

S01 *Geodesia*
Geodesia
Geodesia
Geodesy

Chairpersons:

João Catalao

Juan Barrado Díaz

Manuela Vasconcelos

Rafael Quirós Donate

Aurkibidea/Índice/Índice/Index

Un análisis de las mejoras introducidas por EGNOS en el programa goGPS para el posicionamiento cinemático empleando receptores de bajo coste <i>An analysis of the improvements introduced by EGNOS into the software goGPS for cinematic positioning using low cost receivers</i>	5
A. Herrera, S. Caldera, M. C. de Lacy, E. Realini, M. Reguzzoni	
Medidas geodésicas de deformación en el Parque Nacional de Timanfaya <i>Geodetic deformation measurements in Timanfaya National Park</i>	7
Vélez, E., Arnosó, J., González Montesinos, F., Benavent, M., Vieira, R.	
Obtención del TEC y sus variaciones temporales a partir de diferentes redes de estaciones GNSS permanentes sobre la península ibérica <i>Obtaining the TEC and its temporal variations from different networks of permanent GNSS stations on the iberian peninsula</i>	11
Héctor Lamolda-Ordóñez, Abelardo Bethencourt-Fernández	
Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG) <i>Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG)</i>	17
Jaime Fraile Torrecilla, José Antonio Sánchez Sobrino, Juan Pablo Fernández Herreras	
Monitorización continua para el cálculo del enlace local GNSS-VLBI. <i>Continued Monitoring to calculate the local tie GNSS-VLBI</i>	21
Javier López-Ramasco, Álvaro Santamaría-Gómez, Abelardo Bethencourt Fernández, Susana García-Espada	
A Relação Entre as Coordenadas de Referência das Redes GNSS de Operação Contínua em Portugal Continental <i>The Relationship Between the Reference Coordinates of the CORS Networks in Portugal Mainland</i>	25
Torres, João Agria	
Ajuste de la Red Geodésica Española (ROI) en altitudes ortométricas <i>Adjustment of orthometric heights in the Spanish Geodetic Network (ROI)</i>	29
Jose Antonio Sánchez Sobrino, Miguel Angel Cano Villaverde, Antonio Barbadillo Fernández, Marcelino Valdés Pérez de Vargas	
El modelo combinado de geoide EGM2008-REDNAP. <i>The combined geoid model EGM2008-REDNAP</i>	35
Jose Antonio Sánchez Sobrino, Antonio Barbadillo Fernández, Adolfo Dalda Mourón	
Análisis de observaciones en nuevas estaciones de marea gravimétrica en España <i>Analysis of observations from new tidal gravimetry stations in Spain</i>	43
J. Arnosó, M. Benavent, F. G. Montesinos, M. S. Bos	
A aplicação do GNSS na medição do comportamento estático e dinâmico de grandes estruturas de engenharia civil e de fenómenos geofísicos <i>The GNSS applied to measure static and dynamic response of large civil engineering structures and geophysical phenomena</i>	47
José Nuno Lima, Sérgio Oliveira, Maria João Henriques, João Casaca	
El método de procesado PPP en el Centro de Análisis del IGN. <i>Testing of PPP processing method at the IGN Analysis Center</i>	51
Manel Pascual, Miguel Angel Cano, Marcelino Valdés, Pedro Gonzalo	

Análisis de estaciones permanentes GNSS en la península ibérica, proyecto IBERRED. <i>Analysis of GNSS permanent stations in Iberian Peninsula, IBERRED Project</i>	57
Marcelino Valdés, Miguel Ángel Cano, Manel Pascual, Laura García-Cañada	
Análisis armónico de las observaciones mareográficas en el Puerto de Pasaia <i>Harmonic analysis of the tide gauge observations in Pasaia Harbour</i>	65
M. Benavent, J. Zurutuza, E. J. Vélez, M. J. Sevilla	
Estudio de las Mareas Oceánicas en la Costa Este de Lanzarote (Islas Canarias). Aplicaciones Geodésicas. <i>Study of the Ocean Tides in the East Coast of Lanzarote (Canary Islands). Geodetic Applications</i>	69
Maite Benavent, José Arnos, Emilio J. Vélez, Fuensanta G. Montesinos	
Continuidad de las medidas del mareógrafo de Pasaia <i>Continuity of the Pasaia Tide Gauge measurements</i>	75
Miguel J. Sevilla, J. Zurutuza, A. Martín	
Aplicación PPP para la determinación de Posiciones y Velocidades <i>PPP Application for Positions and Velocity Estimations</i>	81
J. Zurutuza, Z. Agea, Miguel J. Sevilla, A. Martín, M. C. Ruiz	
Control vertical de la Falla activa de Balanegra a partir de perfiles de nivelación de alta precisión. <i>Vertical monitoring of the active Balanegra Fault from high-precision levelling profiles</i>	89
Borque, M.J., Marín-Lechado, C., Pedrera, A., Galindo, J., López Garrido, A. C., Adán, R., Gil, A.J.	
Control Geodésico de Deformaciones en la Falla de Baza a partir de mediciones GPS <i>Geodetic Deformation Monitoring of the Baza Fault from GPS</i>	93
Antonio J. Gil, Francisco J. García Tortosa, Pedro Alfaro, Jesús Galindo, Ángel Carlos López Garrido, María Clara de Lacy, Patricia Ruano, Antonio Pedrera, Carlos Sanz, María Jesús Borque, Juan A. Armenteros, Manuel Avilés	
Red GPS Topo-Iberia: Resultados Preliminares obtenidos en el Centro de Análisis de la UJA. <i>Topo-Iberia GPS Network: Preliminary Results at UJA Analysis Centre</i>	97
Antonio J. Gil, María Clara de Lacy, Antonio M. Ruiz, Juan A. Armenteros, Raquel Adán, Manuel Avilés, Federica Riguzzi, Roberto Devoti	
Control de deformaciones en el puerto de Málaga (sur de España) mediante series temporales de interferometría radar de satélite <i>Deformation monitoring in the port of Málaga (southern Spain) with SAR interferometry time series</i>	101
Antonio M. Ruiz, Joaquim J. Sousa, Miguel Caro, Antonio J. Gil, Ramon F. Hanssen, Zbigniew Perski, Jesús Galindo-Zaldívar, Carlos Sanz de Galdeano	
Evaluación del posicionamiento NRTK en la región fronteriza entre Andalucía (España) y Portugal utilizando las redes activas RAP y RENEP <i>Evaluation of NRTK positioning on the border region of Andalusia (Spain) and Portugal using the RAP and RENEP active networks</i>	105
Mª Selmira Garrido, Elena Giménez, Juan A. Armenteros, Mª Clara de Lacy, Antonio J. Gil	
Exactitud de un MDT obtenido a partir de datos LIDAR <i>Accuracy of a DTM obtained from LIDAR data</i>	109
Alejandro Martínez de Agirre, Borja Rodríguez, José Antonio Malpica	
Infraestructura Geodésica en Gipuzkoa: trabajos iniciales y estado actual. <i>Geodetic Infrastructure in Gipuzkoa: previous works and current state</i>	115
J. Zurutuza, Miguel J. Sevilla, M. C. Ruiz, Josemari Aranburu, Mikel Elorza, Faustino Gainzarain	

Un análisis de las mejoras introducidas por EGNOS en el programa goGPS para el posicionamiento cinemático empleando receptores de bajo coste

An analysis of the improvements introduced by EGNOS into the software goGPS for cinematic positioning using low cost receivers

A. Herrera⁽¹⁾, S. Caldera⁽²⁾, M. C. de Lacy⁽¹⁾, E. Realini⁽³⁾, M. Reguzzoni⁽⁴⁾

⁽¹⁾Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. España.

⁽²⁾GRd srl, spin-off de Politecnico di Milano, Italia

⁽³⁾RISH, Universidad de Kyoto, Japón

⁽⁴⁾DIAR, Politecnico di Milano, Italia

SUMMARY

goGPS is a free and open source navigation software that processes raw GPS data in differential mode with respect to a network of permanent stations and in stand-alone mode. It can use both code (C/A, P) and phase (L1, L2) measurements obtained from geodetic or low cost devices. goGPS applies a Kalman filter directly on the GPS observations, estimating a position at every epoch also by exploiting a dynamic model (constant velocity or acceleration). The positioning is optionally supported by route constraints (e.g. a railway). Moreover, it is possible to introduce into the filter an additional observation extracted from a digital terrain model (DTM) in order to increase accuracy in the vertical direction. In this work the ionospheric and pseudorange corrections provided by EGNOS have been introduced in the stand-alone module of the software. An analysis of the improvements reached in the presence of EGNOS have been studied from data acquired by low cost receiver u-blox AEK-4T.

1. INTRODUCCIÓN

goGPS es un software desarrollado por el Laboratorio de Geomática del Politécnico de Milán Campus de Como. Está diseñado específicamente para mejorar la exactitud del posicionamiento de receptores GPS de bajo coste en tiempo real. goGPS puede trabajar en modo absoluto o relativo. En el último caso aplica un filtro de Kalman a las dobles diferencias de fase, recibiendo los datos del receptor de bajo coste a través de un puerto COM y de una estación permanente a través de Internet por medio del protocolo NTRIP. goGPS puede también utilizar datos de un MDT, si están disponibles, para mejorar la exactitud de la componente vertical. goGPS está desarrollado en un entorno de MATLAB y en las pruebas realizadas dentro de la tesis doctoral de Realini (2009) se obtuvieron las siguientes conclusiones: en algunos casos la exactitud del posicionamiento obtenida con instrumentos de bajo coste fue del mismo orden de magnitud que la proporcionada por receptores monofrecuencia profesionales (Leica GS20) además goGPS permitió obtener mejoras en la exactitud proporcionada por instrumentos de bajo coste, en concreto aplicando posicionamiento relativo en tiempo real y técnicas de filtrado de Kalman se mejoró la exactitud de 2-4 m a pocos decímetros. Se puede encontrar más información en: <http://www.gogps-project.org/>.

Es importante reseñar que goGPS se actualiza periódicamente introduciendo las mejoras que aparecen en los sistemas GNSS. En particular en este trabajo se presenta la parte de SBAS (Space-Based Augmentation System) introducida recientemente en el programa junto con los primeros resultados obtenidos. Así pues, se ha añadido dentro de este software el módulo correspondiente a la inclusión de las correcciones ionosféricas y de pseudodistancias proporcionadas por los satélites de EGNOS y se analizan las mejoras introducidas por la presencia de EGNOS en el posicionamiento stand-alone.

2. SISTEMA DE AUMENTACIÓN BASADO EN SATÉLITES: EGNOS

Recientemente la Agencia Espacial Europea (ESA) ha financiado la puesta en marcha del sistema de aumentación europeo EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*):

- EGNOS Open Service está disponible desde: 1 de octubre de 2009
- EGNOS Safety of Life está disponible desde: 2 de marzo de 2011

Esta señal EGNOS es transmitida por tres satélites geostacionarios: dos satélites Inmarsat-3 y el satélite Artemis ESA. En las estaciones de tierra se procesan las señales y las envían a los satélites. El sofisticado segmento terrestre consiste en: 34 RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*), 4 centros de control y 6 estaciones de envío (<http://www.egnos-pro.esa.int/publication.html>).

La señal emitida por los satélites EGNOS aporta información sobre la posición de cada satélite GPS, la precisión de sus relojes atómicos y sobre el efecto ionosférico. En la Tabla 1 se muestran las mejoras introducidas al utilizar GPS+EGNOS en el modelado de las distintas componentes del error total que afectan al posicionamiento GPS en condiciones medias (Esa 2009).

Tabla 1 – Errores GPS-EGNOS: Órdenes de magnitud típicos.
(*GPS-EGNOS error: Typical order of magnitude.*)

Tipo de error	GPS	EGNOS
Órbitas y sincronización de reloj	1 m	0.5 m
Error troposférico	0.25 m	0.25 m
Error ionosférico	2 m	0.3 m
Ruido del receptor	0.5 m	0.5 m
Multipath	0.2 m	0.2 m
UERE (Suma cuadrática de los errores – 1σ)	2.31 m	0.83 m
HDOP (función de la geometría de los satélites visibles)	1.1 m	1.1 m
Error de exactitud en el posicionamiento horizontal (1σ) = UERE x HDOP	2.54 m	0.92 m
Error de exactitud en el posicionamiento horizontal (2σ , 95%)	5.08 m	1.84 m

3. POSICIONAMIENTO ABSOLUTO CON CÓDIGOS

Se entiende por posicionamiento GPS absoluto de un receptor, la determinación de sus coordenadas y del offset del reloj del receptor a partir de observaciones de esta constelación de satélites. En el caso de receptores de bajo coste este tipo de posicionamiento se realiza con observaciones de código o pseudodistancia siendo la ecuación de observación la siguiente (Biagi 2009):

$$P_R^S(t) + v_p = \rho_R^S(t) + c(dt_R(t) - dt^S(t)) + I_R^S + T_R^S \quad (1)$$

Donde:

$P_R^S(t)$ es la observación de pseudodistancia o código.

v_p es el error aleatorio de la observación de código.

$\rho_R^S(t)$ es la distancia geométrica entre receptor y satélite.

c es la velocidad de la luz.

$dt_R(t)$ y $dt^S(t)$ son los términos asociados a los efectos del offset del oscilador del receptor y satélite respectivamente.

I_R^S y T_R^S representan el retardo ionosférico y troposférico respectivamente.

Para realizar este posicionamiento es necesario disponer de por lo menos observaciones a cuatro satélites en la misma época. Si se estaciona el receptor durante un tiempo habremos de estimar las coordenadas del mismo y un offset del reloj del receptor para cada época, ya que no puede ser considerado constante. A partir de la señal emitida por los satélites EGNOS se puede obtener tanto el valor de la componente del efecto ionosférico como una corrección a la pseudodistancia calculada a partir de la información sobre la posición de cada satélite GPS y de la precisión de sus relojes atómicos. Así, es posible estimar la posición del receptor en cada época utilizando receptores de bajo coste que reciben solamente una frecuencia, como por ejemplo u-blox AEK-4T (<http://www.u-blox.com/>).

El módulo correspondiente a la introducción de la información proporcionada por EGNOS ha sido añadido dentro del software goGPS y los primeros resultados obtenidos se presentan en el siguiente apartado.



Figura 1 – Lugar del experimento: Como, Italia. (Site Map: Como, Italy.)

4. TEST: COMO (ITALIA)

El análisis de las mejoras introducidas por EGNOS en el posicionamiento absoluto se ha evaluado con un experimento en la terraza del Politécnico de Milán, campus de Como (Figura 1). Para ello, primero se obtienen coordenadas precisas del lugar donde se realiza el test mediante RTK. Posteriormente, en ese lugar, se coloca el receptor de bajo coste u-blox AEK-4T (U-blox 2008) conectado al software goGPS y se realizan medidas durante diez minutos.

Para evaluar la mejora, se calcula con goGPS la posición del receptor en cada época con correcciones EGNOS y sin ellas, aplicando una aproximación mínimo cuadrática clásica con la ecuación de observación (1). Los resultados obtenidos junto con los proporcionados por el receptor u-blox se presentan en la Figura 2. En esta Figura se puede observar como la nube de puntos obtenida a partir de las coordenadas calculadas con goGPS utilizando GPS y EGNOS están más próximas a las coordenadas precisas del lugar que

las obtenidas utilizando sólo GPS. Si consideramos las soluciones proporcionadas por u-blox, la solución GPS+EGNOS sigue siendo más próximas a la solución RTK que las coordenadas obtenidas sólo con GPS. Además, las coordenadas calculadas con goGPS utilizando GPS y EGNOS siguen estando más próximas a las coordenadas precisas del lugar que las obtenidas por el software interno del receptor de bajo coste. Se puede notar que la nube de puntos obtenida mediante el software interno del receptor de bajo coste es menos dispersa que en los otros casos debido a que el receptor de bajo coste utiliza el Filtro de Kalman en el cálculo de la posición. Puede también apreciarse un sesgo de las posiciones del u-blox respecto a la posición RTK.

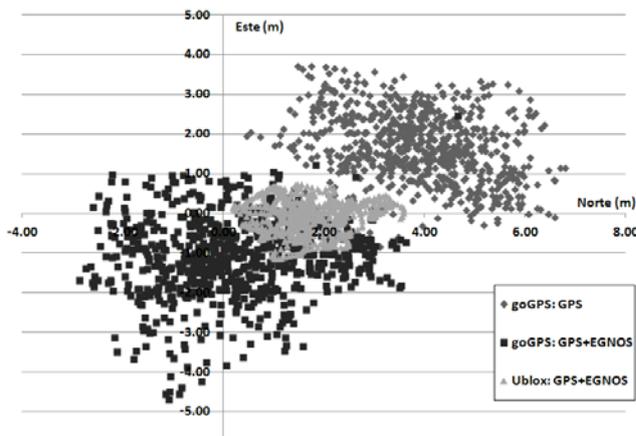


Figura 2 – Coordenadas obtenidas mediante cada método. (Coordinates obtained by each method.)

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha estudiado las mejoras introducidas al considerar EGNOS en posicionamiento absoluto en tiempo real con receptores de bajo coste. Para ello se ha añadido al software goGPS el módulo correspondiente a la introducción de las correcciones enviadas por EGNOS y se ha realizado una primera prueba. De esta prueba se deduce que efectivamente considerar GPS junto con EGNOS mejora la exactitud de la posición estimada. En un futuro próximo se realizarán más pruebas en distintos escenarios para contrastar los distintos resultados.

Además, próximamente se pretende implementar el módulo correspondiente para aplicar las correcciones ionosféricas y de pseudodistancias enviadas por EGNOS en el Filtro de Kalman implementado en el programa goGPS. También se van a introducir los satélites GLONASS en el cálculo de la posición del receptor, y se espera que mejore la estimación de la posición.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro de un proyecto financiado por el ministerio de economía y competitividad con título “Nuevos algoritmos para el futuro sistema GNSS multifrecuencia” (AYA2008-02948).

7. REFERENCIAS

- Biagi L (2009). I fondamentali del GPS. Geomatic Workbooks, Vol. 8. ISSN 1591-092X
- Esa (2009). User guide for EGNOS application developers. ED. 1.1, 07/30/2009
- Realini E (2009). goGPS free and constrained realtive positioning with low cost receivers. Tesis de doctorado. Politécnico de Milán.
- U-blox (2008). NMEA, UBX Protocol Specification. GPS.G5-X-07036-D

Medidas geodésicas de deformación en el Parque Nacional de Timanfaya *Geodetic deformation measurements in Timanfaya National Park*

Vélez, E.^(1,3), Arnosó, J.^(1,3), González Montesinos, F.^(2,3), Benavent, M.^(2,3) y Vieira, R.⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto de Geociencias (CSIC,UCM) Facultad de Matemáticas UCM. Pza. de Ciencias, 3, 28040, Madrid, emilio.velez@csic.es

⁽²⁾Secc. Departamental de Astronomía y Geodesia. Facultad de Matemáticas UCM. Pza. de Ciencias, 3, 28040, Madrid.

⁽³⁾Grupo de Investigación UCM “Geodesia”. Facultad de Matemáticas UCM.

SUMMARY

The observation and study of deformations in the Earth's crust is of great importance to investigate seismic/volcanic precursors and local tectonics movements in geodynamical active areas. From 1992, as a consequence of the research projects developed in the Lanzarote Geodynamics Laboratory (LGL), continuous deformations measurements have been done using different kinds of tilt and strain meters. Among objectives in the analysis of these data are the study of disturbance effects, mainly of atmospheric and oceanic origin, and the most accurate modelling of the long-term trends present in the residual signal, which could mask deformations caused by seismic or volcanic activity. Here, we show, the results of the analysis of 15 years of continuous strain measurements made in Timanfaya National Park, where is located part of the structure of LGL.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo abordamos el estudio de una serie temporal de 15 años de registro de dos extensómetros instalados en el Parque Nacional de Timanfaya, en un área de especial interés por la presencia de anomalías geotérmicas (Araña, et. al,1973; Albert et al., 1994). Como veremos, este tipo de observaciones está fuertemente afectado por las variaciones de temperatura del aire, entre otros efectos perturbadores de origen atmosférico y oceánico. Por tanto, uno de los objetivos que nos hemos planteado ha sido la estimación y eliminación de este efecto en la señal observada.

Para resolverlo, hemos aplicado un modelo de regresión en el que planteamos una relación lineal con la temperatura y con una serie de polinomios que representan otros efectos de largo periodo asociados a perturbaciones atmosféricas (variaciones de presión del aire), oceánicas e instrumentales. Este modelo de regresión incluye también la determinación de un conjunto de parámetros no lineales que se estiman a partir de criterios estadísticos (Venedikov et al., 2006). Este proceso resulta fundamental para poder interpretar otros fenómenos de deformación ocasionada, por ejemplo, por actividad sísmica y/o volcánica que podría haber quedado enmascarada en la señal residual.

Esta metodología de análisis ha sido aplicada para estudiar un efecto que, desde el año 2004, hemos observado en el laboratorio de Timanfaya, y que ha supuesto un aumento progresivo de la temperatura en torno a los 20 °C. De esta manera, hemos podido cuantificar su influencia sobre las observaciones y eliminar su efecto, abriendo una nueva línea de investigación sobre el origen de este aumento de la temperatura y su evolución.

2. EL LABORATORIO DE GEODINÁMICA DE LANZAROTE

Desde el año 1987, nuestro grupo de investigación viene desarrollando diferentes líneas de investigación en la isla de Lanzarote que han dado como consecuencia la creación y desarrollo, en colaboración con el Cabildo Insular, de lo que hoy en día denominamos el *Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote* (Vieira et al., 2006). El LGL es un laboratorio multidisciplinar de investigación, sustentado en el concepto de Lanzarote como un *Laboratorio Natural*, donde poder llevar a cabo estudios y experiencias con el objeto de estudiar y profundizar en el origen, estado y evolución de las Canarias y, en particular, de Lanzarote, así como de investigar diferentes técnicas de observación geodinámica en zonas activas.

En la actualidad, el LGL cuenta con lo que denominamos tres *Módulos de Observación Permanente*, situados en la Cueva de los Verdes, los Jameos del Agua (ambos en la zona norte, en un tubo volcánico del volcán La Corona) y, el tercero, en el Parque Nacional de Timanfaya. Cada uno de los módulos está acondicionado de

acuerdo con las posibilidades, infraestructura y objetivos de la investigación que se desarrollan. El *Centro de Recepción de Datos* se ubica en las instalaciones de la Casa de los Volcanes del Cabildo de Lanzarote (también en los Jameos), desde donde los datos son enviados a Madrid para el análisis.

Además, diferentes redes geodésicas y geofísicas de medidas, distribuidas por la isla, complementan las observaciones.

Parque Nacional de Timanfaya

En el caso concreto del módulo de observación (TIM) situado en el Parque Nacional de Timanfaya, éste se encuentra ubicado en el entorno de una anomalía térmica superficial asociada a la existencia de fracturas que permiten la salida de flujo térmico a alta temperatura, fruto de la existencia de una cámara magmática residual de la erupción del siglo XVIII (1730-1736) y donde, a pocos centímetros, podemos tener temperaturas superiores a 200 °C (Albert et al., 1994).

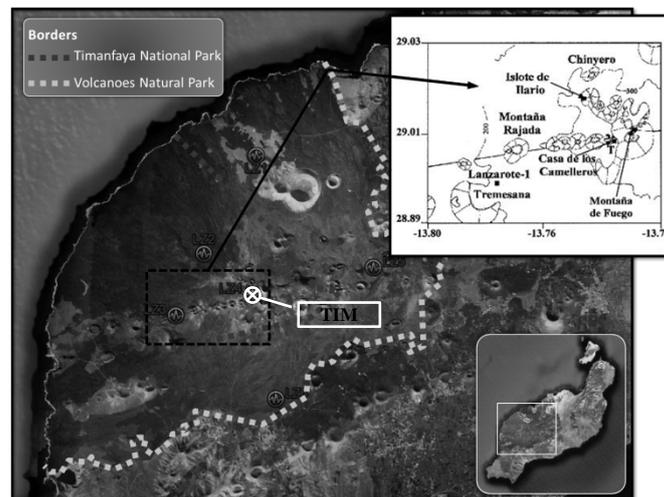


Figura 1 – Mapa del Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote), mostrando la localización del módulo TIM y la distribución de las anomalías geotérmicas.

(Map of National Park of Timanfaya (Lanzarote), showing the location of station TIM as well as the distribution of geothermal anomalies within this area.)

La mayor parte del laboratorio se sitúa en el interior de un edificio subterráneo en las proximidades del volcán Timanfaya y que se oculta a la vista de los visitantes por medio de un cráter artificial. Este edificio, denominado la Casa de los Camelleros, está compuesto por un patio central abierto y dos salas laterales, comunicadas con una galería. Las salas se han acondicionado para la instalación de diferentes equipos científicos y, en la actualidad, cuenta con más de 20 instrumentos, entre gravímetros, clinómetros (de corta y larga

base), extensómetros, equipos para la medida de gases, parámetros meteorológicos, etc.

A unos 100 m de la Casa de los Camelleros existe un área, al aire libre, donde se llevaron a cabo diferentes sondeos para el estudio del aprovechamiento energético de las anomalías térmicas presentes en el marco del Programa JOULE de la CEE (JOUG-004 (ES), 1992). Estos sondeos, hasta 4 y entubados en sus primeros metros, han sido instrumentalizados con termómetros a diferentes profundidades para medir la variación y evolución de la temperatura.

3. INSTRUMENTACIÓN

Entre las muchas colaboraciones científico-técnicas que se mantienen en el LGL, desde el año 1991 destaca la establecida con el Instituto de Sismología de Wuhan (ISW), dependiente del China Earthquake Administration (ChEA), para el desarrollo de tecnología e instrumentación aplicada a investigaciones en geodinámica. Esta colaboración ha sido financiada, principalmente, a través de la AEIC (Vélez et al., 2004). En ella, el LGL ha venido siendo el lugar de prueba, en condiciones reales de observación de los equipos de observación geodésica y geofísica desarrollados. Así, desde el año 1992 en el que se instalaron los primeros clinómetros de larga base (tipo water tube) y extensómetros en la Cueva de los Verdes, se han instalado en el LGL hasta 20 sensores, entre clinómetros, extensómetros, termómetros y barómetros. En concreto, en Timanfaya se instaló el primer set de instrumentos, compuesto por un clinómetro, un extensómetro y dos termómetros, en el año 1996 y en el año 1999 el segundo set, complementario al anterior.

Los dos extensómetros horizontales instalados en Timanfaya consisten en varios tubos de cerámica, de 1 m de longitud, ensamblados con una resina especial, y que tienen uno de los extremos fijos al pilar y el otro extremo libre, en el cual se sitúa un sensor magnético que mide el desplazamiento de la barra. La horizontalidad del instrumento se consigue a través de una suspensión de doble hilo montada en unos arcos fijos a cada uno de los pilares intermedios entre los dos extremos. La longitud de los extensómetros es de 4 y 11 m, respectivamente, y su resolución es de 10^{-8} unidades de extensión. El primero de ellos (CE557) está instalado con un acimut de 42.8°N y el segundo (CE775) ortogonal al primero, por tanto con un acimut de 132.8°N . Cada extensómetro viene provisto de un tornillo micrométrico, con resolución 0.1 mm, en el extremo fijo que permite realizar correcciones de deriva y calibraciones periódicas del instrumento (Arnosó, 1996; Tan et al., 2001; Vélez et al., 2001).

4. DEFORMACIÓN OBSERVADA

En la figura 2 se muestra el registro completo del extensómetro CE557. Podemos ver la deformación registrada y en el que, por ejemplo, podemos apreciar claramente variaciones anuales dentro de una tendencia general no constante a lo largo de todo el registro. Para todo este periodo hemos determinado una tasa de desplazamiento de $-44 \mu\text{m/año}$. Hemos dividido el periodo de observación en tres intervalos P1, P2 y P3. El primer intervalo lo hemos hecho coincidir con la primera parte de la gráfica, en la que se aprecia un fenómeno de contracción progresiva a lo largo de 4-5 años. El segundo intervalo lo hemos hecho coincidir con el periodo de evolución anómala de la temperatura (ver figura 3). Y el tercero con un periodo, aparentemente, algo menos perturbado. Para cada uno de estos intervalos hemos determinado una tasa de desplazamiento de $-105 \mu\text{m/año}$, $+89 \mu\text{m/año}$ y $+27 \mu\text{m/año}$ respectivamente (Arnosó et al., 2012)

De igual forma, para el extensómetro CE755 (figura 3), situado en una dirección ortogonal al anterior, hemos determinado una tasa de deformación para todo el periodo (el registro se inicia en el año 1999) de $+218 \mu\text{m/año}$. También hemos dividido el periodo en tres intervalos P1, P2 y P3. El primero coincide con el primer año de registro, en el que se puede apreciar una pendiente muy pronunciada, probablemente debida al ajuste de los pilares después de su construcción. Como puede apreciarse en la gráfica inferior de la figura 3, a partir del año 2004 comenzamos a registrar un incremento

de la temperatura en el laboratorio, de forma progresiva, pasando de los $21-22^{\circ}\text{C}$ de media anual a unos 40°C actualmente, con máximos de más de 50°C en algunas zonas del laboratorio. En los últimos dos años, la temperatura parece que tiende a estabilizarse, aunque de momento no hemos apreciado un descenso que nos lleve a los valores iniciales. Los otros dos periodos, P2 y P3 en el registro del extensómetro, se han escogido en función de la evolución anómala de la temperatura registrada. Para estos tres intervalos hemos determinado una tasa de deformación de $-1327 \mu\text{m/año}$ para el primer periodo (fuertemente marcado por esa deriva inicial), $+333 \mu\text{m/año}$ y $-95 \mu\text{m/año}$.

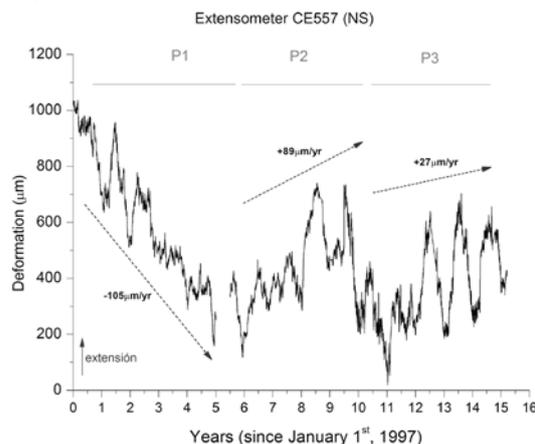


Figura 2 – Valores horarios de deformación observada por el extensómetro CE557 (eliminado el efecto diurno de temperatura). El eje X está referido a 1 de enero de 1997, con intervalos de un año. Se indican las tasas de deformación calculadas para cada periodo considerado. (Hourly values of deformation (diurnal air temperature effect removed) observed with strainmeter CE557 (NS). The origin of X-axis is 1997 January 1st, yearly spaced. Deformation rates are indicated)

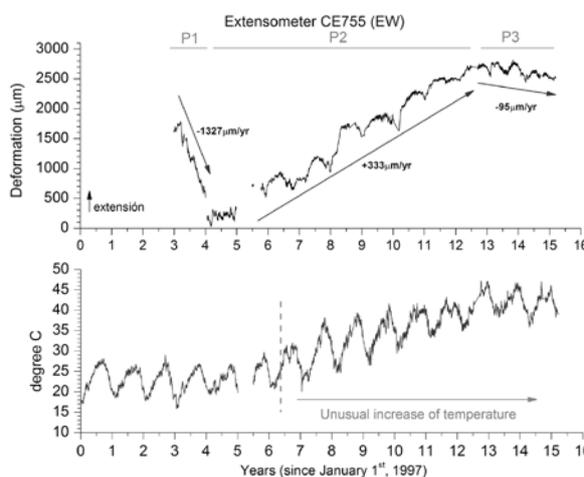


Figura 3 – (Arriba) Valores horarios de deformación observada por el extensómetro CE755 (eliminado el efecto diurno de temperatura). El eje X está referido a 1 de enero de 1997, con intervalos de un año. Se indican las tasas de deformación calculadas para cada periodo considerado. (Abajo) Temperatura del aire observada en el interior de la galería donde está instalado el extensómetro. ((Top) Hourly values of deformation (diurnal air temperature effect removed) observed with strainmeter CE755 (EW). The origin of X-axis is 1997 January 1st, yearly spaced. Deformation rates are indicated. (Bottom) Air temperature recorded inside the gallery where the strainmeter is installed.)

5. MODELIZACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS MEDIDAS DE DEFORMACIÓN

A la vista de las gráficas de deformación y temperatura, y con el fin de eliminar este efecto de las observaciones, hemos aplicado un

modelo de regresión, el cual considera una relación lineal con la temperatura más un polinomio dependiente del tiempo (Venedikov et al., 2006), del siguiente modo:

$$S(t) = E_T(t) + P(t); t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad (1)$$

La señal de deformación $S(t)$ tiene una componente de deformación inducida por la temperatura $E_T(t)$ que queremos cuantificar. Este efecto de deformación inducida lo expresamos en función de un coeficiente de regresión R , y un desfase temporal, Δt , del efecto de la temperatura sobre la señal de deformación, según la siguiente expresión:

$$E_T(t) = R(T(t - \Delta t) - T_{mean}) \quad (2)$$

Los polinomios $P(t)$ representan el modelo de deriva, que incluye otros efectos geofísicos e instrumentales. Así, $P(t)$ lo expresamos como un sumatorio de coeficientes c_k , siendo t_0 la época central del intervalo considerado.

$$P(t) = \sum_{k=0}^m c_k (t - t_0)^k; i = 1, 2, \dots, s \quad (3)$$

Sustituyendo las expresiones de $E_T(t)$ y $P(t)$ en $S(t)$ tenemos un sistema de n ecuaciones, donde para cada intervalo considerado, las incógnitas son el coeficiente de regresión R y los coeficientes del polinomio de deriva c_k , que resolvemos por el método de mínimos cuadrados. Debemos tener en cuenta que el sistema no es linealmente dependiente de las incógnitas. Podemos ir variando tanto Δt como el grado m del polinomio de deriva en la búsqueda de un mejor ajuste. Para seleccionar el valor que mejor ajusta al modelo propuesto, utilizamos el criterio de Akaike (AIC) basado en el principio de máxima verosimilitud (Sakamoto et al., 1986).

Los valores que hemos obtenido para R , considerando el periodo completo y para cada intervalo, se muestran en la tabla 1. Para el caso de considerar todo el periodo completo, el valor obtenido para ambos extensómetros es similar ($15.0 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ frente a $-11.3 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$) aunque de signo opuesto. Vemos también que para los dos últimos periodos los valores obtenidos son muy parecidos y, por el contrario, en el caso del periodo inicial considerado en cada extensómetro, el valor difiere más, probablemente por el efecto del asentamiento de los pilares que ya hemos comentado en el caso del CE755.

Tabla 1 – Valores obtenidos del coeficiente de regresión R para ambos extensómetros según el intervalo considerado (Values of the coefficient R for both strainmeters in function of the interval considered)

Periodo	EXTCE557 (NS) ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)	EXTCE775 (EW) ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
P (completo)	-11.3 ± 0.3	15.0 ± 0.3
P_1	-5.3 ± 0.2	-8.3 ± 0.8
P_2	-14.8 ± 0.2	14.0 ± 0.3
P_3	-15.2 ± 0.2	15.0 ± 0.3

En las figuras 4 y 5 hemos representado la deriva residual ajustada de cada extensómetro, una vez eliminada la marea de extensión (en caso de registrarse) y el efecto diario de la temperatura del aire (gráfica superior), así como la deformación reducida del efecto de la temperatura (gráfica inferior), considerando un único coeficiente de regresión R para el periodo completo de registro y un polinomio de grado 9, obtenido a partir del modelo expuesto para $\Delta t = 0$.

El análisis de esta última curva que representa la deformación reducida del efecto de temperatura, es la que puede proporcionar información útil, por ejemplo, para predicción volcánica o estudio de actividad sísmica, teniendo en cuenta, en cada caso, los distintos efectos perturbadores que afectarían a la señal.

6. CONCLUSIONES

El nivel de precisión que requiere la detección de señales anómalas en este tipo de observaciones, exige el análisis detallado de cualquier efecto que perturbe la señal registrada. En el caso de las

medidas de deformación realizadas con extensómetros, el efecto de la temperatura es de gran importancia.

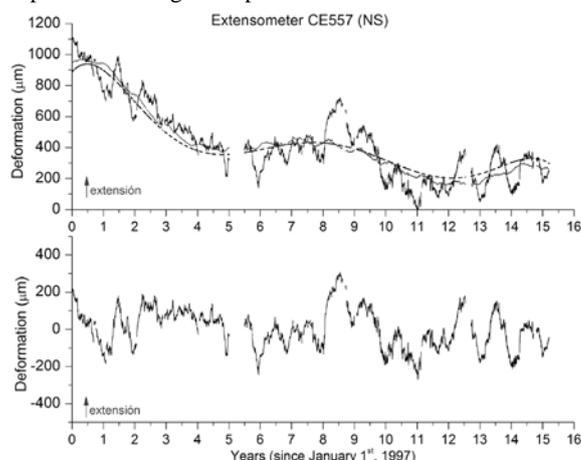


Figura 4 – (Arriba) Curva ajustada (línea fina) para la componente de largo periodo del extensómetro CE557 (línea gruesa). La línea discontinua representa el polinomio ajustado a partir del modelo dado por la ecuación (1), considerando un único coeficiente de regresión R para todo el periodo de observación. (Abajo) Curva de deformación reducida, libre del efecto térmico (no se han considerado otros efectos). ((Top) Adjusted curve (thin curve) for the long-term component of strainmeter CE557 (thick curve). The dashed line represents the polynomial adjusted on the model given for equation (1), when a unique regression coefficient R is considered for all period of observation. (Bottom) Reduced component of the strainmeter, free of the air temperature effect (other disturbing effects are not considered here).)

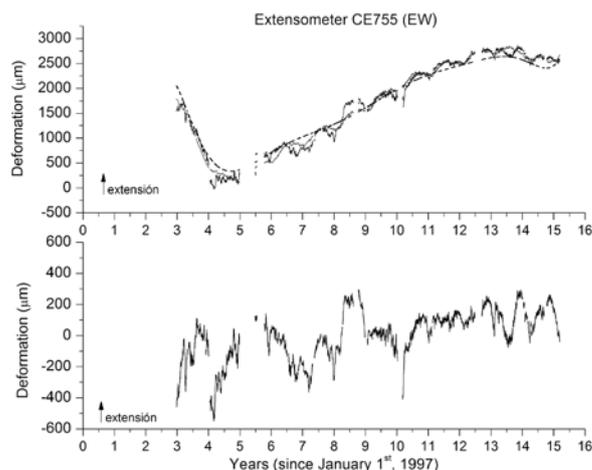


Figura 5 – (Arriba) Curva ajustada (línea fina) para la componente de largo periodo del extensómetro CE775 (línea gruesa). La línea discontinua representa el polinomio ajustado a partir del modelo dado por la ecuación (1), considerando un único coeficiente de regresión R para todo el periodo de observación. (Abajo) Curva de deformación reducida, libre del efecto térmico (no se han considerado otros efectos). ((Top) Adjusted curve (thin curve) for the long-term component of strainmeter CE775 (thick curve). The dashed line represents the polynomial adjusted on the model given for equation (1), when a unique regression coefficient R is considered for all period of observation. (Bottom) Reduced component of the strainmeter, free of the air temperature effect (other disturbing effects are not considered here).)

Con el fin de realizar un estudio de este tipo de perturbaciones en los datos de deformación, hemos llevado a cabo el análisis de los registros de los extensómetros instalados en el módulo de observación de Timanfaya del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote, situado en un área en el que destaca la presencia de anomalías geotérmicas como resultado del proceso eruptivo que sufrió la isla en el siglo XVIII. A partir de este análisis, hemos obtenido las tasas de deformación para ambos extensómetros, con unos valores de $-44 \mu\text{m}/\text{año}$ y $+218 \mu\text{m}/\text{año}$, respectivamente, aunque no de forma constante durante todo el periodo de observación.

Desde el año 2004 hemos observado un incremento anormal de la temperatura en el interior del laboratorio, del orden de 20 °C en 6 años. Es probable que se deba al desplazamiento de la anomalía geotérmica presente en la zona y que ha afectado a las observaciones realizadas. Para poder extraer de la señal observada la deformación inducida por esta variación de temperatura y cuantificar dicho efecto, hemos planteado el modelo (1) para ambos extensómetros. Los coeficientes de regresión obtenidos para todo el periodo de observación considerado son bastante similares (tabla 1) para ambos extensómetros, aunque de signos opuestos debido a las direcciones ortogonales en las que están instalados. El análisis más detallado en diferentes periodos de tiempo proporciona resultados también similares, salvo durante el primer periodo considerado P_1 , donde se observa, en el caso del extensómetro CE775, una fuerte deriva provocada por el asentamiento de los pilares después de su construcción.

Finalmente, hemos obtenido las curvas de deformación una vez eliminado el efecto de la temperatura. Estas curvas, una vez corregidas de otros efectos perturbadores, son de gran utilidad para las investigaciones de vigilancia volcánica o sísmica.

Como siguiente paso, y con el fin de investigar la causa de este aumento de la temperatura, se pretende complementar los resultados obtenidos con el estudio de otras medidas de deformación registradas en Timanfaya mediante, por ejemplo, los clinómetros instalados en el laboratorio, con el registro de gases, así como el seguimiento de la evolución de la anomalía térmica.

7. AGRADECIMIENTOS

Estas investigaciones han venido siendo financiadas por los diferentes proyectos de investigación, obtenidos por el grupo investigador, que se han venido desarrollado en el LGL desde 1987.

Este trabajo ha sido financiado con los proyectos *CGL2007-65110*, subvencionado por Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Plan Nacional I+D+i; *VULCMAC I y II*, subvencionado por la Unión Europea a través de la convocatoria INTERREG III-B; *320-2011*, subvencionado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales a través de la convocatoria de realización de Proyectos de Investigación en la Red de Parques Nacionales.

De forma general queremos agradecer a todas las Instituciones, Científicas y Técnicas, nacionales y extranjeras, que vienen participando en el desarrollo del LGL. Muy especialmente, al personal de la Casa de los Volcanes del Cabildo de Lanzarote, por su dedicación diaria en el mantenimiento de la instrumentación del Laboratorio, y a la Dirección y personal del Parque Nacional de Timanfaya por su apoyo y colaboración.

8. REFERENCIAS

- Albert, J. F., Díez Gil, J. L., Valentin, M^a A. and Torres, F. (1994): "Evaluación de las anomalías geotérmicas de Lanzarote". *Serie Casa de los Volcanes*, **3**, 41-60. ISBN: 84-87021-19-0
- Araña, V., Ortíz, R. and Yuguero, J. (1973): "Thermal anomalies in Lanzarote (Canary Islands)". *Geothermics*, **2**, 2, 73-75.
- Arnosó, J. (1996): "Modelización y evaluación de efectos indirectos sobre las mareas terrestres en el área de las Islas Canarias". *PhD*, Universidad Complutense de Madrid, 148 pp.
- Arnosó, J., Vélez, E., Soler, V., Montesinos, FG. and Benavent, M. (2012): "The Lanzarote Geodynamic Laboratory: new capabilities for monitoring volcanic activity at Canary Islands". *Geophysical Research Abstracts*, **14**, EGU2012-10054.
- Sakamoto, Y., Ishiguro, M. and Kitagawa, G. (1986): "Akaike Information Criterion Statistics". *D. Reidel Publishing Company*, Tokyo, 290 pp.
- Tan Shiling, Vieira, R., Cai Weixin and Arnoso, J. (2001): "Observation technology and instrument applied in the crust deformation field on heat flow at Lanzarote (Spain)". *International Training Workshop on Earth science hazard engineering safety dynamic movement monitoring technology and prediction methods*. Wuhan, October, 12-25., 32-47 pp.
- Vélez, E., Vieira, R., Arnoso, J., Cai Weixin, Jiang Jun and Tan Shiling (2001): "Tidal and non-tidal observations in a colcano active region. Review of the cooperation between Spain and P. R. China in the Geodynamic Laboratory of Lanzarote". *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 1, 488-493.
- Venedikov, AP., Arnoso, J., Cai Weixin, Vieira, R., Tan Shiling and Vélez, EJ (2006): "Separation of the long-term thermal effects from the strain measurements in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote". *Journal of Geodynamics*, **41**, 213-220 pp.
- Vieira, R. and Vélez, E. (2006): "Guía del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote". *Publicaciones del Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM)*, **201**, 66 pp. ISSN:0213-6198.

Obtención del TEC y sus variaciones temporales a partir de diferentes redes de estaciones GNSS permanentes sobre la península ibérica

Obtaining the TEC and its temporal variations from different networks of permanent GNSS stations on the iberian peninsula

Héctor Lamolda Ordóñez⁽¹⁾ y Abelardo Bethencourt Fernández⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Madrid, ETSITGC, Campus Sur, Autovía de Valencia km 7, 28031, Madrid

SUMMARY

In this paper we have collected and standardized the data from different networks of GNSS permanent stations on the iberian peninsula in order to analyze the Total Electron Content (TEC) of the ionosphere. We have obtained a Regional Ionosphere Map (RIM) of higher spatial and temporal resolution than the Global Ionospheric Map (GIM), which are calculated and published from global GNSS observations by international organizations. It has also been analyzed the receptor's instrumental biases using mathematical techniques of least squares adjustment.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se muestran los resultados de los trabajos iniciales realizados para el estudio automatizado de los Mapas Ionosféricos Regionales. Se han puesto en marcha los procedimientos para la recopilación automática de los datos procedentes de las diferentes redes, nacionales y regionales, de estaciones permanentes GNSS peninsulares, se han desarrollado los algoritmos de tratamiento de estos datos con la finalidad de obtener un Mapa Ionosférico Regional y por último se han comparado estos Mapas Ionosféricos Regionales con los Mapas Ionosféricos Globales.

2. OBJETIVOS

El primer objetivo de este trabajo es crear un sistema automatizado de adquisición y homogeneización de datos RINEX provenientes de las redes GNSS permanentes disponibles sobre la península ibérica. De esta forma se consigue el requisito previo para el procesamiento de este trabajo y el de otros futuros siendo una herramienta indispensable.

El segundo objetivo es, a partir de estos datos RINEX, la obtención de un Mapa Ionosférico Regional mediante el cálculo del TEC (Total Electron Content) durante el mes de abril de 2012, y su comparación con Mapas Ionosféricos Globales elaborados por organismos internacionales como el IGS.

3. METODOLOGÍA

Adquisición de datos

La primera tarea a realizar en cuanto a la adquisición de datos fue la de programar el acceso directo a las redes de estaciones permanentes, para lo cual hemos partido del trabajo de Berné y Olivares (2011).

Sin embargo se encontraron varios problemas, ya que no todos los organismos que gestionan las redes disponen de un servidor ftp público de acceso a datos, sino que implantan una aplicación web de descarga manual que impide la automatización. En otros casos no se obtuvo respuesta para el empleo del servicio de ftp privado.

Aún más, existen regiones como es el caso de Castilla - La Mancha, donde no existe ninguna red permanente como puede observarse en la Figura 1.



Figura 1 – Estaciones GNSS permanentes empleadas. (GNSS permanent stations used.)

En cuanto a la homogeneización, existen dificultades provenientes del hecho de que la estructura de carpetas de los servidores ftp no está normalizada por lo que se ha de programar el acceso a cada red individualmente. Esta situación se repite si atendemos al método de compresión, adoptando cada red el sistema que considera. Hay redes que no distribuyen los datos RINEX diarios con observaciones cada 30 segundos, lo que obliga a descargar datos horarios, con un notable aumento de tiempo, y a un muestreo posterior.

En la Tabla 1 se muestran las 14 redes GNSS permanentes utilizadas en este trabajo.

Tabla 1 – Redes GNSS empleadas. (GNSS networks used.)

Red GNSS	Ámbito	Acceso
IGN	España	ftp.geodesia.ign.es
IGP	Portugal	ftp.igeo.pt
ITACYL	Castilla y León	ftp.itacyl.es
RAP	Andalucía	rap.uca.es
CATNET	Cataluña	geofons.icc.cat
GALNET	Galicia	ftp.galnet.com.es
REP	Extremadura	rep-gnss.es
ARAGEA	Aragón	gnss.aragon.es
ERVA	Valencia	icvficheros.icv.gva.es
MERISTEMUM	Murcia	meristemum.carm.es
RGAN	Navarra	ftp.rgan.navarra.es
Red GNSS de Cantabria	Cantabria	ftpgnss.digteg.unican.es
Red GNSS de Euskadi	País Vasco	gps2.euskadi.net
Red GNSS de La Rioja	La Rioja	ftp.larioja.org

Se obtuvieron los datos RINEX diarios con observaciones cada 30 segundos para las estaciones disponibles durante el mes de abril

de 2012. Cabe señalar que, en algunos casos se da el mismo nombre a estaciones de redes distintas por lo que nos vimos obligados a renombrar las duplicadas.

Mapa Ionosférico Regional

Una vez se dispone de los datos RINEX se puede generar el Mapa Ionosférico Regional, para su desarrollo se adoptó el modelo de ionosfera de capa única, asumiendo que todos los electrones libres de la ionosfera están concentrados en una capa esférica de espesor infinitesimal a 400 km de altura de la superficie de la tierra.

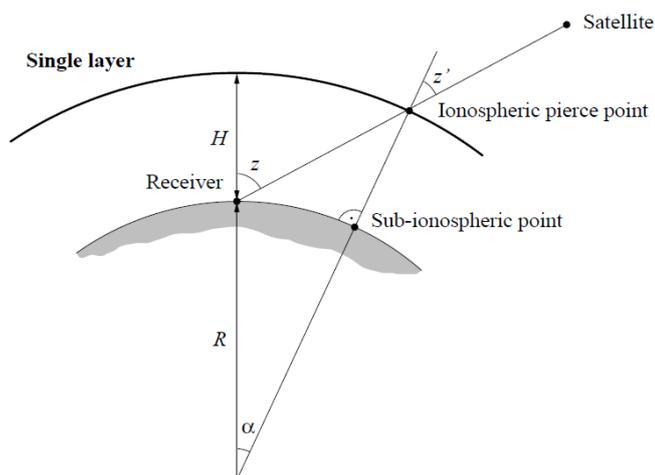


Figura 2 – Modelo de ionosfera de capa única. (Single-layer ionospheric model.) Fuente: Stephan Schaer, University of Berne, 1997.

A partir de observaciones de código y fase junto con las coordenadas del receptor y del satélite se calcula el Slant TEC, el TEC a lo largo de la línea satélite-receptor. A continuación mediante una función de mapping se obtiene el valor del TEC en la vertical del receptor, el vTEC. En el procesamiento de los datos se calcularon los coeficientes de los armónicos esféricos del vTEC según la siguiente fórmula:

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms)$$

Siendo:

E : Vertical TEC (vTEC).

β : Latitud geocéntrica del punto intersección de la línea satélite-receptor con la capa ionosférica.

s : Diferencia entre la longitud del lugar y la longitud del sol.

n_{\max} : Máximo grado del desarrollo armónico esférico.

\tilde{P}_{nm} : Función asociada de Legendre de orden n grado m normalizada.

a_{nm}, b_{nm} : Coeficientes del TEC de las funciones armónicas esféricas.

El valor del TEC se obtiene en TECU (TEC units) donde 1 TECU equivale a 10^{16} electrones libres por metro cuadrado.

De esta forma y mediante los coeficientes del desarrollo armónico esférico se puede calcular el valor del vTEC para unas coordenadas geográficas y un tiempo dados. En este caso se produjeron 360

Mapas Ionosféricos Regionales de la zona de la península ibérica, uno cada 2 horas durante el mes de abril de 2012.

Mapa Ionosférico Global

A fin de poder comparar los Mapas Ionosféricos Regionales se acudió a los Mapas Ionosféricos Globales generados por el IGS. Éstos se distribuyen en formato IONEX, disponiendo de datos globales de TEC cada 2 horas en una rejilla de puntos espaciados 2.5° en latitud y 5° en longitud. Asimismo se incluye el RMS de cada dato.

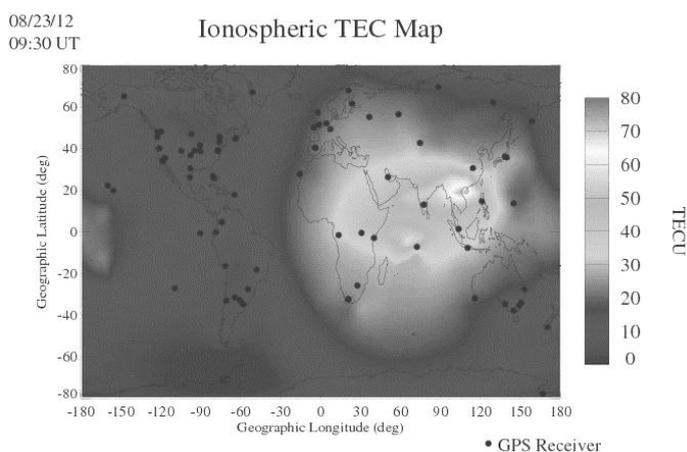


Figura 3 – Mapa Ionosférico Global. (Global Ionospheric Map.) Fuente: Jet Propulsion Laboratory.

Del servidor <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex> se descargaron los ficheros IONEX correspondientes al mes de abril de 2012. Tras obtener los datos de TEC disponibles en el área de la península ibérica se interpoló el valor del TEC para el tiempo y la rejilla empleados en los Mapas Ionosféricos Regionales anteriormente obtenidos. De esta forma para unas mismas coordenadas y un mismo tiempo disponemos de datos de TEC de dos fuentes distintas, la elaboración propia a partir de datos sobre la península ibérica y la proporcionada por el IGS obtenida a partir de datos globales.

Es importante destacar que el proceso para obtener el valor del TEC ambos mapas no ha sido el mismo. En el caso de los Mapas Ionosféricos Regionales empleando las observaciones de las redes de estaciones GNSS permanentes se calcularon los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos, y a partir de ellos, se obtuvo el valor de TEC en la posición y tiempo deseados. Mientras que la generación de los Mapas Ionosféricos Globales se ha hecho interpolando directamente los valores proporcionados en los ficheros IONEX.

4. RESULTADOS

Como ya se ha dicho se obtuvieron 360 Mapas Ionosféricos Regionales de la zona de la península ibérica, uno cada 2 horas durante los 30 días del mes de abril de 2012. Y sus correspondientes 360 Mapas Ionosféricos Globales de la misma zona y con la misma resolución espacial y temporal.

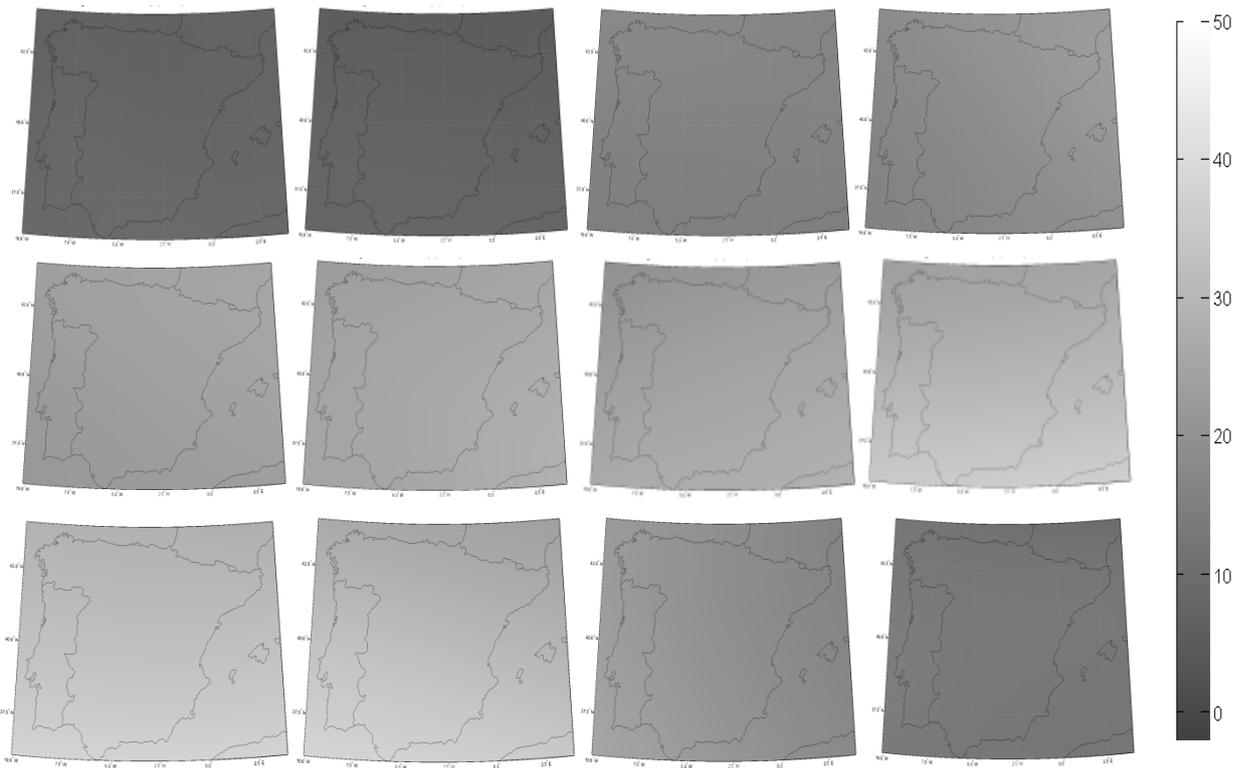


Figura 4 – Mapas Ionosféricos Regionales correspondientes al día 1 de abril de 2012. (Regional Ionospheric Maps for the day April 1, 2012.)

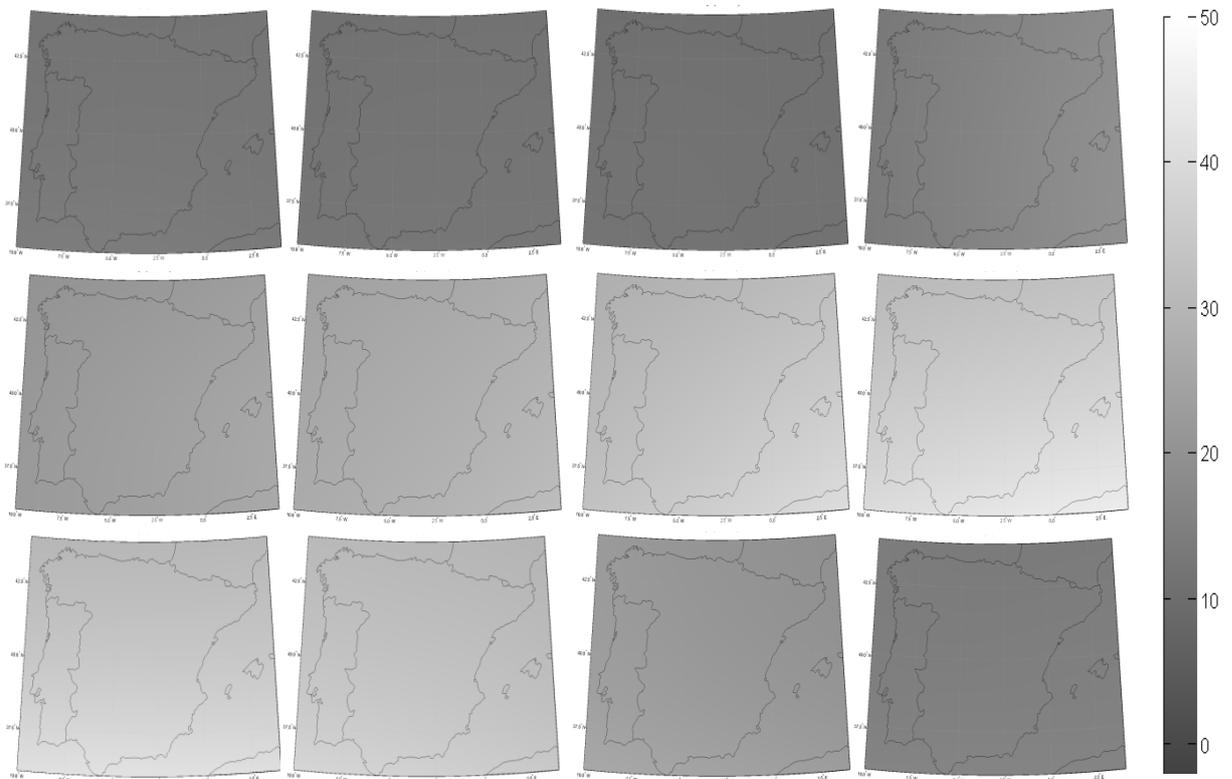


Figura 5 – Mapas Ionosféricos Globales correspondientes al día 1 de abril de 2012. (Global Ionospheric Maps for the day April 1, 2012.)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al disponer de los Mapas Ionosféricos Regionales y Globales de la misma zona calculados para el mismo tiempo y en la misma rejilla en latitud y longitud los datos pueden ser comparados. Para ello se ha representado la evolución del valor del TEC tanto en el Mapa Regional como en el Global en las estaciones del IGN como se muestra en la Figura 6.

