; se puede apreciar el monolito o punto de control y el relleno de la pared sur del muro

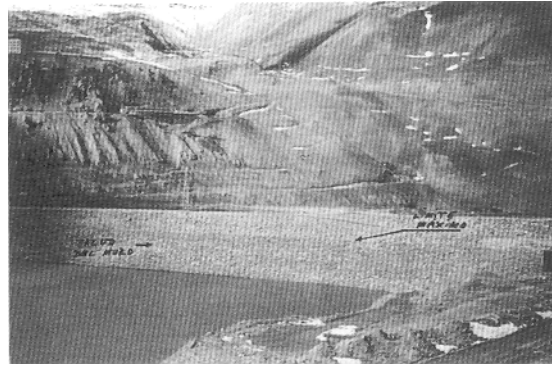


Foto 2. Panorámica del muro, donde se puede apreciar el límite máximo alcanzado por el agua y la presión que ejerce sobre el muro del embalse

ubicado a una distancia promedio de 1.200 m del muro (CMDH). La estadística se completó con mediciones GPS en el período Mayo 1995-Marzo 1996.

Debido a la acumulación de información hasta Abril 1995, el presente informe se remite a entregar la estadística del punto de control N° 5 (total 7 puntos) situado en el centro del muro, ya que es el punto de control más crítico observado. En la Tabla 1 se muestra dicha estadística, y en la Figura 2 se muestra el gráfico de desplazamiento. Las coordenadas del punto de referencia (ver Fotos 3 y 4) son las siguientes:

Punto P.R. CMDH (UTM PSAD-56)

Norte	Este	Cota
6331591,157	380326,198	3489,67

Sistema	Latitud	Longitud
WGS-84	33° 09' 02.52798" S	70° 17' 07.42673" W
PSAD-56	33° 08' 50.37987" S	70° 16' 59.24800" W

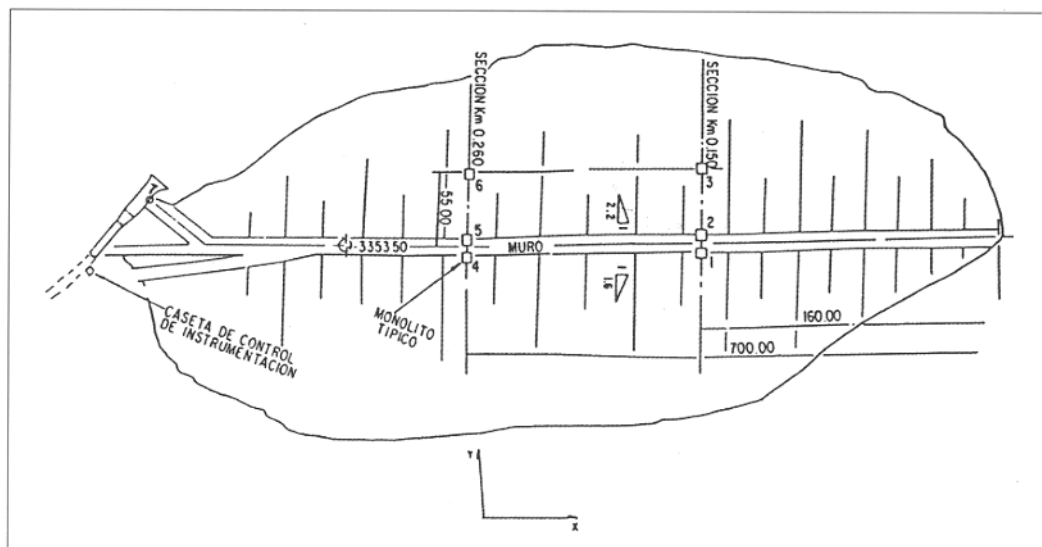


Figura 1. Plano en planta a escala 1 :2.800 del muro del embalse y ubicación de los puntos de control



Foto 3. Panorámica del muro del embalse desde el P. R. CMDH, en época de primavera



Foto 4. Panorámica del muro del embalse desde el punto P.R. CMDH; época de otoño

Las coordenadas de la Tabla 1 está referidas a un sistema propio local de la Cia. Minera, por lo que no es posible compararlos con un sistema internacional como el PSAD-56 que utilizaremos. No obstante, la gráfica de la Figura 2 nos entrega el desplazamiento que es lo que finalmente interesa. Por ello, la importancia de la estadística Octubre

1993 a Abril 1995 radica en el hecho de observar el comportamiento del muro desde el inicio de sus mediciones, ya que dicha información resulta fundamental en la elaboración del diagnóstico final.