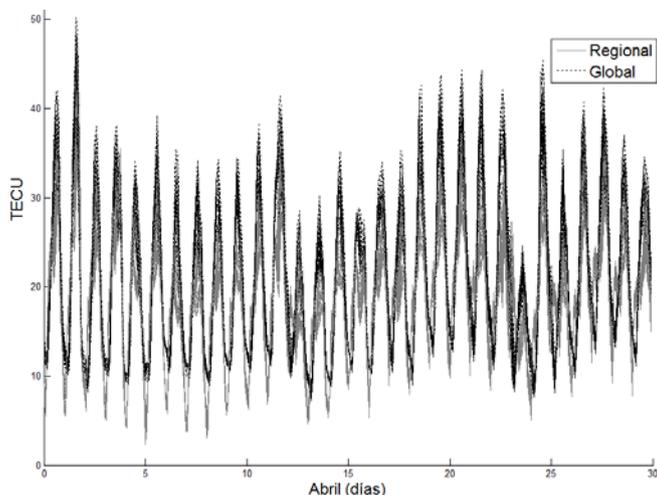


Figura 6 – Valores de TEC en el mes de abril de 2012. (TEC values in April 2012.)

En primera instancia se aprecia un sesgo de 4 TECU de diferencia entre Global y Regional. No obstante al representar la distribución de las diferencias Global-Regional en la Figura 7, además de este sesgo se evidencia una parte anómala en la distribución.

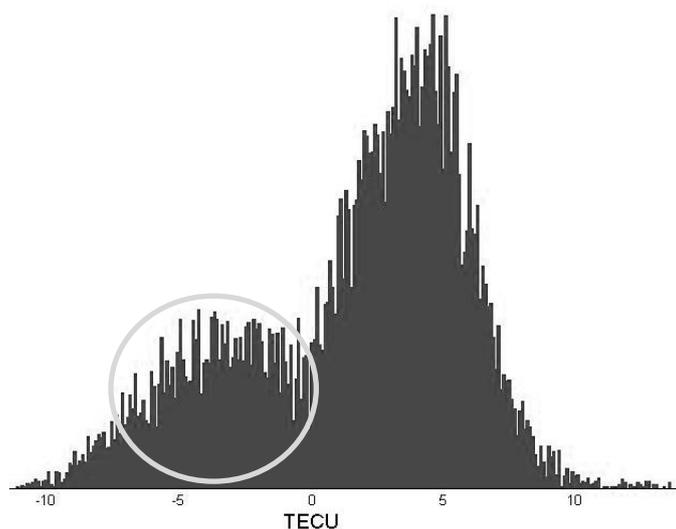


Figura 7 – Distribución de la diferencia Global-Regional en el mes de abril de 2012. (Distribution of Global-Regional difference in April 2012.)

Esta anomalía se puede ver claramente en la Figura 8, el TEC del Mapa Global queda siempre por encima del TEC del Mapa Regional salvo en los Mapas calculados para las 04:00 h y las 06:00 h, donde la tendencia se invierte, causando la forma anómala en la distribución de la Figura 7.

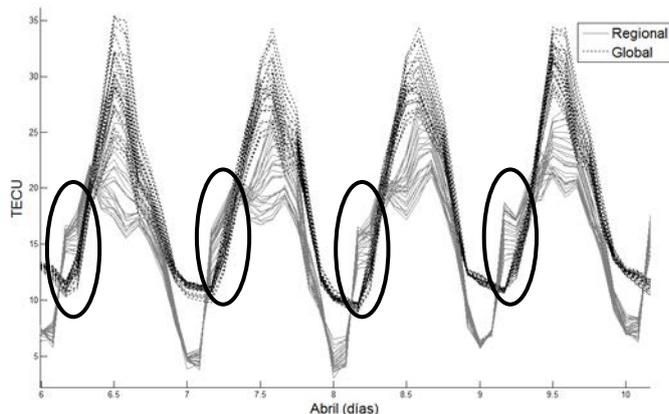


Figura 8 – Valores de TEC del 6 al 10 de abril de 2012. (TEC values from 6 to 10 April 2012.)

Esta anomalía en el TEC del Mapa Ionosférico Regional se podría explicar mediante una falta de sincronismo entre ambos Mapas, no obstante si se emplea la tendencia Global para eliminar el comportamiento anómalo a las 04:00 h y las 06:00 h del Regional, representado en la Figura 9, parece claro que ambas tendencias coinciden en el eje temporal.

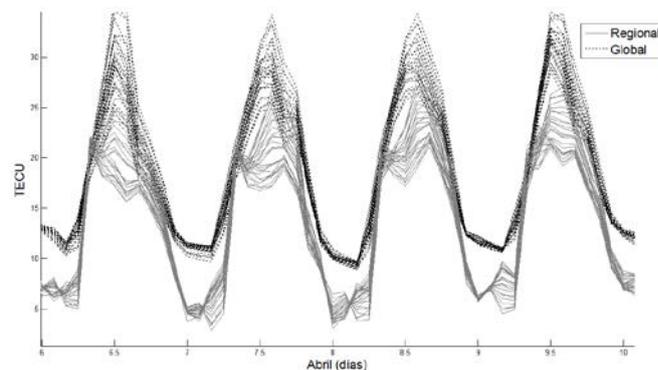


Figura 9 – Valores modificados de TEC del 6 al 10 de abril de 2012. (modified TEC values from 6 to 10 April 2012.)

Asimismo la forma anómala en la distribución de la diferencia modificada Global-Regional queda prácticamente eliminada, resultando una distribución de media 4.01 TECU y desviación típica de 2.79 TECU.

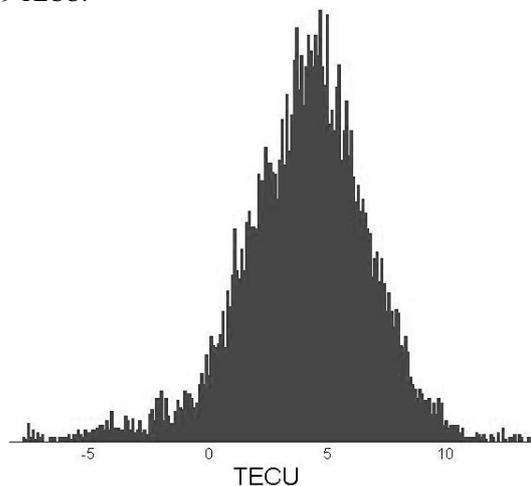


Figura 10 – Distribución de la diferencia modificada Global-Regional en el mes de abril de 2012. (Distribution of Global-Regional modified difference in April 2012.)

6. CONCLUSIONES

Hemos alcanzado nuestros objetivos: la captura automatizada de los datos de las diferentes redes de estaciones permanentes y el desarrollo de las herramientas para la obtención a partir de ellos de Mapas Ionófericos Regionales. La comparación de éstos con los Mapas Ionosféricos Globales refleja, como era de esperar, una mejor resolución y mayor precisión. Hemos encontrado sin embargo algunas discrepancias entre ambos Mapas, cuyo análisis detallado requerirá un estudio posterior.

7. REFERENCIAS

- Berné Valero, J. L. y J. Olivares Belinchón (2011): "Situación actual de las estaciones de referencia GNSS en España". *Publicación Técnica Cuatrimestral de Navegación Marítima, Aérea, Espacial y Terrestre*, 39, 16-20.
- Estey, L. H. y C. M. Meertens (1999): "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data". *GPS Solutions (pub. by John Wiley & Sons)*, 3, 1, 42-49.
- Schaer, S. (1997): "How to use CODE's Global Ionosphere Maps". *Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland*.
- Schaer, S. y W. Gurtner (1998): "IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1". *Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland*.

Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG) *Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG)*

Jaime Fraile Torrecilla, José Antonio Sánchez Sobrino y Juan Pablo Fernández Herreras
Instituto Geográfico Nacional, C/ General Ibáñez de Ibero 3, 28003, Madrid

SUMMARY

The Geodesy Department of the National Geographic Institute has developed for Windows systems a tool named Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG). The aim is to provide help to users who work with the geodetic infrastructures. On the one hand a geodetic calculator application, which includes mainly the coordinate transformation between the old Reference System ED50 and the new adopted ETRS89 and the EGM08-REDNAP geoid model for altimetric conversions. The second aim of the PAG software is to provide users all available information of the geodetic networks in a simple and fast way through an Internet connection. A series of queries and visualization tools allow access to data and information of the ERGNSS network, classical geodetic networks (ROI and REGENTE) and the High Precision Leveling Network (REDNAP).

1. INTRODUCCIÓN

En el Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional se decidió desarrollar el Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG) con el objetivo de poder dar respuesta a las necesidades que planteaban los usuarios de una manera rápida, personal e independiente. Aunque hasta ahora se habían ido desarrollado distintas herramientas que iban proporcionando soluciones independientes en cada momento y que se implementaban en aquellas plataformas que parecieron más adecuadas (Sistemas Windows, Servicios Web...), era preciso unificar todas estas herramientas en una única que facilitase al usuario su trabajo.

La mayoría de las necesidades que demandan los usuarios para sus trabajos en el campo de la geodesia, van dirigidos básicamente a dos vertientes: transformación de coordenadas y acceso a los datos más actualizados posibles de las infraestructuras geodésicas del IGN.

El Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España ha obligado por un lado al Instituto Geográfico Nacional y por otro a los usuarios, a tener que adaptar los trabajos y proyectos tanto pasados como futuros, al nuevo Sistema de Referencia ETRS89. Esto conlleva en la mayoría de los casos la transformación de coordenadas entre este nuevo Sistema de Referencia adoptado y el anteriormente vigente ED50, y transformaciones altimétricas entre alturas ortométricas y elipsoidales con ayuda de un modelo de geoido.

La otra vertiente donde se vuelcan la mayor parte de las demandas de los usuarios, va dirigida al acceso a la información y a los datos que conforman las infraestructuras geodésicas.

En un principio dicha demanda se centraba en la Red Geodésica y en la Red de Nivelación. Terminado el proceso de desarrollo en la Red Geodésica y encontrándose en su fase final la Red de Nivelación, las variaciones que se puedan producir en los datos que conforman las mismas son mínimos y puntuales en el tiempo, con lo cual parece en una primera aproximación, que los datos son estáticos en el tiempo. Pero la realidad es que últimamente la interacción entre los usuarios y el IGN se ha hecho mucho más fluida y una labor de mantenimiento y control de errores que podía resultar muy complicada para este organismo (sobre todo por la cantidad de recursos humanos y materiales de que depende), se ha convertido en algo vivo y constante. Ahora en la mayoría de los casos son los propios usuarios o incluso individuos ajenos a labores geodésicas (que pasan junto a señales) los que informan sobre el estado de las mismas y de posibles errores en sus datos. En definitiva, la información de estas redes sigue viva y en constante actualización.

En los últimos años el punto de mira se ha puesto en la Red de Estaciones Permanentes GNSS (ERGNSS). A diferencia de las otras dos redes, ésta se encuentra en constante fase de desarrollo, en la cual tanto el número de estaciones que la componen como el equipamiento que forma las mismas, van variando en el tiempo. A esto se debe añadir el hecho de que estas estaciones van generando

datos nuevos constantemente. Por eso es fundamental proporcionar a todos los usuarios interesados en estos datos una herramienta que les permita acceder a los mismos (estructurados y almacenados en un servidor FTP) de una manera rápida y cómoda sin que tengan que perder tiempo en comprender cómo se estructura y almacena la información en el servidor.

La ventaja fundamental del PAG radica en la unificación de todas las herramientas que solventan estas demandas en una única aplicación con el objetivo de facilitar el trabajo al usuario que hasta ahora tenía que buscarlas en la web del IGN y que en la mayoría de los casos le remitía a otras páginas web, a servidores FTP o a la descarga de aplicaciones individuales para su ejecución en un PC.

2. LA PLATAFORMA

Actualmente el número de plataformas y sistemas que emplean todos los usuarios para sus trabajos es tan variado que tomar la decisión sobre cual o cuales de ellas se basaría el desarrollo de la aplicación se convertía en un punto conflictivo a la vez que fundamental. Los recursos tanto materiales como humanos de que se disponían en el Área de Geodesia, así como la gran parte de la programación que ya se tenía desarrollado, empujaron a optar en una primera versión por una única plataforma que fuese una de las más extendidas. A sabiendas de que dicha decisión podía dejar a muchos usuarios fuera del acceso al PAG, o al menos obligarlos a trabajar en otras plataformas no habituales, era la mejor opción para desarrollar el PAG y ponerlo a prueba buscando posibles errores e incluso compartiendo con los usuarios sus experiencias para buscar mejoras y complementos que la hicieran más completa.

El sistema operativo elegido para el desarrollo del PAG ha sido Windows XP de Microsoft y las plataformas para las que se ha desarrollado la primera versión han sido para los equipos de sobremesa o portátiles que implementen dicho sistema.

3. LOS MÓDULOS

Las distintas aplicaciones que componen el PAG se pueden agrupar en los siguientes módulos:

Calculadora Geodésica

El trabajo de este módulo se resume en:

- Conversión de coordenadas entre los Sistemas Geodésicos de Referencia oficiales ETRS89 y ED50.
- Transformación de éstas entre coordenadas geográficas y la proyección UTM con el cálculo del factor de escala y la convergencia de meridianos en ambos sistemas.
- Obtención del valor de la ondulación del geoido y componentes de la desviación de la vertical.

Para el cambio de sistema geodésico de referencia la aplicación emplea un par de rejillas del IGN en formato NTV2 (Canadian National Transformation Version 2): una para la Península y otra para Baleares. Cada rejilla está compuesta por una serie de nodos

espaciados a intervalos regulares en latitud y longitud y que contienen información del desplazamiento en segundos sexagesimales de las coordenadas geodésicas. Para conocer el valor del incremento en la conversión entre sistemas para un punto dado, se emplea una interpolación bilineal entre los 4 nodos de la red más cercano a dicho punto. Si el punto en cuestión está fuera de una de estas dos rejillas, no se calcula, aunque sí se procede a su transformación entre geográficas y UTM.

En la transformación de coordenadas geográficas a UTM se emplean las ecuaciones de transformación deducidas para el desarrollo transversal cilíndrico terrestre de Mercator, tomando como referencia un elipsoide de revolución y dividiendo la Tierra en 60 husos iguales de 6 grados cada uno. Como origen de longitudes se toma el meridiano de Greenwich con valores negativos al Oeste. Para las latitudes el origen es el ecuador y valores positivos al Norte.

El cálculo de la ondulación del geode se realiza mediante el modelo EGM2008 – REDNAP. Este modelo es una adaptación del modelo de geode mundial EGM2008 del National Geospatial Intelligence Agency (NGIA) al sistema de referencia vertical en España (REDNAP). Está compuesto por un par de rejillas: una para la Península, Baleares, Ceuta y Melilla y otra para Canarias. En ambos casos las rejillas tienen un paso de malla regular de 1' x 1' en formato ASCII (idéntico al del NGIA). En caso de que el punto a calcular quede fuera de estas dos rejillas no se calculará la ondulación del geode.

Figura 1 – Ejemplo del uso de la Calculadora Geodésica. (Example of using the Geodetic Calculator.)

La aplicación permite la transformación de un único punto o de una serie de puntos introducidos desde un fichero de texto. Los resultados de la transformación pueden ser devueltos en pantalla o exportados a otro fichero de texto. En ambos casos se puede seleccionar los datos de salida.

Datos GNSS

Con este módulo se pretende agilizar y facilitar al usuario la descarga de datos GNSS (RINEX) de la red de estaciones permanentes del Instituto Geográfico Nacional, así como proporcionar datos de control de calidad de los observables GNSS para cada estación y fecha dada, y un informe histórico anual de control de calidad de cada estación. Todos estos datos e información son obtenidos del Servidor FTP de Geodesia del IGN (<ftp://ftp.geodesia.ign.es>), al cual el usuario también puede acceder directamente para extraer dichos datos.

Hacer la descarga de estos datos de forma manual vía FTP puede ser un trabajo tedioso. Sin embargo con esta aplicación el usuario selecciona rápidamente sobre la interface:

- El o las estaciones permanentes de las que desea los datos mediante un mapa de España que informa sobre el tipo de datos de que dispone la estación (GPS y/o GLONASS).
- El día para el que solicita los datos a través de un calendario que además le informará sobre el día ordinal del año y la semana GPS.
- Longitud de los ficheros: **Horarios** (disponibles sólo para los últimos 90 días) con la opción de poder escoger el intervalo entre las observaciones (1, 5, 15 o 30 segundos) y la hora UTC de las mismas, o **Diarios**.

Antes de proceder a la descarga se puede consultar la disponibilidad de datos de todas las estaciones a través de una tabla que también se descarga del servidor FTP.

Durante el proceso de descarga se chequea la conexión a Internet y se procede a la descarga automática uno a uno de los ficheros de observación, efemérides (GPS y GLONASS) y de resumen de calidad de los datos para cada estación.

Por último la aplicación informa sobre los ficheros que se han descargado y aquellos que no se han podido descargar por diversas causas.

Redes Geodésicas

Este módulo es básicamente un navegador web que se apoya en servidores de mapas para poder presentar sobre cartografía los distintos elementos que componen las redes geodésicas de España: ERGNSS, vértices geodésicos (de las redes REGENTE y ROI) y señales de nivelación de la REDNAP. Aparte del servidor de Google, la aplicación (a través de la API de Google Maps) puede trabajar sobre los servidores WMS del PNOA para ortoimágenes y del IGN para la cartografía oficial de este organismo.

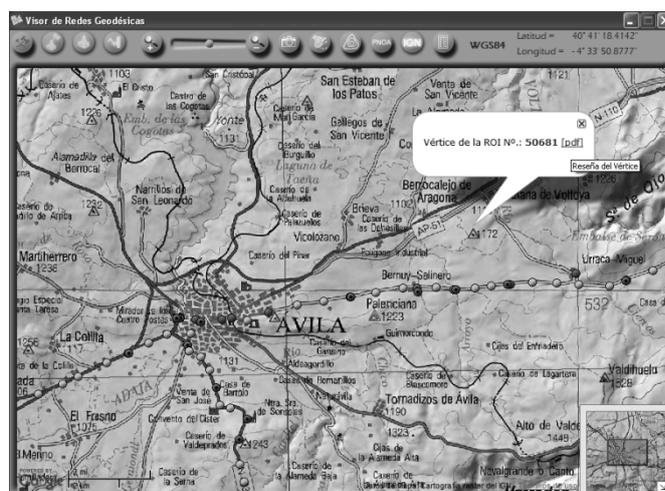


Figura 2 – Ejemplo del Servidor WMS del IGN sobre el Visor de Redes Geodésicas. (Example of WMS Server IGN on the Geodetic Networks Viewer.)

La aplicación, además de mostrar la ubicación física de las distintas señales, también proporciona una información básica de las mismas y un enlace para poder visualizar o descargar, a través del

Servidor FTP de Geodesia del IGN, la reseña literal actualizada de las mismas. Estas reseñas son un documento en formato PDF que proporciona la información más importante y necesaria para poder acceder hasta dicho elemento sobre el terreno (reseña literal, fotografía, croquis, ...) así como sus datos básicos (descripción física, coordenadas de su ubicación, datos de observación y cálculo, etc.)

Dado que las señales que conforman las redes geodésicas, así como sus datos, están en constante modificación y actualización, es conveniente proceder a actualizar el PAG periódicamente mediante su módulo de actualizaciones para comprobar si hay versiones más modernas de los ficheros que esta aplicación consulta para mostrar las señales de las redes.

Utilidades

A las tres aplicaciones básicas anteriores se le han añadido otras dos utilidades de transformación y cálculo y otra de información para poder abarcar las necesidades que plantean algunos usuarios.

Cálculo de Coordenadas

El objetivo es resolver los problemas directo e inverso de la geodesia sobre el elipsoide de Hayford (sistema ED50) o sobre el elipsoide SGR80 (sistema WGS84). Para dos puntos concretos esta aplicación puede realizar:

- Problema directo: desde las coordenadas de uno de los puntos y con el acimut y distancia a otro, calcula las coordenadas de este último y su acimut recíproco.
- Problema inverso: desde las coordenadas de dos puntos se calcula la distancia, el acimut directo y el recíproco.

GEO a XYZ y viceversa

Este módulo permite la transformación entre **coordenadas geográficas** y **cartesianas** en el sistema WGS84 de un único punto o de un conjunto de ellos incluidos en un fichero de texto. Los datos de salida se muestran en pantalla en el caso de un único punto o se devuelven a otro fichero para el caso de una serie de puntos.

El fichero de entrada de datos debe tener un formato específico en el que los campos deben estar separados por espacios y con cierto orden.

Informar sobre redes

Este último módulo está pensado para que el usuario pueda interactuar con el IGN y si durante su trabajo detecta errores o modificaciones en las señales que componen las redes geodésicas y de nivelación, pueda ponerse en contacto con este organismo y hacerle llegar dichos datos.

Básicamente son un par de enlaces a sendos formularios PDF ubicados en el Servidor FTP que se descargan en su equipo para que pueda rellenarlos con su información y remitirlos por correo electrónico al IGN, donde se controlarán y procesarán para efectuar las modificaciones oportunas en las bases de datos.

De esta información se volverán a generar nuevos ficheros encargados de actualizar vía FTP los datos del PAG del usuario mediante el módulo de actualizaciones.

Figura 3 – Formularios para informar sobre el estado de las Redes Geodésicas. (Reports about the status of Geodetic Networks.)

Actualizaciones

Aunque este último módulo no se corresponde con ninguna aplicación geodésica, es parte fundamental del programa, pues es el encargado de mantener al mismo actualizado en todo momento para que los usuarios tengan la seguridad de que están trabajando con los últimos datos de que dispone el Instituto Geográfico Nacional.

Es un módulo que el usuario ha de lanzar manualmente, por lo que es él quien decide en cada momento si quiere actualizar su programa. Al ser ejecutado, la aplicación descarga a través del servidor FTP los ficheros de actualización. Tras su análisis, muestra las actualizaciones disponibles desde que el usuario realizó la última en su programa y le pide su consentimiento para proceder a la misma.

En la última versión del PAG se implementa la posibilidad de actualizar ciertos componentes del programa para corregir posibles errores o mejorar algunas de las prestaciones del mismo sin que sea necesaria la creación de nuevas versiones del PAG con el consiguiente trabajo de reinstalación para el usuario. Estas pequeñas modificaciones serán opacas al usuario, aunque si se le informará de las mismas.

4. EL FUTURO DEL PAG

Para el último cuatrimestre de 2012 estará disponible en el Servidor FTP de Geodesia una nueva versión del programa que, además de corregir pequeños errores de la primera versión e incluir algunas mejoras, estará preparado para trabajar en Sistemas Windows Vista y Windows 7.

El objetivo fundamental para futuras versiones es centrar el PAG en un sistema más universal y de fácil acceso desde distintas plataformas (incluidos dispositivos móviles), como podría ser un servicio web donde los distintos módulos quedarán implementados en sus páginas.

Monitorización continua para el cálculo del enlace local GNSS-VLBI

Continued Monitoring to calculate the local tie GNSS-VLBI

Javier López-Ramasco⁽¹⁾, Álvaro Santamaría-Gómez⁽¹⁾, Abelardo Bethencourt Fernández⁽²⁾ y Susana García-Espada⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Desarrollos Tecnológicos de Yebes (CDTY). Instituto Geográfico Nacional (IGN).

⁽²⁾ E. T. S. de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

SUMMARY

One of the keys for calculating the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) is the availability of observatories operating two or more instruments belonging to any of the four space geodetic techniques (GNSS, VLBI, SLR, DORIS). The difference of the coordinates of the reference points of each technique must be calculated with accuracy, as this allows the integration into a single terrestrial frame those realized by each of the different techniques. The local tie is the vector connecting the reference points of different space geodetic techniques. In most VLBI radio telescopes, the reference point, called invariant reference point (IRP), cannot be realized physically, because it corresponds to the crossing point of the elevation axis with the azimuth axis. The traditional method for obtaining the IRP has been the adjustment of target coordinates placed on the radio telescope, which describe circles in a predetermined pattern of movement of the antenna. The main drawbacks of it are the lack of continuity in the measurement and the operational cease of the antenna. This paper adopts an alternative method that is going to be implemented with the 40 m radio telescope and the future 13 m radio telescope belonging to the RAEGE, at the Yebes observatory (IGN). The proposed method is based on a similarity transformation between the local coordinate system and the antenna system. Also, it allows the continuous determination of the IRP through the use of robotic total stations.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las observaciones terrestres como la determinación de órbitas satelitales, modelos de rotación de la tierra, monitorización del movimiento de placas tectónicas, o el nivel del mar, dependen de la disponibilidad de un sistema de referencia terrestre (TRS) que solo la geodesia espacial nos puede proporcionar (Altamimi, Collilieux y Métivier, 2011). Este sistema es materializado por un conjunto de puntos en la superficie terrestre en los que se determina su posición y velocidad, denominado Marco de Referencia Terrestre (TRF).

El marco de referencia terrestre internacional (ITRF) es el resultado de la combinación de diferentes marcos terrestres realizados a partir de cuatro técnicas geodésicas espaciales que son “Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite” (DORIS), “Satellite Laser Ranging” (SLR), “Global Navigation Satellite Systems” (GNSS) y “Very Long Baseline Interferometry” (VLBI). Aunque unas técnicas son más adecuadas que otras para la determinación de algunos de los parámetros terrestres (centro de masas, movimiento del polo, “wooble”, escala, precesión-nutación, movimiento de rotación, etc.), ninguna por sí sola es capaz de determinarlos todos con exactitud por lo que se hace imprescindible la combinación de todas ellas. Para poder realizar esta combinación, debe conocerse con exactitud el vector espacial que conecta los centros geométricos de las antenas receptoras de cada técnica (enlace local o local tie en inglés). Para evitar distorsiones internas del marco de referencia combinado, la precisión del “local tie” debe ser mejor que las correspondientes a cada una de las técnicas geodésicas. El organismo internacional encargado de combinar los diferentes marcos, el IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), recomienda calcular el enlace local con 1 mm de exactitud (Ray y Altamimi, 2005).

Para mitigar los errores de observación del local tie, el IERS recomienda la determinación del local tie una vez al año, pero debido a la dificultad de la observación, el periodo entre repeticiones se alarga a 2, 3 o más años (Pearlman, 2008). Existe amplia literatura científica que relata las tareas llevadas a cabo para determinar el local tie (Haas y Eschelbach, 2005; Sarti, Sillard y Vittuari, 2004).

Algunos de los principales errores de las dos técnicas más representativas (GPS y VLBI) son “multipath” de la señal recibida de los satélites (Bilich y Larson, 2007), efecto de campo cercano (Dillssner, Seiber, Wubena y Schmitz, 2008), estabilidad de la

monumentación (King y Williams, 2009), interferencia de los radomos (Altamimi et al, 2011), expansión térmica estructural (Nothangel 2008) y deformación estructural por gravedad (Sarti, Abbondanza, Leonid y Negusini, 2010). Todos ellos deben ser analizados y cuantificados con el objetivo de minimizar su impacto en la precisión del local tie calculado.

Aunque son cuatro las técnicas geodésicas de medición empleadas, debido al menor coste de instalación y operación, la más extendida es claramente la técnica GNSS. Esto ha provocado que en el cálculo del ITRF2008, de los 84 emplazamientos donde hay más de una técnica, 44 de ellos combinen GNSS-VLBI y solo 8 dispongan de SLR-VLBI (Altamimi et al, 2011). En el Observatorio de Yebes (IGN) existen dos técnicas geodésicas espaciales: GNSS y VLBI. La técnica GNSS está representada por dos estaciones, YEBE y YEB1. La primera, que opera desde 1999, forma parte de la red de estaciones del TRF del IGS (International GNSS Service). La segunda instalada en el nuevo pabellón de gravimetría del centro, está en funcionamiento desde el año 2009. La técnica VLBI se emplea en dos radio telescopios de 14 m y 40 m respectivamente. El radio telescopio de 14 m, estuvo participando en sesiones VLBI desde 1995 hasta el año 2003, y el de 40 m, que opera desde el 2005, forma parte de la red de antenas del IVS (International VLBI Service). En el presente año se está construyendo un nuevo radio telescopio de 12 m dentro del marco de trabajo del proyecto VLBI2010. Además se encuentra en fase de estudio el diseño de un telescopio SLR. El único local tie observado hasta el momento fue llevado a cabo en 1999 entre la antena YEBE y el radio telescopio de 14 m. Por tanto es necesaria la determinación del local tie entre los diferentes radio telescopios y las dos antenas GNSS.

En el TRF de GNSS, las posiciones y velocidades están asociadas al punto de referencia de la antena GNSS (Antenna Reference Point en inglés), el cual viene marcado físicamente. En el caso del TRF de VLBI, las posiciones y velocidades de los radio telescopios están asociadas al punto de referencia invariante (PRI). El PRI se define geoméricamente como el punto perteneciente al eje de rotación acimutal más cercano al eje de rotación en elevación. Este punto no está físicamente materializado en la mayoría de los radio telescopios debido a que los dos ejes principales no se cortan, si no que se cruzan a una cierta distancia denominada excentricidad. Por lo tanto las coordenadas del PRI en el sistema de coordenadas

local del lugar deben ser estimadas indirectamente mediante observaciones topográficas de prismas o dianas instaladas en la estructura de la antena y que giran solidarias al radio telescopio alrededor de sus dos ejes principales.

El método presentado en este artículo está basado en la determinación del PRI de los radio telescopios VLBI del Observatorio de Yebes de forma automática, continua y remota. Este método alternativo ha empezado a emplearse en algunos observatorios geodésicos, como por ejemplo Onsala en Suecia, Wettzell en Alemania, y Goddard en EEUU (Löslerand y Haas, 2009; Neidhardt, Lösler, Eschelbach y Schenk, 2010; Schmeing, Behrend, Gipson y Nothnagel, 2010).

Este artículo presenta los resultados de estudio de simulación del método aplicado al radiotelescopio de 40 metros del CDTY. Esta simulación nos permitirá optimizar la estrategia de observación. Para ello fueron investigados varios escenarios con diferentes configuraciones geométricas, número de observaciones y precisiones.

2. LA ESTIMACIÓN DEL PRI

Actualmente se están utilizando dos métodos matemáticos para la determinación de las coordenadas del PRI: el método tradicional de ajuste de círculos 3D (Dawson, Sarti, Johnston y Vittuari, 2007) y el método alternativo que se trata aquí, basado en la transformación de semejanza entre el sistema de coordenadas de la antena y el local (Lösler y Hennes, 2008).

El primer método calcula el PRI a partir de las posiciones espaciales relativas entre los dos ejes principales de rotación del instrumento, definidas por los vectores que pasan por el centro de los círculos y perpendicular a éstos. Cada círculo es calculado ajustando la ecuación de una circunferencia a la nube de puntos generada al medir las coordenadas espaciales de varios prismas reflectores fijados a la antena la cual gira sobre su eje de elevación o de acimut (ver Figura 1).

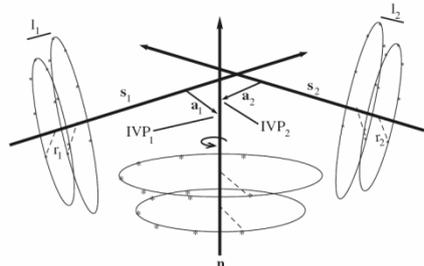


Figura 1- Esquema del método de ajuste por círculos 3D
(Scheme for the method of 3D circles fitting.)
(Dawson et al, 2007)

Para llevarse a cabo es necesario que el radio telescopio se oriente a unas posiciones programadas en las que se hace rotar un determinado ángulo cada cierto tiempo, primero en un eje y después en otro y dividiendo la circunferencia de 360° en sectores de 10°, 20° o 30°. La medición topográfica de los prismas se realiza desde diferentes estacionamientos alrededor de la antena. Esto origina que la antena deje de operar normalmente y que el tiempo de ejecución de las tareas sea de 1 o 2 días dependiendo de las características del radio telescopio.

Existen principalmente dos variaciones matemáticas para la aplicación de este método (Johnston y Dawson, 2004; Sarti et al, 2004), pero ambas estiman la precisión en la determinación de las coordenadas del PRI dentro del intervalo de 0.3 y 0.5 mm (Dawson et al, 2007).

El segundo método nos permite determinar la posición del PRI mientras el radio telescopio está realizando la propia observación VLBI por lo que no es necesario el cese de su actividad para aplicarse. Esta característica es de gran importancia si tenemos en cuenta el marco de funcionamiento del proyecto internacional VLBI2010, en el que participa el CDT de Yebes, donde las sesiones de observación se realizarán de modo continuo al igual que ocurre

con las observaciones GNSS. Este es el método elegido en el Observatorio de Yebes para la determinación del PRI.

El modelo matemático de este método está basado en una transformación espacial de semejanza entre el sistema de coordenadas fijado al radio telescopio (SCR) y el sistema local de coordenadas del observatorio (SCO) (Losler y Hennes, 2008).

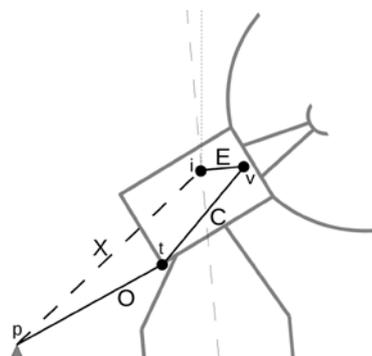


Figura 2- Modelo geométrico empleado.
(Geometric model used.)

El esquema de la Figura 2 muestra que para cualquier orientación del radio telescopio, el vector observado (O) de un prisma reflector (t) en el SCO, desde un taquímetro o estación total estacionada en el punto (p) con coordenadas conocidas en el SCO, es la suma de los tres vectores siguientes: vector X, posición del PRI en el sistema SCO (entre p e i); vector E, excentricidad (entre i y v), rotado el ángulo de acimut del radio telescopio; vector C, posición del prisma reflector en el sistema SCR (entre v y t), rotado según los ángulos de acimut y elevación del radio telescopio. Lo anterior se puede resumir en la expresión (1).

$$O_{SC}^t = R_{SC} (E + C^t) + X \quad (1)$$

Donde R representa la matriz de rotación entre ambos sistemas de coordenadas, el subíndice a representa cada orientación del telescopio, y el superíndice t cada uno de los prismas reflectores o dianas fijadas al radio telescopio.

Para estimar adecuadamente el PRI, la matriz de rotación R debe incluir, aparte de la elevación/azimuth del radio telescopio, algunos parámetros adicionales relacionando ambos sistemas de coordenadas. Estos parámetros son la inclinación relativa de la vertical (α , β) del eje de acimut en el SCO, la falta de ortogonalidad entre los ejes de acimut y elevación (γ), y dos correcciones angulares para las lecturas angulares en acimut y elevación del radio telescopio (C_1, C_2). Todos estos parámetros, junto con las coordenadas del PRI (X) y la excentricidad (E), se estiman por medio de un ajuste mínimo-cuadrático ponderado de las observaciones de los prismas (O).

En este cálculo se establecen premisas a priori que requieren detallarse. En primer lugar los ángulos de acimut y elevación de la antena son introducidos en el cálculo como observaciones de entrada libres de errores. En realidad estas observaciones están afectadas de pequeños errores aleatorios o sistemáticos, debidos a defectos del radio telescopio sin modelizar (por ejemplo: torsiones, compresiones, flexiones, vibraciones, etc) o a factores externos como el empuje del viento y dilataciones térmicas. En futuros trabajos será necesario evaluar el impacto de estos factores en la exactitud y precisión de ambos datos de entrada (acimut y elevación) de la antena del radio telescopio.

Por otro lado, el vector C en el SCR también es dado a priori con un valor libre de error. Sin embargo, mientras la posición relativa entre los prismas reflectores puede ser medida con bastante precisión mediante un método sencillo de topografía clásica, el cálculo del vector C que representa sus posiciones absolutas en el SCR no es tan simple. Deber ser determinado con la máxima precisión ya que cualquier desviación se propagará afectando directamente a la determinación del PRI. Una posibilidad para su determinación es la aplicación del método de ajuste de círculos 3D. En el futuro el ajuste

mínimo-cuadrático será extendido para incluir errores en estos parámetros. En este trabajo hemos considerado las coordenadas de los prismas en el SCR como parámetros fijos y se les ha añadido errores sistemáticos simulados.

Adicionalmente, en el planteamiento del problema hemos asumido que el vector C es constante en el tiempo. Sin embargo, esto es solo una aproximación ya que el vector C adolece de errores dependientes del tiempo como son deformaciones estructurales por variaciones térmicas y por efecto de la gravedad. Estas variaciones serán absorbidas en el cálculo de las coordenadas del PRI si no son corregidas y degradarán su exactitud. Además, dependiendo de la localización de los prismas reflectores, la propagación de cualquier desviación de C no solo afectará a las coordenadas del PRI, si no que otros parámetros de la antena como la excentricidad o inclinaciones de ejes se verán influenciadas. Por otro lado, si realizamos series de medidas en cortos periodos de tiempo se podrían monitorizar las deformaciones del vector C en el transcurso de horas o días, lo que proporcionaría información primordial sobre el comportamiento temporal del radio telescopio (Neidhardt et al, 2010).

3. SIMULACIÓN

La simulación se llevó a cabo siguiendo cinco pasos:

1 *Simulación de las coordenadas de los prismas en el SCR.* Se simuló la colocación de dos señales de puntería retroreflectoras y hemisféricas en los extremos inferiores de ambos contrapesos del radio telescopio, los cuales se mueven solidarios a los ejes de acimut y elevación. En teoría cada una de ellas estaría compuesta por cuatro “corner cubes” que cubrirían un ángulo sólido de 2π estereó radianes, de tal forma que entre los dos dispositivos se podría reflejar la señal de una estación total robotizada desde cualquier posición. La ubicación en los contrapesos fue elegida por ser un compromiso entre la suficiente distancia a los ejes para detectar las variaciones angulares y la estabilidad estructural de la que estos gozan, en comparación con posiciones más alejadas de los ejes pero más susceptibles de deformación como puede ser la estructura de la parábola. En el presente trabajo las coordenadas de los dos prismas en el sistema SCR fueron obtenidos de los planos de construcción de la antena.

2 *Simulación de las orientaciones del radio telescopio.* Se generaron cuatro sets de orientaciones del radio telescopio con valores en acimut y elevación homogéneamente repartidos sobre el hemisferio de observación. Debido a que el número máximo de fuentes observadas en una sesión estándar VLBI de 24 horas es de ~400 y que, teniendo en cuenta las características de velocidad y aceleración del radio telescopio, puede llegarse a medirse 1000 fuentes en 24 horas, los cuatro sets utilizados constaron de 100, 400, 700 y 1000 orientaciones respectivamente.

3 *Simulación del número de estaciones totales utilizadas.* En la simulación se emplearon 3 escenarios diferentes con 1, 2 y 3 estaciones totales robotizadas posicionadas alrededor de la antena y separadas un ángulo de 120° . La distancia al radio telescopio fue tenida en cuenta a través de la simulación de errores aleatorios en las observaciones.

4 *Simulación de las observaciones topográficas de los prismas.* Las coordenadas de los prismas observados en el SCO fueron estimadas utilizando la ecuación de la expresión (1), en la que todos los parámetros (coordenadas del PRI, excentricidad, y falta de verticalidad y ortogonalidad entre ejes) fueron fijados a cero. Fijar estos parámetros con un valor diferente no afecta el estudio de simulación. Se anulaban las observaciones imposibles debido a la ocultación de los prismas detrás de la parábola del radio telescopio en función de su orientación, la localización del prisma y la del instrumento de observación (estación total).

5 *Simulación de los errores de observación.* A las coordenadas de los prismas calculadas en el paso anterior les fue aplicado ruido blanco con el fin de simular errores en la medición de los prismas desde las estaciones totales con variaciones estándar de 0.5, 3, 6 y 9 mm.

Se empleó el método estadístico de Montecarlo repitiendo los cinco pasos anteriores 1000 veces para cada uno de los 48 posibles escenarios resultado de la combinación de 4 sets de número de observaciones, 3 posibles localizaciones de los instrumentos y 4 niveles de precisión en la observación topográfica. La programación del software se llevó a cabo en lenguaje Perl y FreeBASIC.

4. RESULTADOS

Tabla 1-Precisión (2σ) de las coordenadas del PRI (mm)
(Accuracy (2σ) of the PRI Coordinates (mm))

Obs / Error	1 Instrumento				2 Instrumentos				3 Instrumentos			
	0.5	3	6	9	0.5	3	6	9	0.5	3	6	9
1000 (60 h)	0.20	0.90	1.84	2.74	0.04	0.40	0.78	1.18	0.02	0.30	0.60	0.86
700 (42 h)	0.22	1.08	2.18	3.22	0.08	0.48	0.94	1.40	0.02	0.36	0.70	1.08
400 (24 h)	0.30	1.58	2.96	4.38	0.12	0.62	1.26	1.84	0.06	0.48	0.92	1.40
100 (6h)	0.58	2.84	5.42	8.12	0.24	1.22	2.36	3.56	0.18	0.90	1.78	2.68

En la Tabla 1 se muestra la precisión en mm con un intervalo de confianza del 95% (2σ), de la componente tridimensional de las coordenadas del PRI para cada una de los 48 escenarios simulados.

Teniendo en cuenta que debemos alcanzar una precisión de 1 mm podemos responder a las siguientes preguntas:

¿Es suficiente el uso de una sola estación robotizada (instrumento) para la determinación de las coordenadas del PRI? Se puede comprobar en la zona de la tabla correspondiente a un solo instrumento, que con precisiones de 0.5 mm en la determinación de las coordenadas de los prismas reflectores en un entorno muy optimista y con cualquier número de fuentes observadas, alcanzaríamos la precisión de 1 mm requerida. Si consideramos mediciones con una precisión más realista de 3 mm, necesitaríamos disponer de 1000 fuentes (60 horas), cantidad que excede de las 400 fuentes propias de una observación estándar VLBI de 24 horas de duración. La precisión real de las observaciones topográficas será determinada en futuros estudios. También podemos afirmar que la precisión en la determinación del PRI mejora un 57% y un 68% si utilizamos respectivamente dos y tres instrumentos en lugar de uno solo.

¿Alcanzaríamos la precisión de 1 mm con observaciones VLBI normales de 24 horas? Si obviamos los escenarios optimistas con precisión de 0.5 mm, podemos afirmar que con dos y tres instrumentos midiendo simultáneamente, si es viable la obtención de 1 mm de precisión en la determinación del PRI. En el caso de emplear dos instrumentos la precisión mínima de la medición será de 3 mm mientras que en el caso de tres instrumentos el objetivo se consigue con una precisión de observación menor de 6 mm.

A partir de estos resultados se puede afirmar que en observaciones VLBI de 24 horas podemos alcanzar la precisión de 1 mm en la determinación de las coordenadas del PRI con precisiones de medición de 0.5 mm o con sesiones de más de 24 horas con una precisión de 3 mm en la medición topográfica.

Hay que tener en cuenta que el radio telescopio y por tanto el prisma solidario a él, están en continuo movimiento al tener que seguir al quásar en su movimiento diurno por la bóveda celeste, por lo que la precisión nominal del instrumento de 0.5 mm para objetivos estáticos según sus especificaciones técnicas, se degrada a valores mayores que deberemos determinar en diferentes pruebas a realizar en el futuro. En contraposición hemos partido de la premisa que por cada observación de un quásar que tiene una duración entre 1 y 5 minutos, realizamos una sola medición topográfica desde las estaciones totales. Pero es lógico pensar que en este periodo de tiempo se podría realizar más de una observación lo que multiplicaría por dos, tres o más veces la cantidad de mediciones y por tanto la precisión en el cálculo del PRI. Es por ello que se hace imprescindible, antes de calcular el “local tie”, realizar un estudio de la precisión del instrumento para objetivos en movimiento, a la vez que se deberá estudiar y modelizar el error de puntería originado al

emplear cuatro “corner cubes” en un solo objetivo como se ha comentado en el paso primero del apartado de simulación.

Otra posibilidad que se evaluará es la programación del radio telescopio para que realice gran cantidad de observaciones aleatorias y ficticias en un corto periodo de tiempo (2 horas), lo que nos permitiría poder alcanzar la precisión necesaria a la vez que se detectan desviaciones dependientes de tiempo como dilataciones térmicas o deformaciones producidas por el viento. El inconveniente de esta variante del método es la renuncia a una de las principales ventajas del método en relación al ajuste de círculos 3D que es el aprovechamiento del tiempo de observación de una sesión de VLBI geodésico.

Nos hemos centrado en este trabajo en la aplicación del método a radio telescopios de VLBI debido a su disponibilidad en el Centro de Desarrollos de Yebes, pero hay que remarcar que este enfoque para la determinación del PRI en un enlace local es perfectamente aplicable en telescopios ópticos de SLR.

5. CONCLUSIONES

Este método combinado con técnicas modernas de medición topográfica permite la determinación precisa, automática y continua de las coordenadas del PRI, con ahorro de costes materiales, humanos y evitando el paro operacional de la antena.

Otra ventaja del método elegido es que con cortos periodos de observación podríamos evaluar variaciones posicionales del PRI, el comportamiento temporal de la estructura de la antena originados por factores externos como la gravedad, la temperatura o el viento.

A partir de la simulación realizada podemos concluir que es posible calcular las coordenadas del PRI con precisión de 1 mm si realizamos 1000 observaciones (60 horas) con una precisión de 3 mm en las coordenadas o empleamos más de un instrumento.

Además del PRI, se pueden calcular otros parámetros geométricos de la antena como la falta de perpendicularidad entre ejes y la inclinación de estos.

6. REFERENCIAS

Altamimi, Z., X. Collilieux, and L. Métivier (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J. Geod.*, 85, 457-473, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4.

Bilich, A., and K. M. Larson (2007). Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). *Radio Sci.*, 42, RS6003, doi:10.1029/2007RS003652.

Dawson, J., P. Sarti, G. M. Johnston, and L. Vittuari (2007). Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment. *J. Geod.*, 81, 433-441, doi: 10.1007/s00190-006-0125-x.

Dilssner, F., G. Seeber, G. Wubben, and M. Schmitz (2008). Impact of near-field effects on the GNSS position solution. Paper presented at ION GNSS 2008, Inst. of Navig., Savannah, Ga., 16–19 Sept.

Haas, R., and C. Eschelbach (2005). The 2002 Local Tie at the Onsala Space Observatory. Proceedings of the IERS Workshop on site co-location, edited by B. Richter, W. Schwegmann and W. R. Dick. IERS Technical Note, 33, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 55-63.

Johnston G., Dawson J (2004) The 2003 Yarragadee (Moblas 5) local tie survey. *Geoscience Australia record 2004/19*, 27 pp <http://www.ga.gov.au/geodesy/reports/localities/>

King, M. A., and S. D. P. Williams (2009). Apparent stability of GPS monumentation from short-baseline time series, *J. Geophys. Res.*, 114, B10403, doi:10.1029/2009JB006319.

Lösler, M. (2008). Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. *Journal of Applied Geodesy*, 2, 233-238.

LÖSLER, M., and HENNES, M., (2008). An Innovative Mathematical Solution for a Time-Efficient IVS Reference Point Determination. Geodetic Institute of the University of Karlsruhe (TH), German Symposium on Deformation Measurement and Analysis. Lisbon. May 12-15

Neidhardt, A., M. Lösler, C. Eschelbach, and A. Schenk (2010). Permanent monitoring of the reference point at the 20m radio telescope Wettzell. 6th IVS General Meeting, 7-13 February 2010, Hobart, TAS, Australia.

Nothnagel, Axel (2008). Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. *J Geod* (2009) 83:787–792. DOI 10.1007/s00190-008-0284-z

Pearlman, M. R. (2008), Report of TLS (Terrestrial Laser Scanner) Workshop. NASA Goddard Spaceflight Center, 8-10 September, 2008.

Ray J., Altamimi, Z., (2005). Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames. *J Geod* (2005) 79: 189–195. DOI 10.1007/s00190-005-0456-z

Sarti, P., P. Sillard, and L. Vittuari (2004). Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation. *J. Geod.*, 78(3), 210-222, doi: 10.1007/s00190-004-0387-0.

Sarti, P., Abbondanza, C., Leonid, P., Negusini, M. (2010) Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis *J Geod* DOI 10.1007/s00190-010-0410-6

Schmeing, B., D. Behrend, J. Gipson, A. Nothnagel (2010) Proof-of-Concept Studies for a Local Tie Monitoring System, In: VLBI2010: From Vision to Reality, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, D. Behrend and K. D. Baver (eds.), 138-142.

A Relação Entre as Coordenadas de Referência das Redes GNSS de Operação Contínua em Portugal Continental

The Relationship Between the Reference Coordinates of the CORS Networks in Portugal Mainland

Torres, João Agria ⁽¹⁾

⁽¹⁾Artop, Av. Marconi 14-A, 1000-205 Lisboa, jatorres@iol.pt

SUMMARY

Presently, two GNSS (Global Navigation Satellite System) CORS (Continuously Operating Reference Station) networks coexist in Portugal mainland: RENE (Rede Nacional de Estações Permanentes) and SERVIR (Sistema de Estações de Referência GPS Virtuais), operated respectively by the IGP (Instituto Geográfico Português) and the IGeoE (Instituto Geográfico do Exército). Each of the networks has its stations coordinates computed in different geodetic reference systems (ETRS89 and ITRS, respectively), frames (ETRF97 and ITRF2005, respectively) and epochs of realization, and the users have to deal, in practice, with this situation. This paper describes the relationship between both systems and their realizations. In addition, the transformation parameters computed using the standard published values and the established theoretical principles are presented. The particular situation of Portugal mainland is analyzed, with respect to the meaning of the parameters and their influence in the daily practice.

1. INTRODUCTION

The IGP (Instituto Geográfico Português) and the IGeoE (Instituto Geográfico do Exército) operate presently two GNSS (Global Navigation Satellite System) CORS (Continuously Operating Reference Station) networks in Portugal mainland: RENE (Rede Nacional de Estações Permanentes) and SERVIR (Sistema de Estações de Referência GPS Virtuais), respectively.

The coordinates of RENE and SERVIR are referred to the ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) and the ITRS (International Terrestrial Reference System), respectively. Consequently, the users must have different procedures to compute their positions in the adopted reference system for Portugal mainland.

This paper identifies both reference systems and the reference frames and epochs associated to the coordinates assigned to the stations of both CORS networks and presents the transformation parameters computed using the standard published values and the established theoretical principles.

In addition, the particular situation of Portugal mainland is analyzed, with respect to the meaning of the parameters and their influence in the daily practice.

2. THE BASIC REFERENCE SYSTEMS AND REALIZATIONS OF THE NETWORKS

The indication of the reference systems and frames used by each of the networks can be obtained through the information available at the websites of the responsible organizations, <http://www.igeo.pt/> for RENE, IGP (2012), and <http://www.igeoe.pt/> for SERVIR, IGeoE, (2012), complemented with information in several publications, for example Pujol et al, (1998), and private communications from Vasconcelos (2012) and Mendes (2012).

In table 1 the situation of both networks with respect to the reference systems, frames and epochs of realization is summarized.

Table 1 - Characteristics of RENE and SERVIR with respect to reference systems, reference frames and epochs of realization

Network	Reference System	Reference Frame	Epoch
RENE	ETRS89	ETRF97	1995.40
SERVIR	ITRS	ITRF2005	2008.53

As it is shown, two reference systems are used: the ETRS89 and the ITRS. Also two reference frames are used, the ETRF97 (European Terrestrial Reference Frame 1997) and the ITRF2005 (International Terrestrial Reference Frame 2005).

The knowledge of the epoch of realization is fundamental for the computation of the transformation parameters, since the models for

transformation between space geodetic reference frames take into account the time variation of the parameters, as it will be shown.

3. RELATIONSHIP BETWEEN THE ITRS AND THE ETRS89

The ITRS is a spatial reference system co-rotating with the Earth in its diurnal motion in space, and fulfils the following conditions, IERS (International Earth Rotation and Reference Frames Service) (2012):

a) It is geocentric, the center of mass being defined for the whole Earth, including oceans and atmosphere.

b) The unit of length is the meter (SI). This scale is consistent with the TCG time coordinate for a geocentric local frame, in agreement with IAU and IUGG (1991) resolutions. This is obtained by appropriate relativistic modelling.

c) Its orientation was initially given by the Bureau International de l'Heure (BIH) orientation at 1984.0.

d) The time evolution of the orientation is ensured by using a non-rotation condition with regards to horizontal tectonic motions over the whole Earth.

The ITRS is realized by the so-called ITRF. ITRF coordinates are obtained using the observations of space geodetic techniques, whose networks of stations are located on sites covering the whole Earth. Several ITRF solutions exist, the latest one is the ITRF2008. The transformation parameters between all the realizations are published, using the ITRF2000 as a common one, see ITRF (2012).

The ETRS89 is used as the official geodetic reference system in the majority of the European countries, Torres and Ihde (2005), and became the official reference system for geo-referencing information in INSPIRE (2012).

The ETRS89 was defined by EUREF in a resolution adopted at the EUREF symposium in Firenze, 1990, EUREF (1990). The resolution states: "The IAG Sub-commission for the European Reference Frame (EUREF) recommends that the system to be adopted by EUREF will be coincident with ITRS at the epoch 1989.0 and fixed to the stable part of the Eurasian Plate, and will be known as European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)".

This definitions means that the ETRS89 is co-moving with the Eurasian Plate, in a slow motion of approximately 2.5 cm per year towards Northeast.

The ETRS89 is related with the ITRS by means of a mathematical formulation, and it can be seen as its equivalent for the stable part of the Eurasian plate.

The ETRS89 is realized by the so-called ETRF. The parameters used to establish the relationship between the ITRF and ETRF realizations correspond to bring back the Eurasian Plate to the position it had in 1989.0. These parameters are available at the

EUREF website, EUREF (2012), in the publication Altamimi and Boucher (2011).

For the transformation between the systems and respective frames before mentioned, the model is the following:

$$X_2 = X_1 + T + D X_1 + R X_1 \quad (1)$$

where

$$T = \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0 & -R3 & R2 \\ R3 & 0 & -R1 \\ -R2 & R1 & 0 \end{bmatrix}$$

In this equation, X_1 is a vector whose components are the coordinates (X, Y, Z) in system 1, X_2 is a vector whose components are the coordinates (X, Y, Z) in system 2. In the present case, ITRS (ITRF2005) is represented by system 1, and ETRS89 (ETRF97) is represented by system 2.

Also in equation 1, T is the translation vector with 3 components along the X, Y and Z axis ($T1$, $T2$, $T3$, respectively), D is the scale factor, and R is a rotation matrix, whose components are the elemental rotations around the X, Y and Z axis ($R1$, $R2$, $R3$, respectively).

Furthermore, every parameter is time dependent, and it must be computed using equation 2, where P_{tc} is the value of the parameter at epoch tc, P_{t0} is its value at epoch t0, dP its time variation, tc is the epoch of realization and t0 is the reference epoch for the parameter.

$$P_{tc} = P_{t0} + dP (tc - t0) \quad (2)$$

So, the complete transformation model uses 14 parameters, i.e., the seven transformation parameters in equation 1 at a reference epoch and their first derivatives with respect to time.

4. TRANSFORMATION PARAMETERS

Since there are two reference systems and frames involved, the choice of the strategy to compute the parameters was based on the following assumptions:

a) *The epoch of the ITRF2005 realization is 2008.53.*

This epoch is the mean epoch of the present coordinates of SERVIR, according to Mendes (2012). Each station was computed in a different epoch, but the time span is about 12 days. So, it's reasonable to assume the mean epoch of computation as representative of the network's epoch.

b) *The target frame in ETRS89 is ETRF97, epoch 2008.53.*

The ETRS89 official realization in Portugal is ETRF97, epoch 1995.40, Pujol et al, (1998). There is a EUREF resolution to use the ETRF2000 as the conventional frame for the ETRS89, see Altamimi (2006). This resolution doesn't affect ETRF97, so it was not taken into account here. From the theoretical point of view, the target epoch should be 1995.40. To transform the ETRF97 coordinates from epoch 2008.53 to epoch 1995.40 it would be needed the velocity of the stations in ETRF97. This was not done because, in one hand, there are no reliable values available and, on the other, they are expected to be very small and have no significant influence in the daily surveying practice (about 1,7 cm in Cascais within the 13.13 years in the time span of both realizations), EUREF (2012).

According to these and to the fact that the ITRF2000 is the common frame for the published transformation parameters between ITRF realizations, the following strategy was used:

i) *Compute the transformation parameters from ITRF2005 to ITRF2000, epoch 2008.53.*

ii) *Compute the transformation parameters from ITRF2000 to ITRF97, epoch 2008.53.*

iii) *Compute the transformation parameters from ITRF97 to ETRF97, epoch 2008.53.*

The official values of the parameters at the reference epoch and their rates per year for a) and b), are published in ITRF (2012), and the ones for c) are published in EUREF (2012). They are presented at tables 2, 3 and 4, respectively.

Table 2 - Transformation parameters between ITRF2005 and ITRF2000 at epoch 2000.00

Parameter	At 2000.00	Rate per year
T1 (mm)	0.1	-0.2
T2 (mm)	-0.8	0.1
T3 (mm)	-5.8	-1.8
D (10^{-9})	0.40	0.08
R1 (mas)	0.000	0.000
R2 (mas)	0.000	0.000
R3 (mas)	0.000	0.000

Table 3 - Transformation parameters between ITRF2000 and ITRF97 at epoch 1997.00

Parameter	At 1997.00	Rate per year
T1 (mm)	6.7	0.0
T2 (mm)	6.1	-0.6
T3 (mm)	-18.5	-1.4
D (10^{-9})	1.55	0.01
R1 (mas)	0.000	0.000
R2 (mas)	0.000	0.000
R3 (mas)	0.000	0.020

Table 4 - Transformation parameters between ITRF97 and ETRF97 at epoch 1989.00

Parameter	At 1989.00	Rate per year
T1 (mm)	41.0	0.0
T2 (mm)	41.0	0.0
T3 (mm)	-49.0	0.0
D (10^{-9})	0.00	0.00
R1 (mas)	0.000	0.200
R2 (mas)	0.000	0.500
R3 (mas)	0.000	-0.650

The computed transformation parameters at the epoch 2008.53 corresponding to the situations i), ii), iii) are listed in Table 5, where the translation components were rounded to the mm. The values in the last column, which are the sum of these 3 sets, are the final set of parameters that must be used for the required transformation.

Table 5 - Transformation parameters between the different reference frames at epoch 2008.53

Parameter	ITRF2005 to ITRF2000	ITRF2000 to ITRF97	ITRF97 to ETRF97	ITRF2005 to ETRF97
T1 (m)	-0.002	0.007	0.041	0.046
T2 (m)	0.000	-0.001	0.041	0.040
T3 (m)	-0.021	-0.035	-0.049	-0.105
D (10^{-9})	1.08	1.67	0.00	2.75
R1 (mas)	0.000	0.000	3.906	3.906
R2 (mas)	0.000	0.000	9.765	9.765
R3 (mas)	0.000	0.231	-12.695	-12.464

There are two situations that must be emphasized, since they have a direct influence in the computation of the parameters and, consequently, in the homogeneity and reliability of the coordinates.

a) *The reference epoch for the parameters is 2008.53.*

If a new computation of the SERVIR network will happen in the future, either in the same frame (ITRF2005) in a different reference epoch or in other ITRF realizations in the same or in a different reference epoch, the transformation parameters between the two CORS networks must be recomputed.

If there is a new computation of the RENEP network in a new ETRF realization and a new epoch, no major changes in coordinates are expected, 2cm or 3cm at most. This is because the ETRF changes only reflect the better quality of the ITRF, observations and models.

b) *The epochs of both realizations are different, 1995.40 for RENEP and 2008.53 for SERVIR.*

From the theoretical point of view, the transformation should also take into account the velocities of the stations within the Eurasian plate. In other words, after applying the transformation parameters, the effect of the velocities in ETRS89 should be added to the coordinates, using the same epoch as target. However, there are not yet meaningful values available for the velocities, in one hand, and the magnitude of relative velocities is not expected to have a major influence in the results for the surveying practice.

5. THE MEANING OF THE PARAMETERS AND THEIR INFLUENCE IN PRACTICE

The translations is the last column of table 5 (final values) get contributions from the transformations between the ITRF realizations (ITRF2005 to ITRF2000 and ITRF2000 to ITRF97) and from the ITRF97 to the ETRF97. The values for the translations between the ITRF97 and the ETRF97 are, in fact, the shifts between the ITRF97 and the ITRF89 after applying the rotation of the Eurasian Plate, because this is the primary frame related to the ETRS89, see Altamimi and Boucher (2011).

The scale factor has only meaning for transformations within ITRF, as can be seen in table 5.

The final rotations correspond mainly (with the exception of the small rotation R3 from ITRF2000 to ITRF97) to the rotation of the Eurasian Plate and are of course essential for the transformation of the coordinates.

The influence of the transformation parameters in practice in the particular case of Portugal mainland is analyzed hereafter.

The Portugal mainland territory can be seen as included in a piece of the ellipsoidal surface limited, let's say, by the parallels +36° and +43°, and by the meridians -6° and -10° (see figure 1). This very small piece is very close to the origin meridian and, consequently, almost over the X axis. It travels slowly to Northeast at a rate of about 2.5 cm per year.



Figure 1 – The piece of ellipsoidal surface limited by the parallels +36° and +43°, and by the meridians -6° and -10°, extracted from Google Earth (2012).

So, in this particular case, the most important contribution of the rotation of the Eurasian Plate to the change of geographical or plane (cartographic) coordinates comes from the rotations around the Y (in the North direction) and Z (in the East direction) axes.

The coordinates change is a few cm within the piece of ellipsoid defined before with respect to a mean value or to the barycentre. To illustrate this, the coordinates change in space was computed for the 4 corner points and for the barycentre, with latitude = 39.5° and longitude = -8.0°, using the final set of transformation parameters (last column of table 5). The results are shown in table 6.

Table 6 - Coordinates change in space of the 5 points

Component	NW	NE	SW	SE	Barycentre
X (m)	0.215	0.234	0.182	0.204	0.209
Y (m)	-0.322	-0.324	-0.340	-0.343	-0.332
Z (m)	-0.326	-0.322	-0.353	-0.348	-0.337

From the above it can be concluded that, in this particular situation, the whole set of parameters can be easily confused with a single translation vector (three components) at the level of a few cm.

6. FINAL REMARKS

In this paper the relationship between the ITRS and the ETRS89 realizations are presented and, in particular, the transformation parameters between the ITRF2005 and the ETRF97 at epoch 2008.53. Their computation was made using the standard published values and the established theoretical principles.

These transformation parameters can be used in publicly available software, for example, “Transcoord Pro” from IGP (2012). The users must be very careful with the signs convention, especially the rotations, where sometimes the order is also changed. Equation 1 can be used as a reference and clarify any doubts.

The analysis on the practical consequences of these transformation parameters for Portugal mainland shows that the full set of parameters can be easily confused with a single translation vector. The users must be aware of this fact and apply the solutions established by the international responsible organizations and accepted by the scientific and technical communities.

Also, it must be noted that the parameters are computed for the epoch 2008.53. If the reference epoch is different, the parameters change because they are time dependent. It must not be forgotten that the velocity of the Eurasian Plate is about 2.5 cm per year, and this affects the coordinates expressed in the ITRF realizations.

The final parameters presented here are neither official nor have been validated by any of the institutions involved (IGP and IGeoE), so they must be regarded, at this stage, as a mere technical exercise.

7. REFERENCES

- Altamimi, Z. (2006): “ITRF2005 and consequences for the ETRS89 realization”. Presentation at the EUREF Symposium held in Riga, 14-17 June 2006. <http://www.euref.eu>.
- Altamimi, Z and C. Boucher (2011): “Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign”. <http://www.euref.eu>.
- EUREF (1990): “Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) held in Florence, 28-31 May 1990”. Veröf. D. Bay. Komm. F. d. Intern. Erdm.: Astron-Geod. Arbeiten, Heft Nr. 52, 1992.
- EUREF (2012): EUREF website, <http://www.euref.eu>, visited in January 2012.
- Google Earth (2012): Google Earth visited in January 2012.
- IERS (2012): International Earth Rotation and Reference Systems Service website, <http://www.iers.org>, visited in January 2012.
- IGEOE (2012): Instituto Geográfico do Exército website, <http://www.igeoe.pt>, visited in January 2012.
- IGP (2012): Instituto Geográfico Português website, <http://www.igeo.pt>, visited in January 2012.
- INSPIRE (2012): INSPIRE website, <http://inspire.jrc.it>, visited in January 2012.
- Mendes, V. (2012): Private communication.
- Pujol, E. R., J. L. Caturla, H. Ribeiro and J. A. Torres, (1998): “The IBERIA95 Project”. EUREF Publication n. 7/I, Proceedings of the EUREF Symposium held in Bad Neuenahr - Ahrweiler, 10-13 June 1998, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 1999.
- Torres, J. and J. Ihde (2005): “Acceptance and use of ETRS89”. Presentation at the EUREF Symposium held in Vienna, 1-4 June 2005. <http://www.euref-iaag.eu>.
- Vasconcelos, M. (2012): Private communication.

Ajuste de la Red Geodésica Española (ROI) en altitudes ortométricas

Adjustment of orthometric heights in the Spanish Geodetic Network (ROI)

Jose Antonio Sánchez Sobrino, Miguel Angel Cano Villaverde, Antonio Barbadillo Fernández, Marcelino Valdés Pérez de Vargas

Instituto Geográfico Nacional, General Ibañez de Ibero, 3, 28003, Madrid, jassobrino@fomento.es

SUMMARY

In the beginning of 2008 the IGN published the coordinates of the whole of Spain Geodetic Network (ROI) in the ETRS89 system, from an adjustment of the entire network with classical observables and GPS constrained to the REGENTE network. Coordinates were published in this new system along with the reliability parameters (standard deviation of the adjustment) for each point. However, the orthometric height was left open for adjustment in order to harmonize it with REDNAP, the vertical reference frame for Spain. With the help of the undulation of the geoid given by the new model EGM08-REDNAP, an adjustment in orthometric heights has performed constraining to REGENTE, obtaining a set of orthometric heights for the entire ROI that improves the accuracy of existing one.

1. INTRODUCCIÓN.

El 29 de agosto de 2007 fue publicado el Real Decreto 1071/2007 por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Aunque la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE) constituye el marco que materializa dicho sistema, la Red Geodésica Nacional de Orden Inferior (ROI) se puede considerar una densificación de dicho marco, aunque con coordenadas ETRS89 con menor precisión, debido a la naturaleza de los observables utilizados para su cálculo.

La ROI está constituida por casi 11.000 vértices geodésicos en península y Baleares (densidad de un vértice por cada 45 km²) y fue observada mayoritariamente entre las décadas de los 80 y 90 mediante triangulación y el método de vuelta de horizonte, realizando compensaciones parciales por provincias a medida que los trabajos de observación iban avanzando.

El marco sobre el que se apoyaba ROI-ED50 en planimetría era la Red Geodésica de Primer Orden, con observaciones clásicas de lados de 30-40 km y por tanto con precisión muy inferior a la que se puede obtener actualmente con GPS. En altimetría, el marco sobre el que se apoyaba ROI eran un reducido número de vértices nivelados desde la antigua Red de Nivelación de Alta Precisión.

A principios de 2008 se terminó de realizar una compensación tridimensional de toda la Península y Baleares en el sistema ETRS89, publicándose estos resultados en los medios de diseminación de la información del IGN (servidor de datos FTP, página web, reseñas de vértices geodésicos, etc). Se calcularon y publicaron de toda la ROI tanto coordenadas ETRS89 (longitud, latitud, altura elipsoidal) como parámetros de fiabilidad en forma de desviación estándar de cada coordenada resultante del ajuste (Sánchez Sobrino et al, 2008), información esta última útil para que un usuario pueda decidir qué vértices utilizar para un trabajo en función de la precisión requerida. Canarias ya tenía toda la red en el sistema equivalente, REGCAN95, por lo que no fue necesario su recálculo.

Los observables utilizados para el ajuste fueron los ángulos acimutales y cenitales procedentes de las vueltas de horizonte de ROI, conjuntamente con observables GPS disponibles en algunas zonas del país.

En Cataluña, el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) llevó a cabo una campaña de observación GPS en la mayoría de los vértices ROI. También en Navarra casi todos los vértices ROI fueron observados con GPS por el Gobierno de Navarra (Dir. Gral. de Obras Públicas),

así como en Baleares por SITIBSA. En la Comunidad Valenciana también se observó una parte de la ROI con GPS durante la densificación de la red geodésica en la Comunidad de Valencia (4º orden). Todos estos organismos aportaron los datos GPS para llevar a cabo la compensación global, mezclándolos estos con los observables clásicos angulares de ROI (vueltas de horizonte con ángulos acimutales y cenitales). Otras campañas GPS observadas por el IGN en las regiones de Murcia, Madrid y de una forma más dispersa en Castilla-León fueron añadidas a esta compensación global.

Los resultados fueron bastante satisfactorios, sobre todo en planimetría, con un promedio en las elipses de error (95% confianza) del orden de 0.1 m para los vértices geodésicos sin observación GPS. En el caso de la altimetría (elipsoidal), el valor medio de las elipses de error estuvo en 19.4 cm, es decir, del orden del doble que en planimetría.

2. NECESIDAD DEL AJUSTE DE ROI EN ORTOMÉTRICAS.

En el ajuste en ETRS89 quedó pendiente un recálculo de las altitudes ortométricas de ROI, cuya precisión nominal siempre se ha citado que es de 0,3 m. Estas presentaban ciertas deficiencias debido a una serie de factores:

- El marco sobre el que se apoyaban eran vértices nivelados desde la antigua Red de Nivelación de Alta Precisión, desaparecida en la actualidad. En los años 80, esta red no había sido compensada conjuntamente, como la actual REDNAP y además había un buen número de líneas en las cuales no se había realizado gravimetría. Las discrepancias entre esta red y REDNAP llega hasta 0,3 m en algunas zonas del norte de la península. Si el R.D. 1071/2007 establece que el sistema de referencia altimétrico está materializado por las líneas de la Red de Nivelación de Alta Precisión, parece lógico que el sistema que define las altitudes ortométricas de ROI sea la actual REDNAP, por lo que es necesario un recálculo de estas altitudes. Hasta el momento, ROI no constituía un marco de referencia altimétrico consistente con REDNAP.
- Por otro lado, los vértices geodésicos nivelados que constituían el marco de referencia para las altitudes de ROI tenían una irregular distribución, ya que se encontraban en las cercanías de las antiguas líneas de nivelación, configurando polígonos que pueden tener hasta 500 km de perímetro, de tal forma que había zonas extensas en el interior de estos polígonos sin referencias fijas altimétricas

para la compensación de ROI, con la consecuente acumulación de errores.

- Como se ha dicho anteriormente, la forma de compensación de ROI en los 80 y los 90 se fue haciendo por provincias, de tal forma que se tomaban bloques provinciales en los que se fijaban para el ajuste los vértices de una provincia colindante que ya hubiera sido calculada, para evitar duplicidad de coordenadas y dotar de homogeneidad a la red en los límites provinciales. Sin embargo, esto imponía unos estreñimientos a la red de unos vértices que ya arrastraban posibles errores de la provincia limítrofe, de tal forma que no sólo se fijaban en el ajuste vértices nivelados, como hubiera sido ideal.
- Durante la revisión de los ficheros iniciales de cálculo y al compararlos con los cuadernos de campo originales, se detectaron algunos errores relativos a la altura de mira en el vértice visado. Estas alturas podían ser, por lo general, 1.20 m para una visual que apuntara a la cabeza del pilar o 0.00 m para una visual que apuntara a la base del pilar. En algunos casos, estas cantidades estaban cambiadas.

Por todo ello se hacía necesaria una nueva compensación de las altitudes ortométricas de ROI. Si bien los puntos fijos del ajuste en ETRS89 en planimetría estaba resuelto con REGENTE, el problema hasta ahora era qué vértices geodésicos configuraban el marco de referencia fijo en altimetría para tal ajuste, ya que la densidad, distribución y fiabilidad de los vértices nivelados eran aspectos problemáticos.

Actualmente, el modelo de geoide EGM2008-REDNAP permite obtener ondulaciones del geoide sobre WGS84 con precisiones absolutas del orden de 3.8 cm (Sánchez Sobrino, 2009). Esto permite que el marco de referencia para el mencionado ajuste en ortométricas puedan ser las altitudes elipsoidales de la red REGENTE transformadas a ortométricas mediante dicha ondulación del geoide. De esta forma, la precisión obtenida en las altitudes ortométricas de REGENTE es suficiente para realizar el ajuste. Si se tiene en cuenta que este modelo ha sido adaptado mediante las observaciones hechas en REGENTE y REDNAP, los resultados de altitudes obtenidos en el ajuste harían que ROI, REGENTE, REDNAP y EGM2008-REDNAP estuvieran en un marco común.

Por otro lado, REGENTE proporciona una distribución completamente homogénea y una densidad más que suficiente para el ajuste de toda la ROI, tal y como se demostró en el ajuste ETRS89 de 2008.

Una prueba definitiva de la necesidad de este ajuste es que si se calculan directamente las altitudes ortométricas obtenidas en REGENTE con el modelo EGM08-REDNAP ($h - N$) y se comparan con las ortométricas disponibles de ROI hasta el momento actual, se obtienen discrepancias muy apreciables sobre todo en la zona norte. Puesto que la altitud elipsoidal h en REGENTE es el marco legal y la ondulación del modelo tiene una precisión absoluta por debajo de los 5 cm, las altitudes ortométricas así obtenidas en REGENTE deben estar en ese orden de precisión.

En la figura 1 se pueden ver estas discrepancias obtenidas con respecto a las altitudes de ROI existentes durante los últimos 20 años. Los puntos pequeños de tono claro corresponderían a vértices cuya desviación en la altitud es normal dentro de los márgenes de precisión nominal de ROI (± 0.3 m), y aún cubriendo la mayor parte del territorio, quedan zonas importantes fuera de este rango.

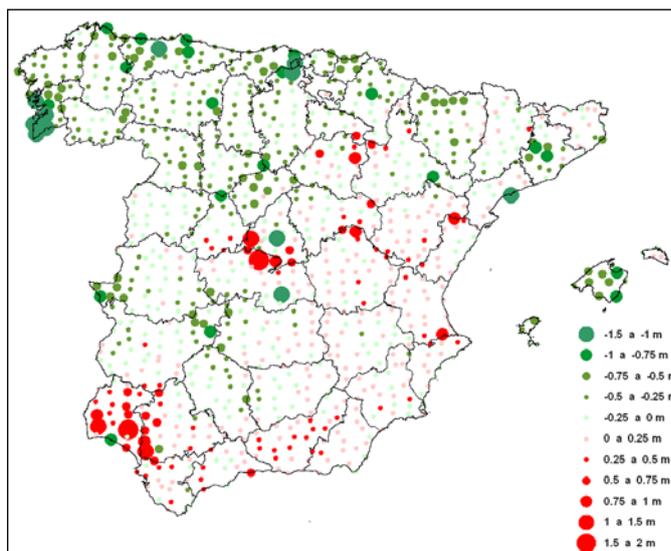


Fig. 1. Discrepancias en REGENTE de altitudes ortométricas.

La necesidad de un nuevo cálculo en las ortométricas de ROI queda patente al disponer de nuevos datos, más fiables, que pueden mejorar la precisión de las altitudes. Asimismo, estas deben tener integridad con el nuevo marco de referencia vertical REDNAP.

A pesar de todo esto no resta mérito a la faraónica labor que en la década de los 80 y principios de los 90 se hizo construyendo, observando y calculando ROI, en lugares muchas veces inaccesibles. De hecho, la mayoría de los observables, de gran calidad, son de esa época y siguen siendo válidos para obtener una precisión considerable.

3. METODOLOGÍA.

3.1. Depuración de las observaciones clásicas de ROI.

La depuración de observaciones clásicas se llevó a cabo ya en el ajuste de 2008 (Sánchez Sobrino et al, 2008). El ajuste en total contiene 100.899 observaciones angulares acimutales, 72.615 observaciones cenitales y 6.490 vectores GPS.

3.1.1. Observaciones acimutales.

La depuración de las vueltas de horizonte acimutales consistió en:

- Revisión exhaustiva de libretas de campo originales y comprobación con fichero digital (codificación, transcripción, cambio de situación de vértices, medias de series de vuelta de horizonte, etc.).
- Transformación de direcciones angulares a acimutes (con coordenadas ETRS89 aproximadas de ROI).
- Cálculo de la desorientación en la estación con todas las visuales.
- Depuración de visuales erróneas no detectadas anteriormente en un determinado rango a partir de diferencias en la desorientación de la vuelta de horizonte.

3.1.2. Observaciones cenitales.

En el caso de las observaciones cenitales, las reducciones fueron diferentes a las realizadas en el ajuste anterior, en el que se utilizó un índice de refracción genérico de 0.13 y no se aplicó corrección por desviación de la vertical.

- Revisión de libretas de campo originales y comprobación con fichero digital.
- Reducción de la visual por alturas de instrumento, pilar y mira (ángulo cenital de "marca a marca").
- Detección de errores mediante cálculo del índice de refracción con visuales recíprocas.
- Detección de errores por alturas de instrumento/mira por comparación de alturas de pilar procedentes de base de datos.
- Eliminación de visuales de más de 15 km de longitud.
- Reducción del ángulo por índice de refracción calculado con visuales recíprocas. En este caso, al contrario que en el cálculo de 2008 y tras realizar diferentes pruebas, se utilizó el ángulo de refracción calculado con las visuales recíprocas. Aunque las visuales cenitales no son estrictamente simultáneas y las condiciones entre las visuales recíprocas pueden variar, se consideró más conveniente y real utilizar el coeficiente de refracción calculado:

$$Z' = Z + \delta$$

donde

$$\delta = \frac{s}{2R} K$$

siendo K el coeficiente de refracción calculado mediante la expresión:

$$K = 1 - \frac{R}{s} (z_1 + z_2 - \pi)$$

Como es lógico, K varía con las condiciones atmosféricas en ambos extremos de la base en el momento de la observación, y más concretamente, con la del gradiente vertical de temperatura. Las observaciones recíprocas de vértices contiguos, por lo general, se hicieron en la misma época y a horas parecidas, ya que se iba observando por zonas, normalmente provincias, por lo que las condiciones meteorológicas en ambas observaciones no debieran variar considerablemente.

Por otra parte, las visuales recíprocas cuyo índice de refracción resultara menor que 0.05 o mayor que 0.20 fueron investigadas, ya que alguna de ellas en buena lógica debería tener un error, aunque a veces y bajo circunstancias concretas esto no tiene porqué ser cierto e incluso pueden darse coeficientes negativos de hasta -0.1 (Torge, 1991).

Para la reducción de las visuales sin recíproca se utilizó un índice de refracción genérico de 0.13, que fue el calculado como global para toda la red.

- Reducción del ángulo cenital por desviación de la vertical en función de las componentes ξ y η y del acimut α de la visual:

$$Z'' = Z' + \varepsilon$$

$$\varepsilon = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha$$

El ajuste se realiza en coordenadas cartesianas tridimensionales y por tanto, el origen son incrementos de altitud elipsoidal. El software

utilizado (Microsearch GeoLab) no reduce las observaciones cenitales (referidas a la normal al geoide) a elipsoidales (referidas a la normal al elipsoide) por desviación relativa de la vertical y por tanto es necesario aplicar esta reducción previamente.

Esta es una variación muy importante con respecto al cálculo de 2008, ya que en ese momento, al no disponer de un modelo de geoide con la suficiente precisión, se decidió no aplicar esta corrección, que si bien puede ser despreciable en la mayor parte de la red, llega a ser muy importante en las zonas donde la desviación de la vertical es considerable. A modo de ejemplo, una desviación de la vertical de 15" con una longitud media de visual de 8,5 km y dependiendo del acimut con que se observe, causa una diferencia en altitud elipsoidal que puede alcanzar 0.62 m. En el caso de una desviación de 10", la diferencia podría ser de hasta 0.41 m.

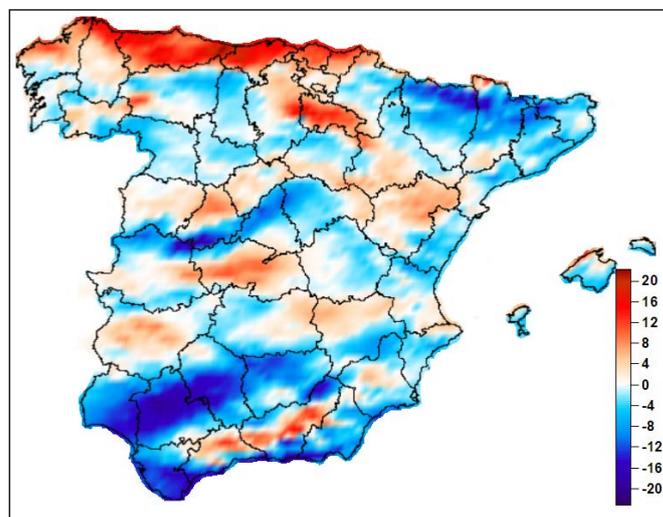
En vértices con observaciones GPS (Cataluña, Navarra, Baleares), la diferencia en altitudes elipsoidales con respecto al cálculo anterior es prácticamente inexistente, ya que el peso de los observables GPS en el ajuste hace que los cenitales tengan poca importancia. En la mayoría de la red las diferencias son pequeñas, pero en las zonas con fuerte desviación de la vertical, pueden darse diferencias a tener en cuenta (el 12% de los vértices sin GPS tienen una desviación total superior a 10"). Este aspecto sin embargo queda parcialmente suavizado por el constreñimiento tan fuerte de la red (todos los vértices REGENTE), de tal forma que las diferencias en altitud elipsoidal del orden superior a 0,1 m sólo se producen en unos pocos vértices.

Se ha utilizado el modelo EGM08-REDNAP, que en el programa de ajuste proporciona la altitud ortométrica a partir de la elipsoidal obtenida. Es ilustrativo comprobar los valores límite de la desviación de la vertical en vértices de la red geodésica:

$$\xi: \begin{cases} \text{Min: } -23.9'' & (40^\circ 09' 23'' \text{ N}; 5^\circ 26' 45'' \text{ W}) \\ \text{Max: } 24.9'' & (43^\circ 18' 32'' \text{ N}; 4^\circ 45' 25'' \text{ W}) \end{cases}$$

$$\eta: \begin{cases} \text{Min: } -22.1'' & (37^\circ 06' 14'' \text{ N}; 3^\circ 30' 36'' \text{ W}) \\ \text{Max: } 15.4'' & (42^\circ 17' 20'' \text{ N}; 2^\circ 52' 04'' \text{ W}) \end{cases}$$

En las siguientes figuras se puede ver la distribución espacial de la desviación de la vertical en ambas componentes (figuras 2 y 3) y en la total ($\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$), (figura 4), así como los histogramas de frecuencias correspondientes en la ROI.



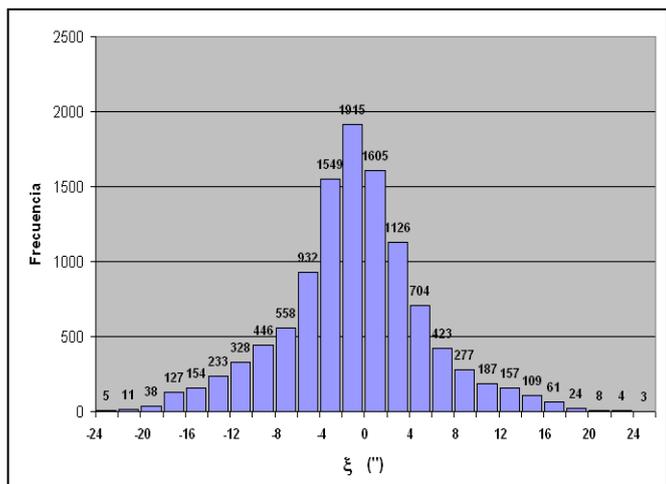


Fig. 2. Desviación de la vertical N-S (ξ'') e histograma de frecuencias.

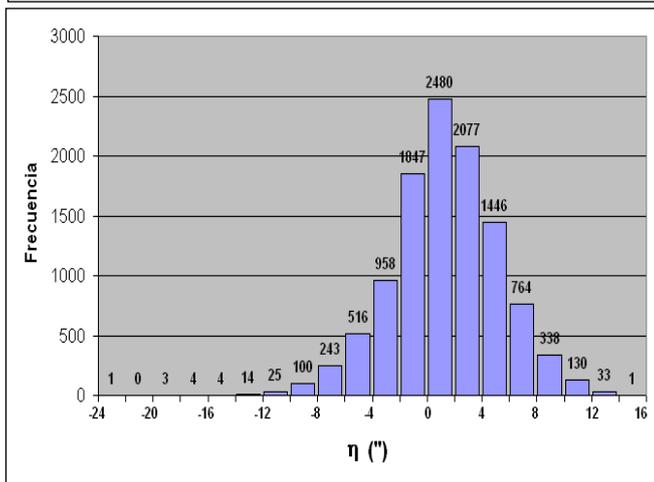
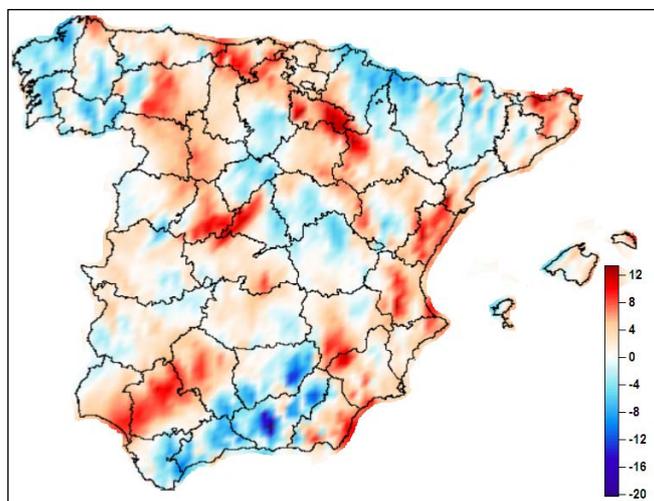


Fig. 3. Desviación de la vertical E-W (η'') e histograma de frecuencias.

3. 2. Ajustes parciales de observaciones.

Una vez depuradas las observaciones clásicas se procedió a realizar un ajuste independiente por bloques de cada grupo de observaciones (GPS, acimutales y cenitales) con una doble finalidad:

- Detectar observaciones erróneas no detectadas en el análisis previo descrito anteriormente (por exceder el valor crítico del residuo tipificado).

- Establecer una ponderación adecuada para cada uno de los tres tipos de observaciones que se utilizará en la posterior compensación conjunta, asignando a cada subconjunto el peso adecuado.

En el caso de las observaciones cenitales, la varianza a priori para cada una de las observaciones se estableció como una función de la distancia de la visual. La expresión de este valor se tomó una población de más de 4000 visuales corregidas, calculando las diferencias entre desnivel directo y recíproco y ajustándolas mediante un polinomio de regresión de grado 2. La función adoptada para la desviación estándar del desnivel observado (por el cenital) es:

$$\sigma[\square] = (0.05 \cdot \hat{D}(km) + 3) \text{ cm}$$

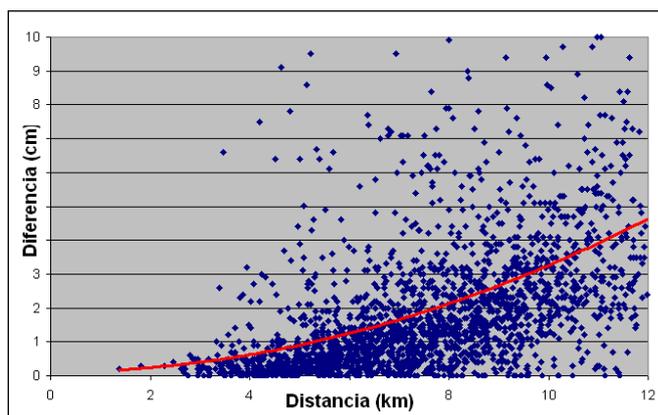


Fig. 4. Distribución de diferencias entre cenitales directo y recíproco.

Esta expresión resultó ser bastante adecuada al obtener la estimación de la varianza a posteriori del ajuste, debiendo únicamente multiplicarla por un factor corrector.

La varianza de estimación a posteriori resultante para introducir como peso en las observaciones angulares acimutales fue 6^{cc}.

El software utilizado para el ajuste fue Microsearch Geolab 2001, utilizado ampliamente por la mayoría de las agencias internacionales en geodesia.

3. 3. Ajuste conjunto (GPS y observaciones angulares).

Finalmente, aplicando los pesos obtenidos en los ajustes independientes anteriores, se realizó una compensación conjunta, en la que también se pudieran detectar posibles inconsistencias entre ambas observaciones no detectadas en pasos anteriores.

Por último, se eliminaron algunas observaciones por presentar un residuo alto en el ajuste final, superior al crítico correspondiente al test Tau.

En la figura 5 se puede ver el gran volumen de datos del ajuste realizado, con casi 200.000 observables y 150.000 grados de libertad en el sistema de ecuaciones.

PARAMETERS		OBSERVATIONS	
Description	Number	Description	Number
No. of Stations	10994	Directions	100899
Coord Parameters	29794	Distances	3
Free Latitudes	9936	Azimuths	0
Free Longitudes	9936	Vertical Angles	0
Free Heights	9922	Zenithal Angles	72615
Fixed Coordinates	3188	Angles	0
Astro. Latitudes	0	Heights	0
Astro. Longitudes	0	Height Differences	0
Geoid Records	0	Auxiliary Params.	0
All Aux. Pars.	12006	2-D Coords.	0
Direction Pars.	12006	2-D Coord. Diffs.	0
Scale Parameters	0	3-D Coords.	0
Constant Pars.	0	3-D Coord. Diffs.	19470
Rotation Pars.	0		
Translation Pars.	0		
Total Parameters	41800	Total Observations	192987
Degrees of Freedom =		151187	

Figura 5. Parámetros y observables del ajuste conjunto.

4. ESTADÍSTICAS Y RESULTADOS.

Del ajuste final se obtuvieron coordenadas (geográficas y UTM en el huso correspondiente), así como desviaciones estándar y elipses de error (95% de confianza) para todos los vértices de la red. Esta información (parámetros de fiabilidad de las coordenadas de cada vértice geodésico) se suministra junto a las coordenadas en las fichas y listados correspondientes, ya que es un dato que puede ser muy útil al usuario que está apoyándose en la red geodésica, según el tipo de trabajo y la precisión requerida para el mismo.

Las coordenadas planimétricas del ajuste en ETRS89 apenas han sufrido variación respecto al ajuste del 2008, con desviaciones estándar promedio para aquellos vértices con observación clásica de 3,7 cm, siendo el semieje mayor promedio de las elipses de error (95% confianza) de 9.7 cm. En el caso de los 1223 vértices con observación GPS, los valores anteriores quedan reducidos a 0.6 cm y 1.4 cm respectivamente.

En el caso de la altimetría, al introducir la corrección por desviación de la vertical en los ángulos cenitales, el cálculo mejora considerablemente y por tanto también hay cambios sustanciales en los valores de altitud elipsoidal, respecto al cálculo de 2008, con incidencia especialmente importante en aquellas zonas con un valor de desviación de la vertical considerable, donde el gradiente de ondulación del geoide es grande (por ejemplo, Valle del Guadalquivir, cornisa Cantábrica, Pirineos y Sistemas Ibérico y Central). Como se ha dicho antes, la diferencia es inapreciable en las zonas donde hay observación GPS conjuntamente con cenitales, ya que el peso de los observables GPS eclipsa a las observaciones cenitales (Cataluña, Navarra, Baleares...).

En este ajuste en altimetría la desviación estándar promedio es de 4.5 cm para los 8700 vértices con observaciones cenitales, y el error vertical promedio -al 95 % de confianza- es de 8.8 cm (en 2008 fue de 19.4 cm). Es decir, se ha conseguido reducir el error altimétrico de los vértices sin observaciones GPS a la mitad. Además, el 81% de los vértices tienen una elipse de error menor que 10 cm (figura 6).

En el caso de los 1222 vértices con observables GPS, la desviación estándar promedio resultante es de 1.2 cm y la elipse de error promedio de 2.3 cm (figura 7).

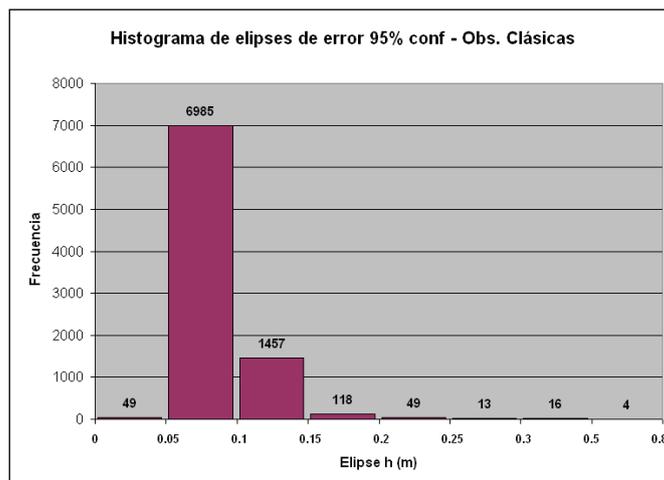


Fig. 6. Histograma de elipses de error vertical (95% conf) en vértices con sólo cenitales.

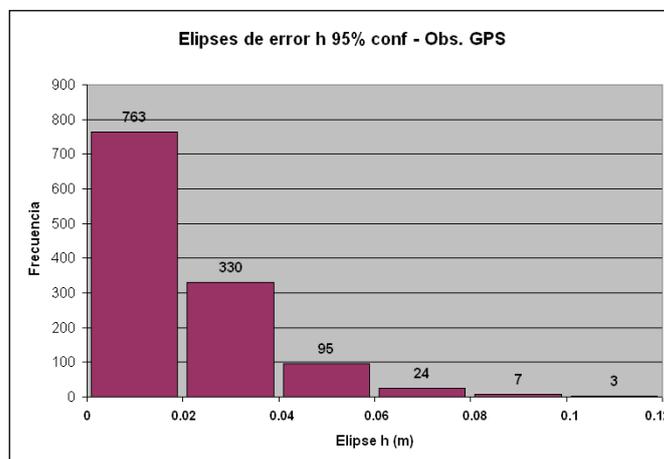


Fig. 7. Histograma de elipses de error vertical (95% conf) en vértices con GPS y cenitales.

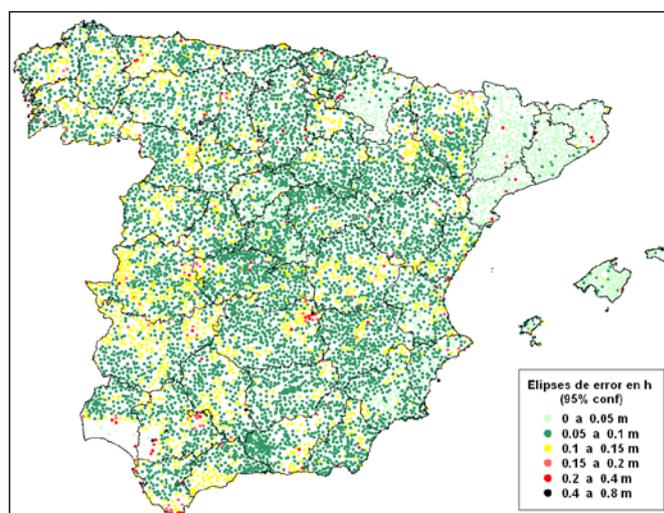


Fig. 8. Distribución de las elipses de error vertical.

5. CONCLUSIONES.

Se ha realizado el nuevo ajuste de la Red Geodésica de España en ETRS89 construyendo a la red REGENTE con observaciones clásicas angulares e incluyendo observaciones GPS adicionales,

obteniendo una precisión final mejor que 0,1 m en planimetría y altimetría (altitudes elipsoidales). En los más de 1.200 vértices geodésicos en los que se han incluido observaciones GPS los resultados han sido notablemente mejores.

Se ha obtenido un nuevo juego de altitudes ortométricas de ROI, más consistentes con REDNAP, a través del modelo de geoide EGM08-REDNAP y potencialmente, más precisas que las anteriores.

En la figuras 9 y 10 se pueden ver las diferencias de altitudes ortométricas con respecto a los valores que han existido durante casi 30 años. Los tonos claros corresponden a aquellos vértices cuya variación está dentro de lo normal dada la precisión nominal de las altitudes ortométricas de ROI anteriores (0.3 m), lo cual corresponde al 68% de los vértices. Entre 0.3 y 0.6 m de diferencia estarían un 25% más de los vértices y finalmente, sólo un 7% de la ROI tendría un cambio en las altitudes ortométricas mayor que 0.6 m.

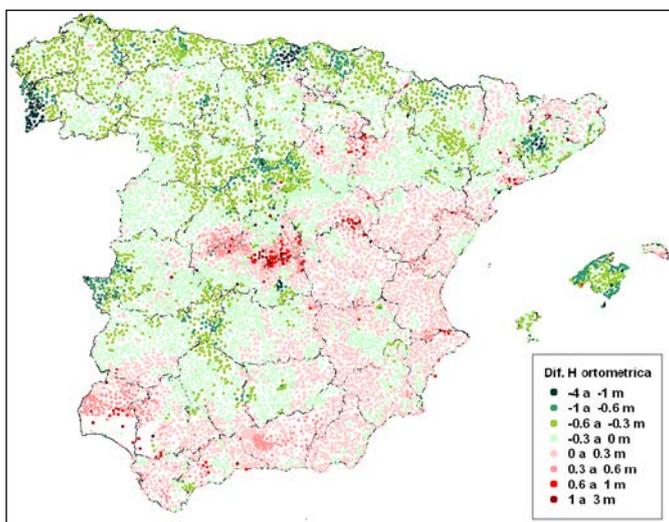


Fig. 9. Diferencias en las altitudes ortométricas de ROI.

La distribución de las diferencias presenta, como era de esperar, cierto sistematismo que evoluciona de unas a otras partes del territorio.

La homogenización de un trabajo o levantamiento anterior con otro actual es posible al comparar los valores iniciales adoptados en aquel con los del nuevo ajuste para los "puntos datum". Si el área afectada es pequeña, la corrección se limitará a una traslación de alturas, y si la extensión territorial es mayor podría resumirse a un plano desplazado verticalmente con dos ligeras inclinaciones N-S y E-O.

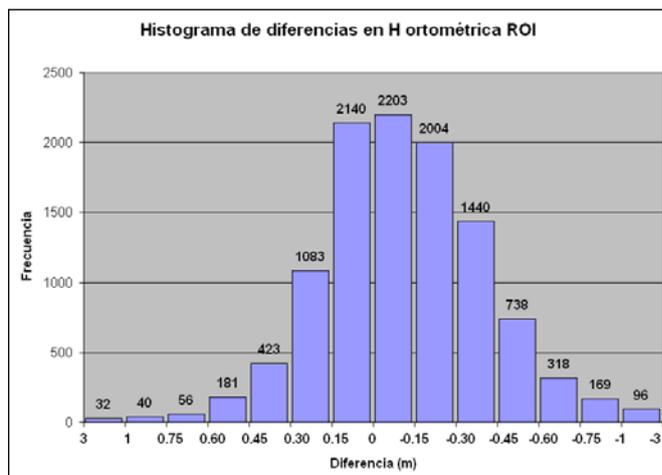


Fig. 10. Histograma de diferencias en la altitud ortométrica de ROI.

6. AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos la colaboración a todas aquellas instituciones que han cedido sus observaciones GPS al IGN para realizar el ajuste conjunto de la red:

- Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).
- Gobierno de Navarra (Dir. Gral. de Obras Públicas).
- SITIBSA (Islas Baleares).
- Instituto Cartográfico Valenciano (ICV) y Comunidad de Valencia.

También a todos aquellos I. T. Topografía del Instituto Geográfico Nacional que durante dos décadas han estado trabajando en la Red Geodésica Nacional, por el alto valor y calidad de las observaciones.

7. REFERENCIAS.

- Cano, M. A., Talaya, J., Termens, A., Quirós, R., Revuelta, L., Sobrino, J. A. S. (2006): Ajuste de la Red Geodésica de Orden Inferior R.O.I. de Cataluña en ETRS89. 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Sevilla. Febrero 2006.
- Quirós Donate, R., Barbadillo Fernández, A., Regidor Gutiérrez, J.L., Sanz Megía, J.M., Cano Villaverde, M.A., Prieto Morín, J.F. (2002): El Proyecto REGENTE. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Valencia, 2002.
- Sánchez Sobrino, J.A., Cano Villaverde, M.A., Revuelta Villeras, L., Quirós Donate, R. (2008): Ajuste de la Red Geodésica de España (ROI) en ETRS89. Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Vol. 25, Nº 144-145, 2008.
- Sánchez Sobrino, J. A. (2009): El nuevo modelo de geoide para España EGM2008-REDNAP. Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Nº 155, 2009.
- Torge, W. (1991): Geodesy. 2ª edición. Ed. Walter de Gruyter. Nueva York - Berlín.

El modelo combinado de geoides EGM2008-REDNAP

The combined geoid model EGM2008-REDNAP

Jose Antonio Sánchez Sobrino, Antonio Barbadillo Fernández, Adolfo Dalda Mourón
 Instituto Geográfico Nacional, Avda.General Ibañez de Ibero, 3, 28003, Madrid, jassobrino@fomento.es

SUMMARY

Obtaining orthometric heights derived from GNSS techniques require to use a serie of points with well known orthometric altitude and perform a local model to interpolate or to have a geoid model with the required precision. However, to use gravity models, they must first be adapted to existing vertical datum. This article summarizes the work done in order to adapt the most recent world gravity model EGM2008 to the Vertical Reference System in Spain materialized by the High Precision Levelling Network (REDNAP). In this sense a surface correction has been computed by the minimum curvature algorithm using the double set of elevations (orthometric and ellipsoidal heights) of about 13700 REDNAP benchmarks. Finally, it has been estimated an absolute accuracy of 3.8 cm tested in the final model on distant points that have not been used in a first estimation and a relative accuracy of about 2 parts per million.

1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, con las técnicas GNSS es fácil obtener coordenadas con precisión suficiente para todo tipo de aplicaciones geodésicas y topográficas incluso trabajando a distancias relativamente grandes. La red geodésica de estaciones permanentes (ERGNSS) y la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE) proporcionan un marco homogéneo y preciso para la geodesia nacional en el nuevo sistema European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89). Asimismo, la mayor parte de las Comunidades Autónomas han desplegado redes de estaciones permanentes GNSS en su territorio con coordenadas en un sistema de referencia absolutamente compatible con los marcos de las redes nacionales del Instituto Geográfico Nacional y con la suficiente densidad de estaciones como para poder ofrecer a los usuarios correcciones diferenciales de fase, de tal forma que estos pueden obtener precisiones de unos pocos centímetros en tiempo real.

Según el Real Decreto 1071/2007 para el cambio de sistema geodésico de referencia en España, ETRS89 y REGCAN95 son los nuevos marcos en los que se debe compilar toda la información geodésica, topográfica y cartográfica. Asimismo, en el Artículo 4, se establece que "el Sistema de Referencia Altimétrico tomará como referencia el nivel medio del mar Mediterráneo en Alicante para la península y las respectivas referencias mareográficas locales para el resto de los territorios. En todos los casos, el sistema altimétrico queda materializado por la nueva Red Española de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP) con altitudes ortométricas Helmert (H)".

Tanto la red de estaciones permanentes ERGNSS como REGENTE tienen altitudes elipsoidales (h) sobre ETRS89 bien determinadas y por tanto el usuario también puede calcular altitudes sobre el elipsoide con sistemas GNSS. Sin embargo, el problema surge a la hora de transformar estas altitudes elipsoidales en altitudes ortométricas, que, obviamente, tienen una aplicación más práctica en topografía y cartografía.

La relación entre ambas es bien conocida por todos, denominada ondulación del geoides, o separación entre geoides y elipsoide en un punto tomada sobre la normal al geoides.

A partir de la figura 1 se puede aproximar (las normales al geoides y al elipsoide no son coplanarias debido a la curvatura de la línea de la plomada respecto a la normal al elipsoide) y obtener la relación entre ambas altitudes:

$$N = h - H$$

En el caso de España, N es siempre positiva con respecto al elipsoide de referencia SGR80 usado en ETRS89, si bien en todo el globo

adquiere valores positivos o negativos que en general no superan los 100 m (figura 2).

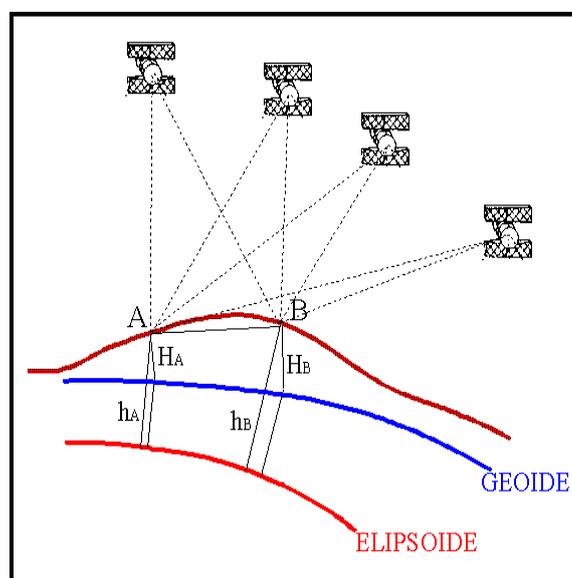


Fig. 1. Relación entre geoides y elipsoide.

Es por tanto imprescindible cuando se trabaja con GNSS disponer de un modelo de geoides con la suficiente precisión relativa para convertir incrementos de altitud elipsoidal en incrementos de altitud ortométrica, ya que la altimetría que se obtiene, por principio, es sólo la elipsoidal.

Ahora bien, los modelos de geoides gravimétricos raramente se ajustan de manera exacta con la superficie de referencia vertical legal en cualquier país. Este ajuste debe hacerse con puntos de la red de nivelación de precisión en los que además de la altitud ortométrica, se haya observado la altitud elipsoidal mediante GPS. De esta forma que se tendrán dos estimaciones del modelo geoidal (Featherstone, 1998):

1. Un modelo de geoides puramente gravimétrico, para su uso en geodesia, oceanografía y geofísica (Vanicek et al, 1994), definido como una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre ($W_0 = \text{constante}$) y que sensiblemente coincide con el nivel medio de los océanos a escala global.
2. Un conjunto discreto de ondulaciones como separación entre la superficie de referencia vertical legal y el elipsoide

WGS84, cuyo uso queda restringido a la conversión directa de altitudes GPS a ortométricas referidas a dicha superficie. Este segundo modelo ya no debería llamarse estrictamente un modelo de geoide, ya que pierde la condición de superficie de referencia equipotencial, pero sí permite correlacionarlo con el modelo gravimétrico para obtener una solución más ajustada entre unas observaciones y otras.

En teoría, el segundo modelo, si está construido sobre la base de una superficie de referencia con altitudes ortométricas, no debería perder la condición de potencial $W_0 = \text{constante}$, ya que estas altitudes están derivadas de cotas geopotenciales.

La solución del modelo de geoide gravimétrico proporciona una detallada información, pero presenta deficiencias en las longitudes de onda largas (Sideris y She, 1995). Por el contrario, la combinación GPS y nivelación tiene una precisión relativamente homogénea y es más real a largas distancias, por lo que esta fuente de datos proporcionará una superficie donde el GPS definirá el control vertical en las longitudes de onda largas mientras las ondulaciones de longitudes de onda medias y cortas se obtienen con la ayuda del modelo de geoide gravimétrico, especialmente en regiones donde no existen datos GPS y en el presente caso, a distancias relativamente alejados de las líneas de nivelación REDNAP.

2. EL NUEVO MODELO GEOPOTENCIAL EGM2008.

En España, el primer modelo de geoide gravimétrico con suficiente precisión fue IBERGEO95 (M. Sevilla), publicado en 1995. Este modelo fue escalado y llevado al sistema de referencia vertical de España mediante unos 200 puntos dobles de la antigua Red de Nivelación de Alta Precisión (RNAP), en los cuales se había hecho observación GPS durante la campaña REGENTE.

Desde entonces han aparecido nuevos modelos de geopotencial mucho más precisos, nuevos modelos digitales del terreno para las correcciones topográficas, sobre todo en zonas marinas y más datos de anomalías de gravedad.

En 2006 el mismo autor publicó un modelo más preciso teniendo en cuenta estas variables denominado IBERGEO 2006 (Sevilla, M.J., 2006), realizado con más de 200.000 datos de gravedad y a partir del modelo geopotencial EIGEN-CG03C publicado por el GeoForschungsZentrum de Potsdam (GFZ), con datos obtenidos de la misión CHAMP. El modelo geopotencial usado corresponde a un desarrollo en armónicos esféricos completo hasta grado y orden 360.

En 2005, V. Corchete (Universidad de Almería) publicó también un modelo gravimétrico (IGG2005), basado en el modelo geopotencial EIGEN-CG01C de la misión CHAMP, con datos gravimétricos de casi 180.000 puntos procedentes del National Geophysical Data Center (NGDC), Bureau Gravimetric International (BGI) y el United States Geological Survey (USGS) y datos altimétricos de STRM90M (Modelo digital del terreno a escala global de 90 m de resolución).

En 2008, un nuevo modelo geopotencial ha sido publicado por el National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM Development Team, el Earth Gravitational Model 2008, EGM2008 (Pavlis et al, 2008). Este modelo gravitacional (figuras 2 y 3) es un desarrollo completo en armónicos esféricos hasta grado y orden 2159 y contiene coeficientes adicionales extendidos hasta grado 2190 y orden 2159 (www.nga.mil), lo cual implica que registra el campo gravitatorio hasta aproximadamente 20 km de longitud de onda. Este modelo ha sido elaborado con anomalías de gravedad a partir de una rejilla de 5' x 5', cuyos datos proceden de diferentes fuentes, sobre todo misiones altimétricas (GRACE).

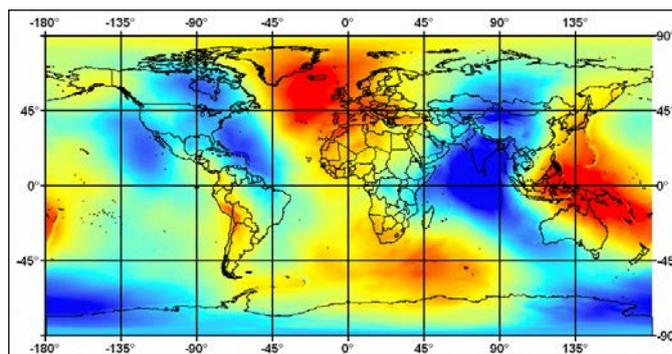


Figura 2. Modelo mundial EGM2008 (Fuente: <http://earth-info.nga.mil>)

EGM2008 es el modelo a escala mundial más completo y preciso obtenido hasta el momento. Está disponible en forma de malla de 1' x 1' y de 2.5' x 2.5', incluso en formato GIS de ESRI, con valores de ondulación sobre WGS84. Un test con datos GPS/nivelación de más de 12.000 puntos a nivel global ha demostrado que la precisión de EGM2008 en desviación estándar se encuentra en el orden del decímetro y mucho mejor en precisión relativa, mejorando con mucho los modelos globales que había hasta el momento (se prevé que la misión GOCE aporte datos aún más completos y fiables). Estos errores están computados a nivel global, por lo que sería necesario una estimación más precisa en una determinada zona con otros datos independientes.

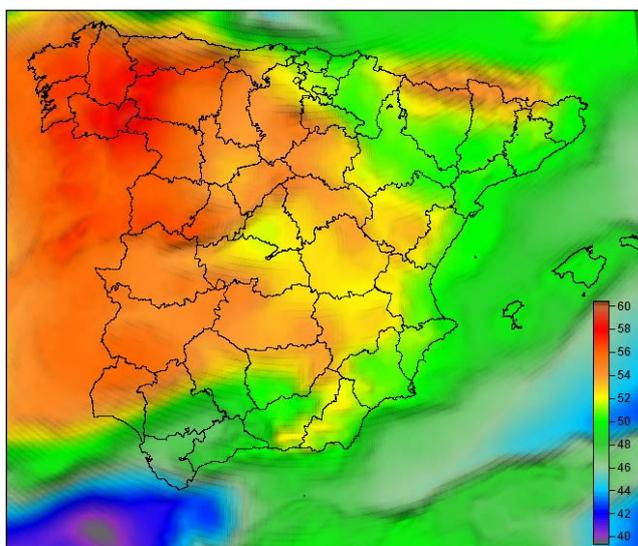


Fig. 3. EGM 2008 en Península y Baleares.

Una comparación similar ha sido realizada recientemente en la Comunidad Valenciana utilizando 223 señales REDNAP con los modelos geopotenciales EGM96 y EIGEN-CG03C, así como con los modelos de geoide EGG97, IGG05, IBERGEO2006 y GCV07 (Martín, A. et al 2008), con resultados muy parecidos en cuanto a desviación estándar (0.106 m).

3. ADAPTACIÓN DE EGM2008 AL SISTEMA DE REFERENCIA VERTICAL EN ESPAÑA.

3.1. El proyecto REDNAP.

El proyecto REDNAP (Red Española de Nivelación de Alta Precisión) constituye la nueva red altimétrica de España, realizada entre los años 2000 y 2008. Está constituida por unas 25.000 señales dispuestas a lo largo de líneas, con una separación media entre los

puntos de 1000 metros, configurando una red de unos 18000 kilómetros. La red ha sido observada con técnicas de nivelación de alta precisión en cuanto a la medición de desniveles geométricos, según unas estrictas prescripciones. Se han realizado medidas de gravedad con gravímetros Lacoste & Romberg partiendo de bases cercanas con itinerarios cerrados para ajuste de la deriva instrumental.

Desde 2008 se están llevando a cabo campañas de densificación de REDNAP, con 34 nuevas líneas (unos 3200 km más) con el objetivo de que ningún polígono supere los 400 km de perímetro (proyecto ampliación REDNAP).

La compensación la red se ha realizado en cotas geopotenciales, como red libre, apoyada en el punto origen NP1 (Alicante), obteniéndose las altitudes ortométricas en función del resultado de geopotenciales, con unos vectores de error máximos en el ajuste (95% confianza) de 8 cm en las zonas más alejadas de NP1 (Galicia y Gerona), con una precisión relativa media de 0.16 ppm (Barbadillo, A. et al, 2008).

De acuerdo con la tendencia actual en la definición de datums verticales en todo el mundo, el ajuste podría hacerse fijando las estaciones mareográficas con datos de nivel medio disponibles en toda la península, pero la diferencia entre el Mediterráneo y el Cantábrico hace que se tenga que deformar la red. La última diferencia medida entre el mareógrafo de Alicante y el de La Coruña medida a través de REDNAP es de 0.287 m (con una elipse de error 95% de confianza en Coruña inferior a 8 cm).



Fig. 4. Nodos REDNAP y vectores de error resultantes del ajuste (95% confianza).

Después de realizar una comparación detallada en puntos de GPS y nivelación de precisión con los modelos de geoide disponibles, se llegó a la conclusión que EGM2008 era el que mejor se adaptaba de manera relativa al Sistema de Referencia Vertical en Península y Baleares, materializado por la Red Española de Nivelación de Alta Precisión, aunque existe un "offset" o desplazamiento medio de 56,1 cm ($N_{EGM2008} - N_{REDNAP}$), debido a la diferencia entre el potencial correspondiente al nivel medio del Mediterráneo en Alicante y el potencial W_0 adoptado por EGM2008. Este desplazamiento se calculó con los valores de ondulación de todas las señales válidas como valor medio de diferencia entre REDNAP y EGM2008.

Es necesario por tanto, para su uso práctico, la adaptación de EGM2008 a REDNAP, utilizando puntos con doble juego de altitudes (elipsoidal y ortométrico). La idea es ajustar la superficie de

ondulaciones dada por un geoide gravimétrico (EGM2008) a las observaciones realizadas sobre REDNAP, de tal forma que el modelo resultante disponga de ondulaciones sobre el sistema de referencia materializado por el datum vertical en España. Como se ha dicho anteriormente, en sentido estricto, el modelo resultante es relativo a la que se podría llamar "Superficie de Referencia Vertical", pero desde el punto de vista práctico, es la superficie necesaria para convertir altitudes GPS en ortométricas.

Iniciativas semejantes han sido llevadas a cabo mediante la adaptación de geoides gravimétricos al datum vertical con datos GPS en las redes de nivelación en Estados Unidos: GEOID03 (Milbert, 1995) y GEOID09 (Roman et al, 2009), en Francia (Jiang y Duquenne, 1996), en Australia, AusGeoid98 (Featherstone et al, 2002 y Fotopoulos, G., 2002), Canadá (Fotopoulos, G. et al, 1999), Bélgica (Duquenne, H. et al, 2004), Alemania (Denker, H. et al, 1999), incluso para toda Europa (Denker, H. et al, 1998), etc. Estos son sólo unos ejemplos de los innumerables trabajos realizados en este sentido en todo el mundo.

3.2. Fuentes de datos.

Con la finalidad de dar coordenadas ETRS89 a las señales de REDNAP, en casi todas ellas se ha observado además GPS, utilizando como bases vértices geodésicos de la red REGENTE. El método de observación ha sido "estático rápido", siendo la distancia de las líneas base o distancia entre el vértice REGENTE y la señal REDNAP, por lo general, menor de 20 km. El tiempo medio de observación de cada señal fue de unos 10 minutos.

Las altitudes elipsoidales obtenidas adolecen de los defectos inherentes al método empleado, a la ubicación del punto –idónea para la red de nivelación pero en múltiples ocasiones inapropiada para observación GPS-, estacionamiento no estricto y a otras causas de error. Por esta razón, no todos los puntos REDNAP han sido observados con GPS. No en todos aquellos donde se ha intentado la observación GPS, el resultado ha sido satisfactorio (por ejemplo, señales de nivelación empotradas en edificios con un horizonte muy limitado). Salvadas estas puntualizaciones, se puede afirmar que se dispone de un número considerable de observaciones que permiten una estimación de la ondulación del geoide por diferencia entre la altitud ortométrica y la altitud elipsoidal así obtenidas.

Por otro lado, el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC), también observó casi 300 puntos REDNAP en RTK utilizando su red de estaciones permanentes GNSS. Con estas observaciones se ha podido realizar una contrastación con los datos observados por el IGN en estático rápido desde REGENTE y así verificar su concordancia, facilitando la depuración de datos en esa región.