METODOLOGIA CON EQUIPOS GPS

La metodología se basa en la captura de información multitemporal en terreno con frecuencia mensual. Las medidas fueron hechas a puntos de control ubicados sobre el coronamiento y talud del muro de embalse, aunque es necesario destacar que los puntos 3 y 6 siempre estuvieron cubiertos por el nivel de agua durante todas las observaciones. Para complementar la investigación se procedió a comparar las mediciones GPS con medidas tradicionales hechas con estación total marca Topcon CS2 con precisión lineal milimétrica y angular de 2 segundos centesimales en una misma sesión y en el mismo instante de tiempo, para luego continuar con la estadística GPS mes a mes. Se utilizó el método estático para observaciones satelitales de precisión.

Fecha	X	Y	Cota
06/10/93	500.225	106.366	3353.604
10/11/93	500.194	106.345	3353.613
17/12/93	500.164	106.359	3353.601
20/01/94	500.226	106.360	3353.688
18/02/94	500.229	106.364	3353.700
10/03/94	500.230	106.340	3353.702
19/04/94	500.198	106.330	3353.703
06/06/94	500.213	106.308	3353.704
11/11/94	500.211	106.398	3353.701
07/03/94	500.217	106.316	3353.694
05/04/95	500.183	106.389	3353.688

Tabla 1 Estadística del Punto de Control N° 5 Mediciones Hechas con Estación Total-Coordenadas del Proyecto

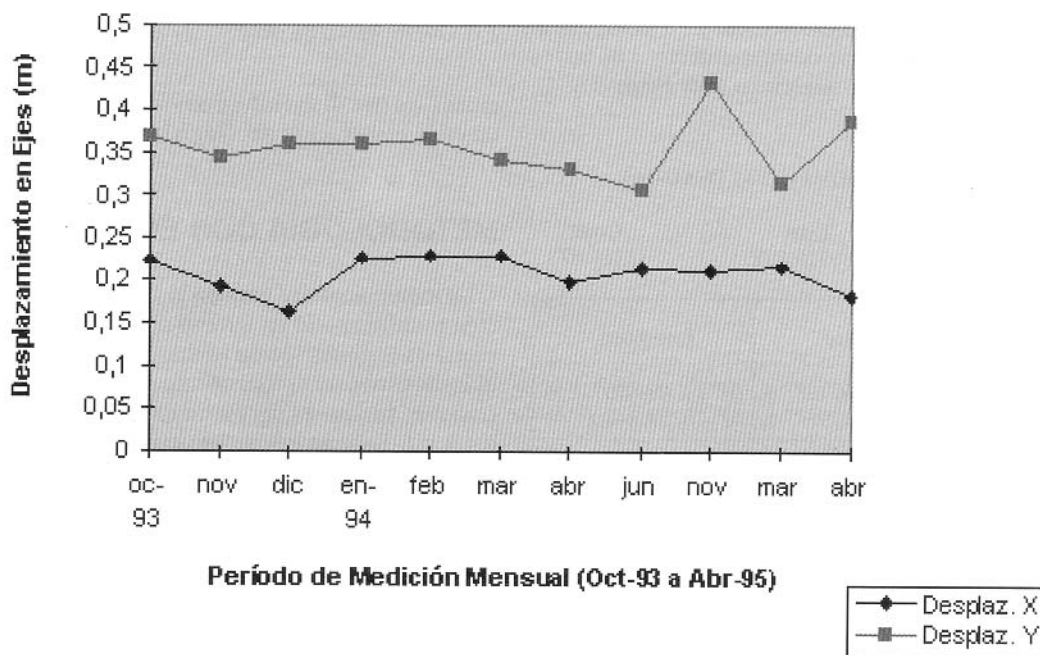


Figura 2. Desplazamiento del punto de control N° 5 (coordenadas del proyecto), mediciones hechas por la empresa con estación total