Recientemente se ha iniciado un proyecto de ampliación de REDNAP, pero la observación GPS ha seguido un criterio más estricto, cambiándose el estático rápido de 10 minutos por un estático de 30 minutos, eligiendo escrupulosamente aquellas señales con buenas condiciones para la observación GPS (buen estacionamiento, horizonte despejado, no multipath...). El estacionamiento en en estos casos ha sido mediante jalón de altura fija con nivel esférico sujetado mediante trípode con pinza, de tal forma que se garantiza de forma estricta la altura de antena sobre la señal. En lugar de observar todos los puntos, cada kilómetro, innecesario para la finalidad que nos ocupa, se observa una señal cada cinco, normalmente una señal principal. De esta forma se tienen a lo largo de la línea de nivelación coordenadas ETRS89 y altura elipsoidal cada cinco kilómetros, pero con una fiabilidad considerablemente mayor que en la observación estático rápido. La longitud de la línea base sigue siendo como máximo de 20 kilómetros, con estación de referencia en un vértice REGENTE.

Por otro lado, la observación de REGENTE se realizó siempre en bloques de nueve vértices geodésicos y dos clavos de la antigua red de nivelación (RNAP) cercanos entre ellos y a uno de los nueve vértices del bloque, de tal forma que estas señales tenían doble juego de altitudes (elipsoidal y ortométrica), con la finalidad de transferir altitud ortométrica a uno de los vértices REGENTE del bloque. Precisamente estas señales son las que sirvieron para hacer el escalado de IBERGEO95, denominadas "apoyos de nivel de REGENTE".

De esta forma se contaba con unos 200 puntos dobles más con seis horas de observación GPS a menos de 5 km de un vértice REGENTE. El problema en este caso es que las señales de nivelación corresponden a la antigua red de nivelación de alta precisión, cuyo datum difiere ligeramente y en una cantidad variable espacialmente de la moderna REDNAP. En algunas zonas esta diferencia es de unos pocos centímetros, pero en otras, sobre todo en el norte, la diferencia llega hasta los 14 centímetros, por lo que, en principio, no se puede dar por válida la altitud ortométrica de estas señales. En un próximo proyecto se integrarán las líneas antiguas que aún tienen suficiente número de señales sin destruir, en la nueva REDNAP.

Sin embargo, existen muchas señales comunes entre una y otra red (unas 3.000), con lo cual para la mayoría de las señales de nivelación REGENTE se ha podido establecer una conexión entre la antigua y la nueva REDNAP, adoptando un valor de altitud ortométrica en estas señales referidas al nuevo datum altimétrico. De esta forma, finalmente se han obtenido unos 125 puntos dobles válidos para el presente trabajo.



Fig. 5. Señales REDNAP antiguas y apoyos de nivel de REGENTE.

Otros datos que se han usado para construir la superficie de corrección a EGM2008 han sido los datos aportados de Portugal y Francia (por debajo del paralelo 44º) para el proyecto de densificación del European Unified Vertical Reference Network (EUVN_DA) de EUREF. Estos puntos pertenecen o están conectados a la red de nivelación de precisión de cada país y han sido escrupulosamente observados con GPS, de tal forma que estos datos han servido para establecer el EUVN (EVRS2000) y escalar el modelo de geoide europeo EGG97 (Kenyeres et al., 2006).

3.3. Depuración de los datos.

La aportación más numerosa la hacen los datos estático rápido de REDNAP, aunque también es cierto que, por numerosos motivos (escaso tiempo de observación, defectuoso estacionamiento en las

señales, pobre horizonte GPS...), la precisión en estos puntos ha de ser necesariamente menor y por tanto es imprescindible la exhaustiva depuración de los datos y la evaluación de su calidad, tarea que ha sido sin duda la más costosa en tiempo, dado el gran volumen de datos, ya que se ha hecho estático-rápido en casi 17.000 señales.

Es obvio que el error que se pudiera tener en las señales es exclusivamente debido a la altitud elipsoidal observada con GPS, ya que el valor de altitud ortométrica está observado con nivelación de alta precisión (tolerancia $1.5\sqrt{k}$ mm), con nodos perfectamente compensados y en las que si hubiera algún error en la nivelación, hubiera sido detectado por diferentes métodos. Por lo tanto, la depuración se hizo siempre sobre la altitud elipsoidal.

Una primera depuración se hizo eliminando aquellos puntos en los que no fue posible resolver ambigüedades de fase (en L1 para líneasbase < 5 km y libre ionosfera para líneasbase > 5 km). En algo más de 500 señales no se pudieron resolver ambigüedades, por lo que la solución, a priori, tuvo que ser rechazada.

La segunda depuración se llevó a cabo analizando la tendencia en la ondulación del geoide entre señales consecutivas, ya que, salvo excepciones, el valor de ondulación observada (GPS-nivelación) debería seguir una tendencia uniforme entre señales que, normalmente, están separadas tan sólo un kilómetro, distancia en la que la variación de ondulación del geoide, debe ser bastante suave. Para analizar la idoneidad de una señal se observaron los valores de las señales anteriores y posteriores, elaborando gráficas con líneas de tendencia y eliminando aquellas señales con un sesgo superior a 0,08 m respecto a la tendencia marcada por las señales cercanas.

La tercera depuración, muy similar a la anterior, y en la que se pudieron refinar aún más los datos, consistió en observar en cada línea de nivelación las diferencias entre la ondulación observada y la ondulación dada por EGM2008 (aplicando el desplazamiento entre ambas superficies de 56.1 cm), de tal manera que la diferencia entre las dos superficies se modeló en cada línea de nivelación con un polinomio de grado 5 que se adapte a la tendencia. En una línea continua donde aproximadamente cada kilómetro (a veces más) se tiene la diferencia entre ondulación observada y ondulación del modelo, la variación de estas diferencias debería responder a una función suavizada, aunque a veces puede recoger irregularidades locales. Un salto de un dato respecto de esta función polinómica de tendencia indica que su altitud elipsoidal puede ser sospechosa, de tal manera que puede ser "razonablemente" eliminada. Con este criterio se eliminaron igualmente señales cuyo sesgo con respecto a la línea de tendencia era superior a 0,08 m.

El último criterio de validación de los datos fue mediante la validación cruzada de una superficie de mínima curvatura que se adaptara a los puntos. La técnica consiste en que para validar un punto cualquiera, se reconstruye la superficie de curvatura mínima sin tener en cuenta ese punto, y el valor resultante de la superficie se compara con el dato, de tal forma que se obtienen unos residuos. Lógicamente, y más con este juego de datos donde obviamente hay errores, aunque ya netamente más pequeños, es importante no forzar a que la superficie "pase" por los puntos.

De esta forma se obtuvieron los residuos de la validación cruzada para cada punto, de media cero (lógicamente, es un estimador insesgado) y se eliminaron aquellos puntos dato que "sobresalían" de la superficie calculada un valor absoluto de más de 6 cm, con lo que se eliminaron casi 400 puntos más. Una vez eliminados estos puntos, la desviación estándar resultante de los residuos de la validación cruzada fue de 2.6 cm, lo cual ya da una idea a priori de la calidad de los datos válidos utilizados.

Esta última depuración se realizó integrando ya todos los datos disponibles, aunque, obviamente, casi la totalidad de los datos

eliminados fueron procedentes de la observación GPS estático rápido. El número de datos finalmente válidos puede verse en la Tabla 1.

En el caso de Canarias, los únicos datos disponibles y utilizados han sido las señales REDNAP con "fast static".

En resumen, los datos depurados válidos y utilizados han sido:

Tabla 1. Fuentes de datos utilizados.

Denominación	Puntos	Obs. GPS	Tiempo obs.	Long. lineabase
REDNAP	12.268	Fast Static	~ 10 min.	< 20 km
Ampliación REDNAP	164	Estático	30 min.	< 20 km
Apoyos REGENTE	niv. 251	Estático	6 horas (2 sesiones)	< 5 km
REDNAP Canarias	963	Fast Static	~ 10 min.	< 20 km
EUVN_DA Portugal & Francia	55	Estático	Variable	Variable

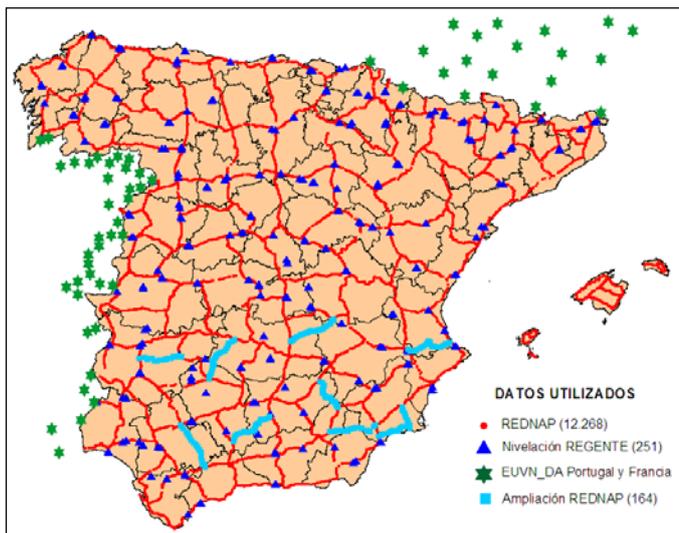


Fig. 6. Datos utilizados (Península y Baleares).

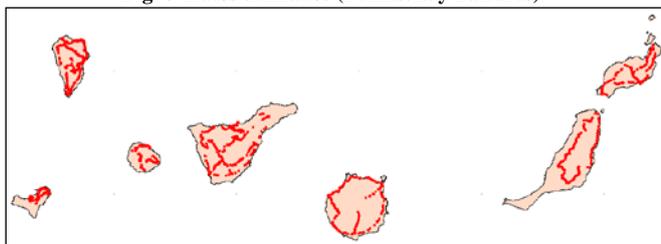


Fig. 7. Datos utilizados (Canarias).

Con estos datos, el objetivo es evaluar las diferencias entre las ondulaciones observadas y las obtenidas por el modelo EGM2008 (con el offset de 0.561 m). De esta forma se pudo construir una "superficie de correcciones" para sumar al modelo gravimétrico y obtener un modelo de geoide "corregido" por REDNAP y adaptado por tanto al datum vertical en España.

Los estadísticos para las diferencias evaluadas con los datos depurados en la península fueron:

Min: -0.225 m
 Max: 0.193 m
 Media: 0.000 m
 Desv. estándar: 0.056 m

Como se puede ver en la desviación estándar de las diferencias de los puntos dato respecto a EGM2008, el ajuste del doble juego de altitudes REDNAP / GPS se encuentra por debajo de 0.1 m en el 93% de los puntos (fig. 8).

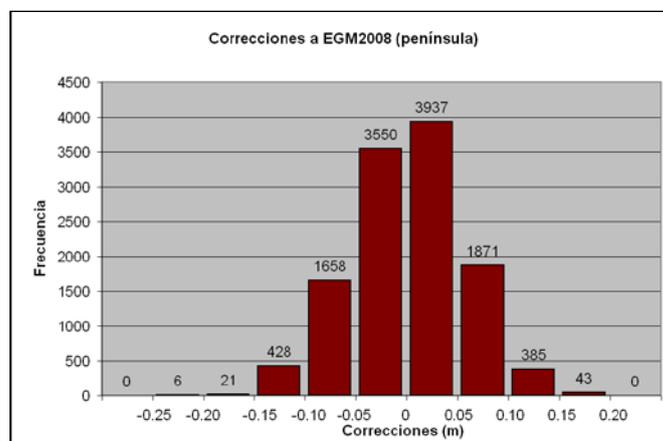


Fig. 8. Histograma de los valores de corrección a EGM2008 (península).

3.4. Calidad de los datos.

Dada la naturaleza de la mayor parte de los datos (estático rápido), es importante plantear cual es la precisión que van a tener estos datos y evaluar así la precisión final en la superficie de corrección de EGM2008.

La superficie de corrección pretende adaptar el modelo de geoide a la superficie de referencia vertical oficial en España (REDNAP), ya que es el "Datum" al cual se quiere referir el modelo de geoide resultante. En este hipotético caso, los posibles errores en la ondulación del geoide provienen de la altitud elipsoidal, que a su vez procede de REGENTE, ya que siempre se han adoptado como referencia los vértices de esta red para obtener la altitud elipsoidal. De esta forma, la superficie resultante (llamémosla EGM2008-REDNAP) está acorde con ambos marcos legales de referencia en altitud (REGENTE - REDNAP).

La desviación estándar resultante de la validación cruzada (2.6 cm) puede ser un buen indicador de la precisión en la altitud elipsoidal de los puntos dato, aunque podría considerarse optimista.

Por otro lado, se cuenta con 251 puntos con una altitud elipsoidal muy precisa (apoyos REGENTE), ya que son clavos de nivelación de la antigua Red de Nivelación de Alta Precisión que fueron observados durante la campaña REGENTE en dos sesiones de tres horas cada una desde un vértice REGENTE situado siempre a menos de 5 kilómetros. Como se ha comentado anteriormente, estas señales tuvieron que ser referidas en altitud ortométrica al nuevo marco REDNAP para ser válidas. Algunas de estas señales pertenecen

también a la nueva REDNAP, ya que entre la antigua red y la nueva hay unas 2.000 señales comunes. Además, concretamente en 52 señales REDNAP que habían sido apoyos de nivelación REGENTE (6 horas de observación GPS con línea-base < 5 km) se había observado GPS estático rápido en REDNAP. Así, la comparación de la altitud elipsoidal REGENTE y la altitud elipsoidal de estático rápido proporciona una excelente manera de evaluación de calidad de los datos.

La comparación entre estos dos juegos de altitudes elipsoidales se puede ver en el siguiente histograma de diferencias (figura 8).

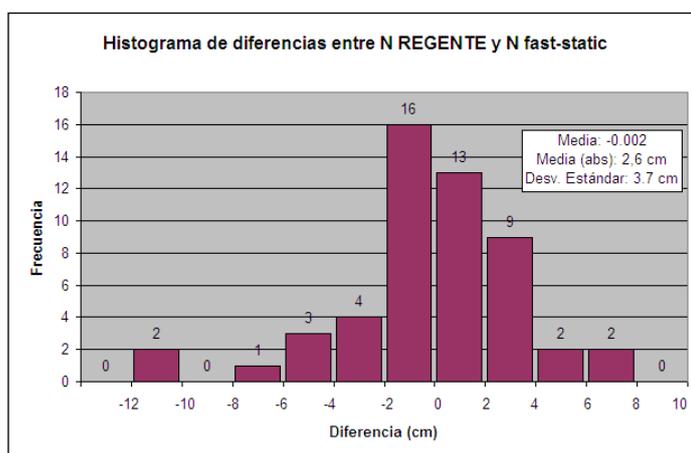


Fig. 9. Histograma de diferencias REGENTE - fast static REDNAP.

El histograma de las diferencias entre h_{REGENTE} y h_{REDNAP} es insegado (promedio de -0.002 m), pero presenta dos puntos, ubicados en la misma zona, con diferencias de 10 cm (Hoja MTN 636, puntos 636A y 636B) cuya altitud ortométrica (no elipsoidal) en la antigua red de nivelación de precisión es probablemente errónea, ya que los puntos fast-static cercanos presentan la misma ondulación del geode.

La diferencia es inferior a los 4 cm en 42 de los 52 puntos analizados (81%), con un promedio en valor absoluto de las diferencias de 2,3 cm y una desviación estándar de 3,7 cm, cantidad que en las desviaciones típicas de las funciones polinómicas anteriormente comentadas ya se veían.

3.5. Obtención de la superficie de corrección y aplicación a EGM2008.

Para la obtención de los modelos de geode válidos para España se obtuvieron dos ficheros de ondulación EGM2008 (uno para Península, Baleares, Ceuta y Melilla y otro para Canarias), con un paso de malla de 1' x 1' con los siguientes límites:

- Península, Baleares, Ceuta y Melilla:

Longitud:	9° 30' W - 4° 30' E
Latitud:	35° N - 44° N
- Canarias:

Longitud:	18° 30' W - 13° W
Latitud:	27° 30' N - 29° 30' N

Con estos modelos gravimétricos se obtuvieron valores de ondulación EGM2008 para los 12700 puntos de la península y los casi 1000 puntos de Canarias, obteniendo unas diferencias entre los valores observados y los calculados por el modelo, diferencias que darán una superficie de corrección y adaptación a REDNAP de EGM2008 gravimétrico.

En el caso del modelo para Península y Baleares, las diferencias obtenidas (teniendo en cuenta el offset de 56.1 cm anteriormente citado) fueron en la península un máximo de 19.3 cm y un mínimo de -22.5 cm, mientras que en Baleares el comportamiento de las diferencias era siempre con signo negativo, un mínimo de -25.3 cm y un máximo de -2.0 cm, con un promedio aquí de -14.7 cm, es decir, una amplitud de 0.23 m. El comportamiento era similar en las cuatro islas del archipiélago, lo cual indica que el datum altimétrico entre las diferentes islas es bastante homogéneo y además el datum del archipiélago es más similar al potencial W_0 adoptado por EGM2008 (desplazamiento medio de 41.4 cm).

La desviación estándar tan pequeña del modelo gravimétrico hizo en principio plantearse si era necesaria una superficie de corrección o simplemente sería suficiente tener en cuenta el offset para obtener una superficie modelo que se adaptara al marco altimétrico legal. Sin embargo, las diferencias observadas presentan sistematismos en algunas líneas o zonas que alcanzan el orden decimétrico y hasta de 0,2 m, lo que justifica en algunas zonas, hace que se planteara construir una superficie de correcciones que corrija estas diferencias y obtener un modelo más preciso.

En el caso de Canarias, las diferencias respecto al modelo en las diferentes islas varían mucho, sin duda debido a que los datum altimétricos entre ellas son bastante heterogéneos. Existen islas que tienen referencia mareográfica con una cierta historia, bien definida por una estación mareográfica, y otras en las que no existe ningún mareógrafo y tienen un nivel medio determinado en la década de los cincuenta con reglas de marea referidas a señales ya desaparecidas (El Hierro y La Gomera).

Dentro de cada isla, la amplitud en las diferencias observadas es bastante reducida, como máximo del orden de 0.2 m, excepto en el caso de Tenerife, donde alcanza los 0.3 m, aspecto que puede ser explicable por el relieve de la isla y por tanto, factores isostáticos en la determinación del modelo gravimétrico.

En cualquier caso, el cálculo de una superficie de corrección en el caso de las Islas Canarias, debe hacerse de modo independiente para cada isla, de tal manera que los diferentes orígenes de altitudes no tengan influencia sobre otra isla cercana.

La elección del algoritmo para generar la superficie de corrección, aunque es una cuestión importante, se ha comprobado que no tiene apenas influencia en el resultado final, dado que los valores de corrección son bastante pequeños.

Una cuestión importante que condiciona la elección del algoritmo es la distribución de los puntos dato, ya que si bien el número de puntos de la superficie de corrección es bastante elevado (unos 12.700 para la península y Baleares y casi 1.000 puntos para las Islas Canarias), la distribución, obviamente, es muy irregular, a lo largo de las líneas de nivelación de REDNAP. Si esta cantidad de puntos estuviera regularmente distribuida sobre la superficie del territorio (pensemos, por ejemplo, en la red geodésica ROI), la elección de un algoritmo para calcular la superficie de corrección sería una cuestión sin importancia, ya que cualquiera daría excelentes resultados.

La mayoría de las experiencias llevadas a cabo en otros países para la combinación de un geode gravimétrico con datos GPS / nivelación de precisión, se han realizado mediante el método de colocación mínimo cuadrático (Denker, 1998, Milbert, 1995, Forsberg, 1998, Featherstone, 2000, etc), aunque normalmente se han realizado con pocos puntos en superficies bastante extensas (AUSGeoid-GPS-AHD en Australia o GEOID09 y GPSBM09 en EEUU, estos basados también en EGM2008).

Otras técnicas probadas incluyen sólo un factor constante de corrección o bien una superficie con ángulos de inclinación o con ajustes polinómicos de segundo o tercer orden (Featherstone et al, 2002).

También han sido probados modelos paramétricos que tratan de modelar las diferencias entre el modelo gravimétrico y el geométrico mediante tres factores como tendencia (t), señal (s) y ruido (n) y un ajuste posterior mediante colocación mínimo-cuadrática (Duquenne et al, 1996).

Otros autores proponen primero una transformación Helmert con 4 parámetros que absorben cambio de datum y posibles errores tanto de nivelación como de GPS y de ondulación del geoid, estableciendo finalmente con las diferencias una colocación mínimo-cuadrática (Sevilla, M. J., 2006).

En cualquier caso, la mayor parte de los algoritmos utilizados para adaptar el modelo de geoid al datum vertical están basados en colocación mínimo-cuadrática, encontrando algunas variaciones, como el kriging. Sin embargo, la distribución tan irregular de los datos en REDNAP, a lo largo de líneas y con zonas relativamente extensas sin datos en el interior de los polígonos, hacen que la función covarianza en esas zonas tenga una difícil representación de los datos, por lo que la colocación mínimo-cuadrática es más difícil que resulte exitosa en este caso.

Debido a la dispersión nominal de los datos de corrección anteriormente discutida (desviación estándar de 3,7 cm), el interpolador que se necesita no debe de pasar por los puntos, sino simplemente ajustarse a ellos con una tendencia de la manera más suave posible. Por otra parte, debido a la gran densidad espacial de puntos a lo largo de la línea de nivelación, el algoritmo debe seguir la tendencia marcada, de tal manera que, aunque la precisión nominal del valor puede estar en ese orden, la superficie reconstruida sin pasar por los puntos dato puede resultar mejorada en su precisión final y, sobre todo, de acuerdo con la "superficie oficial de referencia".

Por otra parte, los valores de la superficie de corrección, bastante pequeños (93% por debajo de 0,1 m) y uniformes zonalmente, hacen que dicha superficie sea muy suave y represente pequeñas irregularidades locales cuando varios puntos en la zona así lo reflejan.

Hay otros algoritmos diferentes semejantes a la colocación mínimo cuadrática para generar la superficie de corrección y el resultado de las pruebas realizadas han sido bastante similares debido, como se ha dicho, a que las correcciones son pequeñas, si bien el que mejor cumplía todas las premisas anteriormente comentadas fue el algoritmo de superficies de mínima curvatura. Este algoritmo se basa en la "mecánica de la lámina delgada" de la teoría de la elasticidad, de tal forma que la lámina se deformaría bajo la acción de fuerzas perpendiculares a su superficie con un criterio de mínima curvatura posible, anulando los esfuerzos no tangenciales fuera de los "puntos dato". El algoritmo de mínima curvatura no es propiamente un interpolador, pero cumple la premisa, y por otro lado, genera la superficie más suave posible con el conjunto de datos disponible sin alterar las zonas periféricas sin datos. Se probó también el interpolador kriging, resultando menos apropiado por la distribución espacial de los datos, ya que las funciones variograma sólo se pueden generar en el sentido de las líneas de nivelación.

Los resultados numéricos para la elección del algoritmo fueron contrastados en puntos de ampliación de REDNAP (GPS de 30 minutos desde un vértice REGENTE a menos de 25 km). Es decir, se generó el modelo resultante con cada uno de los algoritmos probados sin tener en cuenta estos puntos test y se obtuvieron las diferencias entre el modelo resultante y la observación, la cual se considera más

fiable que los puntos estático-rápido. Los resultados se pueden ver en el apartado siguiente.

La figura 10 muestra la superficie de corrección resultante mediante el algoritmo de superficie de mínima curvatura en Península y Baleares, no existiendo, como se puede apreciar, un sistematismo zonal con respecto al modelo de geoid en el sistema de referencia vertical dado por REDNAP.

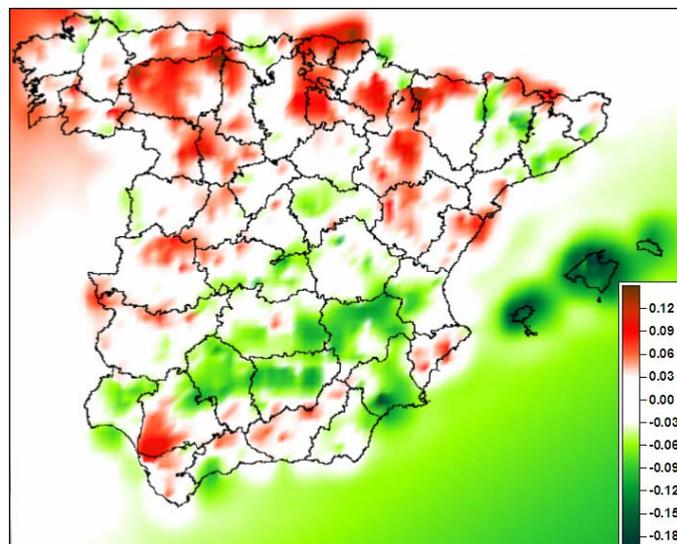


Fig. 10. Superficie de corrección por mínima curvatura.

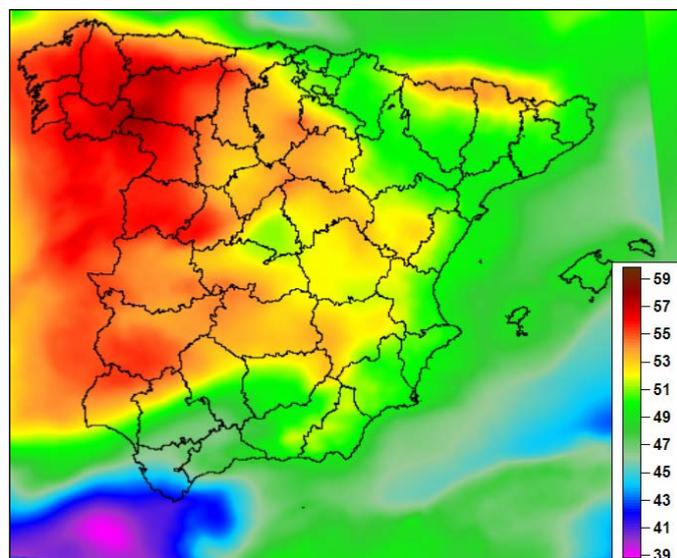


Fig. 11. Modelo final de geoid EGM2008-REDNAP.

4. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL MODELO EGM2008-REDNAP.

Teniendo en cuenta que las superficies altimétricas de referencia que están construyendo el modelo final son REGENTE y REDNAP, es lógico que la precisión final del modelo con la superficie de corrección dependa en cierto modo de la distancia del punto considerado a las líneas de nivelación más cercanas.

Se ha realizado un chequeo del modelo sobre un total de 188 señales de la ampliación de REDNAP con el modelo EGM08-REDNAP obtenido sin la intervención de estos datos. Como se ha dicho anteriormente, en la ampliación de REDNAP, la observación GPS,

que al fin y al cabo determina la calidad, fue de 30 minutos desde un vértice REGENTE situado a menos de 20 km de distancia, con estacionamiento estricto sobre la señal, de tal forma que la altitud elipsoidal pudo ser determinada con una precisión del orden de 2 - 3 cm, aunque este factor puede depender también del software y los parámetros de cálculo utilizados.

Los resultados de la comparación de ondulación del geoid observación - modelo pueden verse en la tabla 2. Hay que tener en cuenta que estas líneas recorren espacios vacíos de datos inicialmente en los que el punto dato más cercano puede estar a más de 50 km.

Tabla 2. Resultados en señales ampliación REDNAP.

Línea REDNAP	Nº señales observadas	Diferencia promedio (m)	Desviación estándar (m)
813	12	0.031	0.038
822	17	0.017	0.021
823	18	0.052	0.030
824	16	0.028	0.036
825	18	0.027	0.033
827	19	0.052	0.059
829	23	0.059	0.031
830	16	0.026	0.034
831	19	0.050	0.032
832	14	0.050	0.061
833	16	0.035	0.045
Promedio	Total 188	0.038	0.038

A la vista de los resultados, se puede afirmar que la desviación estándar y la diferencia promedio (en valor absoluto) entre los valores observados y los valores del modelo es de 0.038 m, habiendo sido el 80% de las diferencias inferiores a 0,05 m.

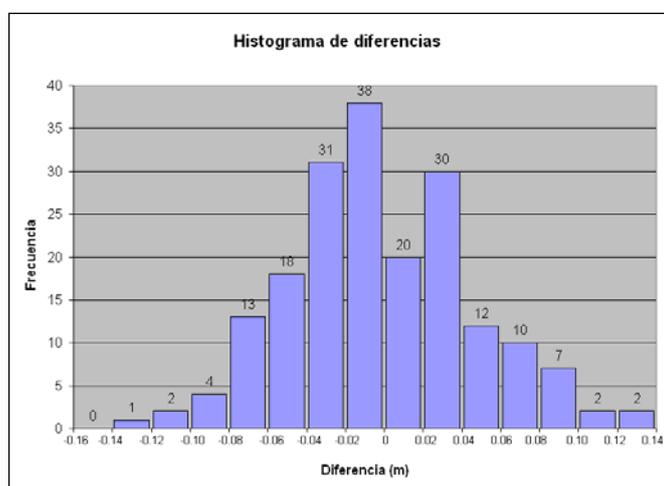


Fig. 14. Histograma de diferencias en ampliación de REDNAP.

Esto es lo que se refiere a la precisión absoluta del modelo. Pero la utilización práctica del modelo y su aplicación en trabajos GNSS en los que se requiera la altitud ortométrica hace que la evaluación de la precisión tenga que hacerse también en modo relativo, en tanto en cuanto se calcula la ondulación de un punto con respecto a otros en la zona de trabajo, dependiente de la distancia, por lo que es conveniente utilizar para ello el concepto de precisión relativa (en partes por millón).

En este sentido, también se han analizado las diferencias en la ampliación REDNAP respecto al modelo en cada una de las once líneas, comparando para ello las diferencias relativas entre las señales de cada línea, obteniendo una estimación de la precisión relativa de 2 ppm.

5. REFERENCIAS.

- Barbadillo, A., Sánchez Sobrino, J. A., de la Cruz, F., Quirós, R. (2008): Compensación preliminar de la nueva Red Española de Nivelación de Alta Precisión. 6ª Asamblea Hispano-lusa de geodesia y geofísica. Tomar, febrero 2008.
- Daniel R. Roman, Yan Ming Wang, Jarir Saleh, Xiaopeng Li (2009): National Geoid Height Models for the United States: USGG2009 and GEOID09. ACSM-MARLS-UCLS-WFPS Conference 2009, 20-23 feb. 2009. Salt Lake City.
- Denker, H. (1998): Evaluation and improvement of the EGG97 quasigeoid model for Europe by GPS and levelling data. Second Cont. Workshop on the Geoid in Europe, Rep. Finn. Geod. Inst. 98:4, 53-61, Masala, 1998.
- Duquenne, H., M. Everaerts, P. Lambot (2004): Merging a Gravimetric Model of the Geoid with GPS/Levelling data: an Example in Belgium. International Association of Geodesy Symposia Gravity, Geoid and Space Missions. GGSM 2004 IAG International Symposium Porto, Portugal August 30 – September 3, 2004.
- Featherstone, W.E. (2000): Refinement of a gravimetric geoid using GPS and levelling data. Journal of Surveying Engineering, 126(2): 27-56.
- Featherstone, W.E. (1998): Do we need a gravimetric geoid or a model of the base of the Australian Height Datum to transform GPS heights?. The Australian Surveyor, 43(4): 273-280.
- Fotopoulos, G., C. Kotsakis and M.G. Sideris (1999): A new Canadian geoid model in support of levelling by GPS. Geomatica, 53(4): 53-62.
- Milbert, D.G. (1995): Improvement of a high resolution geoid height model in the United States by GPS height on NAVD 88 benchmarks. Bull. d'Informations 77 and IGeS Bull. 4, Special Issue, New Geoids in the World, 13-16, Milan, Toulouse.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. (2008): An Earth Gravitational model to degree 2160: EGM2008. EGU general Assembly 2008, Viena, Austria.
- Sevilla, M. J. (2006): IBERGEO_2006. 5ª Asamblea Hispano-lusa de geodesia y Geofísica. Sevilla, febrero 2006.

Análisis de observaciones en nuevas estaciones de marea gravimétrica en España Analysis of observations from new tidal gravimetry stations in Spain

J. Arnosó^(1,4), M. Benavent^(2,4), F. G. Montesinos^(2,4), M. S. Bos⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto de Geociencias (CSIC, UCM). Facultad de C. Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3, 28040, Madrid, jose.arnosó@csic.es

⁽²⁾Facultad de C. Matemáticas. Universidad Complutense de Madrid, Plaza de Ciencias, 3, 28040, Madrid

⁽³⁾CIIMAR Associate Laboratory. Rua dos Bragas, 289. 4050-123 Porto, Portugal

⁽⁴⁾Grupo de Investigación “Geodesia” UCM

SUMMARY

Analysis of continuous gravity measurements made in Spain during past years is presented. Our interest here is broadly on stations located in the south of the Iberian Peninsula, North Africa and the Canary Islands. Currently, the precision and the accuracy obtained after calibration of spring gravimeters, LaCoste & Romberg type, allow us to achieve a value of around $0.1 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ms}^{-2}$), which is suitable to study the solid Earth tide phenomenon. We will focus on the precise modeling of the tidal gravity parameters, and on the most accurate correction of the ocean tide loading effects at those stations.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la gravimetría terrestre viene experimentado un gran avance que, en combinación con otras técnicas, facilita el desarrollo de numerosas aplicaciones en investigaciones geodésicas y geodinámicas. Las medidas continuas de gravedad permiten estudiar fenómenos geodinámicos relacionados con variaciones de altitud y/o con la distribución de masas subsuperficiales que perturban el campo gravitatorio terrestre.

En nuestro caso, la realización de medidas continuas de gravedad se enmarca en proyectos de investigación destinados a estudiar, entre otros objetivos, la redistribución de masas subsuperficiales y la respuesta elástica de la corteza terrestre en relación con fenómenos volcánicos y sísmicos, empleando para ello la señal gravimétrica residual. Para ello se necesita obtener el modelo experimental de marea gravimétrica, así como modelar los diferentes efectos perturbadores de la señal observada, oceánicos y atmosféricos principalmente, de la manera más exacta y precisa posible. Una de estas perturbaciones que trataremos en este trabajo es la de la carga oceánica que, por su magnitud, puede condicionar y modelar sustancialmente la señal gravimétrica observada. Una vez eliminado este efecto del océano en los residuales gravimétricos, el residuo final remanente puede ser susceptible de interpretación geofísica, en las diferentes frecuencias ondas de marea (e.g., Baker and Bos, 2003; Neumeyer et al., 2005).

Por otro lado, la buena calidad de los datos gravimétricos, necesaria en estas investigaciones, se consigue gracias a la mejora en la exactitud de la calibración de los gravímetros utilizados en estas observaciones. En los gravímetros relativos de muelles (e.g. tipo LaCoste&Romberg), un factor importante a considerar es la deriva y otros problemas instrumentales, que se pueden modelar normalmente con polinomios de alto orden (Riccardi et al., 2011).

Tras efectuar los análisis de las observaciones de marea gravimétrica, y calcular las correspondientes correcciones por carga oceánica, comentaremos los resultados obtenidos en un total de 8 estaciones distribuidas en la Península Ibérica, Norte de África y el Archipiélago Canario: en las islas de Lanzarote (estaciones CV y TIM), Tenerife (TP) y El Hierro (AU), en Melilla (ML), Algodonales-Cádiz (AL) y en Madrid (estaciones MF y VC) (Figura 1).

2. ANÁLISIS DE MAREA GRAVIMÉTRICA

Con el fin de obtener los respectivos modelos de marea gravimétrica para cada lugar de observación, el análisis de las observaciones lo hemos realizado utilizando la metodología desarrollada en el software VAV (Venedikov et al., 2003; 2005), basada en el método de análisis armónico con resolución por mínimos cuadrados. De esta manera se pueden obtener estimaciones independientes de la frecuencia en cada uno de los parámetros de marea (factores gravimétricos y desfases), modelar de una manera flexible la deriva, determinar el efecto de perturbaciones

meteorológicas en la señal de marea, procesar datos con cualquier espaciado temporal y mejorar sustancialmente la precisión final mediante la búsqueda sistemática de errores en los datos durante el propio proceso de filtrado y análisis (e.g., Ducarme et al., 2008; Arnosó et al, 2011).

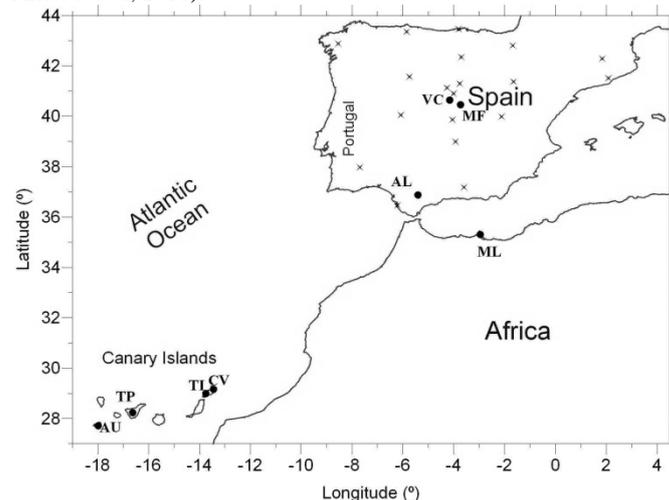


Figura 1 – Estaciones de medida continua de gravedad que se han considerado en este trabajo (círculos), junto con el resto de estaciones de la Red de Marea Gravimétrica (cruces). (Continuous gravity observing sites considered in this work (circles) together with the stations of the Spanish Gravity Tide Network (crosses).)

En nuestro caso, las observaciones se han realizado con gravímetros relativos de muelles, tipo LaCoste&Romberg (LcR), modelos G y Graviton-EG. La Tabla 1 muestra las coordenadas, períodos de observación y gravímetro utilizado en cada una de las estaciones. Los resultados del análisis de marea gravimétrica para los armónicos principales, en las estaciones consideradas en este trabajo, se recogen en la Tabla 2.

3. CÁLCULO DE LA CARGA OCEÁNICA

Una de las principales perturbaciones en las medidas gravimétricas es el efecto oceánico indirecto (o simplemente carga oceánica). Para su determinación, este efecto puede descomponerse de esta forma:

i) El efecto gravitatorio de atracción que provoca el movimiento de las masas de agua oceánica, por la acción de las fuerzas lunisolares.

ii) El desplazamiento elástico que sufre la corteza terrestre debido a la deformación que se genera en el fondo oceánico, originada por el propio peso de la marea que, como consecuencia del gradiente vertical de la gravedad hace que ésta varíe.

ii) La variación de gravedad tras la consiguiente redistribución de masas que se origina en el interior de la Tierra, como consecuencia de los dos efectos anteriores.

Tabla 1 – Coordenadas geográficas, periodo de observación y gravímetro empleado en cada una de las estaciones (Geographic coordinates, period of observation and gravimeter used at the observing sites.)

	Lat	Long	Alt (m)	Period	LcR
CV	29°.16	-13°.44	37.0	1990/01/01-1997/09/30	G434
TIM	29°.00	-13°.75	381.0	2001/10/21-2009/04/27	G003
TP	28°.22	-16°.62	2150.0	1998/12/23-1999/06/29	G665
AU	27°.71	-17°.99	950.5	2008/04/03-2008/09/22	EG1194
ML	35°.31	-2°.96	114.6	2010/03/10-2010/11/26	G933
AL	36°.88	-5°.41	355.5	2008/10/09-2009/04/03	EG1194
VC	40°.65	-4°.14	1212.4	2007/09/06-2008/01/29	EG1194
MF	40°.45	-3°.72	638.8	2005/01/20-2005/09/29	EG1194

Tabla 2 – Amplitud observada (A, en μGal), factor gravimétrico (δ) y desfase (α , local, en grados), para los armónicos principales O_1 y M_2 en los 8 lugares de observación. (Observed amplitudes (A), gravimetric factors (δ) and phase differences (α) for the harmonics O_1 and M_2 at the 8 observing sites. Amplitudes are given in μGal and phases (lags negative), in degree, are local.)

	O_1			M_2		
	Amp.	δ	α	Amp.	δ	α
CV	30.44 ± 0.02	1.1526 ± 0.0007	-1.567 ± 0.035	58.05 ± 0.01	1.0143 ± 0.0002	2.230 ± 0.013
TIM	29.90 ± 0.02	1.1363 ± 0.0007	-1.527 ± 0.038	57.40 ± 0.01	0.9998 ± 0.0002	1.797 ± 0.013
TP	29.90 ± 0.04	1.1561 ± 0.0017	-1.699 ± 0.083	58.09 ± 0.03	0.9965 ± 0.0006	0.148 ± 0.035
AU	29.57 ± 0.03	1.1570 ± 0.0012	-1.910 ± 0.059	58.10 ± 0.02	0.9884 ± 0.0004	-1.197 ± 0.024
ML	33.83 ± 0.08	1.1552 ± 0.0026	-0.238 ± 0.131	57.07 ± 0.04	1.1413 ± 0.0008	3.195 ± 0.042
AL	34.29 ± 0.03	1.1502 ± 0.0009	-0.425 ± 0.044	53.75 ± 0.03	1.1188 ± 0.0007	4.556 ± 0.035
VC	35.20 ± 0.05	1.1465 ± 0.0015	-0.208 ± 0.070	49.60 ± 0.04	1.1469 ± 0.0008	5.063 ± 0.041
MF	35.15 ± 0.24	1.1463 ± 0.0008	-0.290 ± 0.039	49.85 ± 0.30	1.1462 ± 0.0007	4.704 ± 0.034

El cálculo de este efecto (denotado por L), lo hemos realizado a partir de la metodología desarrollada por Farrel (1972), en la que se efectúa la convolución entre las funciones de Green de carga, G , y una distribución global de la marea oceánica, H , mediante

$$L(\mathbf{r}) = \rho \iint_A G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) H(\mathbf{r}') dA \quad (1)$$

donde \mathbf{r} y \mathbf{r}' son los vectores de posición en el punto de cálculo y en el punto del océano que genera la carga, respectivamente, ρ es la densidad del agua de mar y A es la superficie oceánica mundial. En este cálculo interviene un modelo terrestre de referencia SNREI, como por ejemplo el de Gutenberg-Bullen (Harkrider, 1970), con sus correspondientes funciones de Green que miden la deformación elástica que sufre la corteza terrestre. La descripción del comportamiento de la marea oceánica a nivel mundial se introduce en (1) mediante modelos oceánicos globales de la máxima resolución (como por ejemplo FES2004 (Lyard et al., 2006), TPXO.7.1/2 (Egbert & Erofeeva, 2002), HAMTIDE (Taguchi et al., 2010), GOT4.7 (Ray, 2008), EOT11a (Savcenko and Bosch, 2010)). Para el cálculo empleamos los software ECOM (Benavent, 2011) y ATC (Arnos, 1996), que permiten determinar la carga oceánica conjugando numerosas posibilidades: componente de carga, constituyentes armónicos, funciones de Green, dominio de cálculo,

refinamiento de cuadrículas, modelos oceánicos globales y, asimismo, introducción de modelos oceánicos regionales y locales. En el caso que nos ocupa, debido a la geometría costera y la batimetría, que condicionan sustancialmente el modelo de propagación de la marea oceánica, hemos empleado los respectivos modelos regionales para Canarias, CIAM2, y para el entorno de la Península Ibérica, IBER01 (Arnos et al., 2006a; 2006b), (Benavent et al., 2009). Ambos modelos oceánicos se han desarrollado mediante la técnica de asimilación de datos en un modelo hidrodinámico. Para ello se emplearon observaciones mareográficas (costeras y de profundidad) y del satélite altimétrico TOPEX/Poseidon, para un total de 8 constituyentes armónicos (O_1 , Q_1 , P_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 , K_2).

La Figura 2 muestra, como ejemplo, y para el caso de los armónicos principales, los resultados del cálculo de la carga oceánica para las estaciones que hemos considerado en este estudio. Para el caso de las islas de Lanzarote y Tenerife, el efecto de carga es de aproximadamente el 15% de la señal de marea gravimétrica observada y, en el caso de El Hierro, representa un 18%. En la Península Ibérica, merece destacar el hecho de que estos valores de carga están actualizados (Benavent et al., 2009; Benavent, 2011) y tienen una magnitud ligeramente superior a los previamente publicados por Francis y Melchior (1996). En todos los casos, la componente semidiurna domina claramente la amplitud de efecto de carga.

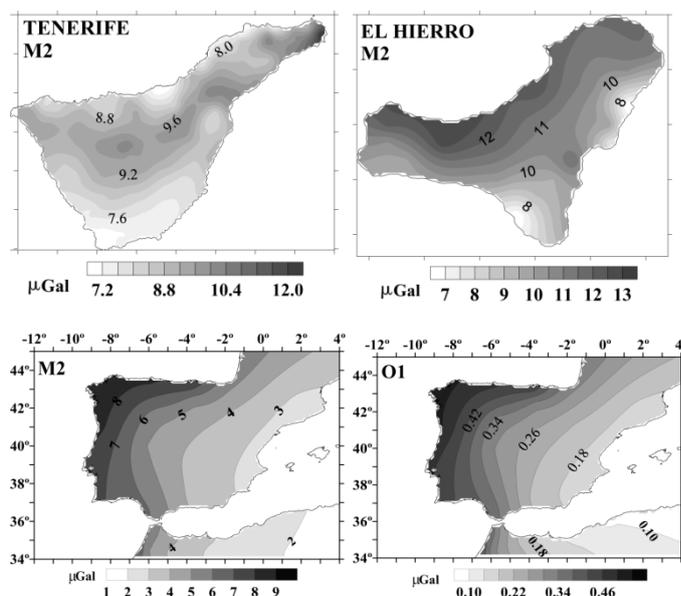


Figura 2 – (Arriba) Mapa de amplitudes con la carga oceánica calculada para la onda M_2 , utilizando un modelo oceánico global suplementado con el modelo regional CIAM2, en las islas de El Hierro y Tenerife. (Abajo) El mismo cálculo, en el caso de la Península Ibérica, suplementado el modelo global con IBER001, para las ondas M_2 y O_1 . (Benavent, 2011). ((Up) Orange maps showing the computed tidal gravity loading for M_2 wave, based on global model supplemented with regional model CIAM2, for El Hierro and Tenerife islands (Down) Same as for O_1 and M_2 waves, using model IBER01 for Iberian Peninsula.)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de marea gravimétrica presentan, en lo que respecta a las estaciones de Tenerife y Lanzarote, una mejora sustancial en la estimación de los parámetros de marea del orden de 2-3 veces el error medio cuadrático, respecto a resultados anteriores (e.g., Arnos et al., 2000; 2001). A pesar de esta mejora, en el caso de Lanzarote, las diferencias entre las estaciones CV y TIM son destacables en el caso de los armónicos principales O_1 y M_2 , considerando la proximidad entre ambos lugares de observación. Respecto al factor de amplitud, en el caso de M_2 la diferencia es de un 1% y llega al 1.8% para O_1 . Así, las diferencias en la estructura de la corteza terrestre superior condicionan en el caso de TIM la

respuesta elástica, que se ve modulada por el efecto de la extensión de marea (Arnosó et al., 2011).

Estas observaciones gravimétricas las hemos corregido por el efecto de carga oceánica, empleando diversos modelos oceánicos globales suplementados por el modelo regional CIAM2. La Figura 3 muestra un ejemplo, para las ondas O_1 y M_2 , de los factores gravimétricos observados una vez corregidos por el efecto de carga oceánica en las estaciones de Lanzarote (CV), Tenerife (TP) y El Hierro (AU). Considerando el margen de error en la calibración instrumental (escala y normalización de cada gravímetro) y en el análisis de las observaciones, no se puede distinguir entre los modelos teóricos elástico e inelástico. La dispersión en los factores gravimétricos es del orden del 0.3% para las ondas semidiurnas y del 0.1% para las diurnas, mientras que es más estable en los desfases, en torno a $\pm 0.1^\circ$.

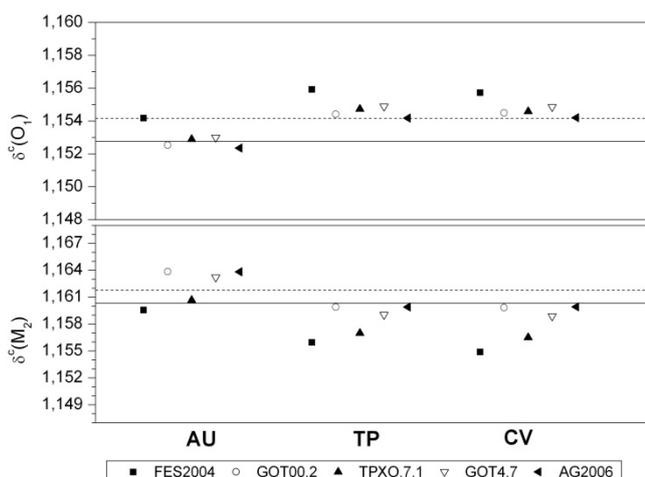


Figura 3 – Factores gravimétricos observados corregidos del efecto de carga oceánica, utilizando 5 modelos oceánicos globales y el modelo regional CIAM2, para los armónicos O_1 y M_2 en las estaciones de El Hierro (AU), Tenerife (TP) y Lanzarote (CV) (modif. Arnoso et al., 2011). Están indicados los factores gravimétricos teóricos para el caso elástico (línea continua) e inelástico no hidrostático (línea discontinua), según el modelo DDW (Dehant et al., 1999). (Observed gravimetric factors corrected from ocean tide loading using 5 ocean tide models supplemented with regional model CIAM2, for the harmonics O_1 and M_2 at AU, TP and CV observing sites. The theoretical factors for the DDW elastic (solid line) and inelastic (dashed line) Earth models are indicated.)

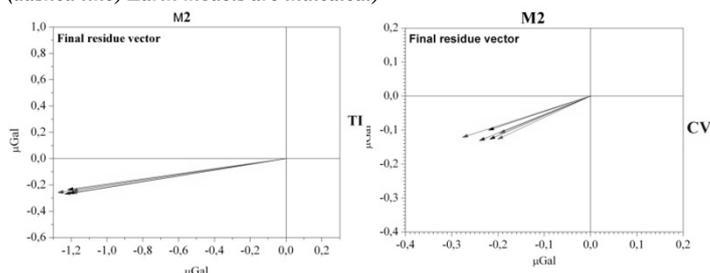


Figura 4 – Vector residuo final (fases locales) para la onda M_2 , calculado sobre la base de 6 modelos oceánicos globales diferentes, junto con el modelo regional CIAM2 en las estaciones CV y TIM de Lanzarote. (Final residue vectors for the harmonic M_2 , based on 6 global oceanic models supplemented with the regional model CIAM2 at sites CV and TIM.)

En el caso de las estaciones de Lanzarote CV y TIM, gráficamente se pueden apreciar con más claridad las diferencias en los resultados mencionados anteriormente. En la Figura 4, para el caso de la onda M_2 , se ha representado el residuo final, que es la diferencia entre el residual observado tras eliminar la marea teórica sobre la base del modelo de Tierra DDW de Dehant et al. (1999) y el calculado a través de la carga oceánica. En TIM, la componente coseno del residuo final (más sensible a la respuesta de la corteza terrestre), alcanza un valor de $-1.2 \mu\text{Gal}$, mientras que en CV está comprendido entre -0.2 y $-0.3 \mu\text{Gal}$. En el caso de la onda O_1 en TIM la componente coseno toma un valor de $-0.5 \mu\text{Gal}$, mientras que

en CV es prácticamente 0. En este trabajo se ha tenido en cuenta el resultado tras el análisis de observaciones realizadas con el gravímetro LcRG003, que es del mismo orden que lo expresado en Arnoso et al. (2001), para el caso del gravímetro LcRG336. Es decir, en épocas diferentes y con distintos gravímetros en la misma estación TIM, y a pesar de la mejora en la exactitud del cálculo de la carga oceánica, las medidas gravimétricas están igualmente afectadas por el efecto de la extensión de marea a que aludíamos con anterioridad. De esta forma, dadas las características singulares de las capas más superficiales de la corteza terrestre en esa zona, consecuencia de las últimas erupciones volcánicas en Lanzarote, se pone de manifiesto una estructura cortical superficial porosa, con cavidades, bajo la influencia de la deformación que se genera por efecto de la extensión de marea.

En el caso de las estaciones situadas en la Península Ibérica y norte de África, los resultados revelan, principalmente, la mejora sustancial en el análisis de las observaciones gravimétricas, considerando la detección de intervalos anómalos en los datos. Como ejemplo, la Figura 5 muestra los factores gravimétricos observados corregidos del efecto de carga oceánica, empleando diversos modelos oceánicos globales y el modelo regional IBER01. En las estaciones VC y MF las discrepancias entre los diferentes valores según el modelo oceánico considerado están en torno al 0.03% y 0.01% para las ondas M_2 y O_1 , respectivamente. En el caso de AL y ML, la discrepancia es del 0.06% para M_2 y del 0.04% para O_1 . Por otro lado, respecto al modelo teórico DDW (Dehant et al., 1999), en su variante inelástica, para la onda M_2 son inferiores al 0.1% sólo en MF, alcanzando el valor máximo de 0.3% en ML. Respecto a O_1 , la discrepancia es del 0.1% en VC y AL, mientras que en MF y ML es de 0.2% y 0.4%, respectivamente. Se puede deducir que, en las estaciones donde se ha utilizado el gravímetro EG1194, los resultados mejoran sustancialmente y, por tanto, la comparación con los modelos terrestres de comparación es factible al nivel del 0.1%, al menos para el armónico O_1 (Benavent., 2011).

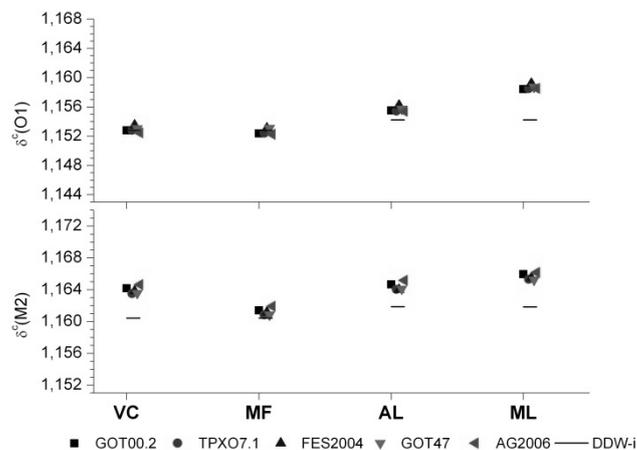


Figura 5 – Factores gravimétricos observados corregidos del efecto de carga oceánica, utilizando 5 modelos oceánicos globales y el modelo regional IBER01, para los armónicos O_1 y M_2 en las estaciones de Madrid (VC, MF), Algodonales (AL) y Melilla (ML) (modif. Benavent, 2011). Está indicado el factor gravimétrico teórico para el caso inelástico no hidrostático (línea continua), según el modelo DDW (Dehant et al., 1999). (Observed gravimetric factors corrected from ocean tide loading using 5 ocean tide models supplemented with regional model CIAM2, for the harmonics O_1 and M_2 at CV, MF, AL and ML observing sites. The theoretical factor for the DDW inelastic (solid line) Earth models are indicated.)

5. CONCLUSIONES

Utilizando el software VAV, que permite detectar intervalos anómalos en los datos, hemos mejorado la precisión en el análisis de las observaciones, con la consiguiente mejora en la estimación de los respectivos parámetros de marea gravimétrica. Asimismo, hemos realizado las correspondientes correcciones por carga en dichos parámetros, para las 8 estaciones consideradas en este trabajo, alcanzando un buen nivel de exactitud. Para ello, empleamos los

modelos oceánicos globales más recientes y exactos, suplementados con modelos regionales para las dos áreas de trabajo (entorno de la Península Ibérica y Canarias). La comparación efectuada entre la carga observada (a través del residual) y la calculada pone de manifiesto la necesidad de mejorar la calibración instrumental en algunas estaciones (CV y ML) y, asimismo, ampliar en algún caso la longitud de las series de observación (e.g., en TP y AU), a efectos de reducir el error en el análisis.

En las estaciones de AU, MF, AL y VC se ha establecido una comparación con DDW al nivel del 0.1% en el caso de O_1 y M_2 , aunque no para los dos armónicos simultáneamente. En el caso de El Hierro (AU) es donde mejor concuerdan las observaciones con el modelo de Tierra.

Respecto a los modelos oceánicos globales empelados aquí, podemos resaltar que, de todos ellos, ninguno presenta una mejora destacable en el cálculo de la carga oceánica respecto a los demás, concordando bastante bien los cálculos para los armónicos considerados. Los modelos regionales IBER01 y CIAM2 se han validado y proporcionan valores de carga más exactos sobre todo en las estaciones más próximas a la costa.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos: CGL2011-25494, del Ministerio de Economía y Competitividad, VULCMAC-MAC/2,3/A7, del programa Interreg-IIIB de la Unión Europea, y GR35/10-A, de la Comunidad de Madrid y la Universidad Complutense de Madrid.

7. REFERENCIAS

- Arnos, J. 1996. Modelización y evaluación de efectos oceánicos indirectos sobre las mareas terrestres en el área de las Islas Canarias. PhD Tesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Arnos, J., Fernández, J., Vieira, R., Vélez, E.J. and A.P. Venedikov, 2000. Results of Tidal Gravity Observations in Tenerife, Canary Islands. *Bull. Inf. Mar. Terr.*, 132, 10283-10290
- Arnos, J., Fernandez, J., Vieira, R. (2001): "Interpretation of tidal gravity anomalies in Lanzarote, Canary Islands". *Journal of Geodynamics* 31, 341-354
- Arnos, J., Benavent, M., Ducarme, B. and F.G. Montesinos (2006a): "A new ocean tide loading model in the Canary Islands region". *Journal of Geodynamics*, 41, 100-111.
- Arnos, J., Benavent, M., Montesinos, F.G. (2006b): "Estimation of errors in the regional ocean tide model (CIAM) for Canary Islands". In: Proc. V Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Ministerio de Medio Ambiente (CD-ROM).
- Arnos, J., Benavent, M., Bos, M.S, Montesinos, F.G., and Vieira, R., 2011. Verifying the body tide at the Canary Islands using tidal gravimetry observations. *J. Geodyn.*, 51, 358-365. doi:10.1016/j.jog.2010.10.004.
- Baker, T.F., Bos, M.S. (2003): "Validating earth and ocean models using tidal gravity measurements". *Geophysical Journal International* 152, 468-485.
- Benavent, M., Arnos, J. y F. G. Montesinos (2009): "Regional ocean tide loading modelling around the Iberian Peninsula". *Journal of Geodynamics*, 48, 132-137. doi:10.1016/j.jog.2009.09.023.
- Benavent, M. (2011): "Estudio metodológico del efecto oceánico indirecto y desarrollo de modelos de carga oceánica. Aplicaciones geodésicas para la Península Ibérica y Canarias". PhD Thesis, Univ. Complutense. Madrid. ISBN: 978-84-694-3115-3.
- Dehant, V., Defraigne, P., Wahr, J. (1999): "Tides for a convective earth". *Journal of Geophysical Research* 104 (B1), 1035-1058.
- Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva (2002): "Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 2, 183-204.
- Farrell, W.E., 1972. Deformation of the earth by surface load. *Rev. Geophys.* 10, 761-779.
- Harkrider, D., 1970. Surface waves in multilayered elastic media (2): higher mode spectra and spectral ratios from point sources in plane-layered earth models. *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 60, 1937
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and O. Francis (2006): "Modelling the global ocean tides: insights from FES2004" *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.
- Melchior, P., Francis, O. (1996): "Comparison of recent ocean tide models using ground-based tidal gravity measurements". *Marine Geodesy* 19, 291-330.
- Neumeyer, J., del Pino, J., Dierks, O., Sun, H. P., Pflug, H. (2005): "Improvement of ocean loading correction on gravity data with additional tide gauge measurements". *Journal of Geodynamics* 40, 104-111
- Ray, R.D., 1999. A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2. NASA Tech. Memo 209478, 58pp., Sept, 1999.
- Riccardi, U., Rosat, S. and Hinderer, J. (2011): "Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series". *Metrologia*, 48, 28-39.
- Savcenko, R. and W. Bosch (2010): "EOT10a - a new global tide model from multimission altimetry". *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-9624, EGU General Assembly, 2010.
- Taguchi, E., Stammer, D. and W. Zehel (2011): "Estimation of deep ocean tidal energy dissipation based on the high-resolution data-assimilative HAMTIDE model" (submitted to *Journal of Geophysical Research*).
- Venedikov, A.P., Arnos, J., Vieira, R., (2003): "VAV: a program for tidal data processing". *Computers & Geosciences* 29, 487-502.
- Venedikov, A.P., Arnos, J., Vieira, R. (2005): "New version of program VAV for tidal data processing". *Computers & Geosciences* 31, 667-669

A aplicação do GNSS na medição do comportamento estático e dinâmico de grandes estruturas de engenharia civil e de fenómenos geofísicos

The GNSS applied to measure static and dynamic response of large civil engineering structures and geophysical phenomena

José Nuno Lima⁽¹⁾, Sérgio Oliveira⁽¹⁾, Maria João Henriques⁽¹⁾ e João Casaca⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101 – 1700-066 Lisboa, jnplima@lneec.pt

SUMMARY

The GNSS is being currently applied to measure static and dynamic response of large civil engineering structures and geophysical phenomena. The GNSS in static mode is more suitable for long-term monitoring because this positioning method is characterised to detect low frequency displacements with millimetric level accuracy. Of course, on short-term monitoring it is required the GNSS in more expeditious mode, like Real Time Kinematic (RTK) or Post Process Kinematic (PPK). However, it is well known that multipath effects and low sampling rates affect the accuracy of high frequency GNSS displacement measurements. In order to assess the accuracy of GNSS in kinematic mode, a test on a three-storey building scale model was carried out, where a modal identification obtained by GNSS in PPK mode is compared with an analytical model. In this paper the test is described in detail, the results obtained are analysed and a conclusion is drawn in order to apply the GNSS for large civil engineering structures and geophysical phenomena monitoring.

1. INTRODUÇÃO

O nível de precisão conseguido com o GNSS em modo estático proporcionou a que se tenha instalado, por toda a Terra, nos últimos vinte cinco anos milhares de estações para monitorizar fenómenos geofísicos e estruturas de engenharia civil. Tipicamente, as soluções em modo estático utilizam janelas de observação GNSS cuja duração vai de algumas horas a alguns dias. A frequência de solução resultante da duração destas janelas apenas permite monitorizar deslocamentos de longo período, como, por exemplo, assentamentos de edifícios ou as velocidades das placas tectónicas. No entanto, aproveitando a elevada precisão da sincronização dos relógios do GNSS e a possibilidade dos receptores GNSS medirem com frequências de amostragem até 100 Hz, já há alguns anos que se utiliza, também, o GNSS na monitorização de movimentos com frequências mais elevadas. O principal obstáculo será a obrigatoriedade de se utilizarem modos de posicionamento mais expeditos, como o cinemático em tempo real (Real Time Kinematic, RTK) ou o cinemático em pós-processamento (Post Processed Kinematic, PPK), onde os erros inerentes a estes tipos de posicionamento poder-se-ão confundir com os movimentos que se pretendem medir.

Está largamente comprovado que o posicionamento GNSS em modo estático tem uma precisão milimétrica (pressupondo as condições mais favoráveis, como, por exemplo, receptores e antenas GNSS de precisão, software de processamento científico, órbitas de precisão, etc.). No caso do posicionamento com o GNSS em modo cinemático a precisão é geralmente inferior, da ordem de alguns centímetros. A degradação da precisão que se verifica no segundo modo é quase exclusivamente devida ao *multipath* (reflexão de sinais) que é um efeito difícil de ser modelado (em particular, quando as superfícies reflectoras estão em movimento).

Para caracterizar a resposta que o GNSS pode dar na medição de deslocamentos de frequência elevada foi feito um ensaio num edifício simples de três pisos.

2. AS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS DO EDIFÍCIO OBTIDAS PELO MODELO MATEMÁTICO

Para o teste foi especialmente construído um modelo simples da estrutura de um edifício: um pórtico constituído por três pisos ligados entre si por quatro pilares. As lajes de piso são materializadas por placas de aço com 2 cm de espessura e os pilares são lâminas de alumínio com uma altura de 1 metro. Na Figura 1-(a) representa-se uma perspectiva do modelo.

Com o intuito de reduzir a dimensão do problema, será feita apenas a análise plana do modelo, considerando a direcção mais

flexível do pórtico tridimensional. Na Figura 1-(b) a estrutura está representada de forma simplificada a duas dimensões.

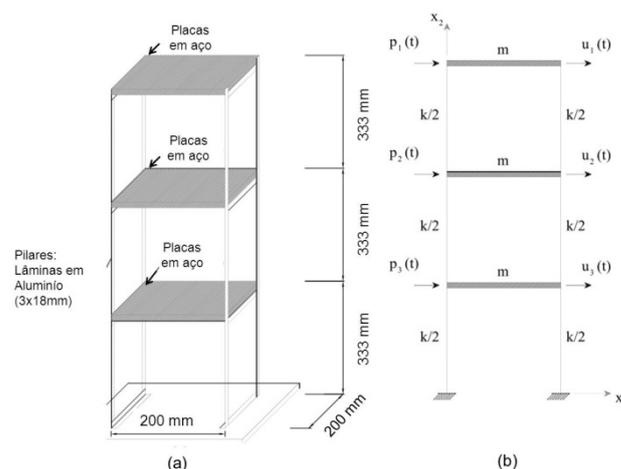


Figura 1 – (a) Perspectiva do modelo de três pisos. (b) Simplificação estrutural do modelo para duas dimensões. ((a) Three-storey model in perspective. (b) Model structural simplification for two dimensions)

Também por simplificação, pode considerar-se que as matrizes de massas e de amortecimentos são diagonais. Assim, a equação dinâmica pode escrever-se da seguinte forma, Oliveira (2007)

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4k_p & -4k_p & 0 \\ -4k_p & 8k_p & -4k_p \\ 0 & -4k_p & 8k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo M a matriz de massas, \ddot{U} é o vector de acelerações, C a matriz de amortecimento, \dot{U} o vector de velocidades, K a matriz de rigidez, U o vector de deslocamentos e F o vector das forças dinâmicas actuantes ao longo do tempo.

Neste sistema de equações diferenciais as incógnitas são os deslocamentos estruturais ao longo do tempo, considerando um grau de liberdade de translação por piso, conforme se pode ver na Figura 1-(b). Este sistema de equações pode ser resolvido no domínio do tempo ou no domínio da frequência, por aplicação da Transformada de Fourier a cada um dos seus membros.

Para determinar as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura a partir do sistema de equações (1), pode admitir-se, sem perda de generalidade, a hipótese de vibração livre, isto é, sem a aplicação de forças, sem amortecimento e condições iniciais

não nulas Oliveira (2007). Também se verifica experimentalmente, embora não seja independente das condições iniciais, que o edifício de três pisos tende a vibrar livremente com todos os pisos a oscilarem em sintonia de modo a que seja possível associar uma onda sinusoidal a cada piso, com a mesma frequência ω_n e com amplitudes decrescentes, do piso superior para o inferior, dadas por φ_{1n} , φ_{2n} e φ_{3n} , ou seja:

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{1n} \cdot \cos(\omega_n t) \\ \varphi_{2n} \cdot \cos(\omega_n t) \\ \varphi_{3n} \cdot \cos(\omega_n t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Prova-se matematicamente que o tipo das equações dadas por (2) poderão ser soluções não nulas para o edifício de três pisos desde que o determinante $|\underline{K} - \underline{M} \cdot \omega_n^2|$ seja nulo (o que significa que as soluções não nulas deste tipo correspondem a soluções indeterminadas). Assim, basta calcular os valores de ω_n (valores próprios) para os quais se verifica a condição:

$$|K - M \cdot \omega_n^2| = 0. \quad (3)$$

Os valores que verificam a equação (3) são os valores das frequências naturais da estrutura, que no caso do edifício de três pisos, correspondem a três frequências distintas.

Para o cálculo das frequências naturais do edifício de três pisos, vamos considerar os seguintes valores: i) módulo de elasticidade do alumínio dada por $E_{\text{alumínio}} = 70\text{GPa}$; ii) massa de cada piso dada por $m = 5\text{kg}$ (sendo necessário acrescentar as massas das antenas GNSS que são 4.14kg, 1.65kg e 1.65kg, para o piso superior, piso intermédio e piso inferior, respectivamente); iii) altura entre os pisos dada por $L = 0.333\text{m}$; iv) espessura dos pilares dada por $h = 0.0028\text{m}$; v) largura dos pilares dada por $b = 0.018\text{m}$.

As constantes I (inércia) e k_p (rigidez dos pilares) são obtidos em (4), e, atendendo a (1), são obtidas (5), Oliveira (2007)

$$I = \frac{b \times h^3}{12}; \quad k_p = \frac{12 \cdot E_{\text{alumínio}} \cdot I}{L^3} = 747.0311 \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} 4 \times 747.0311 & -4 \times 747.0311 & 0 \\ -4 \times 747.0311 & 8 \times 747.0311 & -4 \times 747.0311 \\ 0 & -4 \times 747.0311 & 8 \times 747.0311 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} 5 + 4.14 & 0 & 0 \\ 0 & 5 + 1.65 & 0 \\ 0 & 0 & 5 + 1.65 \end{bmatrix}$$

Com os valores expressos em (4) e em (5), basta determinar os valores próprios do sistema (6).

$$Kx = \lambda Mx \quad (6)$$

A partir dos valores próprios determinam-se as frequências naturais, correspondentes aos três primeiros modos de vibração, e estão expressas em (7).

$$\begin{aligned} \lambda_1 = 73.7342 &\Rightarrow \sqrt{\lambda_1} = 8.888 \Rightarrow \frac{\omega_1}{2\pi} = 1.37\text{Hz} \\ \lambda_2 = 630.3567 &\Rightarrow \sqrt{\lambda_2} = 25.106 \Rightarrow \frac{\omega_2}{2\pi} = 4.00\text{Hz} \\ \lambda_3 = 1420.2055 &\Rightarrow \sqrt{\lambda_3} = 37.686 \Rightarrow \frac{\omega_3}{2\pi} = 6.00\text{Hz} \end{aligned} \quad (7)$$

3. DESCRIÇÃO DO TESTE

Foi colocado no topo dum edifício do campus do LNEC a estrutura de três pisos. A direcção mais flexível desta estrutura ficou orientada para a direcção Norte – Sul. Foram colocadas três antenas GNSS da Topcon no edifício de três pisos: no piso superior uma

antena Choke Ring CR3_GGD (massa = 4.14kg); no piso intermédio uma antena Hiper Pro (massa = 1.65kg) e no piso inferior, também, uma antena Hiper Pro (massa = 1.65kg). No piso superior a antena foi instalada no centro da placa. Para evitar as perdas de sinal, as antenas nos pisos intermédio e inferior foram colocadas lateralmente, conforme se poderá ver na Figura 2. A cerca de 20 metros de distância, foi colocada uma outra antena GNSS da Topcon (Choke Ring CR3_GGD) que funcionou como antena da estação de referência.

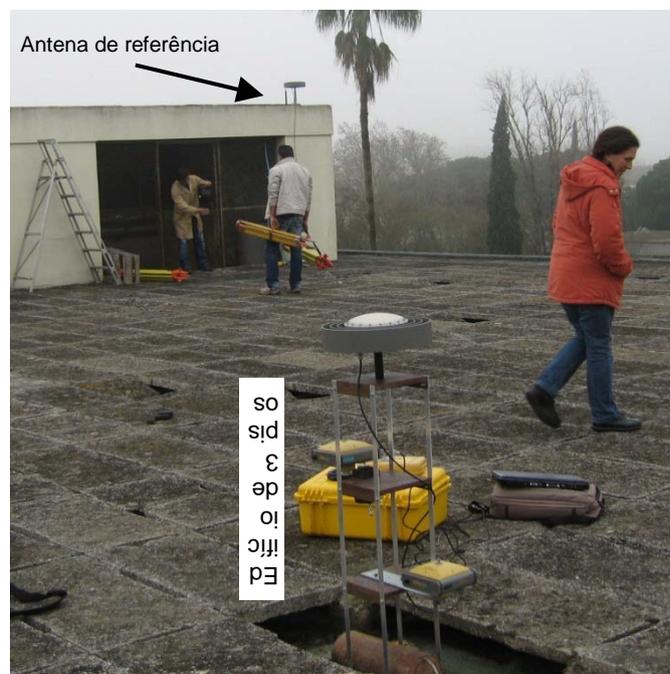


Figura 2 – Localização da antena de referência em relação ao edifício de três pisos. No modelo de três pisos já estão montadas as três antenas GNSS para o teste. (Localization of reference antenna and 3 antennae mounted on three storey building).

As observações foram registadas com uma frequência de amostragem de 20 Hz e foram processadas com o software da Topcon, Pinnacle, em modo cinemático pós-processado, obtendo-se 20 coordenadas por segundo. Durante a sessão de observação foram dadas pequenas pancadas no edifício de modo a que este ficasse a vibrar. Especial atenção foi dada à componente Norte, uma vez que esta direcção é a de maior flexibilidade do edifício.

4. CÁLCULO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS DO EDIFÍCIO ATRAVÉS DAS OBSERVAÇÕES GNSS

Aplicando as Transformadas Rápidas de Fourier às séries temporais obtidas com o GNSS para a componente norte (Figura 3) é possível calcular as frequências naturais do edifício de três pisos.

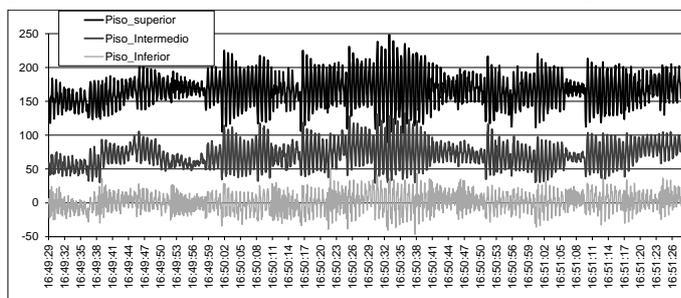


Figura 3 – Série temporal obtida com o GNSS para os três pisos (em cima – piso superior, no meio – piso intermédio e em baixo – piso inferior) na componente dN (expresso em mm). (Time series obtained from the GNSS in north component (up – third storey, middle – second storey, and bottom – first storey) express in mm).

Além do mais, permite através da função de densidade espectral de potência identificar o tipo de ruído da série temporal. Segundo Agnew (1992) a função de densidade espectral de potência pode ser expresso por uma lei de potência (*power law*)

$$P(f) = P_0 \cdot f^{-\alpha} \quad (8)$$

Em que P_0 é uma constante e α é o índice espectral. Para valores de α próximos de 0, o ruído é considerado como sendo branco (*white noise*). Para valores próximos de 1, o ruído é considerado como sendo do tipo *flicker* (*pink noise* – não há um sinal claro). Finalmente, para valores próximos ou superior a 2, o ruído é considerado como sendo do tipo *random walk* (*red noise* – existência de um ou mais sinais claros, também designado por *movimento browniano*).

Aplicando as Transformadas Rápidas de Fourier às séries temporais obtidas com o GNSS, segundo a direcção norte (Figura 3), é possível calcular as frequências naturais do edifício de três pisos. Para isso, recorreu-se ao *software* Tsoft (Van Camp e Vauterin, 2005). As Figuras 4, 5 e 6 mostram a função de densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, observada com o GNSS no piso superior, intermédio e inferior, respectivamente.

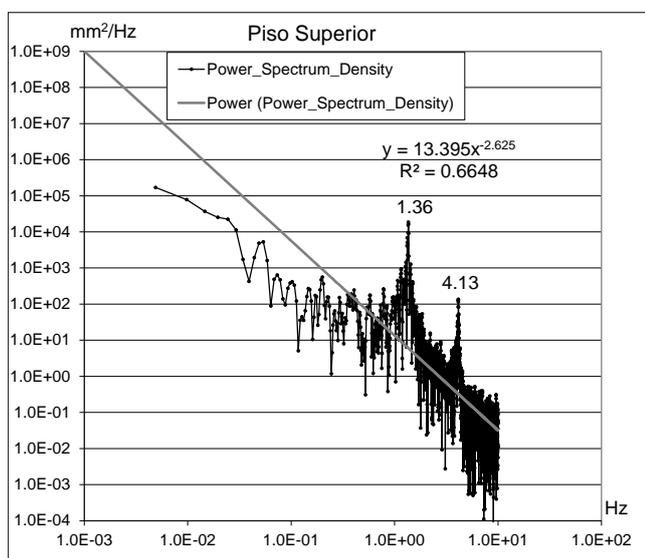


Figura 4 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, observada com o GNSS no piso superior. A identificação dos dois primeiros modos de vibração é bastante clara (Power spectrum density of the GNSS time series observed in third storey, north component. The first two vibration modes identification it is clear.)

As frequências do edifício de três pisos obtidas empiricamente e pelo modelo matemático estão expressas no Quadro 1.

A identificação das frequências dos dois primeiros modos de vibração é muito clara (Figuras 4, 5 e 6) e coerente com os valores obtidos do modelo matemático. No entanto, a identificação da frequência do 3º modo de vibração só é conseguida nos dois pisos inferiores, sendo os valores concordantes com os do modelo matemático.

Os índices espectrais obtidos (2.62, 2.26 e 1.86, para o 3º, 2º e 1º pisos, respectivamente, Figuras 4, 5 e 6) mostram a existência de sinais nas séries temporais observados com o GNSS. Ou seja, as séries temporais são do tipo *movimento browniano*. Há dúvidas em relação ao sucesso da identificação da frequência do 3º modo de vibração, sobretudo com as observações realizadas no 3º piso. Um dos processos para clarificação das dúvidas será conseguir retirar das séries temporais observadas com o GNSS os sinais referentes aos dois primeiros modos de vibração do edifício, através de um filtro.

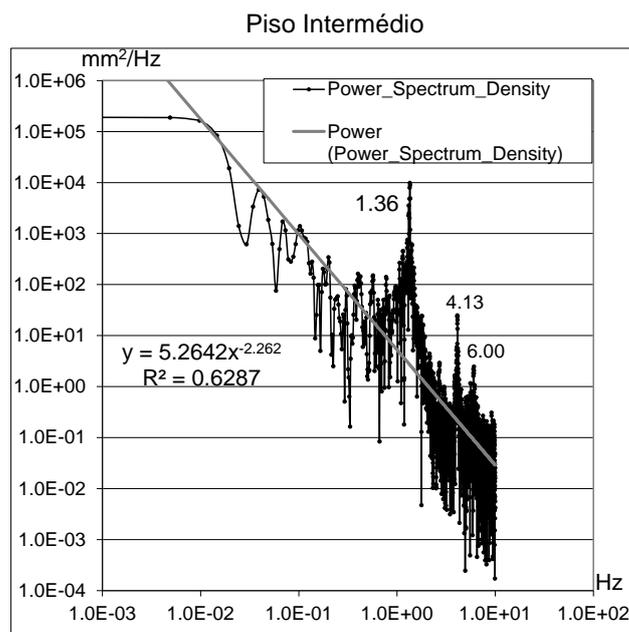


Figura 5 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, observada com o GNSS no piso intermédio. A identificação dos três primeiros modos de vibração é bastante clara (Power spectrum density of the GNSS time series observed in second storey, north component. The first three vibration modes identification it is clear.)

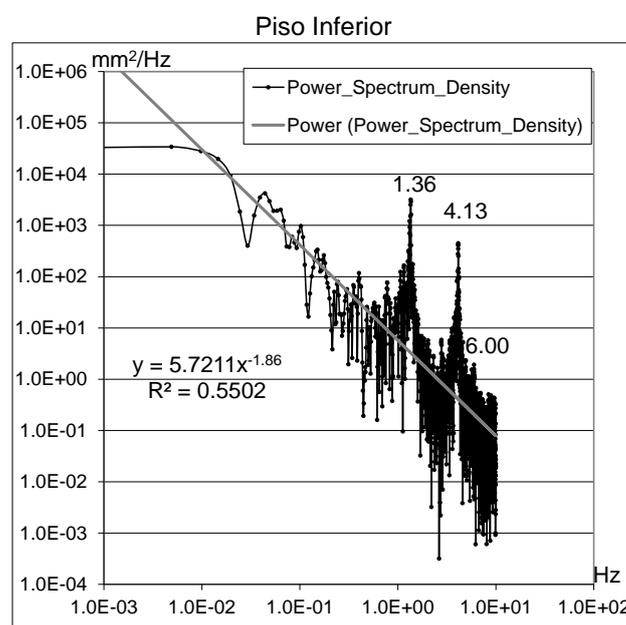


Figura 6 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, observada com o GNSS no piso inferior. A identificação dos dois primeiros modos de vibração é bastante clara, conseguindo identificar-se, ainda o 3º modo de vibração. (Power spectrum density of the GNSS time series observed in first storey, north component. The two first vibration modes identification it is clear. However, the third vibration mode it is still possible to identify.)

Assim, através do *software* Tsoft, foi aplicado às três séries temporais um filtro *passa alto* utilizando as Transformadas Rápidas de Fourier (FFT *high-pass filter*), com uma *frequência de corte* de 5 Hz, ou seja, todos os sinais com frequências abaixo deste valor são filtrados, como são os casos dos dois primeiros modos de vibração.

Quadro 1 – Frequências obtidas com o GNSS e as obtidas com o modelo matemático para o edifício de três pisos (*The GNSS frequencies obtained and those obtained with mathematical model for the three storey building*)

	1º Modo	2º Modo	3º Modo
Modelo Matemático	1.37 Hz	4.00 Hz	6.00 Hz
GNSS 3º Piso	1.36 Hz	4.13 Hz	-----
GNSS 2º Piso	1.36 Hz	4.13 Hz	6.00 Hz
GNSS 1º Piso	1.36 Hz	4.13 Hz	6.00 Hz

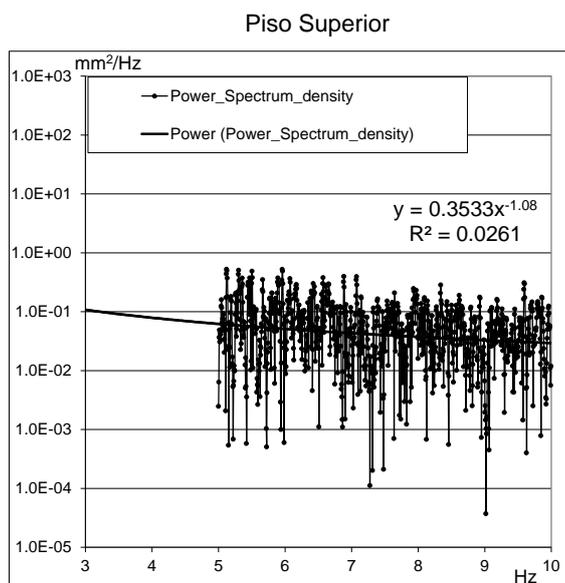


Figura 7 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, filtrada do piso superior. (*Power spectrum density of the time series filtered in third storey, north component*).

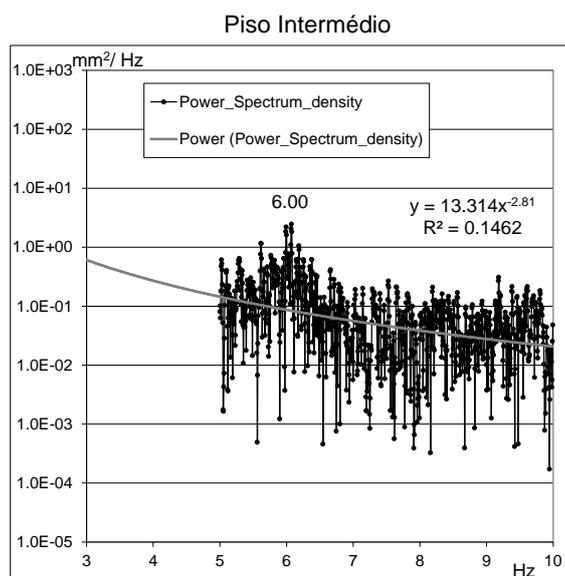


Figura 8 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, filtrada do piso intermédio. (*Power spectrum density of the time series filtered in second storey, north component*).

As Figuras 7, 8 e 9 mostram as séries temporais observadas com o GNSS filtradas de todos os sinais com frequências inferiores a 5Hz, nos 3º, 2º e 1º pisos, respectivamente.

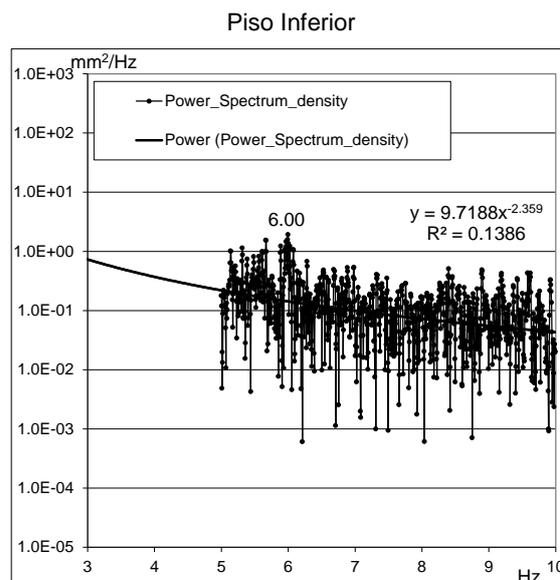


Figura 9 – Densidade espectral de potência da série temporal, na componente dN, filtrada do piso inferior. (*Power spectrum density of the time series filtered in first storey, north component*).

A identificação da frequência do 3º modo de vibração nas séries temporais filtradas só é conseguida nos dois pisos inferiores (Figuras 8 e 9). Além disso, os valores dos índices espectrais (1.08, 2.81 e 2.36, dos 3º, 2º e 1º pisos, respectivamente) mostram que o 3º modo de vibração se confunde com o ruído da série temporal observada com o GNSS no 3º piso. Concluindo-se que não tem uma amplitude significativamente superior à do ruído da observação GNSS que se estima ter uma amplitude inferior a 3mm Lima *et al.* (2009).

5. CONCLUSÕES

Este ensaio mostra que o GNSS pode ser utilizado na monitorização dinâmica de estruturas de engenharia civil e fenómenos geofísicos. É importante referir que o mesmo equipamento (receptor e antena GNSS) permite monitorizar o comportamento estático e dinâmico.

A presença significativa do efeito de *multipath* pode mascarar as vibrações mais importantes, sobretudo quando as amplitudes destas são da ordem de poucos milímetros.

Com a aplicação do filtro do tipo *passa alto* com as Transformadas Rápidas de Fourier procurou-se separar o sinal do ruído. Verificou-se, neste teste, que os sinais de amplitude da ordem de 2 a 3 mm não foram detectados pelo GNSS em modo cinemático (3º modo de vibração no piso superior), mesmo em bases curtas e numa das componentes planimétrica (a componente altimétrica será, por norma, 2 a 3 vezes mais incerta).

Os valores das frequências próprias do edifício determinados experimentalmente são muito próximos dos valores obtidos com o modelo matemático.

6. REFERÊNCIAS

- Agnew, D. (1992): The time-domain behaviour of power-law noises. *Geophys Res Lett* 19: 333-336.
- Oliveira, S. (2007): "Matemática Aplicada à Engenharia Civil". Cap.1, Cap.2 e Cap.3. <https://sites.google.com/site/maecisel2/fichas/>.
- Lima, J.N., Casaca, J. e Henriques, M.J. (2009): "O Ruído da Medição Relativa GNSS com Elevada Frequência de Amostragem". *Relatório 43/2009 –DBB/NGA*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Van Camp, M. e Vauterin, P. (2005): "Tsoft: graphical and interactive software for analysis of time series and Earth tides". *Computers & GeoSciences*, 31 (5), 631-640.

El método de procesado PPP en el Centro de Análisis del IGN *Testing of PPP processing method at the IGN Analysis Center*

Manel Pascual ⁽¹⁾, Miguel Ángel Cano ⁽¹⁾, Marcelino Valdés ⁽¹⁾ y Pedro Gonzalo ⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibáñez Íbero 3, 28003, Madrid, mpfaus@fomento.es

SUMMARY

In the last years the processing method of Precise Point Positioning (PPP) is occupying an important role in the analysis of GNSS permanent stations. There are more and more analysis centers that are using this processing method for different applications compared to the classical double-differences processing method. The Geodesy Department of the Instituto Geográfico Nacional (IGN) has been testing this processing method with the aim of knowing in which projects could be useful. This article shows comparisons between PPP and double differences in different case.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Análisis del Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN), actualmente viene desarrollando una serie de proyectos nacionales (IBERRED y Servicio de Vigilancia Volcánica de Canarias) e internacionales (EUREF y E-GVAP). Para tal fin utiliza diversas metodologías de cálculo. Una de las técnicas empleadas es el Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP), que por sus características, la convierte en una técnica fiable para obtener coordenadas en función del tiempo y por tanto aplicable al estudio de deformaciones, además de la obtención de las coordenadas diarias de cada una de las estaciones que conforman dichas redes.

Con el avance desarrollado en torno a las efemérides precisas y al conocimiento del estado de los relojes de los satélites, el PPP ha ido tomando un interés mayor dentro del campo del posicionamiento incluso en tiempo casi-real, debido principalmente a la simplificación de sus operaciones y la rapidez de cálculo. Para determinar la posición (realizando PPP), utiliza las ecuaciones de “cero-diferencia” a partir del código y la medida de fase transportada. Todo ello, junto con un receptor de doble frecuencia, efemérides precisas y el conocimiento de los estados de los relojes antes mencionados, hacen que el posicionamiento llegue a precisiones inferiores al centímetro. En la actualidad, con los receptores de doble frecuencia, se puede crear un modelo libre-ionosférico formando una combinación de observaciones de código y fase que permite alcanzar la precisión mencionada.

En este artículo se detallan los proyectos actuales llevados a cabo por el centro de Análisis del IGN para contrastar lo adecuado del método, los fundamentos teóricos del método y la aplicación en algunos casos prácticos contrastando con el método usual de dobles diferencias.

2. CENTRO DE ANÁLISIS DEL IGN.

El IGN viene desarrollando desde 1998 una red de estaciones permanentes GNSS (Global Navigation Satellite System) situadas homogéneamente a lo largo de todo el territorio nacional. A partir de esta red se llevan a cabo proyectos nacionales e internacionales. Ejemplo de proyectos nacionales son IBERRED, Quirós et al. (2004), y el cálculo de las estaciones del Servicio de Vigilancia Volcánica de Canarias (SVV), L. García-Cañada et al. (2011), así como proyectos Internacionales EUREF (EUREF Permanent Network EPN), Bruyninx et al. (2009), y el proyecto E-GVAP (EUMETNET EIG GNSS Water Vapour Programme), Vedel H. et al. (2005). Una característica común a ellos es que en la actualidad se emplea el cálculo de dobles diferencias usando el software Bernese en su versión 5.0 del Instituto de Astronomía de la Universidad de Berna (Astronomischen Instituts der Universität Bern, AIUB), Datch et al. (2007).

Desde el año 2008 hasta la fecha se ha introducido otra metodología de cálculo siendo ésta el PPP. Se han tomado 41 estaciones permanentes para ser procesadas de forma diaria con el fin de obtener coordenadas en función del tiempo y realizar estudios

de deformaciones en el terreno, así como otorgar una mayor seguridad a los resultados por poseer dos metodologías de cálculo independientes. Estas estaciones ya son calculadas por los otros proyectos con la metodología de dobles diferencias.

En la Figura 1 se muestra la distribución geográfica de las estaciones procesadas de la red GNSS.



Figura 1 - Estaciones Procesadas de la red GNSS en la península e islas

3. PROCESAMIENTO PPP.

3.1. Fundamentos Matemáticos

Se ha comentado que el interés sobre la metodología de cálculo PPP ha ido creciendo dentro de la comunidad científica que trabaja, investiga y desarrolla soluciones GNSS. Ésto es debido, fundamentalmente, a la simplificación de las operaciones y al no requerimiento de una estación base. Actualmente, con receptores GNSS de doble frecuencia con datos GNSS precisos, y aplicando la técnica PPP, la precisión de posicionamiento puede variar del decímetro al centímetro, Zumberge et al. (1997), llegando incluso a precisiones inferiores al centímetro.

Si se introduce la combinación libre-ionosfera a las ecuaciones de pseudodistancias de código (P) y fase (Φ), junto con los estados de los relojes, el efecto de la troposfera y las ambigüedades de ciclo inicial, llegamos a las expresiones simplificadas de las ecuaciones de observación, Jan K. and Pierre H. et al. (2000):

$$l_p = \rho + C(dt - dT) + T_r + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$l_\phi = \rho + C(dt - dT) + T_r + N \cdot \lambda + \varepsilon_\phi \quad (2)$$

donde:

l_p es la pseudodistancia de código libre-ionosfera,

l_ϕ es la pseudodistancia de fase libre-ionosfera,

dt es el estado del reloj de la estación,

dT es el estado del reloj del satélite,

C es la velocidad de la luz en el vacío,

T_r es el retraso debido a la troposfera,

λ es la longitud de onda libre-ionosfera,

N es la ambigüedad de fase,

$\varepsilon_p, \varepsilon_\phi$ son las componentes de la medición del ruido, incluyendo la multitrayectoria.

ρ es la distancia real satélite-receptor, que expresada como función de las coordenadas del satélite (X_s, Y_s, Z_s) y la estación (x, y, z) queda:

$$\rho = \sqrt{(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2}$$

Expresando el retraso troposférico a partir de una función de modelado (M), manteniendo como incógnita el retraso troposférico en el zenit (zpd) y haciendo desaparecer el término troposférico junto con la eliminación de los relojes de los satélites (dT), conocidos pues son datos de entrada, las ecuaciones de observación se simplifican a:

$$f_p = \rho + C \cdot dt + M \cdot zpd + \varepsilon_p - l_p = 0 \quad (3)$$

$$f_\phi = \rho + C \cdot dt + M \cdot zpd + N \cdot \lambda + \varepsilon_\phi - l_\phi = 0 \quad (4)$$

3.2. Ajuste del Modelo

Linealizando las ecuaciones de observación [3] y [4] junto con los parámetros a priori y las observaciones (X^0, l), llegamos al modelo de ajuste de ecuaciones de observación, expresado en forma matricial, Jan K. and Pierre H. et al. (2000), como:

$$A \cdot \delta + W - V = 0$$

donde A es la matriz diseño, δ es el vector de correcciones a los parámetros desconocidos X

$$X = [x, y, z, dt, zpd, N_{(j-1,nsat)}^j]$$

$W = f(X^0, l)$ es el vector de error de cierre y V es el vector residual.

La solución mínima cuadrática con constreñimientos ponderados a priori (P_X) para los parámetros viene dado por

$$\delta = -(P_{X^0} + A^T P_l A)^{-1} A^T P_l \cdot W \quad (5)$$

de modo que los parámetros estimados serán

$$\hat{X} = X^0 + \delta$$

con la siguiente matriz de covarianza.

$$C_{\hat{X}} = P_{\hat{X}}^{-1} = (P_{X^0} + A^T P_l A)^{-1} \quad (6)$$

3.3. Características generales

El PPP es un caso especial de procesado sin emplear las simples, dobles y triples diferencias, al contrario que en otras aplicaciones, la corrección del reloj del satélite no se calcula sino que se supone conocida de antemano, éstas no se interpolan. El procesamiento de datos se limita a la tasa de muestreo de las correcciones del reloj para obtener una solución. El Center for Orbit Determination in Europe (CODE) provee información sobre los relojes de los satélites con altas tasas de muestreo, como por ejemplo de 30 segundos, permitiendo mejores correcciones en el procesamiento.

En una solución de red por dobles diferencias, todos los parámetros se estiman para que encajen con todos los datos de observación lo mejor posible, siempre considerando todas las correlaciones. En el caso de PPP, el desconocimiento de las correlaciones puede ser una característica que en algunos casos incluso sea de gran ayuda, es decir, los errores introducidos por una estación con un mal comportamiento, influyen en los resultados concretos de dicha estación y no se propagan por la red. Así, la técnica PPP es apta para identificar estaciones que puedan presentar anomalías, proporcionado un cálculo rápido y eficiente para generar coordenadas en un punto dado.

Al emplear PPP hay que tener en cuenta el tiempo de observación. La evolución de la precisión va ligada de forma directa a la evolución del tiempo, S. Bisnath and Y. Gao et al. (2007). Para obtener precisiones de un centímetro se debe hacer una medición de observables mayor a 4 horas, Lambert et al (2008). En la Figura 2 se representa la precisión obtenida en la determinación de las coordenadas de la estación VALE para un periodo de 4 horas. Se aprecia como la precisión varía desde 30 centímetros durante los primeros 5 minutos de observación, hasta 5 centímetros a la hora de observación.

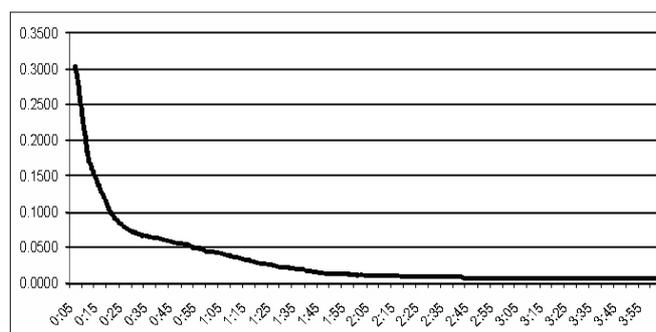


Figura 2. Evolución de la precisión del PPP respecto al tiempo para la coordenada h con observables de la estación permanente VALE del IGN.

Los datos usados para la realización de los casos prácticos que se describen a continuación, son captados en formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format, Gurtner et al. (2005), desde el servidor de datos GNSS de Geodesia del IGN. Una vez que es chequeada la calidad de estos datos con el programa de UNAVCO, TEQC, Estey L. et al. (1999), éstos quedan preparados en el servidor de datos para su cálculo.

Además de los ficheros de observación de las estaciones GNSS, los datos de entrada para estos casos prácticos han sido el Modelo de Nutación el IAU2000, el modelo del polo el IERS2000, DE200 para efemérides planetarias, coeficiente de Potencial de la Tierra JGM3, la Carga oceánica mediante el modelo FES2004, archivos DCB del CODE, estados de los relojes modelados a través de los productos CLK del IGS, efemérides precisas finales, rápidas y ultra-rápidas al igual que los Parámetros ERP de Rotación de la Tierra del IGS, offsets de los centros de fase de las antenas mediante PHAS_EUR.Iyy y datum geodésico IGSy dependiendo 'yy' del marco de referencia que sea vigente, Valdés et al. (2008).

4. CASOS PRÁCTICOS

El Centro de Análisis del IGN ha realizado una serie de cálculos PPP con el objetivo de estudiar las deformaciones producidas en

áreas volcánicas o que han sufrido terremotos fuertes y comparar esta técnica con otras para profundizar más en la utilidad de su aplicación. El programa de cálculo utilizado es Bernese en su versión 5.0, Datch et al. (2007).

4.1. Crisis volcánica en la Isla del Hierro

Como consecuencia de la crisis de 2011 en la isla de El Hierro, detectada con registros sísmicos, el SVV del IGN comenzó a desplegar una red geodésica de estaciones permanentes GNSS, puntos de observaciones periódicas GNSS e InSAR, con la finalidad de evaluar las posibles deformaciones en el terreno causadas por el proceso volcánico.

La red permanente GNSS está compuesta por 13 estaciones, ver Figura 3, con registros continuos. Los datos procedentes de cada una de las estaciones son enviados al Centro de Análisis para su posterior cálculo. En la Tabla I se detalla el estado a mayo 2012 de las estaciones GNSS del SVV en El Hierro, M. A. Cano (2012).

	LATITUD	LONGITUD	RECEPTOR	ANTENA
HI00	27°48' 46"N	17°54'57"O	TRIMBLE 5700	ZEPHYR GEODETIC
FRON	27°45'20"N	18°6'13"O	Leica 1200 GRX	LEIAX1203
HI01	27°44'47"N	17°58'54"O	Leica 1200 GRX	LEIAT504
HI02	27°45'0"N	18°2'23"O	Trimble 4000SSI	TRM29659
HI03	27°45'7"N	18°4'54"O	Trimble NetRS	TRM29659
HI04	27°45'20"N	18°6'12"O	Trimble NetRS	TRM29659
HI05	27°42'31"N	18°8'37"O	Leica 1200 GRX	LEIAT504
HI06	27°42'24.3"N	18° 04'26"O	Trimble 4000SSI	TRM29659
HI07	27°43'0"N	18°01'17"O	Trimble 4000SSI	TRM29659
HI08	27°42'33"N	17°58'44"O	Leica GR10	LEIAR25.R4
HI09	27°40'26"N	18°01'23"O	Trimble NetRs	Compact L1L2 w G. Plane
HI10	27°43'02"N	18°01'17"O	Leica GR10	LEIAR25.R4
HI11	27°44'17"N	18°04'58"O	Trimble 4000SSI	TRM29659

Tabla 1. Instrumental de la red GNSS.

En la Figura 3 se muestran los emplazamientos de las estaciones, tanto continuas como de observación periódica.

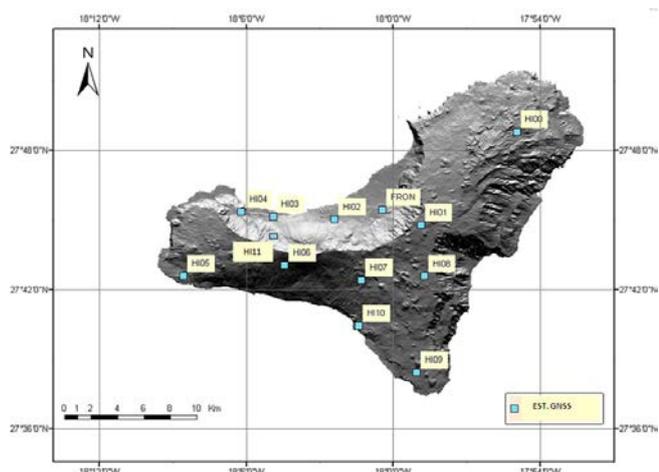


Figura 3. Localización de las estaciones GNSS.

Estos datos GNSS son procesados tanto en dobles diferencias como en PPP para su posterior comparación. Dada la finalidad de vigilancia volcánica, y como consecuencia de ello la necesidad de una rápida obtención de los resultados, para cada red se realizan dos procesados, uno con efemérides rápidas de los satélites, publicadas

por el IGS a las 17 horas de la finalización del día de la obtención de los datos, y posteriormente un procesado preciso con el uso de efemérides finales, Dow et al. (2009). Además, durante la crisis volcánica se ha añadido un procesado, también diario, con efemérides ultrarrápidas, cuyos resultados se tenían a primera hora de la mañana del día siguiente. A partir de todos estos procesados se obtienen las series de coordenadas diarias de las estaciones, tanto en dobles diferencias como en PPP, lo que permite tener control de la evolución de las deformaciones.

Un ejemplo comparativo entre los resultados obtenidos con la técnica de dobles diferencias y PPP en deformación se detecta en la estación permanente HI03, como puede observarse en la Figura.4 y Figura 5, donde aparecen las coordenadas topocéntricas (n,e,u). Se observa a primeros de septiembre de 2011 un incremento notable en la aceleración en la componente norte y este. El cálculo está realizado con productos finales y con un tiempo de procesado diario.

Para la determinación precisa de desplazamientos en superficie, las series de coordenadas temporales deberían ser expresadas en un marco de referencia local fijo. Ahora bien, como la finalidad de este estudio es la comparación de la técnica clásica de dobles diferencias y PPP, se optó porque la solución final para las coordenadas estuviese expresada en el marco de referencia correspondiente a la época de observación, en este caso, ITRF08. La consecuencia es que el desplazamiento debido a los movimientos de la placa tectónica Africana de las estaciones de la red no se elimina de las series temporales, si bien su valor es mucho más pequeño (~2 cm/año) que aquellos derivados de la crisis volcánica, y por lo tanto no afecta a la comparación entre técnicas.

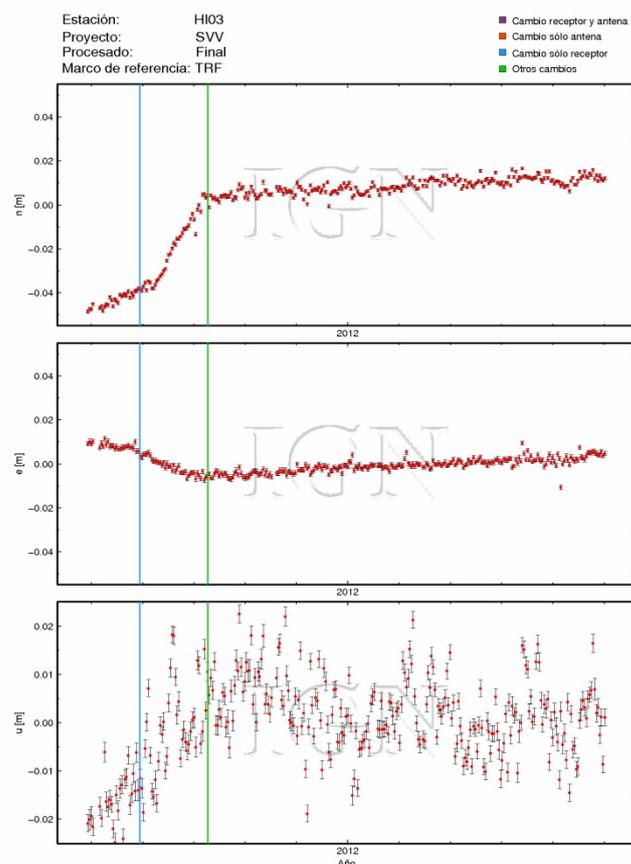


Figura 4. Serie temporal estación HI03 en coordenadas locales. Procesado mediante dobles diferencias.

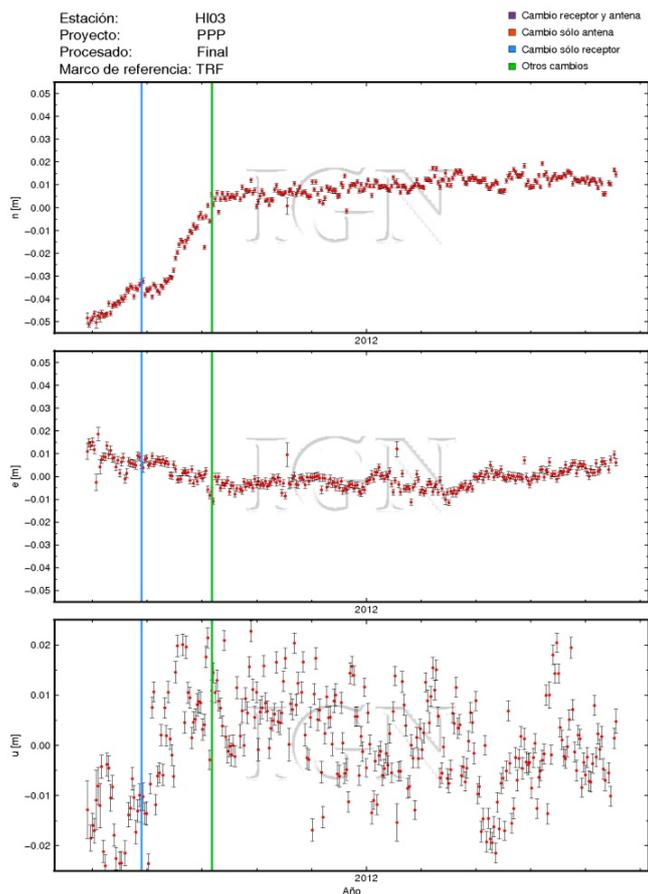


Figura. 5. Serie temporal estación HI03 en coordenadas locales. Procesado mediante PPP

Al realizar la diferencia del ejemplo anterior entre dobles diferencias y PPP en sus respectivos componentes norte, este y altura, ver Figura.6, se observa que las diferencias oscilan alrededor 1 centímetro en la mayoría de los casos. Teniendo presente que el cálculo PPP trabaja de forma absoluta, podemos decir que utilizar esta técnica como sistema de alerta en situaciones similares a la crisis del Hierro es factible debido a la similitud de sus resultados con los obtenidos con la metodología diferencial.

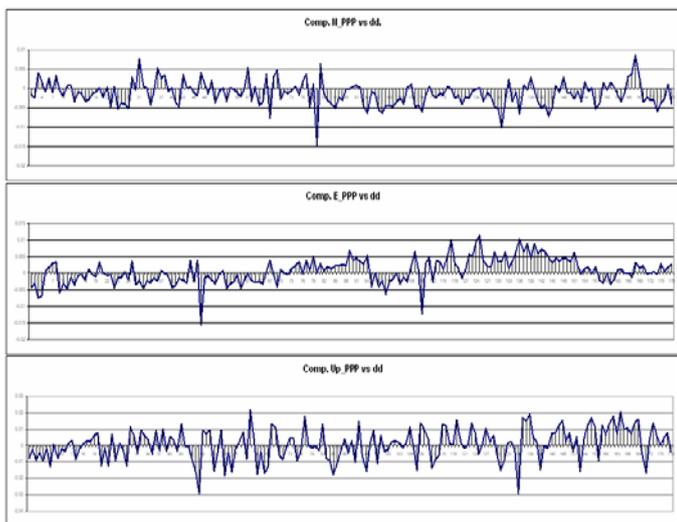


Figura 6. Diferencias de coordenadas obtenidas mediante cálculo dobles diferencias-PPP (n, e, u).

4.2. Terremoto de Japón

El 11 de marzo de 2011 tuvo lugar el terremoto de Japón. Clasificado como el cuarto más potente del mundo (desde 1900) con una magnitud 9.0 Mw y con epicentro cerca de la costa noreste de Honshun, fue precedido por una serie de grandes premonitores durante los dos días precedentes, comenzando por el sismo del 9 de marzo de magnitud 7.2 Mw, a unos 40 km del terremoto del 11 de marzo y continuando con tres eventos mayores de magnitud 6 Mw ese mismo día.

Al encontrarse Japón en una zona con un alto riesgo sísmico, numerosas son las agencias o servicios, nacionales e internacionales, que vigilan la región en sus diversas técnicas de cálculo. Entre ellas destacamos la GPS Earth Observation Network System (GEONET), operada por el Geographical Survey Institute (GSI) de Japón, que posee 1231 Estaciones Permanentes GPS, o la propia red del International GNSS Service (IGS), que engloba una Red de Estaciones Permanentes GPS de distintas agencias repartidas por toda la Tierra. De esta red mundial, 10 estaciones se encuentran en Japón, teniendo especial relevancia la estación de Mizusawa (MIZU) por su proximidad (140 km) al epicentro del terremoto del 11 de marzo. La agencia responsable de la estación permanente es el GeoForschungsZentrum (GFZ) de Alemania. Esto convierte a esta estación como idónea para estudiar el impacto del terremoto y estudiar los desplazamientos en la zona.

Para este caso práctico se han descargado los archivos RINEX de la estación MIZU diarios a 30 segundos, procesando un total de 13 días (DOY 65 al 77), siendo el 70 el día del terremoto. Resaltar que debido al terremoto y al tsunami posterior, la comunicación con la estación fue interrumpida desde el día 70 a partir de las 8 horas UTC hasta el día 75 que se restableció (8:17:30 horas UTC).

En la Figura 7 se muestra las componentes locales (n, e, u) de la estación MIZU, antes y después del terremoto, procesado mediante técnica de dobles diferencias.

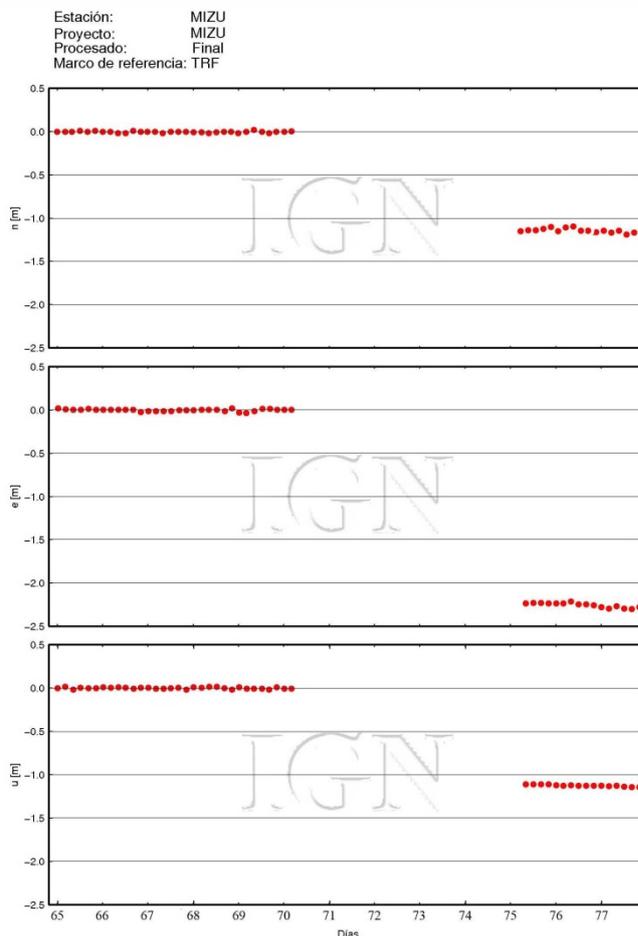


Figura7. Componentes locales (n, e, u) de MIZU. Dobles diferencias.

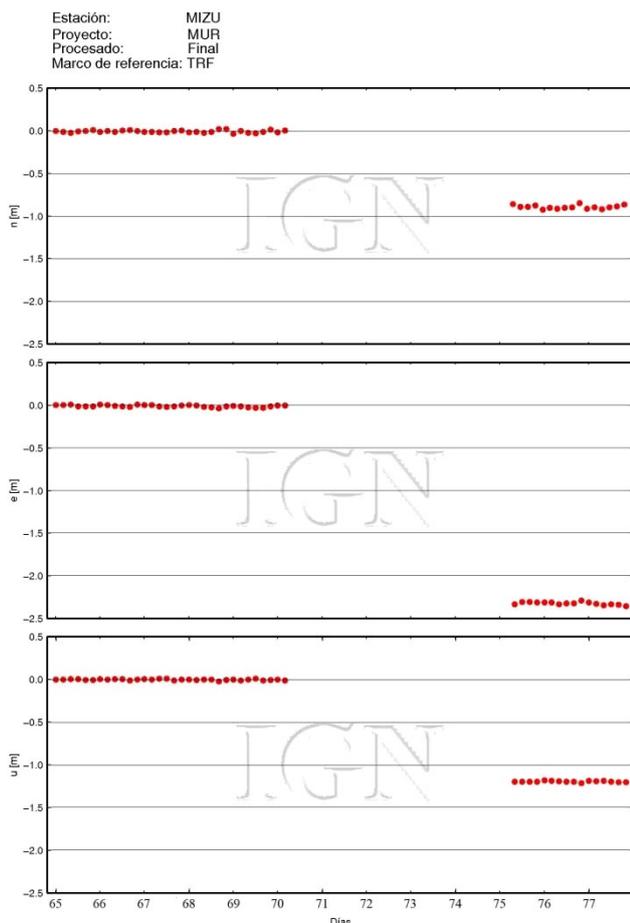


Figura 8. Componentes locales (n , e , u) de MIZU. PPP.

En la Figura 8 se muestran las componentes locales obtenidas mediante técnica PPP.

Los desplazamientos obtenidos ambos casos, en coordenadas locales, han sido bastante significativos. Se ha desplazado la estación MIZU 1 m hacia el sur, 2,3 m hacia el este y ha sufrido un hundimiento de 1,2 m.

Al realizar la diferencia entre ambas soluciones, dobles diferencias y PPP, ver Figura 9, se observa que las diferencias oscilan alrededor del centímetro en la mayoría de los casos.

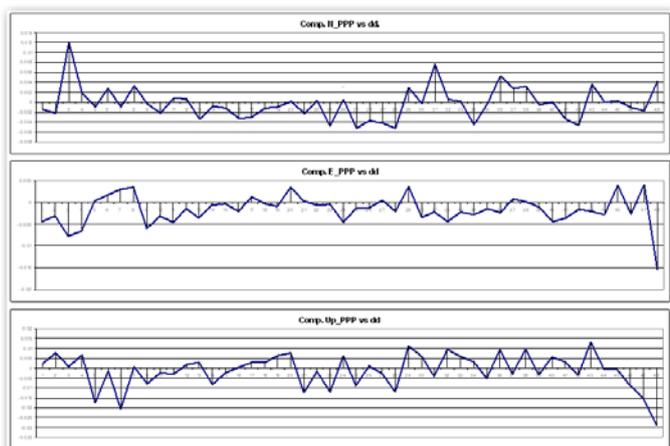


Figura 9. Diferencias de coordenadas obtenidas mediante cálculo dobles diferencias-PPP (n , e , u).

5. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos en los dos casos prácticos realizados, se puede concluir que la técnica PPP genera series

temporales, al igual que el cálculo clásico mediante dobles diferencias y ajuste posterior de la red, y los productos GNSS producidos por los servicios internacionales hacen posible alcanzar precisiones suficientes como para ser considerado una herramienta válida al estudio de deformaciones.

A la vista de los ejemplos es válido tanto para pequeñas deformaciones (El Hierro) como desplazamientos fuertes (Mizu).

La gran simplificación de sus operaciones y la disponibilidad de los datos necesarios en tiempo casi real disminuyen el tiempo de respuesta, siendo óptimo como método de sistemas de alerta, generando además una gran reducción de los costes de equipamiento, mano de obra y simplificación logística-operativa de campo.

6. TRABAJOS FUTUROS

El primer paso para mejorar los resultados, sería la integración de datos GPS y GLONASS, que produciría una disminución en el tiempo de convergencia a la mitad y aumentaría la robustez del posicionamiento.

Con la finalidad de mejorar los resultados en el territorio nacional, sería óptimo realizar la integración de productos propios del IGN en el procesado mediante PPP como las Efemérides Precisas del proyecto IBERRED y el Modelado de la troposfera del proyecto E-GVAP.

El futuro del PPP pasa por la técnica PPP-RTK (tiempo real), basada en el posicionamiento PPP apoyado en el protocolo NTRIP, para la diseminación de correcciones diferenciales, estado de los relojes (CLK), efemérides precisas y modelado troposférico en tiempo real, datos que, a día de hoy, empiezan a estar disponibles.