Notas:

i) En las mediciones hechas con estación total fueron consideradas las debidas correcciones por presión y temperatura, así como la correspondiente verificación de la constante de prisma como en toda medida de precisión EDM

ii) Para observar mejor el desplazamiento en los ejes X e Y, se hicieron coincidir los ejes Norte y Este con los datos originales del proyecto, teniendo como referencia el eje principal del muro. La diferencia entre coordenadas arrojó el desplazamiento que se aprecia en la Figura 2 (datos gentileza Sr. Ricardo Godoy Ing. Ejec. Geomensura).

Las fechas de medición fueron planificadas haciendo uso del software PRISM de procesamiento de información de efemérides y almanaque, entregadas por el satélite para una mayor seguridad en la precisión en las sesiones de terreno. El mismo software es utilizado, posteriormente, para vaciado y proceso de los datos obtenidos en cada una de las sesiones, para finalmente calcular las coordenadas de cada punto de control que servirán para medir y analizar el desplazamiento de la estructura en relación al P.R. CMDH y comenzar a crear la estadística GPS.

RESULTADOS OBTENIDOS

La estadística completa de mediciones GPS la podemos apreciar en la Tabla 2, no olvidemos que las cotas están referidas al sistema de proyección cartográfica UTM, elipsoide PSAD-56 y cota vinculada al N.M.M. A su vez, el desplazamiento del punto de control N° 5 se puede observar en la Figura 3.

Cabe destacar que estas mediciones fueron comparadas con medidas tradicionales realizadas con estación total en la sesión del 28/02/96, con equipo perteneciente a nuestra universidad, pudiéndose constatar diferencias del orden de centímetro en coordenadas debido principalmente a la falta de coincidencia en el azimut de partida y en la longitud de las distancias. Además, se realizó una nivelación geométrica precisa para verificar las cotas de todos los puntos de control, y que mediante la técnica de interferometría calculan los equipos GPS; los resultados se aprecian en la Figura 4.

Respecto a esto último es necesario recordar que la finalidad de la investigación es la utilización de la tecnología GPS en situaciones de difícil medición y de alta precisión, y no comparativamente con otras técnicas, ya que para eso se necesitaría haber continuado con las mediciones tradicionales con estación total a fin de poder correlacionar *a posteriori* ambos sistemas con una estadística más completa.

Si hacemos un análisis de los datos obtenidos en los últimos meses, veremos que la precisión de éstos es mejor que la precisión garantizada por el fabricante de 1 cm + 1 PPM al igual que la tolerancia exigida por la empresa para el control pe-

riódico del muro estimada en 1 cm para el movimiento mensual, pues el valor del RMS (error medio cuadrático) para las observaciones mensuales de la Tabla 2 oscila entre 4 y 8 mm, con un post-proceso que acusa un 100% de confiabilidad (RATIO). Estos aspectos demuestran que el muro posee estabilidad y, por otra parte, se recomienda realizar controles bimestrales.

CONCLUSIONES

Los resultados entregados por la medición con receptores GPS acusan movimientos de contracciones y dilataciones periódicas del muro de embalse, según la época del año, debido a presiones ejercidas por la acumulación de nieve y agua en el sector, especialmente en las mediciones iniciales con estación total.

Para evitar posibles dificultades se ha reforzado la pared sur del muro con material de extracción procedente de la misma faena, el cual posee una alta resistencia. Este hecho ha repercutido en las mediciones, sean GPS o cualquier otra, en el sentido de alterar y disminuir la tendencia sinusoidal apreciada en los gráficos de desplazamiento de los puntos de control según la época del año, inclusive en el N° 5, apreciándose un menor desplazamiento del muro, motivo por el cual la tendencia inicial de los datos no coincide con la de las últimas mediciones, en el sentido de que en épocas similares el volumen y altura de agua alcanzada ejercían una presión que provocaba una reacción de mayor desplazamiento por parte del muro, situación que en las últimas mediciones no se aprecia, según verifican las observaciones GPS.