7. REFERENCIAS

- Bruyninx, C., J. Legrand, F. Roosbeek (2009): "EPN Status and Network Management" Florence, Italy, May 27-30 2009, EUREF Publication, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (En prensa)
- Datch, R., P.F., Hugentobler, M. Meindl (2007): "User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0" (2007)
- Dach R., Urs Hugentobler and Pierre Fridez. Tutorial Bernese GPS Software v.5.0. Astronomical institute, University of Bern. 2007
- Dow, J.M., R. E. Neilan, C. Rizos (2009): "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems", Journal of Geodesy (2009) vol. 83, pp 191-198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Estey, L. H. C. M. Meertens (1999); "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data", GPS Solutions (pub. by John Wiley & Sons), Vol. 3, No. 1, pp. 42-49, doi:10.1007/PL00012778, 1999.
- Gurtner, W., L. Estey (2005): "RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11". <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex211.txt>.
- Jan Kouba and Pierre Héroux. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. Geodetic Survey Division Natural Resources Canada. 615 Booth Street. Ottawa, Ontario K1A 0E9. September 2000
- Lambert Wanninger. High-Precision GNSS Positioning. Geodätisches Institut, TU Dresden, 01062 Dresden. Proceedings of the International SatNav User Congress POSITIONs 2008, 07.-09.10.2008
- L. García-Cañada, M. A. Cano, M. J. García-Arias, J. Pereda, E. González-Alonso, M. Valdés: "Control de deformaciones en la reactivación y erupción de El Hierro (Islas Canarias, España) 2011-2012". Unidad de Volcanología y Área de Geodesia del IGN.
- M. A. Cano, L. García-Cañada, M. J. García-Arias, E. González-Alonso, M. J. Moreno, J. Pereda (2012): "Trabajos Geodésicos del IGN en el Hierro durante la Crisis Volcánica". Comunicación oral.
- Quirós, R., M. Valdés, L. Lozano, M.A. Cano, J.A.S. Sobrino (2004): "Análisis de series de estaciones GPS permanentes ibéricas en el IGN" 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Figueira da Foz (Portugal). 3-7 febrero 2004.
- Quirós, R., J.A.S. Sobrino, M.A. Cano, M. Valdés (2004): "National Report of Spain: Spanish national GPS Reference Stations Network (ERGSP)". Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. Band 33. EUREF Publication No.13. Frankfurt am Main 2004. ISBN 3-89888-885-1 pp 283.
- S. Bisnath and Y. Gao. Current state of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University. Toronto. Canada, M3j 1P3. and Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada, T2N 1N4. 2007
- Valdés M., L. García-Cañada, M.A. Cano (2008): "Estado actual de procesamiento en el Centro de Análisis Local de EUREF (IGE)" 6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar (Portugal), Febrero de 2008.
- Vedel, H. (2005): "E-GVAP, Meteorology and Geodesy Synergy" Presentation of E-GVAP at EUREF Symposium Vienna, Junio 2005.
- Zumberge, J.F., M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, nº B3, pp. 5005-5018.

Análisis de estaciones permanentes GNSS en la península ibérica, proyecto IBERRED

Analysis of GNSS permanent stations in Iberian Peninsula, IBERRED Project

Marcelino Valdés⁽¹⁾, Miguel Ángel Cano⁽¹⁾, Manel Pascual⁽¹⁾ y Laura García-Cañada⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibáñez Íbero 3, 28003, Madrid, mvaldes@fomento.es

SUMMARY

In recent years, many public GNSS permanent stations belonging to different institutions have been installed in the Iberian Peninsula and surrounding. The Department of Geodesy of the Instituto Geográfico Nacional (IGN) processes continuously the vast majority of these stations. The main objectives of these processings are: the control of the reference system as dense as possible, getting precise coordinates for other projects, monitoring the behaviour of the different stations. Occasional re-processings are performed in order to improve and /or mix the solutions in addition to calculating the positions continuously. In some of the stations have been observed peculiar behaviours, such as those due to Lorca earthquake in May 2011.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Navegación Mundial por Satélite (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) han producido cambios muy importantes en la Geodesia. Esta nueva técnica es capaz de realizar mediciones de forma continua y automática a lo largo del tiempo. A consecuencia de ello surgieron como redes geodésicas, las redes de estaciones permanentes GNSS. La observación y cálculo de estas redes permanentes proporciona coordenadas diarias de cada una de las estaciones. En definitiva, no sólo se conoce la posición de los puntos que forman la red, sino además su variación con el tiempo.

En España y en los países colindantes se han instalado numerosas redes de estaciones permanentes GNSS en los últimos años. Y aunque generalmente su objetivo principal es proporcionar correcciones en tiempo real, el análisis de los datos de post-proceso, con las mejores metodologías de cálculo geodésico existentes, permite un gran número de aplicaciones. Entre ellas podemos enumerar: control de los marcos de referencia utilizados de forma práctica en un territorio dado, obtención de coordenadas precisas que sean la base de obtención de otros productos como pueden ser meteorológicos u orbitales, estudios geodinámicos o detección de movimientos locales de muy diversas causas. El Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN) puso en marcha el denominado proyecto IBERRED, Quirós et al. (2004), que consiste en el cálculo y análisis de series temporales de coordenadas de estaciones permanentes GNSS en el área de la Península Ibérica con la máxima densidad posible. Los datos de entrada son procesados con un software riguroso para obtener la máxima precisión y consistencia. La red actualmente procesada consta de alrededor de 340 estaciones.

Este proyecto tiene vocación de continuidad y mejora permanente. Existen algunos resultados que aunque preliminares, demuestran la idoneidad y utilidad de un proyecto de este tipo con implicaciones interdisciplinarias en ramas de la Meteorología, Geodinámica, Volcanología o Sismología aparte de la Geodesia. En este artículo se presenta las características de la red procesada, del procesamiento, la metodología de creación y análisis de series temporales, y por último algunos resultados concretos reseñables.

2. RED IBERRED

Se parte de la captación de datos post-proceso, en formato independiente del receptor (Receiver Independent Exchange, RINEX), Gurtner et al. (2005), de una red lo más densa posible de estaciones permanentes GNSS en el área de la Península Ibérica y alrededores. Se procesan estaciones de las que existen datos con acceso público y gratuito o un acuerdo bilateral con el IGN. En caso de existencia de varias redes en un mismo territorio que puedan producir una densidad excesiva para nuestros fines, se da preferencia a la que pertenezca a alguna administración, ya que se supone un mayor compromiso de permanencia en el tiempo.

Son diversas las entidades e instituciones poseedoras de estas redes, casi todas son dependientes de administraciones públicas y algunas de empresas privadas. Muchas de las estaciones adicionalmente están integradas de forma voluntaria a alguna red internacional de estaciones GNSS, como es la red perteneciente a la Sub-comisión para Europa de Marcos de Referencia de la Asociación Internacional de Geodesia (EUREF) llamada red permanente de EUREF (EUREF Permanent Network EPN) , Bruyninx et al. (2009) o la perteneciente al Servicio Internacional GNSS (International GNSS Service, IGS) llamada Red de Seguimiento del IGS (IGS Tracking Network), Dow et al.. (2009).

2.1. Redes GNSS procesadas

A parte de las estaciones pertenecientes a redes internacionales (EPN, IGS), el resto de estaciones procesadas pertenecen a las siguientes instituciones:

- Red Nacional de Estaciones Permanentes (Rede Nacional de Estações Permanentes, RENEPE) del Instituto Geográfico Portugués (IGP).
- Red GNSS Permanente (Réseau GNSS Permanent, RGP) del Institut National de L'Information Géographique et Forestière (IGN) de Francia.
- Red de Estaciones de Referencia GNSS del IGN (ERGNSS) , Quirós et al. (2004)
- Red Geodésica Activa en Tiempo Real (ERVA) del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV).
- Red de Estaciones de Referencia GPS (CATNET) del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).
- Red de Estaciones Permanentes GNSS de Galicia (GALNET) de Cartogalicia S.L.
- Red de Estaciones GNSS de Castilla y León del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL).
- Red de Estaciones de Referencia (MERISTEMUM) de la Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia.
- Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) del Instituto de Cartografía y Estadística de Andalucía.
- Red de Estaciones Base GPS de la Comunidad de Madrid (REBCM).
- Red Geodésica Activa (REGAM) de la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia.
- Red Geodésica Activa de Navarra (RGAN) de la Comunidad Foral de Navarra.
- Red de Estaciones de Referencia GNSS del Euskadi (RGE) del Gobierno Vasco, Diputaciones Forales y Universidad del País Vasco.
- Red de Estaciones Permanentes GNSS de La Rioja.
- Red Extremeña de Posicionamiento GNSS (REP) de la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura.
- Red de Estaciones Permanentes de Canarias (REPC) de Cartográfica de Canarias, S. A. (GRAFCAN).
- Red GNSS Activa (RGAC) de la Universidad de Cantabria.
- Red GNSS Activa (RGAPA) del Principado de Asturias.

- Red Geodésica Activa de las Islas Baleares de SITIBSA.

En la Tabla 1 se muestran las entidades con estaciones permanentes procesadas en este proyecto. Las estaciones pertenecientes a una red internacional (EUREF, IGS) no se contabilizan en la red de ámbito geográfico inferior ya sea en la tabla o en el artículo en general.

Tabla 1 – Redes procesadas en IBERRED (IBERRED processed networks)

Red GNSS	Ámbito Geográfico	Nº de Estaciones
Redes Internacionales		
IGS	Mundial	27
EPN (EUREF)	Europa	54
Redes Nacionales		
ERGNSS (IGN)	España	19
RENEP (IGP)	Portugal	33
RGP (IGN)	Francia	14
Redes Regionales		
ERVA	Comunidad Valenciana	7
CATNET	Cataluña	9
GALNET	Galicia	17
GRAFCAN	Islas Canarias	17
ITACYL	Castilla y León	33
MERISTEMUM	Región de Murcia	7
RAP	Andalucía	22
REGAM	Región de Murcia	9
REGAPA	Asturias	8
REBCM	Comunidad de Madrid	6
Red de La Rioja	La Rioja	5
REP	Extremadura	12
RGAC	Cantabria	5
RGAN	Navarra	14
RGE	País Vasco	11
SITIBSA	Islas Baleares	8
Otras	Europeas	3
Total		340

2.2. Distribución geográfica de estaciones

En la Figura 1 se muestran el mapa de estaciones procesadas totales. Como se observa, se pretende el cálculo de las estaciones existentes en la Península Ibérica y alrededores, en especial la zona denominada Macaronesia.

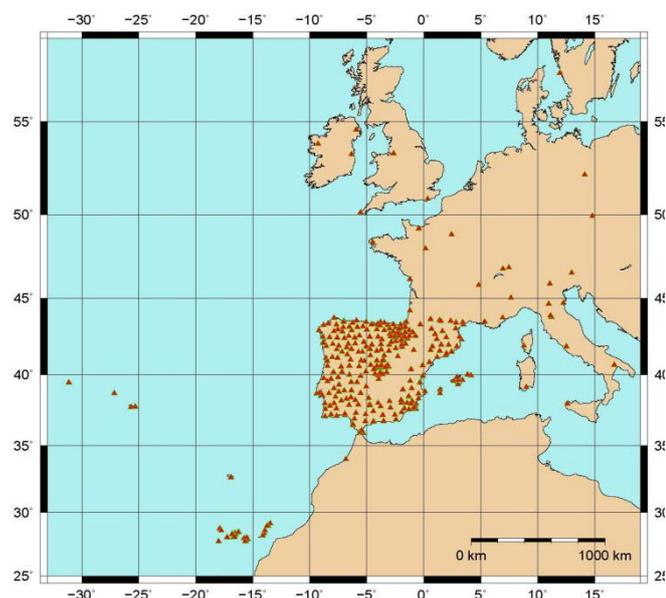


Figura 1 - Estaciones Procesadas en IBERRED (IBERRED processed stations.)

Y en la Figura 2 las estaciones procesadas, con detalle en la Península Ibérica, que es la zona principal de estudio. Se puede observar como las regiones con menos estaciones son Aragón y Castilla la Mancha. En el caso de Aragón ya existe una red y existen conversaciones para la captación automática de los datos. En el caso de Castilla la Mancha no existe aún una red de ámbito regional.

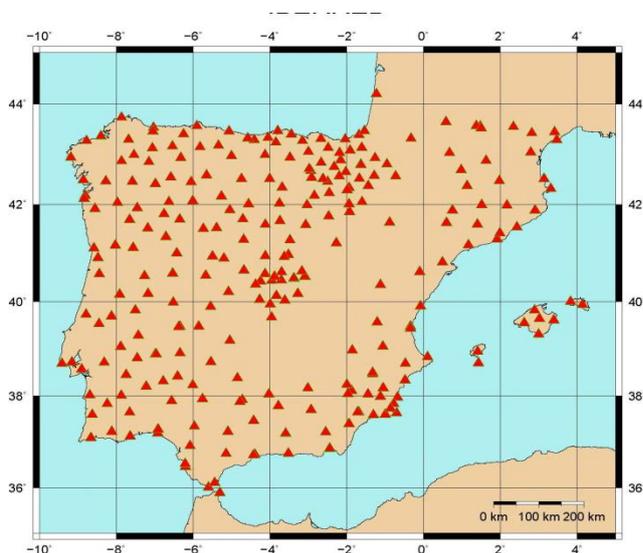


Figura 2 - Estaciones Procesadas en IBERRED en la Península Ibérica y Baleares (IBERRED processed station in Iberian pPeninsula and Balearic Islands.)

Los datos en formato RINEX son en algunos casos captados de servidores públicos de las distintas redes y en otros son directamente enviados a un servidor del IGN. Una vez que es chequeada la calidad de estos datos con el programa de Traducción, Edición, Corte/pega y Chequeo de Calidad (Tranlation, Editing, Cut/Splice and Quality Check, TEQC) Estey et al. (1999), éstos quedan preparados en el servidor de datos para su cálculo.

3. PROCESAMIENTO

Se Las características generales del procesamiento, que tiene como fin la obtención de las coordenadas diarias de cada una de las estaciones, son las que siguen: el procesamiento se basa en la metodología general de resolución de ecuaciones de dobles diferencias de fase, Leick (1995), el sistema procesado es solamente el GPS hasta el momento y los productos de partida necesarios para el cálculo, en relación con efemérides o relojes de los satélites son productos precisos IGS, Dow et al. (2009)]. El programa de cálculo utilizado es Bernese en su versión 5.0 del Instituto de Astronomía de la Universidad de Berna (Astronomischen Instituts der Universität Bern, AIUB), Dach et al. (2007).

3.1. Cadencia de los procesamientos

La cadencia temporal de realización de los cálculos depende de si es el procesamiento rutinario o los procesamientos ocasionales. De forma habitual y totalmente automática se realiza el procesamiento rutinario una vez por semana donde se calculan las coordenadas de las estaciones de los siete días de una semana. Ese cálculo se realiza con una demora respecto a las observaciones de unos 15 días. Esta dilación viene motivada por el propio retraso de los productos precisos del IGS. En cuanto a los procesamientos ocasionales, estos tienen diversos motivos. Por un lado la existencia de fallos en el automatismo de los cálculos o la aparición de nuevas observaciones que no estaban disponibles en el procesamiento rutinario, pero sobre todo y más importantes son los procesamientos ocasionales o reprocesamientos que viene motivados por la

existencia de nuevos productos IGS con mejores cualidades o la existencia de nuevos modelos que supongan un aumento en la precisión de las coordenadas finales.

3.2. Reprocesamientos

El reprocesamiento más reseñable realizado hasta el momento es el producido con la aparición de productos del IGS reprocesados, que nos permitirán usar un mismo Marco de Referencia Terrestre Internacional (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), en concreto en el marco de referencia terrestre IGS05, Gendt et al. (2010), estrechamente relacionado con ITRF2005. La existencia de estos nuevos productos, efemérides y relojes de satélites, permitió reprocesar todos los datos existentes hasta ese momento, desde el año 1996. Hasta entonces los cálculos se habían realizado en el mismo marco de referencia en que se iban publicando los productos del IGS, estos fueron ITRF94, ITRF96, ITRF97 e ITRF00. Cada cambio de marco supone en la práctica un salto en las series de coordenadas que puede llegar a ser de algunos centímetros. Al reprocesar se consiguió entonces unificar todos los cálculos en un mismo marco de referencia, lo que posibilita un análisis de las series de coordenadas más eficaz.

Además y paralelamente a este cambio, se consiguió unificar los modelos de calibración del centro de fase de las antenas a modelos absolutos, cuando antaño se empezó con relativos. Por otra parte, la forma de modelar la troposfera se unificó y el modelo de cargas oceánicas pasó de GOT99.2 a FES2004, Valdés et al. (2008)]. Todas estas circunstancias dieron lugar a un conjunto de coordenadas con un cálculo homogéneo. En abril del 2011 un nuevo marco de referencia se empezó a utilizar en los productos IGS, el IGS08, estrechamente relacionado a ITRF08, Altamimi et al. (2011), con lo que a partir de entonces conviven coordenadas en IGS05, Ferland et al. (2009) con coordenadas en IGS08 en nuestras series; a la espera de la publicación de productos IGS reprocesados en IGS08 para volver a reprocesar y unificar en IGS08.

3.3. Agrupación (clustering)

En el modelo de dobles diferencias, el aumento del número de estaciones procesadas aumenta el tiempo de cálculo de forma exponencial, pudiendo llegar a hacer inviable el tratamiento de las grandes matrices que se forman, en el momento del cálculo de los parámetros, en una computadora normal. Dado el alto número de estaciones procesadas, hasta 340, y la metodología de dobles diferencias utilizadas, la única opción de cálculo en este caso es la agrupación de estaciones en pequeñas subredes, con estaciones en común, que si sean tratables por la computadora. En este caso, los grupos se crean automáticamente para cada día por criterios de mínima distancia y siempre con menos de 20 estaciones por subred. Posteriormente, se agrupan las ecuaciones normales del ajuste de las subredes, Datch et al. (2007), obteniendo de esta forma un resultado similar a la no agrupación.

3.4. Características principales de procesamiento

En la Tabla 2 se detallan las opciones del cálculo utilizadas en el procesamiento. En esta tabla, por un lado se tratan los modelos utilizados y por otro lado los parámetros estimados en el ajuste.

Tabla 2 – Característica principales del procesamiento (Main processing features)

Aspecto	Característica
Modelos de medida	
Preprocesamiento	Reprocesamiento de fase base a base usando triples diferencias. En la mayor parte de los casos, los saltos de ciclo son fijados mediante la búsqueda simultánea en diferentes combinaciones lineales de L1 y L2. Si un salto de ciclo no puede fijarse, las observaciones afectadas son eliminadas y se establece una nueva ambigüedad de ciclo inicial.
Observable básico	Portadora de fase. El código se usa sólo para calcular los estados de los relojes de los receptores.
Máscara de	3° con ponderación dependiente de la elevación por

elevación	$\cos^2(z)$.
Intervalo de datos	Para resolución de ambigüedades 30 segundos. Para procesamiento final 180 segundos.
Observable modelado	Dobles diferencias, con la combinación de libre ionosfera.
Calibraciones del centro de fase de la antenas terrestres	Correcciones absolutas del centro de fase basadas en modelo IGS08, se considera la calibración individual si ésta existe.
Calibraciones del centro de fase de la antenas de los satélites	- Absolutas del centro de fase basadas en el modelo IGS08.
Troposfera	Modelo a priori es Dry-Niell con estimaciones a intervalos horarios para cada estación usando la función de modelado Wet-Niell sin sigmas a priori. Los gradientes horizontales son estimados cada día y estación, en modo <i>tilting</i> , sin constreñimientos a priori. Estimación horaria para cada estación de los ZPD's, se generan los ficheros troposféricos.
Ionosfera	Se calcula un modelo regional. Sólo se usa en la resolución de ambigüedades. No es modelada en la solución final ya que se elimina formando la combinación libre ionosfera de L1 y L2.
Parámetros estimados (Valores a priori y sigmas)	
Ajuste	Algoritmos mínimos cuadrados ponderados.
Criterios de rechazo de observaciones	Los RINEX con menos del 10% de posibles observaciones son eliminados. Los Residuos de observaciones mayores de 2.5mm son eliminados. Las baselines donde se exceden los 5mm de sigma son excluidas.
Definición del Datum	Las estaciones del IGS con coordenadas y velocidades publicadas en IGS08: BRST, CAGL, CAGZ, GMAS, HERS, HERT, LROC, MAS1, MATE, ONSA, PDEL, RABT, SCOR, SFER, TLSE, VILL, YEBE, ZIMM son usadas con condición de mínimo constreñimiento de translación.
Troposfera	Constreñimientos absolutos y relativos: 5.0m Cálculo de ficheros troposféricos con coordenadas de solución semanal.
Ionosfera	Uso de modelo regional ionosférico precalculado para resolución de ambigüedades con QIF.
Resolución de ambigüedades	Usando la estrategia quasi-ionosphere-free (QIF) con información regional de TEC a 10°
Estado de relojes	Relojes de satélite: las derivas se eliminan formando las dobles diferencias. Relojes receptor: derivas estimadas durante el preproceso usando las medidas de código.
Orbitas y ERP	Parámetros de rotación del polo y órbitas finales precisas del IGS.
Efemérides Planetarias	Modelo DE200.
Mareas	Según estándares IERS 1996/2000
Cargas Oceánicas	Modelo FES2004
Carga atmosférica	No se tiene en cuenta

4. RESULTADOS

Una vez realizados todos los cálculos y comprobado que existe una buena repetibilidad entre los datos de los días de cada semana se obtienen los resultados finales para cada día. Estos son, por un lado los ficheros en el Formato de Intercambio Independiente de Soluciones (Solution Independent Exchange Format, SINEX) , Rotacher et al. (2006)], donde se definen las coordenadas finales así como sus precisiones además de los parámetros principales del ajuste estadístico del que provienen. Por otro lado las soluciones troposféricas en forma del Retraso Total en el Zenit (Zenith Total Delay, ZTD) para cada hora. Estos últimos datos son apropiados

para estudios de comportamiento de la atmósfera en Meteorología, Romero et al. (2009). Pero estos resultados meteorológicos tienen una antigüedad de 15 días cuando son obtenidos y pierden parte de su utilidad por su demora.

Para cálculos en tiempo casi-real existe otro proyecto en el que participa el IGN a nivel europeo, el proyecto de determinación de vapor de agua con GNSS de EIG EUMETNET (EUMETNET EIG GNSS Water Vapour Programme, E-GVAP), Vedel (2005). Las coordenadas más actuales de IBERRED son utilizadas como dato de partida en este proyecto.

4.1. Series Temporales de Coordenadas

Las coordenadas diarias obtenidas residen en los ficheros SINEX de cada día y se encuentran en el marco de referencia terrestre en el que fueron calculadas, que depende del marco de referencia de las órbitas y de las coordenadas de las estaciones que definen el datum. En el proyecto IBERRED los datos desde el año 1996 hasta abril de 2011 se encuentran en IGS05 y los datos posteriores en IGS08 expresadas todos ellos en coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas (X, Y, Z).

Agrupando en tablas por estación estas coordenadas para cada día, tendremos las series temporales de coordenadas cartesianas diarias expresadas en el marco de referencia terrestre. Así se construyen las series numéricas en ficheros independientes para cada estación y también su representación gráfica. En la siguiente Figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de serie para la estación de YEBE en la provincia de Guadalajara. Con el ejemplo de esta estación en particular se pretende mostrar las diferencias básicas de los diversos tipos de series.

En la Figura 3 se observa más dispersión en las coordenadas X y Z. Esto se explica ya dada la posición geográfica de la estación y la mayor indeterminación GNSS en el cálculo de la altura. Esta indeterminación de la altura se proyecta en las coordenadas X y la Z cartesianas geocéntricas.

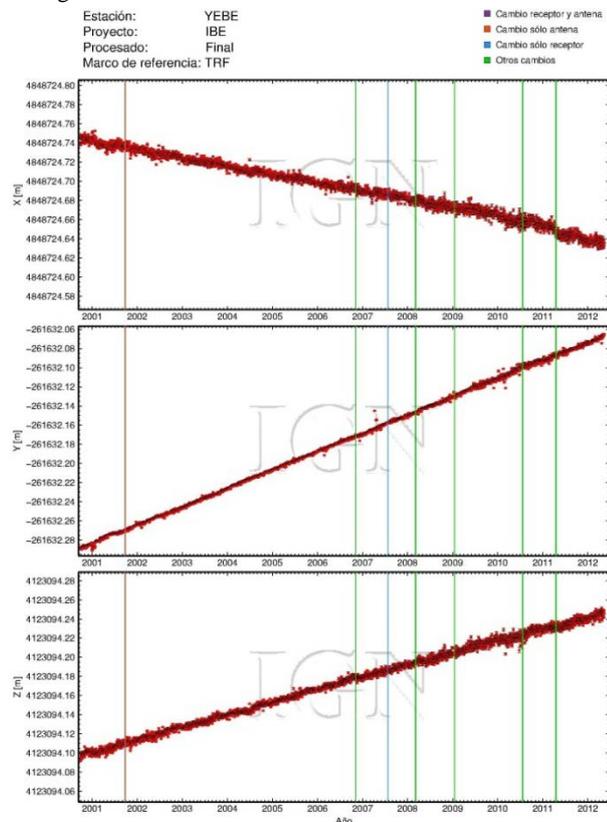


Figura 3 - Serie Temporal de la estación YEBE (Yebes, Guadalajara) en coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas con barras de error en el marco de referencia terrestre internacional (IGS05-IGS08). Time serie of YEBE station (Yebes, Guadalajara) in geocentric three dimensional Cartesian coordinates with error bars in International Terrestrial Reference Frame IGS05-08.)

Las series, expresadas así, no son de gran utilidad práctica para detectar movimientos sobre la superficie terrestre, como las expresadas en coordenadas locales topocéntricas (Norte, Este, Elevación). Para ello se realiza la oportuna transformación, que consiste en la rotación y traslación hacia el sistema topocéntrico local con referencia en las coordenadas geográficas de las coordenadas medias de cada estación. Habremos creado, en esta ocasión, las series temporales topocéntricas locales diarias de cada estación, como vemos en la Figura 4.

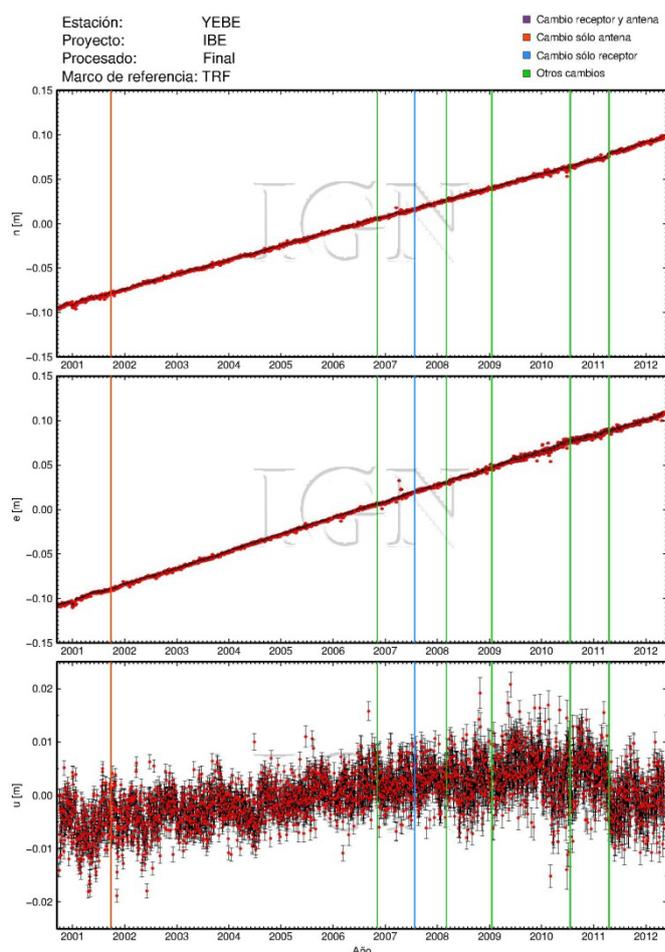


Figura 4 - Serie Temporal de la estación YEBE (Yebes, Guadalajara) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre internacional (IGS05-IGS08). (Time serie of YEBE station (Yebes, Guadalajara) in local topocentric coordinates with error bars in International Terrestrial Reference Frame IGS05-08.)

Se puede apreciar como en esta serie, la mayor dispersión afecta a la altura. El desplazamiento en las coordenadas Norte y Este corresponde en su inmensa mayoría al propio movimiento geodinámico dentro de un marco terrestre de referencia dado. Este tipo de series son más útiles de interpretar para la mayoría de aplicaciones.

Una de las formas de eliminar el desplazamiento superficial de los puntos debidos en gran medida al movimiento de placas tectónicas, es expresar las coordenadas en otro marco de referencia que en vez de ser de ámbito internacional sea de ámbito regional. En nuestro caso disponemos de un sistema de este tipo, el Sistema Terrestre de Referencia Europeo (European Terrestrial Reference System, ETRS89), que además de ser oficial en la España y Portugal continentales, cumple la condición de ser fijo a la parte estable de la placa euroasiática, Altamimi (2011), condición que se cumple en la mayor parte de la Península. En la práctica, la transformación consiste en la aplicación a las coordenadas cartesianas geocéntricas, expresadas en los marcos de referencia terrestre, las expresiones

recomendadas por EUREF, Boucher et al. (2011) con el resultado de obtener coordenadas en la realización de ETRS89 llamada ETRF2000, por un lado desde IGS05 lo que se anota como ETRF2000(R05) o desde el IGS08 lo que se nombra como ETRF2000(R08). Estas coordenadas en ETRF2000 se pueden expresar tanto en coordenadas cartesianas geocéntricas (X, Y, Z) como en coordenadas topocéntricas locales (Norte, Este, Elevación) de la misma forma que ocurría en el caso anterior. En la Figura 5 se muestra la serie en coordenadas topocéntricas locales para la misma estación que antes, YEBE.

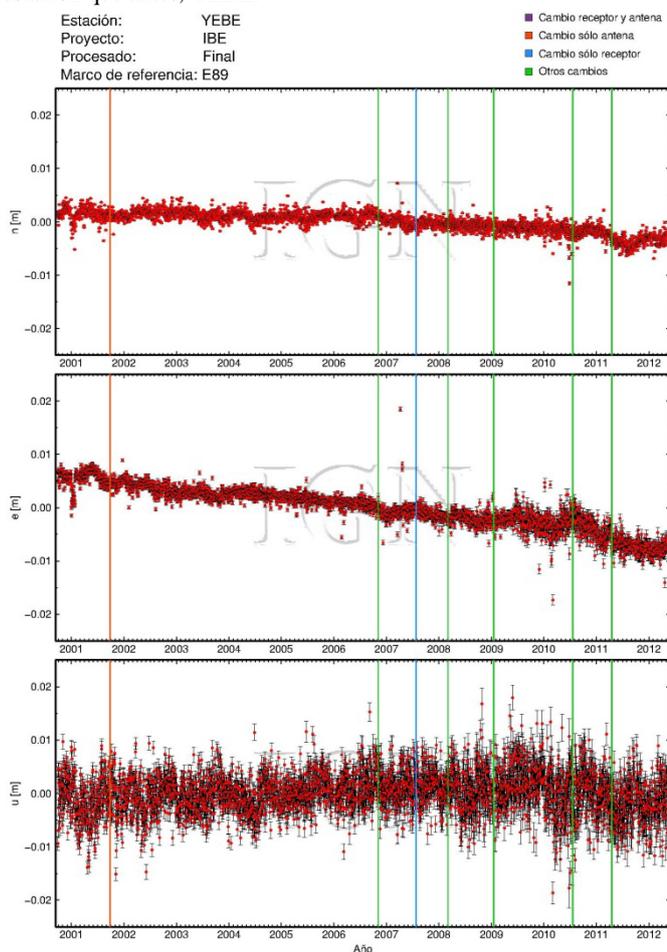


Figura 5 - Serie Temporal de la estación YEBE (Yebes, Guadalajara) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000). (Time serie of YEBE station (Yebes, Guadalajara) in local topocentric coordinates with error bars in European Terrestrial Reference Frame (ETRF2000).)

Se observa en la Figura 5 que prácticamente ha desaparecido el movimiento superficial de la estación aunque queda un ligero movimiento remanente que se puede explicar de forma general como un movimiento estrictamente local o que la localización del punto no cumple rigurosamente la pertenencia a la parte más estable de la placa euroasiática.

4.2. Cálculo de velocidades.

Al pretender utilizar estas series tal como están en el estudio de desplazamientos de los puntos en un periodo medio o largo, nos encontramos con que las series calculadas hasta este momento son series 'brutas'. Aún no se han estudiado los intervalos de datos que por una u otra cuestión sean erróneos y por lo tanto suprimibles o las coordenadas que por una u otra razón están fuera de tendencia (outliers), o incluso los saltos en las series que aparecen por diversas causas, la más frecuente un cambio de instrumental. En definitiva, a través del estudio de las series se encuentran estas anomalías que son debidamente anotadas y utilizadas para convertir las series en series

limpias de anomalías. En estas series 'limpias' ya si podemos estudiar los desplazamientos de los puntos.

Una estrategia para encontrar anomalías de este tipo es el estudio de sus velocidades, que una vez vistas en el conjunto regional nos avisarán a simple vista de tendencias que no corresponden a lo esperable, de tal forma que iterativamente se refinarán, tanto las series, como las velocidades. Actualmente se está centrando el trabajo en la mejora de esta fase del proyecto.

Para el cálculo de estas velocidades se ha usado el programa de análisis de series temporales de coordenadas GNSS CATS, Williams (2008), que permite el cálculo de velocidades y el manejo de saltos en las series.

Una vez limpiadas las series y seleccionadas aquellas con más de dos años y medio de datos, que es considerado el mínimo número de años para obtener unas velocidades fiables, Belewitt et al. (2002), se calculan las velocidades tanto horizontales, a partir de las componentes Norte y Este, como verticales.

En las Figuras 6 y 7 se observan los vectores velocidad en el marco ETRF2000. Nos centramos en el área ibérica para observar mejor las características de las velocidades.

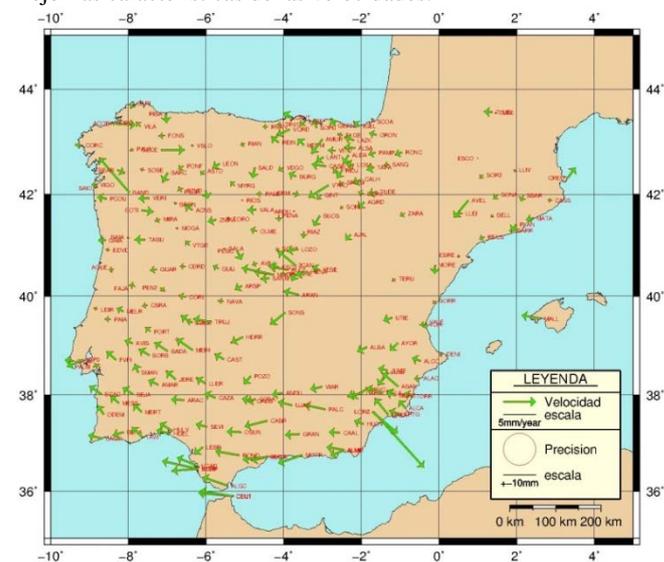


Figura 6 - Mapa de velocidades horizontales en ETRF2000 de estaciones en área de la Península Ibérica. (Horizontal velocity map in ETRF2000 for stations in Iberian Peninsula)

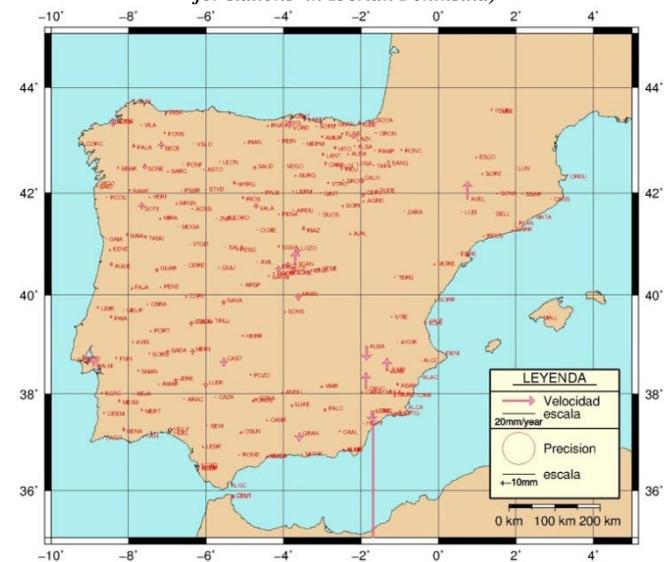


Figura 7 - Mapa de velocidades vertical en ETRF2000 de estaciones en área de la Península Ibérica. (Vertical velocity map in ETRF2000 for stations in Iberian Peninsula)

Se concluye en cuanto a las velocidades horizontales, que en líneas generales el comportamiento respecto a la realización ETRF2000 de ETRS89 en la península ibérica no es homogéneo aumentando el tamaño de los vectores de Norte a Sur con un aparente giro en el sentido retrógrado. Lo que nos da una idea del comportamiento geodinámico de la península. También en líneas generales no aparece ningún hundimiento ni levantamiento generalizado.

Además, en un sentido más particular se observan estaciones con comportamientos fuera de la tónica general, como ACOR (A Coruña), AVEL (Lleida), BAND (Ourense), LORC y LORC2 (Murcia), etc., a veces sólo en la velocidad horizontal o vertical y otras en ambas. Para estudiar con detalle el comportamiento concreto de una estación es preciso analizar en detalle su serie temporal, como haremos con algunos ejemplos a continuación.

4.3. Casos Particulares

Algunas estaciones presentan resultados concretos que es interesante analizar en detalle. Son muchas las estaciones que a través del estudio de sus series permiten estudiar diversos fenómenos. El caso de la estación permanente instalada en El Hierro, llamada FRON, es muy ilustrativo ya que la observación de una elevación en la estación, junto a otros datos volcanológicos permitió estudiar la fase pre-eruptiva de la erupción que comenzó en octubre de 2011. Son numerosos los casos y fenómenos observados, ya sean de deformación o por causas puramente instrumentales. Dada la imposibilidad de comentar todos los casos, se han escogido tres de ellos, que demuestran el poder de detección de fenómenos del análisis de las series de coordenadas.

4.3.1. LORC (Lorca, Murcia): En Lorca se han observado dos fenómenos que se ilustran en la Figura 8. Por un lado un pequeño salto en las series motivado por el terremoto de mayo de 2011, que se observa sobre todo en la componente Norte y que llega a ser de algún centímetro.

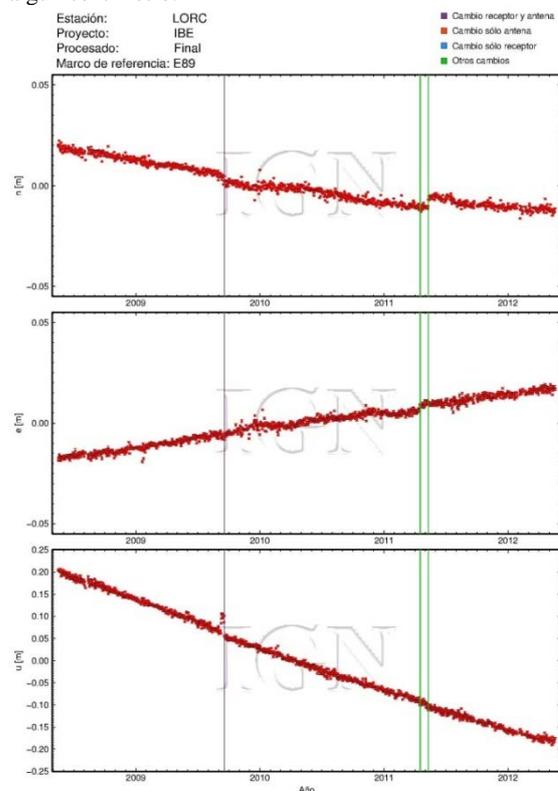


Figura 8 - Serie Temporal de la estación LORC (Lorca, Murcia) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000). (Time serie of LORC station (Lorca, Murcia) in local topocentric coordinates with error bars in European Terrestrial Reference Frame (ETRF2000).)

Por otro lado, se observa un hundimiento de la estación de alrededor de 9 cm anuales y que concuerda con resultados obtenidos con Radar Interferométrico de Apertura Sintética (Interferometric synthetic aperture radar, InSAR) González et al. (2011) que apuntan a un posible origen hidrológico.

4.3.2. ACOR (A Coruña, Galicia): En este caso también se observan dos fenómenos ilustrados en la Figura 9. Por un lado un hundimiento progresivo desde mediados de 2002 hasta mediados del 2003. El motivo que lo originó fue instrumental, la degradación progresiva del amplificador de la antena hizo que la cantidad y calidad de los satélites seguidos fuera cada vez peor.

Por otro lado, se observa un hundimiento constante y progresivo junto con un desplazamiento al Este que ocurre en toda la serie registrada. Se ha comprobado con mediciones de nivelación de alta precisión que el edificio que contiene la estación, el mareógrafo de A Coruña y situado en el extremo de un muelle, se está inclinando hacia el Este ligeramente.

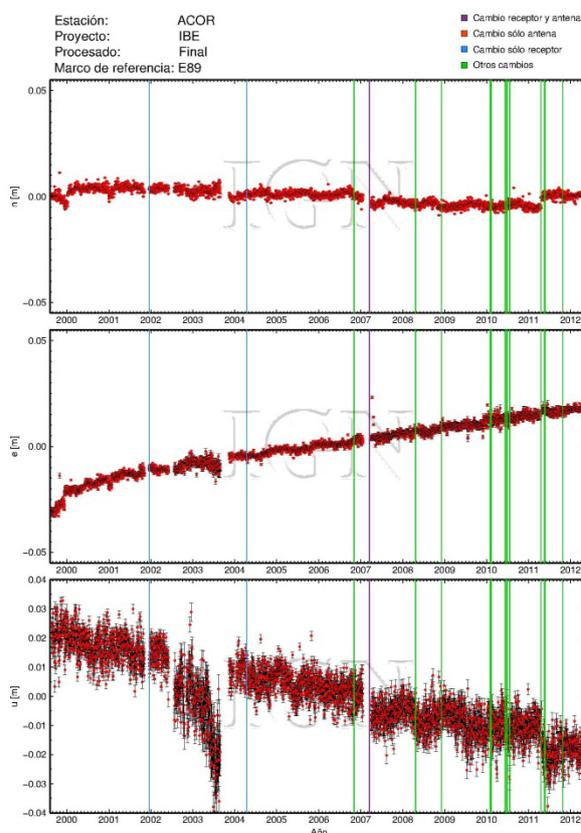


Figura 9 - Serie Temporal de la estación ACOR (A Coruña) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000). (Time serie of ACOR station (A Coruña) in local topocentric coordinates with error bars in European Terrestrial Reference Frame (ETRF2000).)

4.3.3. 3CAN (Tres Cantos, Madrid): En este caso lo que nos muestra la Figura 10, sobre todo en la componente vertical, es una oscilación con un periodo de algo más de un año y con una amplitud de hasta 4 cm. El origen de este fenómeno es más complejo, si elimináramos un origen en la tipología de la monumentación, podríamos pensar en un posible origen hidrológico dada su estacionalidad. Pero estas no son aun más que conjeturas a la espera de estudios adicionales.

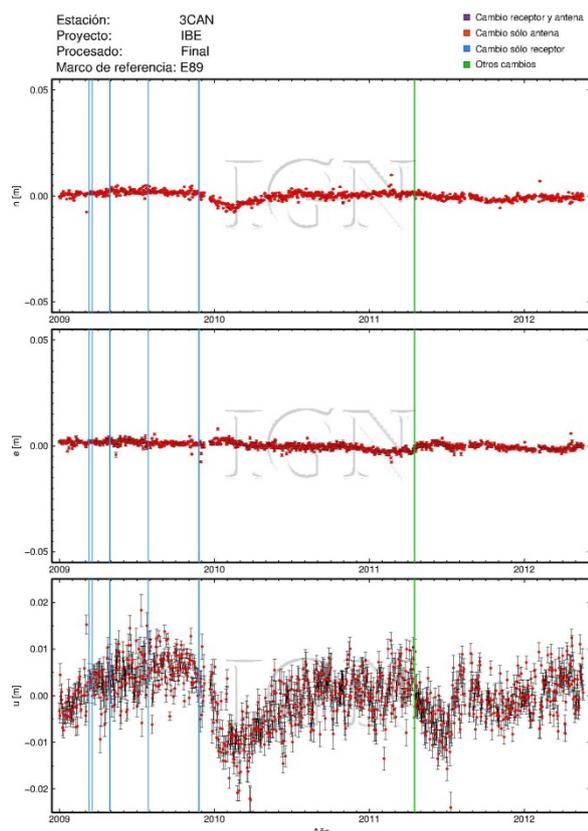


Figura 10 - Serie Temporal de la estación 3CAN (Tres Cantos, Madrid) en coordenadas topocéntricas locales con barras de error en el marco de referencia terrestre europeo (ETRF2000). (Time serie of 3CAN station (Tres Cantos, Madrid) in local topocentric coordinates with error bars in European Terrestrial Reference Frame (ETRF2000).)

5. CONCLUSIONES

El proyecto IBERRED detecta movimientos en la superficie terrestre con una precisión y distribución hasta hace pocos años difíciles de imaginar. Se demuestra que, dado el seguimiento constante que realiza, es la más adecuada de las herramientas posibles para cualquier estudio sobre los sistemas y marcos de referencia que utilizamos. Han sido varios los gestores de redes GNSS regionales que han pedido unas coordenadas adecuadas para sus estaciones al IGN. El proyecto IBERRED ha sido el productor de esas coordenadas demostrando su utilidad práctica, ya que esas coordenadas son básicas cuando utilizamos las redes de correcciones en tiempo real. Las coordenadas calculadas, precisas y actualizadas, son el punto de partida para otros proyectos meteorológicos, como E-GVAP. IBERRED se comporta como un sensor de los movimientos de nuestro territorio, sus series nos muestran una gran variedad de fenómenos, ya sean instrumentales o físicos, como deformaciones de origen tectónico, volcánico o hidrológico.

Pero este proyecto dejaría de tener sentido si no continua actualizándose y mejorando. En primer lugar, en cuanto a las redes procesadas, que deberá tender a la completitud. La comunicación con los gestores de las distintas redes debería ser más activa y comprometida por ambas partes. Pero técnicamente también se deberá mejorar la forma de estudio de las series, con análisis espectrales y análisis de ruido. Se debe normalizar la forma en que se describen las anomalías de las series: saltos, ventanas de datos erróneos, puntos fuera de tendencia, que permitan su

aprovechamiento en los reprocesamientos. En breve se espera la publicación de productos reprocesados IGS, en IGS08, lo que implicará un nuevo reprocesamiento. El cálculo debe aprovechar las observaciones GLONASS y Galileo en un futuro cercano. Los resultados en las Islas Canarias han permitido detectar no sólo deformaciones puntuales, sino también permitirán estudios geodinámicos del área a más largo plazo. Muchas de las estaciones son de reciente instalación y es pronto para obtener conclusiones del archipiélago.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no sería posible sin el trabajo de tantas personas y la implicación de todas aquellas instituciones, Comunidades Autónomas y empresas que han hecho posible la existencia de cada una de las estaciones permanentes GNSS procesadas, que además en su gran mayoría son de disposición pública y gratuita. Nuestro agradecimiento por el gran valor que tiene su trabajo para la Geodesia.

6. REFERENCIAS

- Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier (2011): "ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame". *Journal of Geodesy* 2011, vol. 85 pp. 1332-1394, Springer Science + Business Media, 0949-7714 electronic: 1432-1394.
- Altamimi, Z. (2011): "European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)", <http://etrs89.ensg.ign.fr/>.
- Blewitt, G., D. Lavalée (2002): "Effect of annual signals on geodetic velocity", *Journ. Geophys. Res.*, Vol. 107(B7), 10.1029/2001JB000570, 2002.
- Boucher, C., Z. Altamimi (2011): "Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign", <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>
- Bruyninx, C., J. Legrand, F. Roosbeek (2009): "EPN Status and Network Management" Florence, Italy, May 27-30 2009, EUREF Publication, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (En prensa)
- Datch, R., P.F., Hugentobler, M. Meindl (2007): "User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0" (2007)
- Dow, J.M., R. E. Neilan, C. Rizos (2009): "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems", *Journal of Geodesy* (2009) vol. 83, pp 191-198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Estey, L. H., C. M. Meertens (1999): "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data", *GPS Solutions* (pub. by John Wiley & Sons), Vol. 3, No. 1, pp. 42-49, doi:10.1007/PL00012778, 1999.
- Ferland, R., M. Piraszewski (2009): "The IGS-combined station coordinates, earth rotation parameters and apparent geocenter", *Journal of Geodesy* 2009, vol. 83 p. 385, Springer Science + Business Media, 0949-7714 electronic: 1432-1394.
- Gendt G., J. Griffiths, Th. Nischan, J. Ray (2010): "IGS reprocessing -- Summary of orbit/clock combination & first quality assessment (2010)" presentation at IGS 2010 Workshop, Newcastle upon Tyne, UK, 30 June 2010.
- González, P.J., J. Fernández (2011): "Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry" *Geology*, Junio 2011, vol. 39, pp. 551-554, first published on May 4, 2011, doi:10.1130/G31900.1.
- Gurtner, W., L. Estey (2005): "RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11". <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex211.txt>.
- Quirós, R., M. Valdés, L. Lozano, M.A. Cano, J.A.S. Sobrino (2004): "Análisis de series de estaciones GPS permanentes ibéricas en el IGN" 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Figueira da Foz (Portugal), 3-7 febrero 2004.
- Quirós, R., J.A.S. Sobrino, M.A. Cano, M. Valdés (2004): "National Report of Spain: Spanish national GPS Reference Stations Network (ERGPS)". *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*. Band 33, EUREF Publication No.13. Frankfurt am Main 2004. ISBN 3-89888-885-1 pp 283.
- Leick, A. (1995): "GPS Satellite Surveying" (1995), Wiley, ISBN 0-471-30626-6.
- Romero, P.M., E. Cuevas, R. Ramos, M. Valdés, M. Schneider (2009): "Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e Intercomparación de diferentes Técnicas de Medida" de la Serie de Notas Técnicas digitales del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña de la AEMET Nota Técnica digital Nº 1, Abril 2009.
- Rothacher, M., D. Thaller (2006): "IERS Message nº 103". <http://www.iers.org>.
- Valdés M., L. García-Cañada, M.A. Cano (2008): "Estado actual de procesamiento en el Centro de Análisis Local de EUREF (IGE)" 6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar (Portugal), Febrero de 2008.
- Vedel, H. (2005): "E-GVAP, Meteorology and Geodesy Sinergy" Presentation of E-GVAP at EUREF Symposium Vienna, Junio 2005.
- Williams, S.D.P. (2008): "CATS : GPS coordinate time series analysis software" *GPS Solutions*, Vol. 12, Nº 2, Marzo 2008, pp. 147-153.

Análisis armónico de las observaciones mareográficas en el Puerto de Pasaia

Harmonic analysis of the tide gauge observations in Pasaia Harbour

M. Benavent⁽¹⁾, J. Zurutuza⁽²⁾, E. Vélez⁽³⁾ and M. J. Sevilla⁽¹⁾

⁽¹⁾ Fac. CC. Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, Spain, maite_benavent@mat.ucm.es, miguel_sevilla@mat.ucm.es

⁽²⁾ Departamento de Geodesia de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, Spain, jzurutuza@gmail.com

⁽³⁾ Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Madrid, Spain, eivelez@mat.ucm.es

SUMMARY

The main goal of this work is to study and compare the results obtained from the harmonic analysis of tide gauge records in the Pasaia harbour (Gipuzkoa, Spain). In February 2007, the University Complutense of Madrid and the company GEOLan Donosti S.L., with the financial support of the Provincial Council of Gipuzkoa, installed a depth sensor in the Pasaia harbor. One of the most important objectives of this institutional collaboration is to carry out studies related with local sea level changes. Thus, in this work we study the sea level observations recorded in Pasaia for a period of three years (2009 to 2011). The harmonic analysis of the time series have been carried out using different scientific software (SLPR2, Versatile_TIDANA and VAV) so that, we have compared the results obtained depending on the methodology and processing options used for each program. As a consequence of these studies we have obtained the harmonic constant for the main tidal constituents in Pasaia Harbor.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2007, la Universidad Complutense de Madrid y la empresa GELan Donosti S.L., con el apoyo económico de la Exc. Diputación Foral de Gipuzkoa, instalaron un sensor de profundidad en el puerto de Pasaia (Gipuzkoa, España) con el objetivo de llevar a cabo, entre otras, investigaciones relacionadas con las variaciones locales del nivel del mar (Vélez et al., 2008; Sevilla et al., 2011).

En este trabajo se estudian los registros del mareógrafo durante un periodo de tres años de observación, 2009 a 2011, con el fin de obtener unas constantes armónicas de marea en Pasaia. El análisis armónico de la serie de datos observados se ha llevado a cabo utilizando diverso software científico, incluyendo SLPR2, Versatile_TIDANA y VAV. Estos programas de análisis se fundamentan en diferentes metodologías, así mismo incluyen distintas opciones de procesado. Hemos comparado los resultados obtenidos con los diferentes programas y, basándonos en el estudio de los residuales de marea, proporcionamos unas constantes armónicas de marea en la estación Puerto de Pasaia. El trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: En las Secciones 2 y 3 se describe la situación de la estación mareográfica y la instrumentación instalada en la misma, respectivamente. La serie de datos observados y considerados para el estudio se presenta en la Sección 4. Los programas utilizados para el análisis de dichas observaciones se especifican en la Sección 5, así como se describe brevemente la metodología de cada uno de ellos y las opciones de procesado empleadas en nuestro análisis. Finalmente, en la Sección 6 se presentan los resultados obtenidos.

2. LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN MAREOGRÁFICA

La estación mareográfica se ubica en Pasaia, puerto de la cornisa cantábrica en el norte de España (Fig. 1). Dentro del puerto, la estación se localiza en las proximidades de las dependencias del Centro Tecnológico del Mar y los Alimentos (AZTI), lo que facilita unas buenas condiciones de instalación y de mantenimiento. Cabe destacar que, a escasos metros del mareógrafo se localiza una de las estaciones GPS de la Red Activa de la Diputación Foral de Guipúzcoa, utilizada para la determinación de movimientos verticales del terreno y el estudio de las variaciones locales y absolutas del nivel del mar (Sevilla et al., 2011).



Figura 1 – Situación del mareógrafo en el puerto de Pasaia (coordenadas 43°.32 N, 1°.93 O). Imágenes obtenidas con Google Earth. (Location of the tide gauge in Pasaia harbour (coordinates 43°.32 N, 1°.93 W). Images obtained using Google Earth)

3. INSTRUMENTACIÓN E INSTALACIÓN

La instalación del mareógrafo, un sensor de profundidad Digi quartz (Paroscientific Inc.) modelo 8DP070-GV con electrónica inteligente modelo 735, se caracteriza por un sistema de doble tubo (Fig. 2), uno exterior anclado a la pared del puerto y otro interior en el que se fija el sensor, a una profundidad de 7 m respecto del nivel del muelle. Este diseño garantiza la robustez de la instalación, evitando variaciones de posición en el sensor, además del oleaje externo.

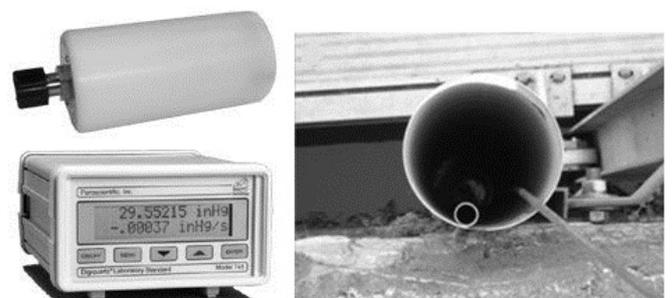


Figura 2 – Instrumentación instalada en la estación: (Izda) Sensor de profundidad Digi quartz (Paroscientific Inc. modelo 8DP015-GV-2) y electrónica inteligente (Paroscientific Inc. modelo 735). (Dcha) Vista de la instalación del mareógrafo en el interior del sistema de doble tubo. (Instrumentation installed in the station: (Left) Digi quartz depth sensor (Paroscientific Inc. model 8DP015-GV-2) and intelligent display (Paroscientific Inc. model 735). (Right) View of the tide gauge installation inside a double tube system)

4. DATOS

La serie de datos considerada en este estudio corresponde a las elevaciones del nivel del mar registradas por el mareógrafo desde el 09/07/2009 hasta el 31/12/2011 con una frecuencia de muestro de 5 minutos (Fig. 3).

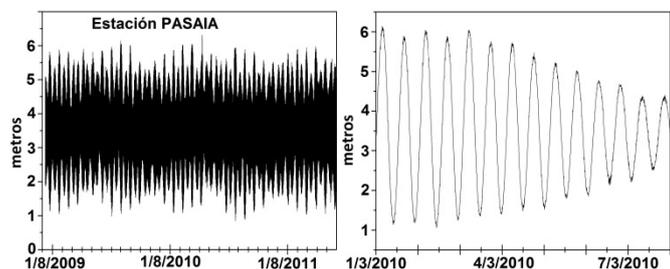


Figura 3 – Observaciones en la estación Pasaia: (Izda) Periodo completo de observación. (Dcha) Detalle sobre ocho días de registro. (Observations in Pasaia station: (Left) Entire observation period. (Right) Zoom over a period of eight day)

El régimen de marea en la región es predominantemente semidiurno, siendo el constituyente principal en esta banda de marea M2. En la Figura 4 se ha representado el espectro de amplitudes de la serie temporal para las bandas de marea semidiurna y diurna, en las que se han señalado los constituyentes armónicos de marea dominantes.

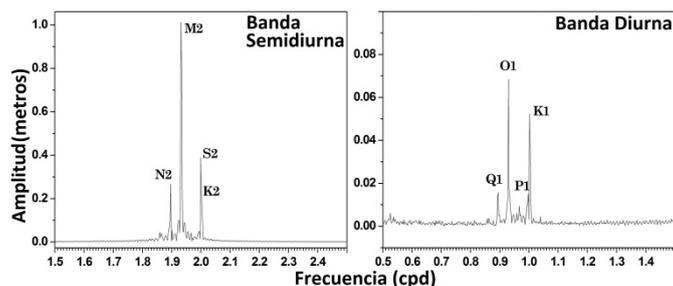


Figura 4 – Espectro de amplitudes de la serie temporal sobre las bandas de marea de 2 ciclos por día (izda) y 1 ciclo por día (dcha). (Amplitude spectrum of the time series over the tidal bands of 2 cycles per day (left) and 1 cycle per day (right))

5. ANÁLISIS ARMÓNICO DE LAS OBSERVACIONES

El análisis armónico de las observaciones se ha llevado a cabo utilizando tres programas, basados en diferentes metodologías de análisis y que incluyen, además, diferentes opciones para el procesado de las observaciones. En esta Sección se describen brevemente la metodología de análisis de cada programa y las opciones de procesado utilizadas en cada caso en este estudio. En la Sección siguiente se presentarán y compararán los resultados obtenidos con cada programa.

5.1 Con el Software Versatile_TIDANA

El Software Versatile harmonic TIDal ANALysis (Foreman et al., 2009) se caracteriza por:

a) Admitir datos con frecuencia de muestro aleatoria e interrupciones. Además, evita la restricción temporal máxima de un año de la metodología clásica (Foreman, 1977) e implementada en el software SLPR2 (University of Hawaii Sea Level Center).

b) Incorporar directamente en el ajuste mínimo cuadrático correcciones nodales e inferencia a diferencia de SLPR2 que las introduce como correcciones a posteriori.

c) Resolver el sistema matricial mediante la Descomposición de Valor Singular (SVD) y proporcionar matrices covarianza y coeficientes de correlación, que son de utilidad en la elección de constituyentes armónicos incorporados en el análisis.

Entre las opciones seleccionadas para el análisis de las observaciones registradas en la estación Puerto de Pasaia con el software Versatile_TIDANA destaca:

- La inclusión de 38 ondas de marea diurnas y semidiurnas en el análisis, más un total de 26 constituyentes de aguas someras (estos últimos resultados no se presentan en este trabajo por encontrarse fuera de los objetivos del mismo).

Cabe destacar que las opciones de análisis han sido seleccionadas una vez realizados diversos estudios comparativos con este mismo programa. Estos estudios incluyen:

- La selección del conjunto de constituyentes armónicos incluidos en el análisis.
- El estudio de los residuales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.
- El estudio comparativo con el método clásico de análisis armónico empleado con el software SLPR2.

Los resultados obtenidos en el análisis de la serie temporal con Versatile_TIDANA se presentan en la Tabla 1.