Finalmente queda demostrada la utilidad de los equipos GPS tanto en mediciones de alta precisión como en la constancia y seguridad que ofrecen las mismas, al poder construir estadísticas de datos mucho más regulares y sin alteraciones o impedimentos de tipo climático o por falta de planificación.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA, F. J. Y RODRÍGUEZ, J. M. 1986. *Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- BARAN, W., GAJDEROWICZ, Y., OSZCZAK, S. and WASILEWSKI, A. 1992. Experiments with Application of GPS Ashtech MD-XII Receivers to Control Measurements and Engineering Works. Institute of Geodesy and Photogrammetry. Poland.
- HOLLMANN, R. and WELSH, W. M. 1992. Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, A High Precision Dam Monitoring Network Observed With GPS. Institute of Geodesy. Germany.

FECHAS	SITIO	NORTE	ESTE	COTA
	CDMH	6331591.157	380326.198	3489.669
Fecha: 01/06/95	1	6331458.633	379865.652	3353.428
Día GPS: 152	2	6331464.591	379863.797	3353.509
	4	6331420.379	379751.902	3353.642
	5	6331426.314	379749.649	3353.639
	7	6331397.533	379572.489	3348.466
Fecha: 06/07/95	1	6331458.622	379865.623	3353.433
Día GPS: 187	2	6331464.575	379863.756	3353.520
	4	6331420.350	379751.845	3353.648
	5	6331426.294	379749.584	3353.654
	7	6331397.501	379572.431	3348.474
Fecha: 03/08/95	1	6331458.636	379865.649	3353.426
Día GPS: 215	2	6331464.595	379863.794	3353.504
	4	6331420.368	379751.896	3353.634
	5	6331426.325	379749.640	3353.647
	7	6331397.546	379572.490	3348.465
Fecha: 22/09/95	1	6331458.634	379865.659	3353.429
Día GPS: 265	2	6331464.597	379863.804	3353.497
	4	6331420.377	379751.903	3353.639
	5	6331426.316	379749.649	3353.645
	7	6331397.531	379572.488	3348.461
Fecha: 30/10/95	1	6331458.638	379865.653	3353.424
Día GPS: 303	2	6331464.599	379863.801	3353.494
	4	6331420.382	379751.903	3353.641
	5	6331426.323	379749.645	3353.642
	7	6331397.535	379572.491	3348.463
Fecha: 24/11/95	1	6331458.636	379865.654	3353.417
Día GPS: 328	2	6331464.599	379863.798	3353.499
	4	6331420.385	379751.904	3353.641
	5	6331426.319	379749.648	3353.636
	7	6331397.535	379572.488	3348.457
Fecha: 19/12/95	1	6331458.638	379865.651	3353.424
Día GPS: 353	2	6331464.600	379863.801	3353.494
	4	6331420.384	379751.903	3353.638
	5	6331426.321	379749.652	3353.638
	7	6331397.535	379572.495	3348.464
Fecha: 09/01/96	2	6331464.591	379863.807	3353.502
Día GPS: 09	5	6331426.315	379749.648	3353.640
	7	6331397.532	379572.493	3348.464
Fecha: 28/02/96	1	6331458.634	379865.658	3353.423
Día GPS: 59	2	6331464.594	379863.804	3353.508
	4	633.1420.371	379751.897	3353.613
	5	6331426.316	379749.652	3353.657
	7	6331397.522	379572.495	3348.466
Fecha: 19/03/96	1	6331458.633	379865.651	3353.426
Día GPS: 79	2	6331464.598	379863.794	3353.511
	4	6331420.376	379751.896	3353.648
	5	6331426.308	379749.649	3353.637
	7	6331397.526	379572.489	3348.458

Tabla 2 Estadística de Mediciones G.P.S. sobre el Muro de Embalse Sector Los Bronces

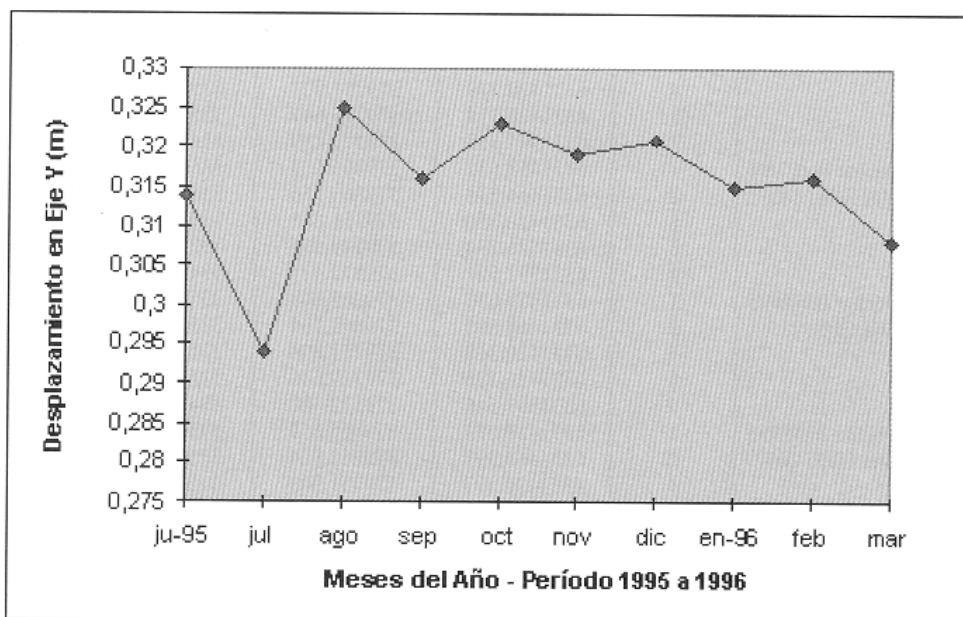


Figura 3. Desplazamiento del punto de control N° 5 según mediciones GPS

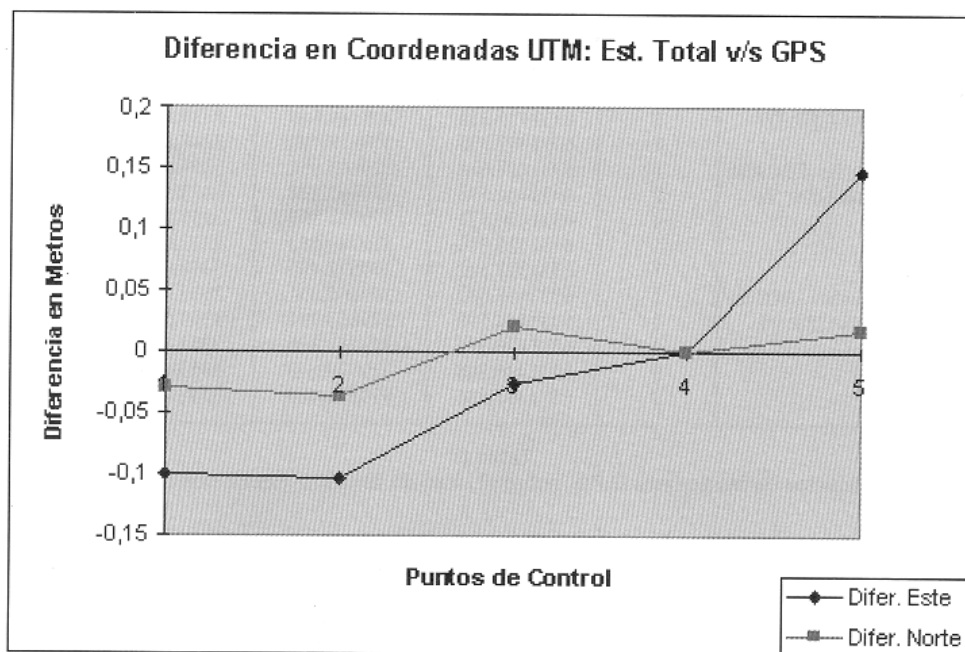


Figura 4. Diferencias en cota y coordenadas UTM entre medidas con estación total y GPS. Todas las diferencias están en metros y referidas al dato GPS del día 28/02/96