5.2 Con el Software VAV

El análisis armónico de las observaciones mareográficas con el software VAV (Venedikov et al., 2005, 2003) se realiza mediante su transformación del dominio del tiempo al dominio del tiempo/frecuencia a través de un proceso de filtrado. El algoritmo mínimos cuadrados se aplica en el dominio del tiempo y de la frecuencia bajo la consideración de ruido de color. Esto permite una estimación de la precisión independiente de la frecuencia. Además, con respecto al método de análisis, cabe destacar:

a) La modelización teórica apropiada de la señal de marea, que permite considerar en el proceso de análisis armónico todas las mareas parciales.

b) La admisión de datos con incrementos de tiempo arbitrarios, no equiespaciados e interrupciones.

c) La detección automática de datos anómalos y la elección del modelo que mejor se ajusta a los datos (conjunto de ondas de marea seleccionadas para el análisis, tamaño de la ventana temporal de aplicación de los filtros y el polinomio de deriva considerado).

Las opciones de procesado y análisis de las observaciones registradas en el Puerto de Pasaia con el programa VAV incluyen:

- Un conjunto de ondas de marea que incluye 30 mareas diurnas y semidiurnas.
- Una ventana temporal de 24 horas para la partición de los datos y un polinomio de grado uno para el modelo de deriva en cada intervalo.

Como en el caso anterior, hay que señalar que las opciones de análisis anteriores han sido seleccionadas después de realizar diversos estudios comparativos entre las opciones de procesado y análisis que incluye este programa. Algunos de estos estudios son:

- El conjunto de ondas seleccionada para el análisis.
- La ventana temporal para la partición de los datos (de 24 ó 48 horas) y el grado (1 ó 2) del polinomio para el modelo de deriva en cada intervalo.
- La localización de intervalos anómalos.
- El estudio de los residuales obtenidos en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Los resultados obtenidos en el análisis de la serie temporal con el software VAV se presentan en la Tabla 1.

6. RESULTADOS

Las constantes armónicas de marea (amplitudes y fases) obtenidas en el análisis armónico de las series del nivel del mar observadas en la estación puerto de Pasaia, con los programas Versatile_TIDANA y VAV, se presentan en la Tabla 1. En el caso de los resultados obtenidos con VAV se indica, además, la desviación estándar obtenida para cada constituyente de marea en el proceso de análisis armónico. Finalmente, debe señalarse que, para la presentación de resultados se han seleccionado los armónicos:

- 1) Con desviación estándar de la fase inferior a 40°.

- 2) Con amplitud superior a 2 mm.
- 3) Con un error relativo en amplitud inferior al 50%.

En los resultados presentados en la Tabla 1 se observa que, las diferencias en las amplitudes y fases de los constituyentes de marea dominantes en las bandas diurna y semidiurna obtenidas usando VAV y Versatile_TIDANA son

- En amplitud: 0.003 cm (lo que supone un 0.04% del valor de la amplitud) para la onda O1; 0.166 cm (2.62%) para K1, 0.098 cm (0.34%) para N2, 0.115 cm (0.08%) para M2 y 0.082 cm (0.17%) para S2.
- En fases: 0.37° para O1, 0.2° para K1, 3.59° para N2, 0.03° para M2 y 0.05° para S2.

Además, para los constituyentes presentados las diferencias obtenidas entre ambos resultados no exceden significativamente, por lo general, los errores estimados en la determinación de dichos constituyentes.

Tabla 1 - Amplitudes (en cm) y fases (en grados, respecto a Greenwich) de los principales constituyentes de marea obtenidos en el análisis armónico con Versatile_TIDANA y VAV. (Amplitudes (in cm) and phases (in degree, with respect to Greenwich) of the main tidal constituents obtained from the harmonic analysis using Versatile_TIDANA and VAV)

Onda	Versatile_TIDANA		VAV	
	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
2Q1	0.389	230.85	0.393±0.051	219.42±7.48
SGM1	0.417	231.86	0.450±0.052	230.09±6.58
Q1	2.035	266.80	2.033±0.050	267.50±1.41
RO1	0.412	279.05	0.326±0.051	276.87±8.93
O1	7.204	320.73	7.201±0.052	321.10±0.41
M1	0.833	7.66	0.813±0.038	6.56±2.68
P1	1.965	56.37	1.827±0.054	53.25±1.70
S1	1.075	223.78	1.198±0.104	229.12±4.73
K1	6.292	67.92	6.126±0.052	68.12±0.49
J1	0.322	72.71	0.345±0.043	77.70±7.12
EPS2	1.110	20.12	1.251±0.044	20.71±2.02
2N2	3.918	45.23	4.055±0.049	44.03±0.69
MU2	4.675	49.23	4.698±0.049	47.61±0.60
N2	28.69	72.62	28.595±0.049	69.03±0.10
NU2	5.461	75.62	5.488±0.049	74.74±0.51
M2	135.7	92.63	135.826±0.050	92.60±0.02
L2	3.306	97.86	2.666±0.051	76.41±1.09
T2	2.615	118.20	2.670±0.052	117.18±1.12
S2	47.46	124.73	47.545±0.048	124.78±0.06
K2	13.30	122.43	13.288±0.049	121.99±0.21

Para determinar el conjunto de constantes armónicas en la estación puerto de Pasaia, de entre los resultados obtenidos con Versatile_TIDANA y VAV, se han calculado las series residuales. Dichas series se obtienen como la diferencia entre la marea observada y la calculada (a partir de las constantes armónicas obtenidas con cada programa). En la Figura 5 se presentan los residuales obtenidos para el periodo completo de observación y en la Figura 6 una ampliación de la misma para un mes de registro.

Del estudio de estos residuales hay que destacar que, el valor medio de las diferencias entre la predicción de marea obtenida a partir del análisis armónico con Versatile_TIDANA respecto de la observada es de 0.002 cm (y desviación estándar de 11.02 cm). Con VAV el valor medio de las diferencias se reduce a 0.0002 cm (con desviación estándar de 5.97 cm). Esto es, VAV reduce en un factor de 10 el residual de marea, por lo que seleccionamos como constantes armónicas en la estación Pasaia las proporcionadas por este programa y listadas en la Tabla 1.

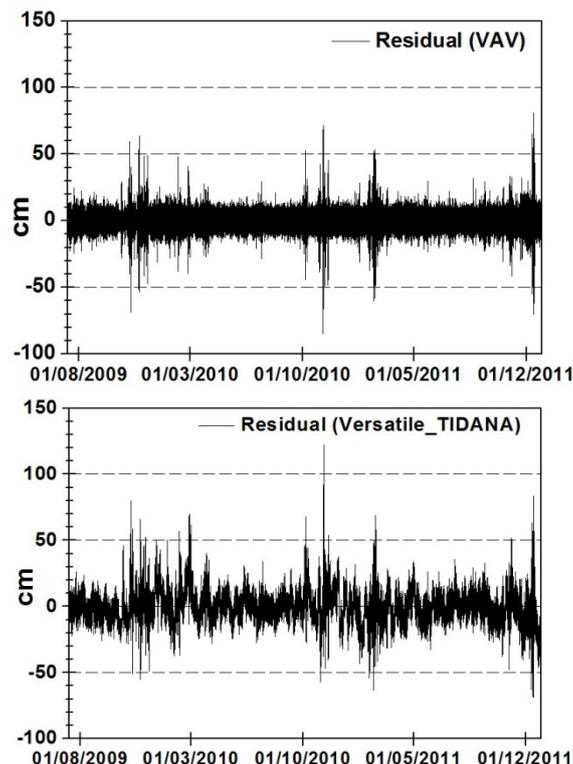


Figura 5 – Residuales de marea obtenidos en la estación puerto de Pasaia, para todo el periodo de observación, a partir del análisis armónico con VAV (arriba) y con Versatile_TIDANA (abajo). (Tidal residuals obtained in Pasaia harbour station, for the entire observing period, from the tidal harmonic analysis using VAV (top) and Versatile_TIDANA (bottom))

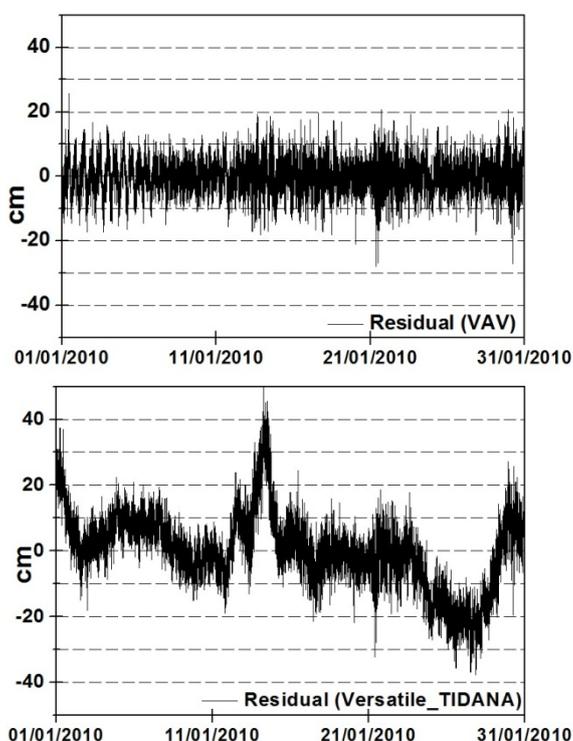


Figura 6 – Residuales de marea obtenidos en la estación puerto de Pasaia, para un mes de observación, a partir del análisis armónico con VAV (arriba) y con Versatile_TIDANA (abajo). (Tidal residuals obtained in Pasaia harbour station, for a period of one month, from the tidal harmonic analysis using VAV (top) and Versatile_TIDANA (bottom))

7. AGRADECIMIENTOS

PROYECTO: 'Redes Geodésicas y GPS' desarrollado por la empresa GEOLAN DONOSTI S.L y la Universidad Complutense de Madrid para la Diputación Foral de Guipúzcoa.

8. REFERENCIAS

Foreman, M.G.G., (1977, revised 2004): "Manual for tidal heights analysis and prediction". *Pacific Marine Science Report*, 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay. 58 pp.

- Foreman, M.G.G., Cherniawsky, J.Y. and V.A. Ballantyne (2009): "Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 806–817. doi: 10.1175/2008JTECHO615.1.
- Sevilla, M.J., Zurutuza, J. and A. Martin (2011): "Three Years of Tide Gauge Measurements in the Pasajes Harbour". *FIG Working Week 2011, Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011*.
- Vélez, E.J., Zurutuza, J., Sevilla, M.J., Galparsolo, I and A. Antzizar (2008): "Tide gauge station in the Pasajes harbour". *6ª Asamblea Luso-Española de Geodesia y Geofísica, Tomar, 2008*.
- Venedikov, A., Arnosó, J. and R. Vieira (2003): "VAV: a program for tidal data processing". *Comput. Geosci.* **29**, 487–502.
- Venedikov, A., Arnosó, J. and R. Vieira (2005): "New version of program VAV for tidal data processing". *Comput. Geosci.* **31**, 667–669.

Estudio de las Mareas Oceánicas en la Costa Este de Lanzarote (Islas Canarias). Aplicaciones Geodésicas

Study of the Ocean Tides in the East Coast of Lanzarote (Canary Islands). Geodetic Applications

Maite Benavent⁽¹⁾⁽³⁾, José Arnosó⁽²⁾⁽³⁾, Emilio J. Vélez⁽²⁾⁽³⁾ y Fuensanta G. Montesinos⁽¹⁾⁽³⁾

⁽¹⁾ Fac. CC. Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, España, maite_benavent@mat.ucm.es, fuensanta_gonzalez@mat.ucm.es

⁽²⁾ Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Madrid, España, jose_arnosó@mat.ucm.es, ejvelez@mat.ucm.es

⁽³⁾ Grupo Geodesia UCM

SUMMARY

Over the last several decades numerous geodetic researches are being conducted in the Canary archipelago. Among the objectives of these researches crustal deformation, volcanic hazards monitoring or sea level studies are included. In Lanzarote, the most northern and eastern island of the archipelago, a permanent Geodynamics Laboratory (denoted as LGL) was established in 1987. Currently, there are a great number of precise geodetic and geophysical instruments operating continuously in the LGL (gravimeters, tiltmeters, extensometers, GPS, etc.). Most of the observations carried out there are being affected by the ocean tide loading effect (OTL), that must be corrected to use the observations for further geodetic and geodynamics investigations. The amplitudes of the OTL effect in the Canarian region reach very high values, and it is necessary a rigorous representation of the surrounding ocean tides for its precise modeling.

In this work we study the ocean tides in the east coast of Lanzarote from the analysis of sea level observations made using pressure depth sensors and coastal tide gauges located at three different stations. Results obtained from the analysis of the observed time series are compared with most modern global ocean tide models (TPX07.2, EOT11a, HAMTIDE, FES2004) and also with the regional tide model of the Canary archipelago CIAM2.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas se están llevando a cabo, en las diferentes islas que conforman el archipiélago Canario, numerosas investigaciones geodésicas con fines tales como el estudio de deformaciones del terreno por técnicas geodésicas y geofísicas, investigaciones en vigilancia de peligros volcánicos o el estudio de las variaciones del nivel del mar. En la Isla de Lanzarote, donde se ubica el Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote, LGL (Vieira et al., 1991; 2006), se encuentran operando continuamente un gran número de instrumentos geodésicos y geofísicos de precisión (gravímetros, clinómetros, extensómetros, GPS, etc.). La mayoría de estas observaciones están afectadas por el efecto de carga causado por las mareas oceánicas que, debido a su magnitud, debe ser corregido en las observaciones para que éstas puedan emplearse con rigor en las investigaciones geodésicas, geofísicas y geodinámicas llevadas a cabo en la isla. Cabe señalar, además, que en esta región el efecto de carga oceánica alcanza amplitudes muy grandes y para su determinación se requiere una representación precisa de la marea oceánica circundante. Estas razones, ponen de manifiesto la importancia del estudio y modelización precisa de la marea oceánica en Canarias y, en particular, en el entorno de Lanzarote.

En este trabajo se estudian las mareas oceánicas en la costa este de Lanzarote, a partir del análisis de las observaciones de marea realizadas mediante diversos mareógrafos situados en tres emplazamientos diferentes, dos en la costa y el tercero en el océano a ocho metros de profundidad. Los resultados obtenidos se comparan con los modelos globales de marea oceánica más modernos, determinados a través de modelización hidrodinámica y asimilación de observaciones procedentes de altimetría por satélite y mareógrafos. Con este estudio se pretende incorporar mejoras en la serie de modelos de marea para el entorno de Canarias, denominada CIAM, que nuestro grupo de trabajo viene desarrollando los últimos años (Arnosó et al., 2006; Benavent et al., 2011).

2. ESTACIONES MAREOGRÁFICAS Y DATOS

El archipiélago Canario, localizado entre las latitudes 27° y 30° N y las longitudes 13° y 19° O, está compuesto por siete islas principales, siendo Lanzarote la situada más al este y al norte (Figura 1). La marea astronómica en la región es, principalmente, de tipo

semidiurno, con amplitudes que alcanzan hasta 85 cm (al noreste de Lanzarote) para el constituyente dominante M2 (Figura 2).

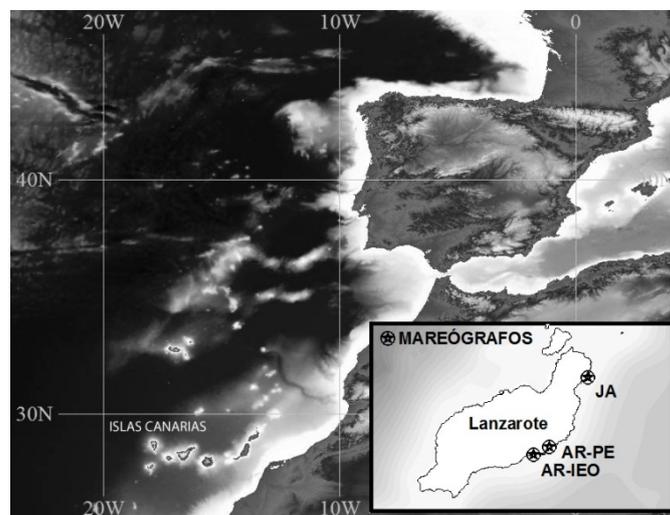


Figura 1 – Mapa de situación de las islas Canarias y zoom sobre Lanzarote. Los símbolos en el mapa señalan la localización de las estaciones mareográficas. (Location map of the Canary islands and zoom over Lanzarote. Black symbols depict the location of the tide gauge stations)

Las observaciones de marea oceánica utilizadas en este estudio proceden de tres estaciones localizadas en la costa este de Lanzarote. La primera estación, **Jameos del Agua (JA)** pertenece al LGL. Se sitúa en mar abierto a 200 metros de la costa noreste de Lanzarote y a unos 8 metros de profundidad. En esta estación se dispone de dos series observadas en periodos de tiempo diferentes con dos sensores de presión de fondo: Un sensor Aanderaa WLR7 y un SAIV TD301A (en adelante se denotarán por JA-WLR7 y JA-TD301A, respectivamente). Las series tienen una longitud temporal de 7 meses en JA-WLR7 y unos dos años y medio en JA-TD301A. Las otras dos estaciones pertenecen a instituciones públicas: La primera, la estación **Arrecife-PE (AR-PE)** pertenece a la Red REDMAR de

Puertos del Estado, PE (código 3470-Arrecife). Se encuentra situada al final del muelle de contenedores del puerto de Arrecife, a unos 23 kilómetros al sur de la estación JA. En AR-PE, las observaciones, con una longitud temporal de cuatro años, se han realizado con un mareógrafo radar MIROS. La última estación, **Arrecife-IEO**, AR-IEO (un mareógrafo de flotador clásico) pertenece al Instituto Español de Oceanografía (IEO) y se encuentra incluida en la red del Permanent Mean Sea Level Service, PMSLS (código 370/004). Los datos correspondientes a AR-IEO, un total de 27 años de observación, se encuentran disponibles a través del UHSLC (<http://uhslc.soest.hawaii.edu>). En la Figura 2, se muestran las observaciones registradas en las tres estaciones mareográficas. Cabe señalar que la gráfica correspondiente a JA-WLR7 muestra las observaciones del nivel del mar (en cm) respecto al cero del instrumento sin corrección de la presión atmosférica, que se ha representado de forma independiente en la misma gráfica. Para esta misma estación se muestra en la Figura 3 el espectro de amplitudes para las frecuencias de 0 a 4 ciclos por día y dos detalles de la misma sobre las bandas de marea diurna (ondas dominantes K1, O1, P1 y Q1) y semidiurna (ondas dominantes N2, M2, S2 y K2).

Tabla 1 – Localización de las estaciones mareográficas e instrumentación. Para cada estación se indica el periodo de observación y el número efectivo de días utilizado en el análisis. (Location of the tide gauge stations and instrumentation. For each station, the period of observation and the number of effective days used for the analysis are listed)

Estación	Coordenadas	Sensor	Periodo
AR-IEO	28°.95 N 13°.57 W	Flotador	1959/4/1-1991/12/31 (9822)
AR-PE	28°.97 N 13°.53 W	MIROS	2008/3/10-2012/2/13 (1339)
JA	29°.16 N 13°.43 W	WLR7	1998/11/6-1999/6/9 (212)
		TD301A	2005/10/27-2009/11/13 (982)

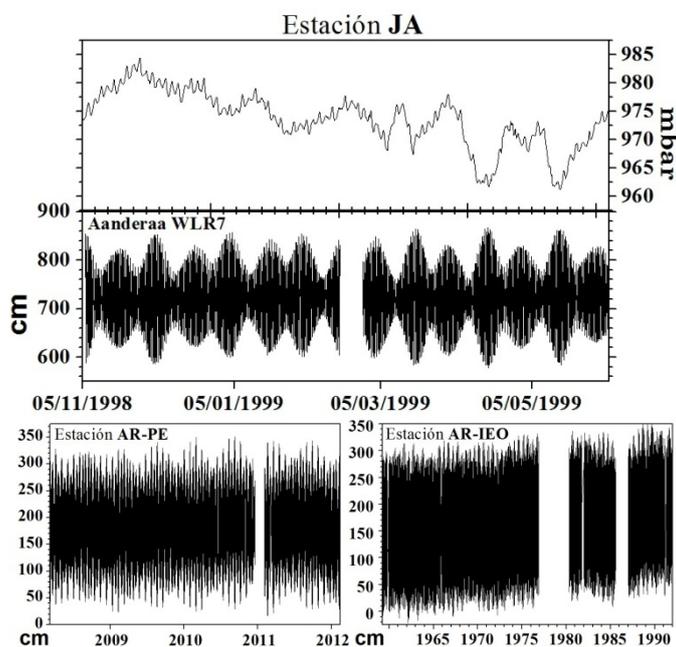


Figura 2 – (Arriba) En la estación JA-WLR7, observaciones del nivel del mar, respecto del cero del instrumento y registros de presión atmosférica. (Abajo) Observaciones del nivel del mar en las estaciones AR-PE (izqda.) y AR-IEO (dcha.). ((Top) Sea level observations, with respect to the zero of the instrument, and atmospheric pressure records at JA-WLR7 station. (Bottom) Sea level observations at AR-PE (left) and AR-IEO (right))

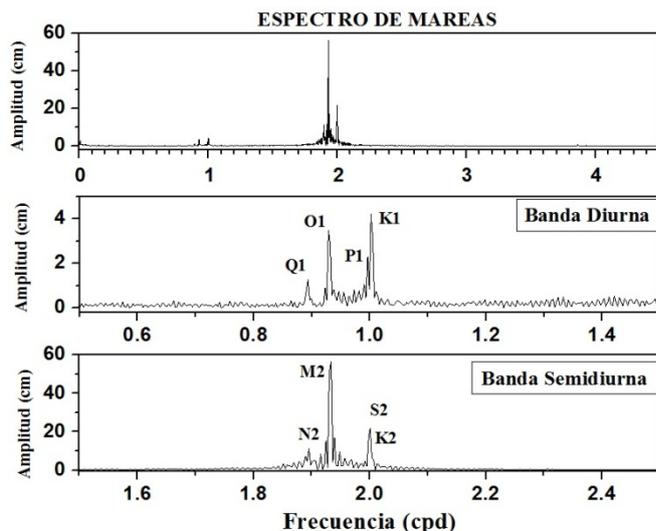


Figura 3 – Espectro de amplitudes de mareas con frecuencias entre 0 y 4 ciclos por día. Zoom sobre las bandas de marea diurna y semidiurna. (Amplitude spectrum of tides with frequencies from 0 to 4 cycles per day. Zoom over diurnal and semidiurnal tidal bands)

3. ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES

Antes de realizar el análisis armónico de las series temporales observadas, para determinar las constantes armónicas de marea (amplitudes y fases de cada onda), éstas se someten a controles de calidad y validación. Estos controles incluyen, entre otros, la inspección visual de los datos brutos (con el software TSOFT, Van Camp y Vauterin, 2005), la detección de picos, fallos instrumentales, etc. En caso de periodos de falta de datos no se realizan interpolaciones, ya que pueden introducir ruido y el software de análisis utilizado permite trabajar con interrupciones en las series.

Por otra parte, en la estación JA (sensores Aanderaa WLR7 y SAIV TD301A), las elevaciones del nivel del mar H (respecto del cero del instrumento) se han determinado a partir de las medidas de presión de fondo total, P , (suma de la presión atmosférica, P_{ATM} , y de la presión de la columna de agua) según la expresión

$$H = \frac{P - P_{ATM}}{\rho \cdot g} \quad (1)$$

siendo ρ la densidad media de la columna de agua sobre el mareógrafo ($\rho = 1026.7 \text{ kg/m}^3$) y g la gravedad ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$). La reducción de la presión del aire, P_{ATM} , de la presión total se realiza a partir de observaciones de la presión atmosférica (Figura 2) registradas en una estación meteorológica que se encuentra a una distancia de unos 200 m del mareógrafo.

El análisis armónico de las series temporales se ha llevado a cabo utilizando el software VAV (Venedikov et al., 2003, 2005), que se basa en la transformación de las observaciones del dominio temporal al dominio de frecuencias mediante un proceso de filtrado. Los parámetros de marea se estiman a partir del método de análisis armónico resuelto por mínimos cuadrados. Para el análisis se han utilizado diversas opciones que incluye el programa y que permiten incrementar la precisión en la estimación de los parámetros.

Constituyentes de marea incluidos en el análisis

La selección de las ondas de marea incluidas en el análisis se basa, principalmente, en la longitud de las series temporales, atendiendo al criterio de Rayleigh, y la desviación estándar de los parámetros de marea estimados. Debe señalarse que, en este contexto, por onda de marea se entiende un intervalo de frecuencia donde los parámetros de marea no varían para pequeños cambios de frecuencia, y de tal forma que, los parámetros de marea se consideran constantes, y se denotan con el nombre de la onda dominante, en dicho intervalo.

Así, para la estación JA-WLR7, se seleccionó un conjunto de constituyentes para el análisis que incluye 13 ondas de marea diurnas y semidiurnas. Para las restantes estaciones se consideró un conjunto de 20 ondas de marea diurnas (SGQ1, 2Q1, SGM1, Q1, RO1, O1, TAU1, M1, CHI1, PI1, P1, S1, K1, PSI1, TET1, J1, SO1, OO1, NU1) y 10 semidiurnas (EPS2, 2N2, MU2, N2, NU2, M2, L2, T2, S2, K2). En la Figura 4 se ha representado, como ejemplo, el factor de amplitud estimado con sus respectivas barras de error, para el conjunto de constituyentes incluidos en el análisis en la estación JA-WLR7.

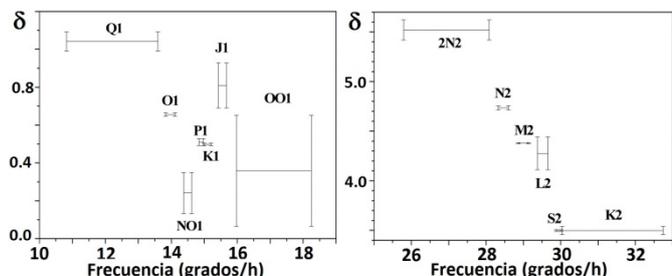


Figura 4 – En la estación JA-WLR7, factor de amplitud estimado, δ para las ondas seleccionadas en el análisis de marea. (Amplitude factors, δ , estimated through the analysis of the waves selected in JA-WLR7)

Detección automática de anomalías

VAV incorpora una opción para la detección automática de intervalos anómalos, mediante un proceso iterativo de testeo de los residuales de los datos filtrados. Aquellos intervalos cuyos residuales excedan un cierto umbral prefijado se consideran como anómalos y se eliminan del análisis. El proceso se repite de forma recursiva hasta que los parámetros de marea y/o su desviación media se estabilizan. En la Figura 5, se representan para la estación AR-IEO los residuales de los datos filtrados (banda de marea de 2 c.p.d) en la primera etapa del proceso y una vez transcurridas 6 iteraciones (observar que las escalas son diferentes). En la Figura 6, con el fin de mostrar la estabilización del proceso, se representa el factor de amplitud, para la estación AR-PE y la onda de marea M2, obtenido tras cada iteración, su desviación estándar y el número de datos eliminados en cada iteración.

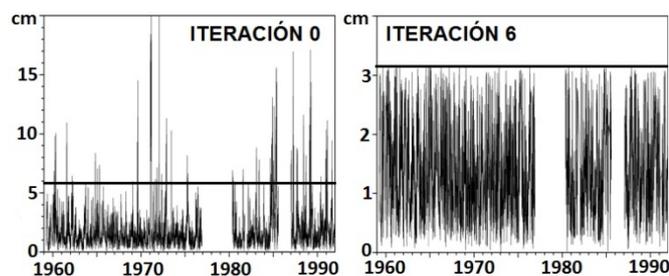


Figura 5 – Para la estación AR-IEO, residuales de los números filtrados, iteraciones 0 y 6, en la frecuencia de 2 ciclos por día. La línea horizontal representa el umbral prefijado 3σ , siendo σ la desviación estándar. (Residuals of the filtered numbers, iterations 0 and 6, for the frequency 2 cycles per day at AR-IEO station. Horizontal line is the 3σ threshold level, where σ is the estimated standard deviation)

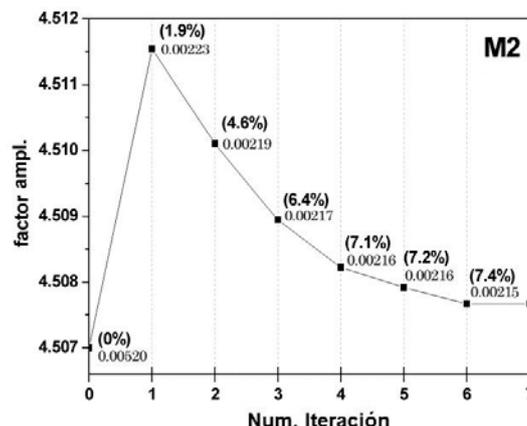


Figura 6 – En la estación AR-PE, resultado de siete iteraciones, para mostrar el efecto de la eliminación de intervalos de datos anómalos con VAV. La gráfica muestra el valor del factor de amplitud para la onda M2. Para cada iteración se indica el porcentaje de datos eliminados (entre paréntesis) y la desviación estándar obtenida en el proceso de análisis demarea (debajo de los paréntesis). (Results of 7 iterations of VAV to see the effect of the elimination of anomalous data intervals at AR-PE station. Graphic shows value of the amplitude factor for M2 wave. For each iteration, the percent of data elimination (in bracket) and (below brackets) the standar deviation obtained in the tidal analysis process are shown)

4. RESULTADOS

Parámetros de marea estimados y su precisión

Los resultados obtenidos en el análisis armónico de las series temporales, amplitudes y fases de los principales constituyentes de marea junto con su precisión, se presentan en la Tabla 2. Asimismo, para las ondas de marea dominantes en la banda semidiurna, M2, y diurna, K1, se muestran diagramas de barras representando los parámetros de marea estimados (amplitudes en cm y fases, en grados, con respecto Greenwich) y su precisión (Figura 7). En la estación JA se observa que, para el constituyente armónico M2, el mayor error en la amplitud estimada se produce para el sensor Aanderaa WLR7. Eso se atribuye a la longitud de la serie observada por este sensor, de tan sólo 7 meses, frente a los dos años observados por el sensor SAIV TD301A. Así, en la estación JA consideraremos los parámetros de marea obtenidos con este último sensor.

Tabla 2 – Constantes armónicas obtenidas en las tres estaciones para las principales ondas diurnas y semidiurnas. (Harmonic constants resulting for the main diurnal and semidiurnal waves, at the three stations)

Estación	O1		P1		K1	
	A (cm)	G (°)	A (cm)	G (°)	A (cm)	G (°)
AR-IEO	5.278	296.16	2.017	28.70	6.823	42.15
	± 0.026	± 0.29	± 0.028	± 0.81	± 0.027	± 0.23
AR-PE	5.237	295.72	2.130	25.33	6.817	43.11
	± 0.015	± 0.16	± 0.015	± 0.41	± 0.015	± 0.13
WLR7	5.616	295.54	2.037	52.73	6.005	40.07
	± 0.085	± 0.87	± 0.072	± 2.04	± 0.080	± 0.78
TD301A	5.450	297.54	1.375	41.33	6.711	34.88
	± 0.095	± 1.00	± 0.112	± 4.66	± 0.101	± 0.87
Estación	N2		M2		S2	
	A (cm)	G (°)	A (cm)	G (°)	A (cm)	G (°)
AR-IEO	17.297	19.11	84.408	34.77	31.751	58.16
	± 0.041	± 0.14	± 0.040	± 0.03	± 0.039	± 0.07
AR-PE	17.484	20.71	83.856	35.26	31.770	57.88
	± 0.036	± 0.12	± 0.035	± 0.02	± 0.034	± 0.06
WLR7	16.914	23.18	81.701	35.91	30.367	57.44
	± 0.074	± 0.25	± 0.076	± 0.05	± 0.076	± 0.15
TD301a	17.577	22.74	84.677	34.52	31.709	56.72
	± 0.132	± 0.43	± 0.130	± 0.09	± 0.125	± 0.23

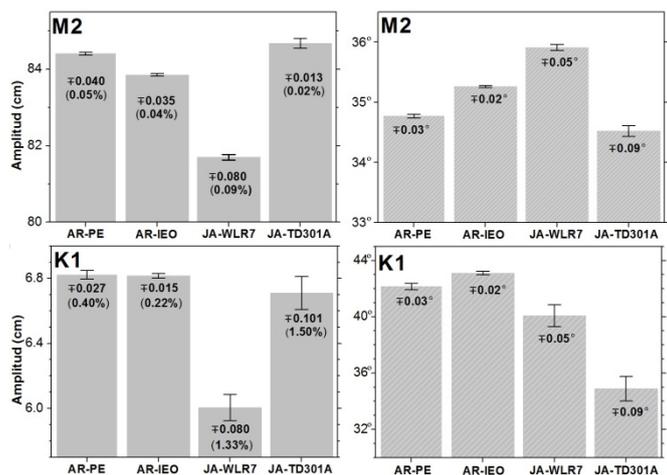


Figura 7 – Para las ondas M2 y K1, parámetros de marea estimados en el análisis armónico de las series observadas en las estaciones AR-PE, AR-IEO y JA. Las barras representan la precisión estimada (que también se indica numéricamente). (For M2 and K1 waves, tidal parameters estimated in the harmonic analysis of the observed series at the stations AR-PE, AR-IEO and JA. Bars represent estimation of the precision, which is also shown numerically)

Comparación con modelos de marea oceánica

Por último, se han comparado los resultados obtenidos (listados en la Tabla 2) con diversos modelos de marea globales seleccionados de entre los más recientes y de mayor resolución. Estos son: TPX07.2 (Egbert y Erofeeva, 2002), EOT11a (Savcenko and Bosch, 2010), HAMTIDE (Taguchi et al., 2011) y FES2004 (Lyard et al., 2006). Todos ellos han sido obtenidos a partir de esquemas de asimilación de datos en modelos hidrodinámicos, exceptuando EOT11a que es puramente empírico. Además, se han comparado también los resultados con CIAM2 (Benavent, 2011; Arnos et al., 2006), que es un modelo de alta resolución (5 minutos) desarrollado específicamente para la región Canaria. En la Tabla 3 se indican, junto con la resolución de cada modelo, las misiones de altimetría por satélite cuyas observaciones se han asimilado en los modelos, así como si se han utilizado o no observaciones procedentes de mareógrafos.

La comparación entre observaciones y modelos se realiza, para cada onda de marea k, en términos del error medio cuadrático de las diferencias (EMC) según la ecuación

$$EMC^k(\lambda, \phi) = \sqrt{(C_1^k(\lambda, \phi) - C_2^k(\lambda, \phi))^2 + (S_1^k(\lambda, \phi) - S_2^k(\lambda, \phi))^2} \quad (2)$$

donde C y S denotan las componentes en fase y en cuadratura de la marea oceánica k en la posición (λ, φ). Los subíndices 1 y 2 designan las componentes obtenidas a partir de las observaciones y de los modelos, respectivamente. Posteriormente, se estudia la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los EMC anteriores (denotada por RSS), esto es

$$RSS(\lambda, \phi) = \sqrt{\sum_{k=1}^7 (EMC^k(\lambda, \phi))^2} \quad (3)$$

Esta expresión permite considerar el efecto de los 7 constituyentes de marea principales (O1, P1, K1, N2, M2, S2 y K2).

Se ha representado en una primera gráfica (Figura 8) el EMC de las diferencias entre las observaciones en las tres estaciones y los modelos considerados, para las principales ondas de marea. En una segunda gráfica (Figura 9) se ha representado el RSS dado por la ecuación (3). De estos estudios se desprende que, en general, para todas las ondas de marea, HAMTIDE es el modelo más discrepante con las observaciones, mientras que CIAM2 y EOT11a son los que mejor concuerdan. Debe señalarse que, CIAM2 presenta ligeras discrepancias en la estación AR-PE, que se atribuyen a que en esta localización CIAM2 asimilaba las constantes armónicas procedentes de antiguas observaciones mareográficas de corta duración.

Tabla 3 – Modelos de marea oceánica utilizados en el estudio para la comparación con las observaciones. Se indica la resolución espacial de los mismos y la procedencia de los datos asimilados. (Ocean tide models used in this study for the comparison with observations. Spatial resolution and source of assimilated data are also indicated)

Modelo	Resolución	Datos	
		Satélite (*)	Mareógrafos
TPX07.2	0.25°	TP, ERS, JA1, GRA	Sí
EOT11a	0.125°	TP, ERS, ENV, JA1, GFO	No
HAMTIDE	7.5'	TP, JA1	No
FES2004	0.125°	TP, ERS	Sí
CIAM2	5'	TP	Sí

(*) TP = TOPEX/POSEIDON, JA1 = JASON1, GRA = GRACE, ENV = ENVISAT

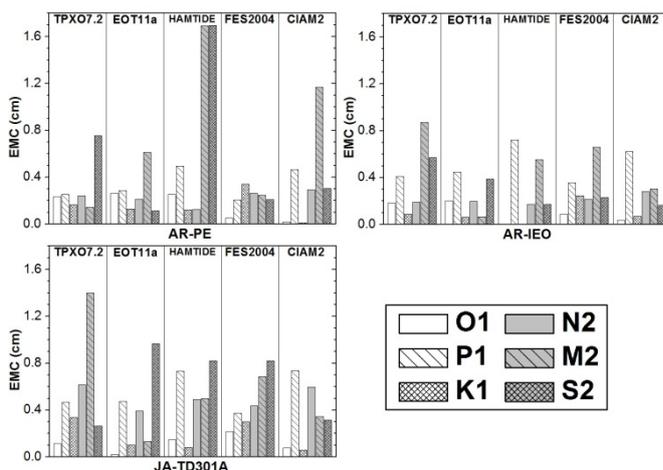


Figura 8 – EMC de las diferencias (en cm) entre las constantes armónicas obtenidas del análisis de las series temporales observadas y las proporcionadas por los modelos, en las estaciones AR-PE, AR-IEO y JA-TD301A. (Mean square error of the differences (in cm) between the harmonic constants obtained from the analysis of the observed time series and from the tide models, at stations AR-PE, AR-IEO and JA-TD301A)

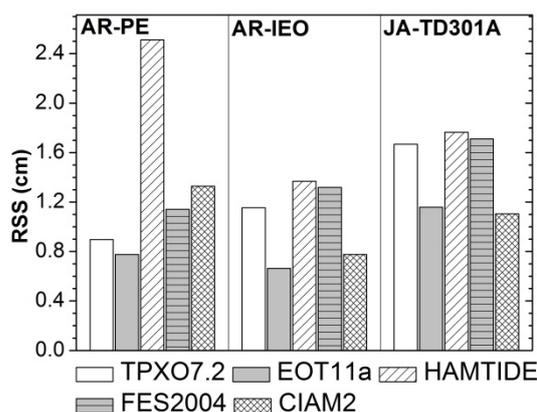


Figura 9 – Valores del RSS (en cm) entre las observaciones y cuatro modelos globales y el regional CIAM2, calculados sobre las siete ondas de marea principales, en las tres estaciones. (Root Sum Square (RSS, in cm) between the observations and four global models and the regional one CIAM2, at the three stations)

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado los registros de las variaciones del nivel del mar obtenidos mediante mareógrafos, instalados en tres estaciones situadas en distintas localizaciones de la costa este de la isla de Lanzarote. En cada estación se han estimado, a partir del análisis armónico de las series temporales observadas, los parámetros de marea y sus correspondientes desviaciones estándar,

para los principales constituyentes en las bandas de marea diurna y semidiurna. Los resultados obtenidos se han comparado con los modelos globales de marea oceánica actuales de mayor resolución (TOPEX7.2, EOT11a, HAMTIDE, FES2004) y con el modelo específico de la región Canaria CIAM2. La buena concordancia del modelo CIAM2 con las observaciones pone de manifiesto la importancia del desarrollo de modelos específicos, de gran resolución y que representen con precisión la marea oceánica, en regiones de gran variabilidad oceánica como es el entorno de Canarias. Los resultados de este trabajo permitirán realizar mejoras en los modelos regionales para Canarias, basados en técnicas de asimilación de datos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos: CGL2011-25494 y CGL2007-65110 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España), 320/2011 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (España), INTERREG-IIIB VULCMAC-MAC/2,3/A7 y MCGR35/10-A de la Universidad Complutense de Madrid-BSCH.

Los autores agradecen al Ente Público Puertos del Estado y al Instituto Español de Oceanografía las observaciones mareográficas facilitadas.

7. REFERENCIAS

- Arnos, J., Benavent, M., Ducarme, B. and F.G. Montesinos (2006): "A new ocean tide loading model in the Canary Islands region". *J. Geodyn.*, **41**, 100–111.
- Benavent, M. (2011): "Estudio metodológico del efecto oceánico indirecto y desarrollo de modelos de carga oceánica. Aplicaciones geodésicas para la Península Ibérica y Canarias". *PhD Thesis, Univ. Complutense*. Madrid. ISBN: 978-84-694-3115-3.
- Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva (2002): "Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 2, 183-204.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and O. Francis (2006): "Modelling the global ocean tides: insights from FES2004" *Ocean Dynamics*, **56**, 394-415.
- Savcenko, R. and W. Bosch (2010): "EOT10a - a new global tide model from multimission altimetry". *Geophys. Res. Abs.*, **12**, EGU2010-9624, EGU General Assembly, 2010.
- Taguchi, E., Stammer, D. and W. Zahel (2011): "Estimation of deep ocean tidal energy dissipation based on the high-resolution data-assimilative HAMTIDE model" (*submitted to J. Geophys. Res.*).
- Van Camp, M. and P. Vauterin (2005): "Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides". *Comput. Geosci.*, **31**, 5, 631-640.
- Venedikov, A.P., Arnoso, J. and R. Vieira (2003): "VAV: a program for tidal data processing". *Comput. Geosci.*, **29**, 487–502.
- Venedikov, A.P., Arnoso, J. and R. Vieira (2005): "New version of program VAV for tidal data processing". *Comput. Geosci.*, **31**, 667–669.
- Vieira, R., Van Ruymbeke, M., Fernández, J. and C. Toro (1991): "The Lanzarote Underground Laboratory". *Cahiers du Centre Européen de Géodyn. et de Séismol.*, **4**, 71-86.
- Vieira, R. and E. Vélez (2006): "Guía del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote". *Publicaciones del Instituto de Astronomía y Geodesia*, **201**, Madrid. ISSN: 0213-61-98.

Continuidad de las medidas del mareógrafo de Pasaia

Continuity of the Pasaia Tide Gauge measurements

Miguel J. Sevilla⁽¹⁾, J. Zurutuza⁽²⁾ and A. Martín⁽¹⁾

⁽¹⁾Astronomía y Geodesia. Facultad de Matemáticas. Universidad Complutense. Madrid sevilla@mat.ucm.es

⁽²⁾Dpto. de Geodesia Aplicada. Sociedad de Ciencias ARANZADI. Gipuzkoa. geodesia@aranzadi-zientziak.org

SUMMARY

In order to get sea level variations in the Pasaia harbour (Cantabrian Sea in the north of Spain) an automatic precision tide gauge was installed in 2007. To obtain absolute sea level variations isolated from crustal movements or local deformations, a permanent GNSS station has also been installed in a nearby building of the tide gauge. A high-accuracy vertical tie between the reference point of the GNSS antenna and the tide gauge bench mark is carried out yearly.

In this paper the stations description, the first results obtained with four years of tide gauge measurements, the evaluation of the altimetric link campaigns, and the comparison of the levels of different measurements are presented. The statistical analysis of four years of records is presented as well.

1. INTRODUCCIÓN

En febrero de 2007 se puso en funcionamiento una estación permanente GNSS y un mareógrafo (TG) en el puerto de Pasaia, en el norte de España (Figura 1).

La finalidad de esta instalación es el estudio del nivel del mar y de su variación a lo largo del tiempo. Uno de los objetivos de la estación GNSS es la determinación de posibles movimientos verticales de la corteza en la zona de estudio así como la conexión de la referencia del mareógrafo (TGBM1), que está referida a un sistema de referencia local, al sistema de referencia global geocéntrico (ITRF). Entonces, los datos GNSS permitirán corregir los largos registros del nivel del mar obtenidos con el mareógrafo y así separar las variaciones del nivel del mar de las deformaciones de la corteza y obtener el nivel del mar absoluto (Zurutuza and Sevilla 2006).



Figura 1 - Situación de la estación de Pasaia (Pasaia station situation)

Tanto el mareógrafo como la antena GNSS están conectados con tres marcas adicionales (TGBM2, TGBM3 y TGBM4) que darán información de posibles deformaciones locales y quedarán de reserva para no perder el control si alguna de las TGBM desapareciera o fuera destruida (Figura 2). Estas conexiones se hacen por medio de observaciones GNSS y nivelación de precisión. El enlace de la antena GNSS, que está en la azotea de un edificio, con la TGBM1 del mareógrafo se hace por nivelación trigonométrica recíproca y simultánea a fin de asegurar la precisión milimétrica. Tanto la red de nivelación entre las TGBM como el enlace con la antena GNSS son observadas una vez al año para su control (Vélez et al. 2008).

En la estación se tienen también instalados aparatos meteorológicos que proporcionan datos continuos de presión, temperatura y humedad, coordinados con las series de valores GNSS. También se dispone de medidas de la gravedad en la zona. Todos estos datos permiten correcciones instrumentales y calibración de instrumentos y posteriormente son utilizados para el estudio de posibles variaciones estacionales o debidas a borrascas frecuentes en el mar Cantábrico.

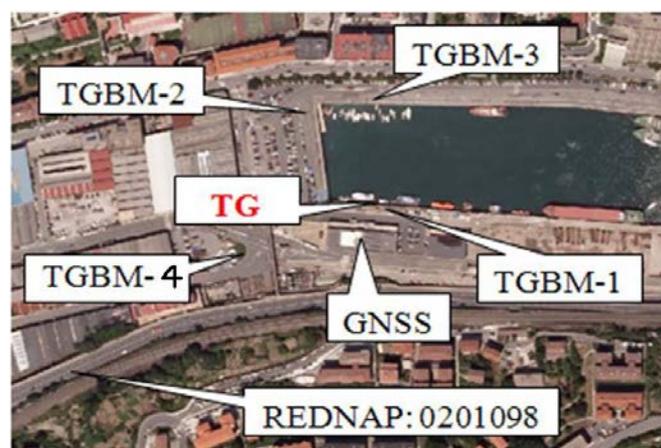


Figura 2 - Situación de las TGBM en Pasaia (Situation of TGBMs in Pasaia)

2. EL MAREÓGRAFO

El instrumento es un mareógrafo de presión PAROSCIENTIFIC para la medida del nivel del agua por inmersión con un sensor de cuarzo digital Digiquartz© 8DP070-GV con electrónica inteligente modelo 735. Para almacenamiento de datos de dispone de un Datalogger Campbell R800. Se producen ficheros diarios con un periodo de adquisición de un dato cada minuto.

3. ESTACIÓN GNSS PERMANENTE

Se trata de un receptor GNSS de doble frecuencia (14 GPS+12 GLONASS), modelo "Leica GR10". La antena está instalada sobre un mástil estable en la terraza del edificio de AZTI (Figura 3), a unos 15 metros del TGBM1 del mareógrafo. La antena es una 3D choke-ring con elemento Dorne Margolin "LEIAR25.R4 LEIT". Las variaciones del centro de fase absoluto (PCV) para esta antena se obtienen del IGS (IGS08.ATX). Las coordenadas aproximadas (ETRS89) son: $\varphi = 43^{\circ} 19' 18.373''$, $\lambda = -1^{\circ} 55' 52.059''$.

El tratamiento de datos diario (solo datos GPS) se realiza con el software Bernese 5.0 (Dach et al., 2007) y con el software propio AutoGNSS (Zurutuza et al., 2007). Los principales parámetros considerados son (Zurutuza and Sevilla, 2007, 2009): Intervalo de muestreo 30 segundos. Máscara de elevación 10° . Modelo troposférico de Niell NMF (Niell Mapping Function) (Niell, 1996) estimado cada 3 horas interpolado linealmente en cada época de observación. Ionosfera casi eliminada con la frecuencia "iono-free". Efemérides precisas IGS. Mareas terrestres y correlaciones DD usadas. Estaciones IGS fijas de BRUS, EBRE, VILL, YEBE. La estación GNSS pertenece a la red GNSS de Guipúzcoa.



Figura 3 - Edificio de AZTI y antena GNSS. (Building of AZTI and GPS Antenna)

La red de control de la estación GNSS permanente consta de 4 estaciones adicionales próximas. Sirve para determinar posibles deformaciones locales (principalmente del edificio de AZTI) que pudieran influir en las coordenadas determinadas de la estación (Sevilla et al 2010, Sevilla and Romero 1991, García and Sevilla 2006). La máxima distancia de la antena GNSS permanente a las estaciones de control es de unos 400 metros.

El enlace de la antena GNSS con el nivel del mar y la red española de nivelación en Pasaia es una operación bastante delicada debido a la configuración del itinerario que discurre desde la terraza, donde está situada la antena GNSS, al muelle del puerto donde está el mareógrafo. Este enlace se repite con carácter anual. La mayor dificultad que se presenta es enlazar con precisión milimétrica dos puntos separados una distancia de 31,5 metros entre los que existe un desnivel de unos 14,6 metros y entre los que no existe visibilidad directa. Para fines altimétricos las TGBM también están enlazadas con una marca de la Red Española de Nivelación de Precisión REDNAP. El enlace con la REDNAP ha dejado de ser posible desde 2011 al haber desaparecido físicamente el clavo de la señal del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y no haber sido ni reconstruido ni replanteado por dicha institución.

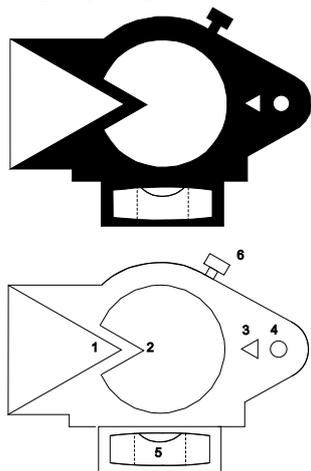


Figura 4 - Placas NITRIVAL NPT. (NITRIVAL NPT Targets)

La instrumentación consiste en un teodolito WILD T2 con sistema de puntería NITRIVAL NPT (Figura 4) y una estación total PENTAX ATS 101 con una precisión en distancias de $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$, que incluye correcciones meteorológicas automáticas por presión y temperatura. Las constantes son calibradas en una base de tres pilares del laboratorio de la Facultad de Matemáticas de Madrid. Para la nivelación geométrica se utiliza un nivel automático digital SOKKIA SDL30 y miras milimétricas de fibra de vidrio con código de barras.

Las campañas de nivelación han sido realizadas durante los meses de julio de los años 2008, 2009, 2010 y 2011. Se programan las mismas fechas todos los años a fin de tener condiciones atmosféricas análogas. Como se dijo anteriormente, las nivelaciones trigonométrica y geométrica se utilizan para lograr las precisiones requeridas. La nivelación trigonométrica recíproca y simultánea es la elegida para enlazar la estación GNSS con el mareógrafo mientras que la nivelación geométrica se usa para obtener las altitudes de todas las TGBM. Respecto a la nivelación trigonométrica, la estación total y el teodolito se estacionan de forma excéntrica muy próximos a la estación GNSS y al TGBM1 del mareógrafo de manera que las altitudes reales de estos puntos se obtienen teniendo en cuenta las lecturas sobre miras milimétricas situadas en ambos extremos de las estaciones que deben enlazarse (TGBM1 y GNSS) con ángulo vertical de 0° . Por otra parte, la nivelación geométrica se hace con el nivel en el punto medio de cada tramo, de unos 40 metros, con itinerarios de ida y vuelta para cancelar los errores de refracción y curvatura. De esta forma, considerando las medias de las altitudes observadas los errores de cierre raramente sobrepasan 1,5 milímetros (Valbuena et al 1997).

Una vez concluida cada campaña se calculan en gabinete todas las diferencias de altitud observadas. Para el cálculo de las diferencias de altitudes trigonométricas se utiliza el método de cálculos directos independientes. Los puntos debidamente señalizados en el terreno con señales estándar o con referencias sólidas son los siguientes (Figura 5): (1) tubo del mareógrafo, (2) TGBM1, 2 y 3, (3) TGBM4, (4) señal de nivelación 201098 del IGN y (5) antena GPS.

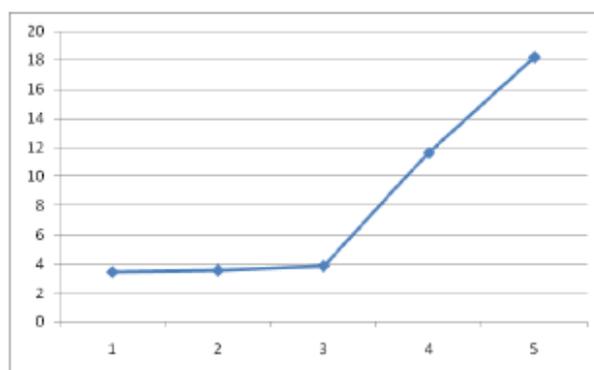


Figura 5 - Perfil de la nivelación de precisión (Profile of the spirit levelling)

En la Tabla 1 se presentan las diferencias de altitud y las altitudes obtenidas de los puntos de referencia observados en los cuatro años. El 0 (cero) es el tubo del mareógrafo, la TGBM1 está a 6 metros del mareógrafo en el muelle, la TGBM2 está en la esquina noroeste del muelle a unos 170 metros de la TGBM1, la TGBM3 a unos 170 metros de la TGBM2 hacia el Este y la TGBM4 en la rotonda exterior al recinto de AZTI (Figura 2). La TGBM1 fue tomada como referencia del mareógrafo y a este punto se refiere el nivel del mar. En la citada tabla se utiliza la siguiente nomenclatura

Nombre	
0	Mareógrafo
1000	TGBM1
2000	TGBM2
3000	TGBM3
999	Antena GNSS
1999	Clavo cerca de antena
66	TGBM4
10	REDNAP 201098

Resumen de resultados (altitudes en metros, diferencias en milímetros)	2008	2009	2010	2011	8-9	8-10	8-11	9-10	9-11	10-11
GPS AZTI menos TGBM1 (999-1000)	14,7368	14,7373	14,7369	14,7370	-0,500	-0,100	-0,202	0,400	0,298	-0,102
TGBM4 menos TGBM1 (66-1000)	0,2981	0,2969	0,2955	0,2946	1,200	2,650	3,550	1,450	2,350	0,900
Clavo REDNAP menos TGBM4 (10-66)	7,7509	7,7511	7,7527		-0,150	-1,800		-1,650		
Clavo REDNAP menos TGBM1 (10-1000)	8,0490	8,0480	8,0482		1,050	0,850		-0,200		
TGBM4 menos TGBM2 (66-2000)			-0,6976	-0,6964						-1,250
TGBM2 menos TGBM3 (2000-3000)			-0,0469	-0,0473						0,350
TGBM1 menos Tubo mareógrafo (1000-0)	0,1140	0,1143	0,1146	0,1149	-0,250	-0,550	-0,900	-0,300	-0,650	-0,350
Cerro mareógrafo menos Tubo (fijo)	6,940	6,940	6,940	6,940						
Nivel medio del mar desde el cerro del mareógrafo	3,4786	3,4786	3,4786	3,4786						
Altitudes sobre el NMM de Pasaja	2008	2009	2010	2011	8-9	8-10	8-11	9-10	9-11	10-11
H del tubo del mareógrafo	3,4614	3,4614	3,4614	3,4614	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H del TGBM1	3,5754	3,5757	3,5760	3,5763	-0,250	-0,550	-0,900	-0,300	-0,650	-0,350
H del TGBM4	3,8735	3,8726	3,8714	3,8709	0,950	2,100	2,650	1,150	1,700	0,550
H del TGBM2			3,1738	3,1745						-0,700
H del TGBM3			3,1269	3,1273						-0,350
H del clavo REDNAP 201098	11,6244	11,6236	11,6241		0,800	0,300		-0,500		
H GPS Azti (4644909,4163, -156645,5982, 4353622,6602)	18,3122	18,3130	18,3129	18,3133	-0,750	-0,650	-1,102	0,100	-0,352	-0,452
Altitudes sobre el TGBM1 de Pasaja	2008	2009	2010	2011	8-9	8-10	8-11	9-10	9-11	10-11
H del tubo del mareógrafo	-0,1140	-0,1143	-0,1146	-0,1149	0,250	0,550	0,900	0,300	0,650	0,350
H del TGBM1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H del TGBM4	0,2981	0,2969	0,2955	0,2946	1,200	2,650	3,550	1,450	2,350	0,900
H del TGBM2			-0,4022	-0,4018						-0,350
H del TGBM3			-0,4491	-0,4491						0,000
H del clavo REDNAP 201098	8,0490	8,0480	8,0482		1,050	0,850		-0,200		
H GPS Azti (4644909,4163, -156645,5982, 4353622,6602)	14,7368	14,7373	14,7369	14,7370	-0,500	-0,100	-0,202	0,400	0,298	-0,102
Nivel Medio del Mar	-3,5754	-3,5757	-3,5760	-3,5763	0,250	0,550	0,900	0,300	0,650	0,350

Tabla 1. Resultados de campañas 2008 a 2011 (Results for campaigns 2008 to 2011).

La nivelación se realiza en dos anillos. El primero, o anillo superior, parte de la marca 66 de la rotonda (TGBM4) y termina en la señal de nivelación 10. La doble nivelación de este anillo produce un error de cierre de 0,1 milímetros. El segundo anillo parte del TGBM1, va a la marca 66 (TGBM4), continúa por el TGBM2 y termina en el TGBM3. La doble nivelación de este anillo produce un error de cierre de 0,5 milímetros. También se calculan los errores de cierre individualizados entre 0 y 66 de -0,1 mm, entre 66 y 2000 de 0,0 mm y entre 2000 y 3000 de 0,4 mm. Estos resultados confirman que la nivelación geométrica de precisión es muy buena. La diferencia entre la estación 999 (antena GPS) y la referencia del mareógrafo TGBM1 varía como se muestra en la Tabla 1.

En la campaña del año 2010 (Sevilla et al. 2011). quedó claro que era necesario instalar un clavo permanente en la terraza de AZTI enlazado por nivelación trigonométrica con el TGBM1 en las inmediaciones del mareógrafo para desde este clavo dar cota a la antena GPS por nivelación geométrica y por medida directa escrupulosamente realizada. De esta forma si por cualquier motivo se cambia la antena solamente habría que repetir el enlace de la antena con el clavo. Este nuevo clavo fue instalado en la esquina noreste de la terraza en el mes de junio y se le asignó el número 1999. La observación del año 2011 ya se hizo a este nuevo clavo de manera que la diferencia de altitud entre el clavo 1000 y la antena 999 consta de dos tramos, el enlace trigonométrico 1000 a 1999 y el enlace geométrico del 1999 al 999.

Una circunstancia nueva en la campaña del año 2011 es que la antena GPS fue reemplazada por una nueva, por lo que las observaciones que se refieren a esta nueva antena son diferentes a las de los años anteriores con la antena vieja. Esto ocasiona una variación de 10,37 centímetros entre las altitudes de la antena de los años 2008, 2009, 2010 y las del año 2011. Para mantener las diferencias de altitud homogéneas, es decir referidas al mismo datum de antena en futuras campañas se decidió transformar las medidas de los años 2008, 2009 y 2010 al mismo datum de 2011.

Otra desagradable circunstancia encontrada en la campaña de 2011 es que la señal de nivelación REDNAP 201098 del IGN había desaparecido. Esta señal era de suma importancia pues a través de ella enlazábamos las altitudes con las de la Red española de nivelación y en definitiva el datum de Alicante con el datum de Pasaia. Se comunicó esta desaparición al organismo responsable IGN quien tomaría las medidas necesarias para reinstalar dicha señal y asignarle cota en el mismo sistema de referencia que utiliza la REDNAP. Como consecuencia de lo anterior en la campaña de 2011 solamente se observó el segundo anillo.

4. ANÁLISIS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

Se consideran las medidas de 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011. El mareógrafo comenzó a funcionar el día 28 de marzo de 2007 y produjo datos utilizables desde el 1 de mayo de 2007. El mareógrafo dejó de funcionar el día 7 de febrero de 2009 debido a problemas con el sistema de almacenamiento de datos. Este intervalo lo denominamos 1er ciclo. La cadencia de los datos archivados es de un dato cada minuto y la de los datos utilizados es de un dato cada cinco minutos. Se instala un nuevo sistema de almacenamiento de datos (datalogger) que comenzó a funcionar el 10 de julio de 2009 y continúa funcionando en la actualidad (junio 2012), a este intervalo lo denominamos 2º ciclo. La Tabla 2 muestra la estadística de datos depurados de los dos ciclos.

Puede verse que la media total es 3.511 y la desviación típica 0.107. Las medias diarias oscilan entre un valor mínimo de 3.224 y un valor máximo de 3.925 en un rango de 0.7010. Los valores observados oscilan entre un mínimo de 0.842 y un máximo de 6.523 es decir entre la marea mínima registrada y la marea máxima, en el periodo de observación, la diferencia es de 5.681 metros. Las desviaciones típicas de los valores observados oscilan entre un mínimo de 0.374 y 1.711. La Figura 6 muestra un gráfico de datos diarios

Tabla 2. Estadística de datos depurados (Statistics for all the reviewed data)

Suma	5143,617				5741
Media	3,511				
DT	0,107				
Mínimo	3,224	0,374	0,842	6,523	5,681
Máximo	3,925	1,711			
Rango	0,7010				
Sin Dato	82				

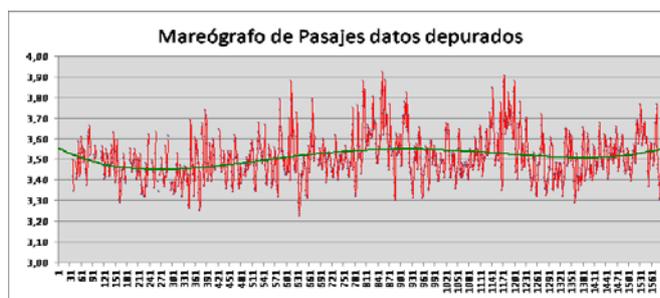


Figura 6 - Datos del mareógrafo de Pasaia. (Pasaia Tide Gauge Data)

La Tabla 3 presenta los siguientes resultados:

Media 1 = Medias mensuales de un valor cada día (30 elementos por mes). La media diaria es la media de los datos cada 5 minutos (288 por día)

Media 1A = Medias totales acumuladas de un valor cada día (30*N elementos)

Media 1 total (media de las medias mensuales) = **3,5096**

Media 1A total (media acumulada de todos los datos hasta ese mes) = **3,5104**

Tabla 3. Medias mensuales y totales de datos diarios (Monthly and total averages of daily data)

Año	Mes	Media 1	Residuos	Datos total	Media 1A	Residuos	
2007	5	3,5038	-0,0058	26	3,5038	-0,0066	
	6	3,5110	0,0014	50	3,5073	-0,0031	
	7	3,4968	-0,0128	70	3,5043	-0,0061	
	8	3,4994	-0,0102	101	3,5028	-0,0076	
	9	3,4197	-0,0899	128	3,4853	-0,0251	
	10	3,4489	-0,0607	159	3,4782	-0,0322	
	11	3,4177	-0,0918	182	3,4705	-0,0399	
	12	3,4197	-0,0898	211	3,4635	-0,0468	
	2008	1	3,4465	-0,0631	241	3,4614	-0,0490
		2	3,4531	-0,0565	270	3,4605	-0,0499
		3	3,4714	-0,0381	301	3,4616	-0,0487
		4	3,5114	0,0019	331	3,4662	-0,0442
5		3,5107	0,0011	358	3,4695	-0,0409	
6		3,4573	-0,0523	388	3,4686	-0,0418	
7		3,4766	-0,0330	414	3,4691	-0,0413	
8		3,4813	-0,0283	445	3,4699	-0,0405	
9		3,5232	0,0136	473	3,4731	-0,0373	
10		3,4859	-0,0236	504	3,4739	-0,0365	
11		3,5363	0,0268	534	3,4774	-0,0330	
12		3,4765	-0,0331	565	3,4773	-0,0331	
2009	1	3,5179	0,0083	596	3,4794	-0,0310	
	7	3,4999	-0,0096	618	3,4802	-0,0302	
	8	3,4859	-0,0237	649	3,4804	-0,0299	

	9	3,4899	-0,0196	679	3,4809	-0,0295
	10	3,5196	0,0101	710	3,4826	-0,0278
	11	3,6583	0,1488	740	3,4897	-0,0207
	12	3,6560	0,1464	771	3,4964	-0,0140
2010	1	3,5577	0,0481	802	3,4987	-0,0117
	2	3,6290	0,1194	830	3,5031	-0,0073
	3	3,5024	-0,0072	861	3,5031	-0,0073
	4	3,4672	-0,0424	891	3,5019	-0,0085
	5	3,4903	-0,0193	922	3,5015	-0,0089
	6	3,5247	0,0151	952	3,5022	-0,0082
	7	3,4706	-0,0389	983	3,5012	-0,0091
	8	3,4950	-0,0145	1014	3,5011	-0,0093
	9	3,5397	0,0302	1044	3,5022	-0,0082
	10	3,6182	0,1086	1075	3,5055	-0,0049
	11	3,6730	0,1634	1105	3,5101	-0,0003
	12	3,6008	0,0913	1136	3,5125	0,0021
2011	1	3,4936	-0,0160	1167	3,5120	0,0016
	2	3,4784	-0,0312	1195	3,5112	0,0009
	3	3,4421	-0,0675	1226	3,5095	-0,0009
	4	3,4779	-0,0317	1256	3,5087	-0,0017
	5	3,4574	-0,0521	1287	3,5075	-0,0029
	6	3,4957	-0,0139	1317	3,5072	-0,0032
	7	3,5167	0,0071	1348	3,5075	-0,0029
	8	3,5294	0,0199	1379	3,5079	-0,0024
	9	3,5280	0,0184	1409	3,5084	-0,0020
	10	3,5297	0,0201	1440	3,5088	-0,0016
	11	3,5903	0,0807	1470	3,5105	0,0001
	12	3,5054	-0,0041	1501	3,5104	
Media total		3,5096				

La Tabla 4 presenta los siguientes resultados:

Media 2 = Media mensual de un valor cada 5 minutos (288*30=8640 elementos)

Media 2A = Media total acumulada de un valor cada 5 minutos (8640*N elementos)

Media 2 total (media de las medias mensuales) = **3,5091**

Media 2A total (media acumulada de todos los datos hasta ese mes) = **3,5106**

Tabla 4. Medias mensuales y totales de valores cada 5 minutos
(Monthly and total averages of data every 5 minutes)

Año	Mes	Media 1	Residuos	Datos total	Media 1A	Residuos
2007	5	3,493	-0,017	6628	3,493	-0,018
	6	3,514	0,005	13216	3,503	-0,007
	7	3,496	-0,013	18669	3,501	-0,009
	8	3,499	-0,010	27597	3,501	-0,010
	9	3,412	-0,097	34944	3,482	-0,028
	10	3,472	-0,037	43561	3,480	-0,030
	11	3,420	-0,089	49874	3,473	-0,038
	12	3,427	-0,082	57585	3,466	-0,044
2008	1	3,439	-0,070	65272	3,463	-0,047
	2	3,428	-0,081	73285	3,459	-0,051
	3	3,471	-0,038	82213	3,461	-0,050
	4	3,508	-0,001	90770	3,465	-0,045
	5	3,503	-0,006	98000	3,468	-0,043

	6	3,457	-0,052	106622	3,467	-0,044
	7	3,474	-0,035	113946	3,468	-0,043
	8	3,481	-0,028	122874	3,469	-0,042
	9	3,521	0,012	130827	3,472	-0,039
	10	3,486	-0,023	139712	3,473	-0,038
	11	3,536	0,027	148352	3,476	-0,034
	12	3,476	-0,033	157280	3,476	-0,034
2009	1	3,518	0,009	166054	3,479	-0,032
	7	3,503	-0,006	172371	3,479	-0,031
	8	3,486	-0,023	181299	3,480	-0,031
	9	3,490	-0,019	189939	3,480	-0,030
	10	3,520	0,011	198742	3,482	-0,029
	11	3,658	0,149	207379	3,489	-0,021
	12	3,656	0,147	216307	3,496	-0,014
2010	1	3,558	0,049	225235	3,499	-0,012
	2	3,629	0,120	233299	3,503	-0,007
	3	3,502	-0,007	242227	3,503	-0,007
	4	3,467	-0,042	250867	3,502	-0,009
	5	3,490	-0,019	259795	3,502	-0,009
	6	3,525	0,016	268435	3,502	-0,008
	7	3,471	-0,038	277363	3,501	-0,009
	8	3,495	-0,014	286291	3,501	-0,010
	9	3,540	0,031	294931	3,502	-0,008
	10	3,618	0,109	303859	3,506	-0,005
	11	3,673	0,164	312499	3,510	0,000
	12	3,601	0,092	321427	3,513	0,002
2011	1	3,494	-0,016	330355	3,512	0,002
	2	3,478	-0,031	338419	3,511	0,001
	3	3,442	-0,067	347347	3,510	-0,001
	4	3,478	-0,031	355987	3,509	-0,002
	5	3,457	-0,052	364915	3,508	-0,003
	6	3,496	-0,013	373555	3,507	-0,003
	7	3,517	0,008	382483	3,508	-0,003
	8	3,529	0,020	391411	3,508	-0,003
	9	3,528	0,019	400051	3,508	-0,002
	10	3,530	0,021	408979	3,509	-0,002
	11	3,590	0,081	417619	3,511	0,000
	12	3,510	0,001	426547	3,511	
Media total		3,509				

Tabla 5. Resumen de medias (Summary of averages)

Tipo de medias	Valores medios
Media de valores medios diarios datos brutos	3.5104
Media de valores medios diarios datos depurados (36 días menos)	3.5110
Media de valores medios mensuales	3.5096
Valor medio acumulado datos mensuales	3.5104
Media de valores medios cada 5M	3.5091
Valor medio acumulado de datos cada 5M	3.5106

Puede observarse que todas las medias son iguales al orden del milímetro, por lo tanto el nivel medio del mar (sin correcciones) de mayo de 2007 a diciembre de 2011 respecto del cero del mareógrafo es de **3,510 m**.

Las medias mensuales ponen de manifiesto una anomalía producida en los meses de noviembre de 2009 a febrero de 2010. En

estos meses se obtienen residuos de 149, 147, 49 y 120 milímetros respecto del valor medio de 3.509 metros. Se han revisado las circunstancias de los registros, el funcionamiento del mareógrafo, los parámetros meteorológicos de esas fechas, las variaciones de la marea astronómica, los aportes de agua, etc., pero no se han encontrado las causas de estas anomalías. Lo que si se ha visto en la bibliografía consultada (Sveet et al 2009) es que este suceso no es único en nuestro mareógrafo (Pasaia) sino que anomalías parecidas a las nuestras se han producido en otros lugares de la Tierra y en otras fechas, también sin una explicación plausible.

Este fenómeno vuelve a repetirse en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2010 y en noviembre de 2011 con diferencias de 109, 164, 92 y 81 milímetros respectivamente respecto del valor medio de 3.509 metros. Esta anomalía se ve claramente en la Figura 7. La Figura 8 muestra el nivel del mar acumulado.

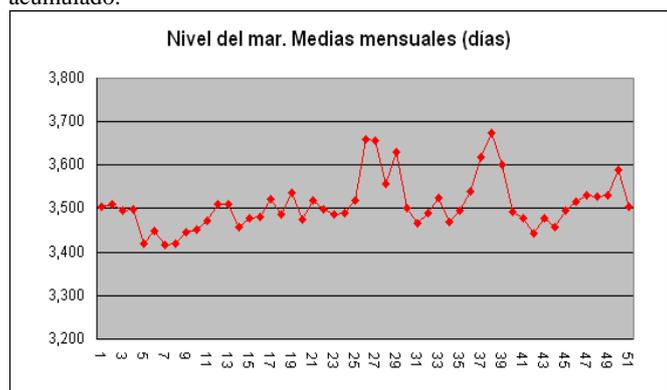


Figura 7 - Medias mensuales (Monthly averages)

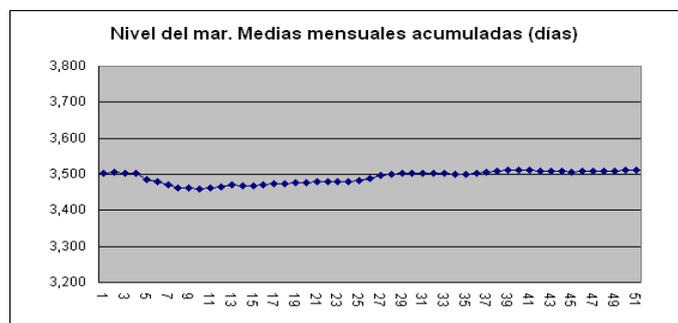


Figura 8 - Media acumulada (Accumulated average)

5. CONCLUSIONES

Se ha descrito la estación mareográfica de Pasaia constituida por un receptor GNSS permanente y un mareógrafo de presión. Se ha informado de los resultados obtenidos con más de cuatro años de observaciones continuas del nivel del mar y coordenadas GPS. Han sido analizados los enlaces por nivelación de precisión entre la red de TGBMs, el cero del mareógrafo y la antena GNSS. También se ha presentado la estadística de los resultados obtenidos y las gráficas correspondientes. Estos resultados muestran que la estación GNSS/TG está completamente operativa y podrán obtenerse resultados definitivos cuando se disponga de suficientes años de datos de observación.

6. REFERENCIAS

- Dach, R. Hugentobler, U.; Fridez, P.; Michael M. (2007): "BERNESE GPS SOFTWARE VERSION 5.0". Astronomical Institute, University of Bern.
- García-Cañada, L. and Sevilla, M. J. (2006): Monitoring crustal movements and sea level in Lanzarote. *Geodetic Monitoring: from Geophysical to Geodetic Roles IAG / Springer Series*, vol. 131. pp. 160-165. Springer Verlag.
- Niell, A.E. (1996). "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths." *J. Geophys. Res.*101(B2), 227-3246.
- Sevilla, M. J., Martín, A and Zurutuza, J (2010): GPS Networks for deformation monitoring in Canarian Archipelago. 15th General Assembly of WEGENER Bogazici University. Istanbul, Turkey.
- Sevilla M. J. and Romero, P. (1991): Ground deformation control by statistical analysis of a Geodetic network in the caldera of Teide. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 47 pp. 65-74. Elsevier Sc. Pub. Amsterdam.
- Sevilla, M. J., J. Zurutuza and A. Martín (2011): Three Years of Tide Gauge Measurements in the Pasajes Harbou. FIG Working Week Bridging the Gap between Cultures Marrakech pp 1-12.
- Sweet, W., Zervas, C. and Gill, S. (2009): Elevated East Coast Sea Levels Anomaly, NOAA Technical Report NOS CO-OPS 051.
- Valbuena J. L., Vara, M. D., Soriano, M. D. Díaz, G. R. y Sevilla, M. J. (1997): Instrumentación y metodología empleadas en las técnicas altimétricas clásicas. *Topografía y Cartografía*, Vol. XIII N° 74 y 75, pp. 2-19, Madrid.
- Vélez, E., Zurutuza, J., Sevilla, M. J., Galparsoro, I y Antzizar, A. (2008): Estación Mereográfica del puerto de Pasajes. 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar 11-14 febrero de 2008.
- Zurutuza, J. and Sevilla, M. J. (2006). Deformations monitoring by integrating local and global reference systems. *Geodetic Monitoring: from Geophysical to Geodetic Roles IAG / Springer Series*, vol. 131. pp. 48-55 Springer Verlag.
- Zurutuza, J. and Sevilla, M. J. (2007): Influence of the Cutoff Angle and the Bearing in High-Precision GPS Vector Determination. *Journal of Surveying Engineering*. Vol 133, n° 2, pp. 90-94.
- Zurutuza, J., M. J. Sevilla and M. Elorza (2007): AutoGNSS: A new GPS Vector Processing Software. IUGG 2007 General Assembly. Perugia 2-12 julio de 2007.
- Zurutuza, J. and M. J. Sevilla (2009): Dependence of the GPS high-precision solutions on the considered tropospheric model. Spain-China Symposium on Geophysical & Geochemical Geosystems. Zaragoza junio 2009.

Aplicación PPP para la determinación de Posiciones y Velocidades

PPP Application for Positions and Velocity Estimations

J. Zurutuza⁽¹⁾, Z. Agea⁽²⁾, Miguel J. Sevilla⁽³⁾, A. Martín⁽³⁾ and M. C. Ruiz⁽⁴⁾

⁽¹⁾Dpto. de Geodesia Aplicada. Sociedad de Ciencias ARANZADI. Guipúzcoa. geodesia@aranzadi-zientziak.org

⁽²⁾Escuela Politécnica Superior. Universidad de Jaén. zuritaa@msn.com

⁽³⁾Astronomía y Geodesia. Facultad de Matemáticas. Universidad Complutense. Madrid sevilla@mat.ucm.es

⁽⁴⁾GEOLan Donosti SL. Portuetxe 53B, Of. 314 - 20.018 San Sebastián. admin.@geolandonosti.com

SUMMARY

GPS Precise Point Positioning (PPP) has become, over the last years, an excellent alternative to the double-differences-based GPS models. The high accuracies achieved in daily sessions, as well as the computation speed make PPP an option that many Analysis Centers (ACs) have considered to be given as an extra service. However, most PPP processing Software is protected by copyright laws and “online” services can not be provided. This paper shows an implementation of an online-PPP processing Service which is based in the GNU LGPL GPS-Toolkit. To check the software, velocities of the four station of the Active Gipuzkoa Network are computed and the results are checked with the Bernese solutions.

1. INTRODUCCIÓN

El *Precise Point Positioning* (PPP) se ha convertido en los últimos años en una excelente alternativa a los métodos GPS diferenciales basados en el modelo matemático de las dobles diferencias (DDs). Las ventajas, desde el punto de vista práctico, son muchas, ya que el tiempo de procesamiento de soluciones diarias es de escasos segundos frente a los varios minutos, incluso horas de los métodos diferenciales. Además, no es preciso generar ficheros intermedios de sincronización de relojes, generación de dobles diferencias, ... , con el consiguiente ahorro de espacio de disco y memoria. En este trabajo se presenta una solución PPP basada en la GPS-Toolkit (GPSTk) (B. Tolman et al., 2004), que permite su distribución y uso en las circunstancias definidas por la GNU LGPL. La aplicación desarrollada es un excelente medio para verificar soluciones y observaciones con rapidez, sin olvidar que no puede ser comparada con las soluciones PPP de otros organismos. Cabe reseñarse que el objetivo inicial de la aplicación desarrollada no es el de proporcionar soluciones del orden del centímetro, sino producir soluciones en torno a los 5 cm o mejores.

Para validar la calidad de los resultados, se comparan las series obtenidas con PPP de las 4 estaciones de la Red GNSS de Gipuzkoa con las soluciones obtenidas con Bernese 5.0 (BPE) (Dach et al., 2007). Es importante remarcar que con BPE se han procesado los datos utilizando un muestreo de 30 s, mientras que para obtener resultados PPP se han utilizado efemérides IGS y el intervalo de muestreo ha sido de 900 s para evitar la interpolación de los relojes de los satélites.

2. GPSTk

Tal y como describe en la propia web de GPSTk (www.gpstk.org), el Proyecto GPSTk tiene por objeto proporcionar una librería y un conjunto de aplicaciones para el procesamiento GNSS de forma que los investigadores puedan centrarse en la investigación, y no en la programación, con herramientas de garantía y robustas. Por ello, GPSTk se desarrolla en C++ ANSI y es portable prácticamente a cualquier plataforma. La programación está orientada a objetos, el código es modular, extensible y, por tanto, de fácil mantenimiento.

GPSTk se basa en una librería general y otras auxiliares además de un conjunto adicional de aplicaciones. De esta forma, se proporcionan numerosas aplicaciones para facilitar el procesamiento y preprocesamiento de observaciones GNSS. Además, se proporcionan herramientas para llevar a cabo tareas relacionadas con los relojes, importación de datos en formatos generales (RINEX, ANTEX, SP3,...), que son la base para producir aplicaciones más complejas.

GPSTk está patrocinado por el *Space and Geophysics Laboratory*, del *Applied Research Laboratories* de la Universidad de Texas en Austin (ARL:UT), que inició sus actividades antes del

lanzamiento del primer satélite GPS, en 1978. En 2003, el equipo de (ARL:UT) decidió desarrollar las herramientas en código abierto. En la actualidad, GPSTk es el resultado de la colaboración de numerosos investigadores de todo el mundo (Renfro et al. 2005; Harris et al. 2007). La aplicación PPP desarrollada se basa en la metodología expuesta en (Salazar et al., 2009).

3. GPSTk-PPP.

Tal y como ha sido mencionado, la base de cálculo es GPSTk. Además, son necesarias herramientas adicionales, como es el caso de *wget*, *gunzip* y *jam*, para ayudar a compilar el software desarrollado (en c++) junto con las librerías. Para facilitar la obtención de los datos necesarios para el cálculo.

Así, el procesamiento se resume en:

1. RINEX (Gurtner, 1998): Obtención de las épocas de observación (inicio y fin), coordenadas, excentricidades de la antena y modelo de ésta.
2. Preparación de los datos: obtención de los ficheros de efemérides, cálculo de la posición del Polo (para la corrección de marea polar), ficheros DCB (aunque no se aplica esta corrección).
3. Cálculo y resultados finales.

Para entender el funcionamiento y la implantación de GPSTk, se recomienda (Salazar et al., 2009). Del procedimiento indicado en dicha publicación, se extrae la metodología de cálculo mostrada a continuación y que se lleva a cabo época a época (entre paréntesis se detalla la clase de la librería GPSTk utilizada):

- Verificar si están los observables necesarios (*RequireObservables.hpp*).
- Detección de los saltos de ciclo con L_3 y Melbourne-Wubben (*ComputeLinear.hpp*, *LICSDetector2.hpp* y *MWCSDetector.hpp*).
- Control de las órbitas (*SatArcMarker.hpp*).
- Remuestreo, en caso de que los intervalos de las órbitas y relojes no coincidan con los definidos (*Decimate.hpp*).
- Análisis inicial de la señal recibida (*BasicModel.hpp*).
- Eliminación de los satélites en eclipse (*EclipsedSatFilter.hpp*).
- Retardo por variación de la gravedad a lo largo de la trayectoria de la señal (*GravitationalDelay.hpp*).
- Cálculo del efecto por la variación de los centros de fase del satélite (*ComputeSatPCenter.hpp*).
- Correcciones debidas a la ubicación, como son mareas, carga oceánica, variaciones de los centros de fase,... (*CorrectObservables.hpp*).
- Corrección por polaridad de la señal (*ComputeWindUp.hpp*).
- Corrección troposférica (*ComputeTropModel.hpp*).
- Cálculo con combinaciones lineales libres de ionosfera de código (P_3) y fase (L_3) (*ComputeLinear.hpp*).

- Detección inicial de observaciones groseras a partir de las medidas P_3 (*SimpleFilter.hpp*).
- Alinear medidas de código y fase, manteniendo la naturaleza de las ambigüedades de fase (*PhaseCodeAlignment.hpp*).
- Cálculo de residuos de código y fase (*ComputeLinear.hpp*).
- Cálculo de los DOPs (*ComputeDOP.hpp*).
- Resolución del sistema de ecuaciones con filtrado Kalman Extendido, en función de las opciones activadas (*SolverPPP.hpp*).
- Reprocesamiento PPP, en caso de habilitar el modo “Forward-backward” (*SolverPPFB.hpp*).

A la par que se ejecuta el programa, se crean una serie de “scripts” para facilitar la obtención de los datos necesarios. Por ejemplo, para la semana GPS 1656, día 5, el *script* ejecutado sería:

```
#!/bin/sh
echo Downloading needed SP3 files...
if [ -f igs16565.sp3 ]
then
echo igs16565.sp3 file already exists in folder. Will not be retrieved.
else
wget ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/1656/igs16565.sp3.Z
gunzip igs16565.sp3.Z
fi
echo Retrieving the necessary .DCB file from CODE.
if [ -f P1C11110.DCB ]
then
echo P1C11110.DCB file already exists in folder. Will not be retrieved.
else
wget ftp://ftp.unibe.ch/aibw/CODE/2011/P1C11110.DCB.Z
gunzip P1C11110.DCB.Z
fi
```

Como puede apreciarse, lo primero que hace el script es determinar si el fichero existe (efemérides, del servidor de *cddis* y DCB, del *CODE*), en cuyo caso no lo descarga. Este tipo de procedimiento es importante para procesar grandes cantidades de datos. Respecto al reloj del receptor, éste se modela como “ruido blanco”; las coordenadas como constantes o ruido blanco, según sea el modelo estático o cinemático y, finalmente, la componente húmeda del retardo troposférico vertical, como “random walk”.

Una vez a la semana, los ficheros utilizados se actualizan mediante el comando de Linux “*cron*”. Entre éstos, destacan:

```
wget -t 1 ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs08.atx
wget -t 1 ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs05.atx
wget -t 1 ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs_01.atx
wget -t 1 http://maia.usno.navy.mil/ser7/finals2000A.all
```

De esta forma la aplicación dispone siempre de la información más actualizada. La aplicación permite introducir datos de carga oceánica. Para ello, se adjunta un link a la web del Observatorio Chalmers de Geodesia Espacial de Onsala (<http://froste.oso.chalmers.se/loading/>) para que se obtengan las constantes armónicas en formato BLQ y se introduzcan en la página de cálculo. Dentro de las opciones de cálculo, se puede elegir entre:

- Definir el intervalo de muestreo (por defecto, 900 s).
- Procesamiento “Forward-backward”, es decir, procesar los datos RINEX y volver varios ciclos atrás para agilizar la convergencia.
- Procesar en modo cinemático.

Además de estas opciones en la web, en modo local se puede definir la máscara de elevación y el tipo de salida (relativa o absoluta). A la aplicación, que es totalmente gratuita, se accede a través del link:

http://www.geolandonosti.com/index.php?option=com_content&task=view&id=78&Itemid=159&lang=es (figura 1, el 25/04/2012).

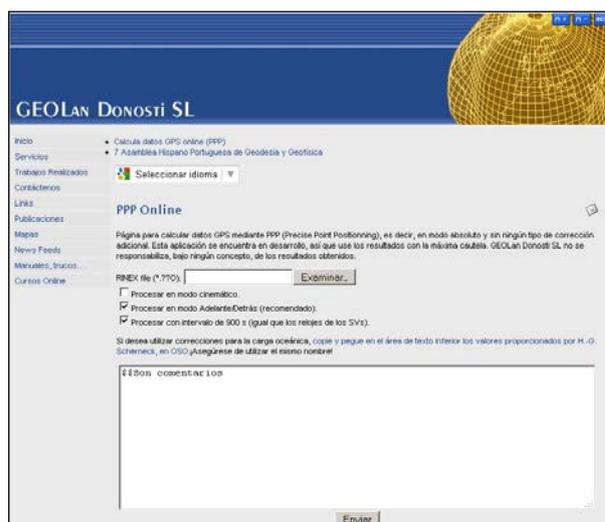


Figura 1 – GPSTk-PPP “online” (“online” GPSTk-PPP).

Las salidas que el programa produce son una gráfica, bajo googlemaps, y un fichero ASCII con información detallada de las coordenadas época a época.

El cálculo de un fichero de 24 horas a 900 s de intervalo dura unos 30 s.

Como contrapartida, PPP utiliza inicialmente medidas de código, por lo que el tiempo de convergencia hasta tener soluciones óptimas es de unas 2-3 horas. En definitiva, la precisión PPP se obtiene con el cambio de la constelación observada.

4. PARÁMETROS PARA EL PROCESAMIENTO

El **procesamiento PPP**, pese a parecer un proceso trivial, es una tarea nada sencilla que requiere, además, de numerosos modelos y datos adicionales (Kouba and Heroux, 2001). Tal es el caso de las efemérides precisas, estados de los relojes de los satélites,... y todos los efectos que en modelos diferenciales son eliminados, como ha sido puesto anteriormente de manifiesto. Así, el procesamiento GPSTk-PPP se resume en:

- Intervalo de muestreo: 900 s (al igual que efemérides y relojes IGS),
- Atmósfera:
 - Ionosfera: prácticamente eliminada con L_3 ,
 - Troposfera: modelada con NMF. En el ajuste se aplica el modelo “random walk”,
- Reloj del receptor: modelado como ruido blanco,
- Procesamiento: forward-backward para una más rápida convergencia de las soluciones (aunque no necesaria en sesiones diarias).
- Sistema: Sólo GPS.
- Correcciones adicionales: carga oceánica, mareas terrestres,...
- Precisión a obtener: en torno a los 2 cm en cada componente.

Respecto a los **métodos diferenciales**, el procesamiento se lleva a cabo con BPE y puede ser resumido en:

- Intervalo de muestreo: 30 s,
- Atmósfera:
 - Ionosfera: prácticamente eliminada con L_3 ,
 - Troposfera: NMF, estimada cada 2 horas,
- Sistema: Sólo GPS.
- Estaciones Fijas: IGS (EBRE, BRUS, VILL, YEBE).
- Efemérides: precisas IGS.
- Correcciones adicionales: carga oceánica, mareas terrestres,...
- Dobles diferencias correladas.
- Precisión a obtener a priori: en torno a 1.5 cm en cada componente.

5. CONTROL DE CALIDAD PPP: ESTACIONES IGS

Hay que tener presente que se trata de una aplicación gratuita para ser ejecutada “online” y que, por tanto, las precisiones a obtener no pueden ser comparadas con las proporcionadas por otro software de pago o científico.

Para realizar el control de calidad de las soluciones PPP se han calculado las coordenadas de 5 estaciones IGS durante 9 días en el Marco ITRF2005. Dichas estaciones son: BRUS, HERT, MATE, VILL, YEBE y ZIMM. La época considerada ha sido 2010.5 siendo, por tanto, Marco ITRF2005 (IGS05 para las efemérides).

Las diferencias son inferiores a los 2 cm para la planimetría (N, E) (en torno al cm en casi todas las soluciones), mientras que para la componente altimétrica (U) las precisiones son menores, como cabía esperar, estando en todos los casos por debajo de los 5 cm y, la mayoría de las veces, en torno a los 2-3 cm (Figura 2). Las estadísticas de las discrepancias entre los valores calculados con GPSTk-PPP y las coordenadas en época 2007.5 de varias estaciones IGS son:

Tabla 1 – Diferencias PPP-IGS (ITRF2005, época 2007.5) (PPP – IGS differences in ITRF2005, epoch 2007.5).

	N (m)	E (m)	U (m)
Media	-0.0006	-0.0038	-0.0203
Desv. Est.	0.0041	0.0056	0.0106
Mínimo	-0.0165	-0.0187	-0.0444
Máximo	0.0067	0.0127	0.0280

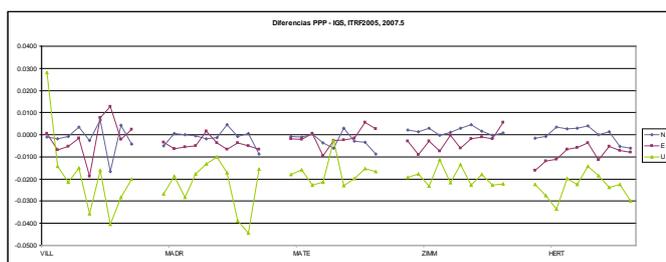


Figura 2 - Control de Calidad PPP NEU (NEU PPP Quality Check).

Con estos resultados (tabla 1 y figura 2) se dan por buenas las soluciones obtenidas con la solución GPSTk-PPP utilizada, ya que están por debajo del umbral fijado inicialmente, siendo los resultados totalmente coherentes con las precisiones obtenidas por otros autores (Kouba and Heroux, 2001). Sin embargo, a diferencia de los resultados PPP obtenidos por los citados autores, en nuestro caso el signo de la diferencia es siempre el mismo, lo que hace pensar en un sesgo en las soluciones. Este hecho ha de ser objeto de un mayor análisis, que será llevado a cabo en un futuro próximo, ya que pese a que la materialización del datum mediante PPP e ITRF puede estar sesgada, es poco probable que en todas las estaciones chequeadas el signo sea siempre el mismo. Hay que mencionar que las coordenadas se han comparado en la época 2010.5, pero se refieren a 2000.0, por lo cual puede haber discrepancias por la transmisión de las velocidades.

6. ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES Y COORDENADAS MEDIANTE PPP

La utilización del PPP para diversos fines además de posicionamiento, como el análisis de la señal, ya ha sido puesta de manifiesto en trabajos como (Rodrigo F. Leandro et. al., 2011). En nuestro caso, para llevar a cabo la estimación de las coordenadas y de las velocidades se han utilizado datos de 2010. El motivo se debe a que en 2010 no se ha producido cambio de Marco de Referencia (Figuras 3 a 6, en incrementos de Coordenadas Cartesianas). Adicionalmente, se ha considerado 2011, a partir de la semana GPS 1632 (17 de Abril de 2011), para ver el impacto del cambio de Marco de Referencia en las soluciones finales. Desde la citada fecha

hasta final de año se han calculado las series temporales con BPE para verificar los resultados PPP.

Las estaciones utilizadas son las de la Red GNSS de Gipuzkoa (Figura 3). Los resultados (velocidades y origen) obtenidos para 2010 para las Coordenadas Cartesianas se adjuntan en la tabla 1. Las soluciones muestran, de manera evidente, las tendencias de cada una de las estaciones. Para obtener los resultados mostrados se ha procedido como sigue:

1. Ajuste de una recta a cada componente (X, Y, Z),
2. Eliminación de aquellos residuales superiores a 1.5 cm, en valor absoluto, respecto a la recta ajustada,
3. Ajustar una nueva recta hasta no tener residuos de 1.5 cm.

Tabla 2 - Velocidades PPP 2010/01/01 a 2011/04/16 (2010/01/01 to 2011/04/16 PPP Velocities).

	X		Y		Z	
	V_X (m/a)	σ_{VX}	V_Y (m/a)	σ_{VY}	V_Z (m/a)	σ_{VZ}
ELGE	-0.0107	0.0006	0.0207	0.0004	0.0122	0.0005
IGEL	-0.0102	0.0008	0.0205	0.0006	0.0127	0.0007
LAZK	-0.0068	0.0007	0.0208	0.0005	0.0150	0.0006
PASA	-0.0114	0.0007	0.0198	0.0006	0.0110	0.0006

Como puede apreciarse en la Tabla 2, los resultados son muy coherentes entre ellos. Destacan los bajos errores medios cuadráticos obtenidos en el ajuste para todas las componentes. Además, puede apreciarse que para todas las estaciones los resultados son muy similares salvo para LAZK (componente X).



Figura 3 - Red GNSS Activa de Gipuzkoa (Active GNSS Network of Gipuzkoa).

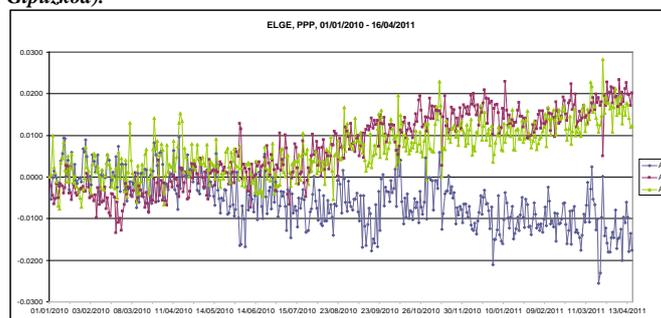


Figura 4 - Serie Temporal PPP de ELGE (ELGE PPP Time Series).

A la vista de las figuras 4 a 7, puede verse que en algunas de las estaciones (IGEL, ELGE y PASA) los efectos estacionales y los residuos son más elevados que en la restante estación considerada. Recordemos que en verano la cantidad de vapor de agua es superior al invierno, lo que parece reflejarse en los resultados. El hecho de la cercanía al mar y su baja cota hacen que el impacto del efecto troposférico sea máximo en estas estaciones y, como es sabido, en los modelos de PPP, este efecto no es eliminado por ninguna técnica y ha de ser estimado. Este puede ser, sin duda alguna, el mayor problema del análisis de series con PPP.

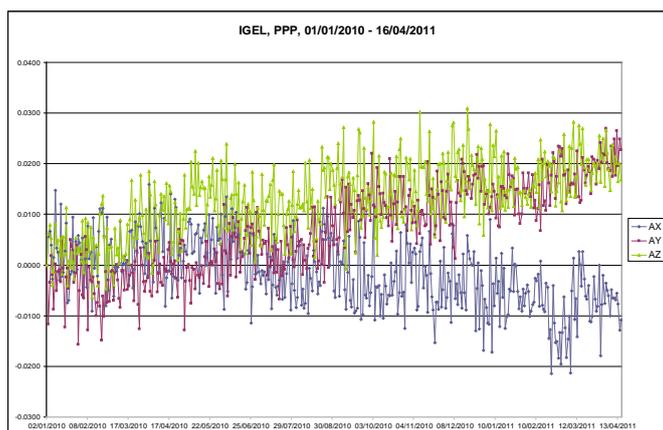


Figura 5 - Serie Temporal PPP de IGEL (IGEL PPP Time Series).

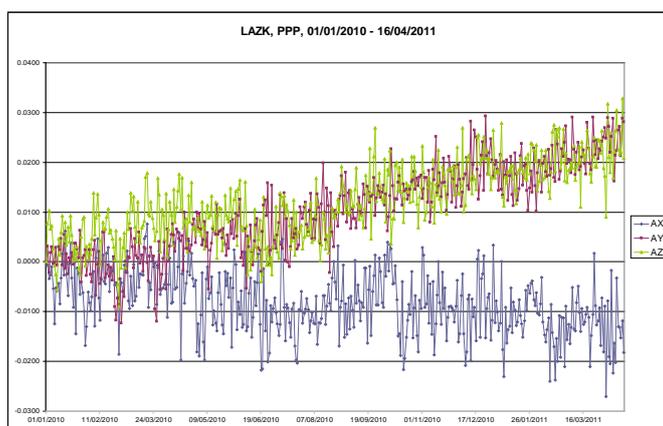


Figura 6 - Serie Temporal PPP de LAZK (LAZK PPP Time Series).

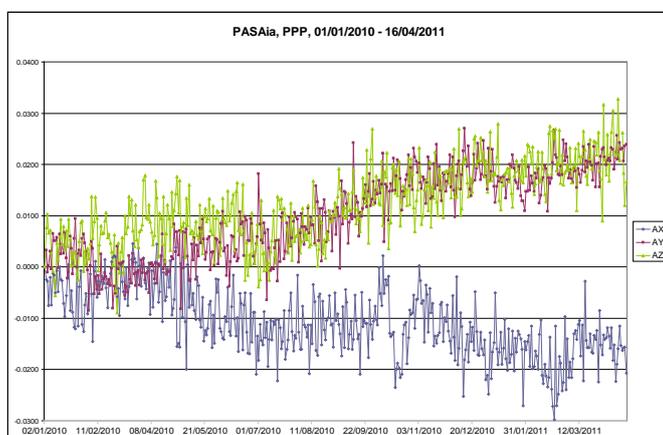


Figura 7 - Serie Temporal PPP de PASA (PASA PPP Time Series).

7. IMPACTO DE LOS CAMBIOS DE DATUM Y ANTENA EN LAS SOLUCIONES PPP

Con objeto de mostrar la sensibilidad de las soluciones PPP obtenidas, se adjunta, en este apartado, el caso de la estación de PASA. En dicha estación, durante 2011, se cambió la antena GNSS. Además, como es bien sabido, previamente (17 de Abril de 2011), se cambió el Marco de referencia de las efemérides de IGS05 a IGS08. En la figura 8 se muestran las diferencias entre la primera época y las soluciones diarias. Las fechas de cambios son:

- 17 de Abril de 2011 (Cambio de Marco: IGS05->IGS08),
- 6 de Junio de 2011 (Cambio de antena: LEIAT504GG LEIS → LEIAR25.R4 LEIT)

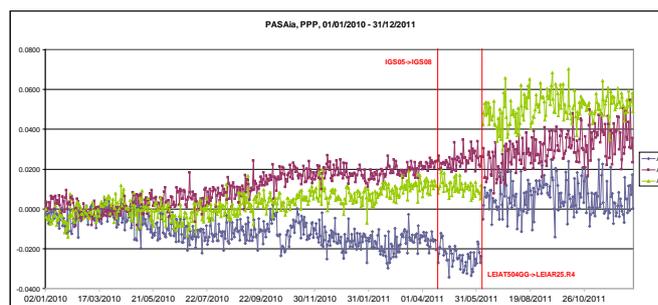


Figura 8 - Impacto en PPP de cambio de datum y antena en PASA (PASA PPP impact in datum and antenna switch).

En la figura 8 se muestra que el impacto del cambio de datum es prácticamente inapreciable. Los resultados muestran una ligera variación en la componente Z que es del orden de magnitud descrito en [IGSMAIL-6354] (5.8 mm, en época 2005.0), por lo que la sensibilidad de GPSTk-PPP es muy elevada. Bien es cierto que este efecto, dada su pequeña magnitud, podría pasar como efecto estacional. Esto es lo que cabía esperar, ya que el cambio IGS05->IGS08 es muy leve; ambos Marcos están obtenidos con PCV absolutos y las escalas de ambos son del mismo orden. Sin embargo, sí es importante el cambio de antena producido. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de referir las estaciones GNSS a referencias externas, como es el caso de PASA, con 4 señales adicionales. Por ello, con objeto de no tener que modificar las coordenadas con cada cambio de antena, es preciso referir el ARP (*Antenna Reference Point*) a señales excéntricas. Además, con la nueva antena se aprecian residuos de mayor amplitud.

8. ESTIMACIÓN DE COORDENADAS MEDIANTE MÉTODOS DIFERENCIALES

En este caso, se han procesado las coordenadas de las estaciones con BPE desde 2010.0 hasta la primera semana de Febrero de 2011 con el fin de obtener datos en las mismas épocas que con PPP. En esta fase es crucial la determinación de las estaciones permanentes para el ajuste de la red y fijación de las ambigüedades (Zurutuza et al., 2011). En la Figura 9 se muestran las estaciones de referencia utilizadas (en azul), mientras que en rojo se detallan las estaciones procesadas diariamente en la Red Activa de Gipuzkoa.

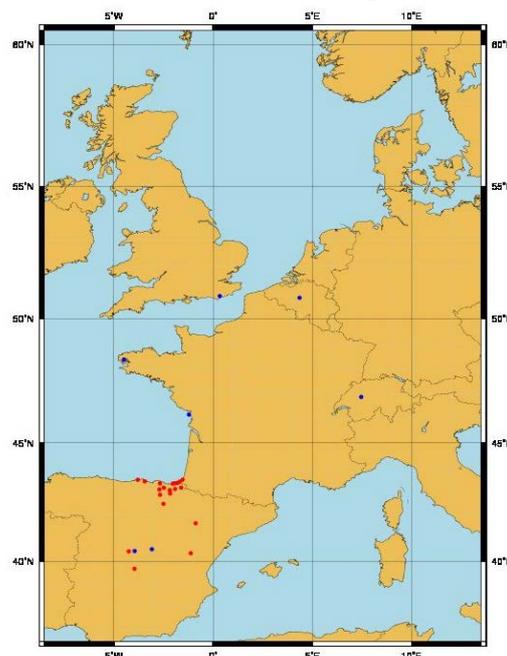


Figura 9 - Estaciones procesadas a diario con BPE (Daily processed Stations with BPE).

En las figuras 10 a 13 se muestran las soluciones semanales obtenidas con BPE, mientras que la tabla 3 muestra las velocidades estimadas a partir de estas soluciones. Es importante destacar que las estimaciones son muy similares a las obtenidas con GPSTK-PPP.

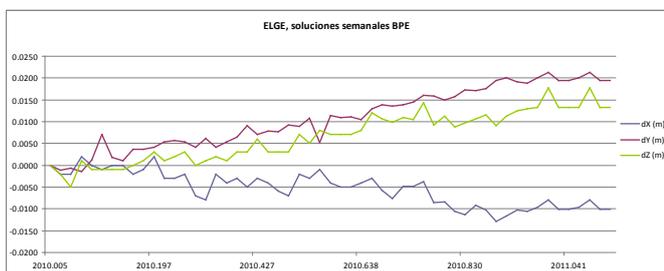


Figura 10 - Serie Temporal BPE de ELGE (ELGE BPE Time Series).

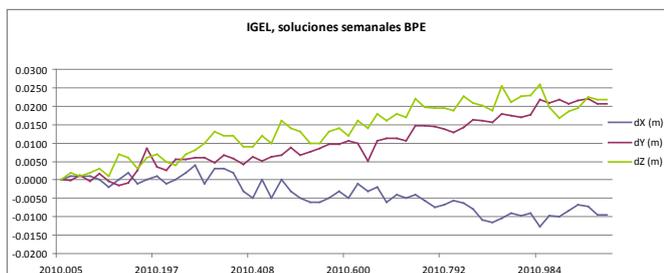


Figura 11 - Serie Temporal BPE de IGEL (IGEL BPE Time Series).

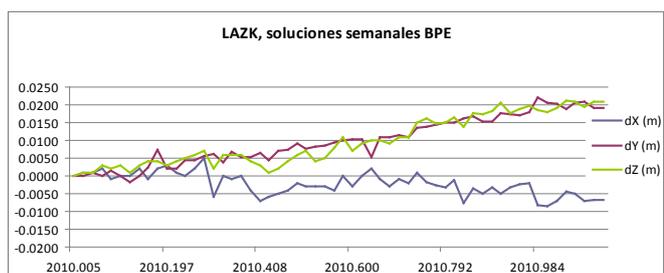


Figura 12 - Serie Temporal BPE de LAZK (LAZK BPE Time Series).

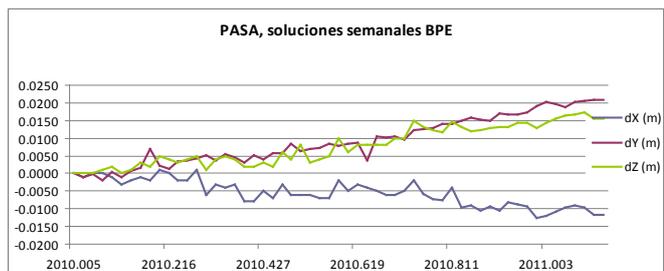


Figura 13 - Serie Temporal BPE de PASA (PASA BPE Time Series).

Como puede apreciarse en las figuras 10 a 13, las soluciones semanales obtenidas con BPE son de muy elevada calidad. Hay que tener en cuenta que dichas soluciones se basan en las soluciones diarias que son ajustadas. Por ello, es habitual que los residuos sean bajos.

Tabla 3 - Velocidades BPE 2010/01/01 a 2011/04/16 (2010/01/01 to 2011/04/16 BPE Velocities).

	X		Y		Z	
	V_x (m/a)	σ_{VX}	V_y (m/a)	σ_{VY}	V_z (m/a)	σ_{VZ}
ELGE	-0.0100	0.0008	0.0201	0.0006	0.0161	0.0007
IGEL	-0.0114	0.0009	0.0200	0.0007	0.0201	0.0010
LAZK	-0.0063	0.0009	0.0198	0.0006	0.0197	0.0009
PASA	-0.0097	0.0008	0.0201	0.0007	0.0157	0.0007

Es reseñable la diferencia en la velocidad obtenida para las distintas estaciones, sobre todo, para la componente Z de IGEL. Estar rodeada de sensores meteorológicos puede, sin duda, afectar a la calidad de sus observaciones.

9. DIFERENCIAS ENTRE LAS ESTIMACIONES BPE Y LAS SOLUCIONES DIARIAS PPP

En este apartado se adjuntan las discrepancias entre las coordenadas obtenidas a partir de las soluciones BPE (recta de regresión a partir de las soluciones semanales) para cada solución PPP de cada una de las estaciones consideradas.

En este caso (figuras 14 a 17), las diferencias se adjuntan en coordenadas locales NEU (Norte, Este y Altura). El motivo de adjuntar las componentes locales es para ver el efecto en la altimetría y planimetría, ya que en las coordenadas cartesianas es más complejo de ver el efecto.

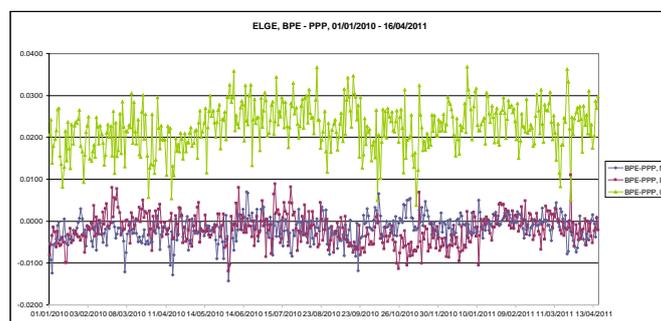


Figura 14 - Diferencia BPE Semanal – PPP diario en ELGE (BPE Weekly – Daily PPP Differences in ELGE).

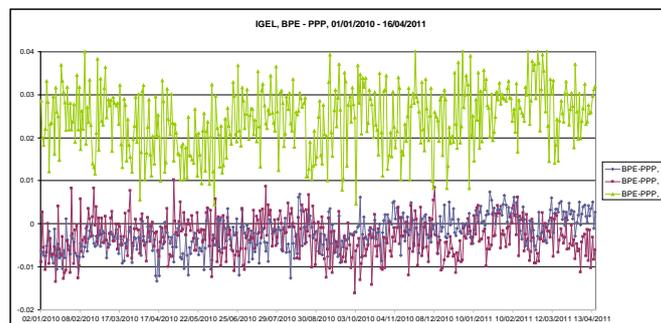


Figura 15 - Diferencia BPE Semanal – PPP diario en IGEL (BPE Weekly – Daily PPP Differences in IGEL).

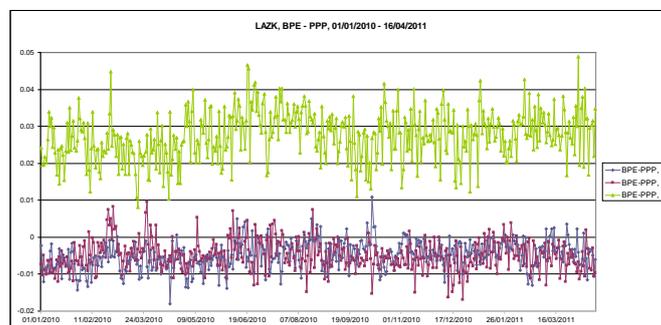


Figura 16 - Diferencia BPE Semanal – PPP diario en LAZK (BPE Weekly – Daily PPP Differences in LAZK).

En todas las figuras puede apreciarse que las discrepancias planimétricas son prácticamente nulas mientras que las altimétricas rondan los 2-3 cm, suficiente para la gran mayoría de aplicaciones topográficas.

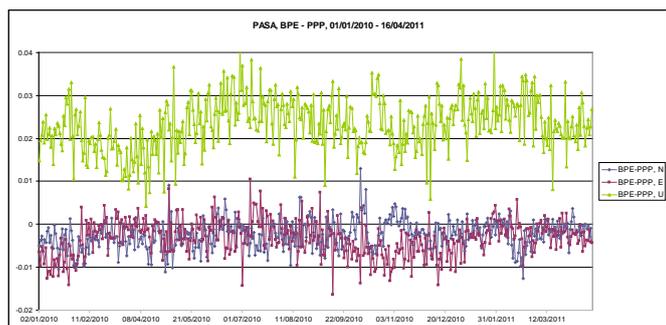


Figura 17 – Diferencia BPE Semanal – PPP diario en PASA (BPE Weekly – Daily PPP Differences in PASA).

Las estadísticas de las discrepancias, en coordenadas locales (NEU) se adjuntan en las tablas 4 y 5.

Tabla 4 - Estadísticas BPE Semanal – PPP diario en ELGE e IGEL (BPE Weekly – Daily PPP Statistics in ELGE and IGEL).

	ELGE			IGEL		
	N (m)	E (m)	U (m)	N (m)	E (m)	U (m)
Media	-0.002	-0.002	0.022	-0.002	-0.003	0.024
Desv. Est.	0.003	0.004	0.006	0.004	0.005	0.008
Mínimo	-0.014	-0.012	0.004	-0.013	-0.016	0.004
Máximo	0.007	0.011	0.037	0.007	0.010	0.042

Tabla 5 - Estadísticas BPE Semanal – PPP diario en LAZK y PASA (BPE Weekly – Daily PPP Statistics in LAZK and PASA).

	LAZK			PASA		
	N (m)	E (m)	U (m)	N (m)	E (m)	U (m)
Media	-0.005	-0.005	0.027	-0.002	-0.003	0.023
Desv. Est.	0.004	0.004	0.007	0.003	0.004	0.006
Mínimo	-0.018	-0.017	0.008	-0.013	-0.016	0.004
Máximo	0.011	0.010	0.049	0.013	0.011	0.043

Tal y como se aprecia en las figuras 14 a 17 y se detalla en las tablas 4 y 5, las desviaciones en los valores planimétricos (N, E) de GPSTk-PPP respecto de la estimación BPE son mínimas. Sin embargo, se aprecian desviaciones en cota (U) que varían desde 0.022 m en ELGE a 0.027 m en LAZK. Al tratarse de medias aritméticas, estos valores implican la existencia de soluciones sesgadas en la componente altimétrica. Dicho esto, hay que tener en cuenta que las diferencias son inferiores a los 3 cm, lo cual quiere decir que la precisión obtenida es algo inferior a las soluciones diarias; recordemos que, por ejemplo, en BPE se impone un límite de 1.5 cm en cada componente planimétrica y hasta 3.0 cm en la altimétrica para determinar las soluciones semanales (Dach et al., 2007).

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los sesgos detectados en las coordenadas pueden deberse a diversos motivos, siendo el más probable el modelado de la troposfera. En soluciones diarias la troposfera se modela y puede ser calculada en modo relativo (recomendado para distancias cortas), mientras que en PPP no es posible utilizar este modelo. Cualquier circunstancia afecta a la parte húmeda de la troposfera que es, en definitiva, la principal responsable de este tipo de pequeñas variaciones por el difícil modelado y rápida variabilidad del vapor de agua (Zurutuza et al., 2007 y Zurutuza et al., 2011). Es de esperar, por tanto, que con los nuevos modelos de troposfera los resultados obtenidos con GPSTk-PPP se vean mejorados.

Otra posible causa de error puede deberse a la determinación de los estados de los relojes de los receptores, que es un factor crítico en PPP. Al procesar datos cada 900 s se evita la interpolación de los relojes de los satélites, por lo que el reloj a estimar es el del receptor de tierra. En los modelos de dobles diferencias, este hecho se modela sin dificultad, pero en PPP el tratamiento es más complejo y puede producir errores. Hay que añadir que las estaciones GNSS utilizadas

en este estudio (ELGE, IGEL, LAZK y PASA) no disponen de observaciones P1, por lo que hay que utilizar C1 (C/A) que, recordemos, es 10 veces menos precisa que P1. Este hecho puede afectar también a los resultados finales.

Si bien es cierto que las discrepancias en la estimación de velocidades son inadmisibles, sí es posible obtener excelentes resultados en la estimación de coordenadas dentro de intervalo utilizado para los cálculos. Hay que tener presente que un año es un período de tiempo muy reducido y los efectos estacionales pueden ser muy relevantes para obtener un resultado más satisfactorio.

Si se analizan las componentes en las que se producen las diferencias máximas, se puede ver cómo el mayor impacto se da en las altitudes de los puntos. Por tanto, sí es posible utilizar la solución GPSTk-PPP para estimar velocidades planimétricas en cortos intervalos de tiempo. Con altimetría, por otra parte, hay que tener mucha cautela. Discrepancias de 2, e incluso 3 cm en altitud son totalmente admisibles para los fines para los que la aplicación se ha desarrollado, incluso para chequear coordenadas de redes GNSS.

Respecto a las estimaciones de las velocidades, a la vista de las tablas 2 y 3, es posible apreciar las similitudes en las velocidades estimadas en modo diferencial y GPSTk-PPP. Es importante reseñar que la estación en la que más discrepancia se halla es IGEL y es, también, en la que los errores medios cuadráticos son más elevados; esto mismo sucede en el cálculo con BPE (figura 11). Si se comparan las componentes cartesianas, es posible apreciar que las mayores discrepancias se producen en la componente Z, en la que se advierten diferencias, en el peor caso, de hasta 7 mm/año en IGEL. En X e Y, sin embargo, las discrepancias entre las soluciones GPSTk-PPP y Bernese (semanales) son prácticamente del orden del milímetro. Es decir, podrían utilizarse las estimaciones de las velocidades en función de la precisión requerida, pero siendo conscientes de que una estimación a 10 años podría tener un error de 7 cm que puede ser, en la mayoría de los casos, insuficiente. Otra solución sería procesar anualmente las velocidades (duración estimada de unas 3 horas), de forma que los errores pueden quedar acotados en límites muy precisos.

11. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, se puede concluir este trabajo diciendo que, en primer lugar, la aplicación desarrollada cumple su objetivo y proporciona resultados con garantías. Se ha mostrado como, un usuario que desee dar coordenadas precisas, con 2-3 horas de observación puede tener precisiones en torno a los 5 cm sin más ayuda que sus datos RINEX.

Por otra parte, respecto al análisis de las velocidades, los resultados no pueden ser considerados como definitivos, ya que sólo se han utilizado datos de un año. En el futuro, se procederá a la comparación de más datos, pero con series más largas y en IGS08, con lo que será posible determinar si GPSTk-PPP puede ser utilizado para este fin en concreto. Recordemos, no obstante, que las soluciones para las componentes planimétricas proporcionan resultados excelentes, mientras que la altimétrica es una solución excelente, pero sesgada.

Como nota final, cabe decirse que los resultados diarios de un año entero de las cuatro estaciones consideradas se han calculado en menos de cuatro horas con un PC Intel Pentium de doble núcleo a 2,80 GHz con 1 Gb de RAM y sistema operativo Linux Ubuntu 9.04 (jaunty). Si los datos se procesan en el servidor, sin contar el tiempo de subida de los ficheros, la solución final se obtiene en unos 20 s. Este hecho hace que consideremos que se trate de una excelente aplicación, además de una alternativa, a las distintas soluciones existentes en el mercado.

12. REFERENCIAS

Brian Tolman, R. Benjamin Harris, Tom Gaussiran, David Munton, Jon Little, Richard Mach, Scot Nelsen, Brent Renfro, ARL:UT; David Schlossberg, University of California Berkeley. "The GPS Toolkit -- Open Source GPS Software". Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of

- the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, California. September 2004.
- Dach, R. Hugentobler, U.; Fridez, P.; Michael M. (2007): "BERNESE GPS SOFTWARE VERSION 5.0". Astronomical Institute, University of Bern.
- GNU LGPL: <http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html> (2012/04/04).
- Harris RB, Conn T, Gaussiran T, Kieschnick C, Little J, Mach R, Munton D, Renfro B, Nelsen S, Tolman B, Vorce J, Salazar D (2007) The GPSTk: new features, applications and changes. In: Proceedings of the 20th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2007) September, Fort Worth, TX, USA.
- GPSTk: <http://www.gpsk.org> (2012/04/04).
- Gunzip: <http://www.gzip.org/> (2012/04/25).
- W. Gurtner (1998): "RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10", <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex210.txt>
- [IGSMail-6354]: "Upcoming switch to IGS08/igs08.atx", en <http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006346.html> (19/04/2012).
- Jam: <http://www.firetype.org/jam/index.html> (2012/04/25).
- Kouba J, Heroux P (2001) "Precise point positioning using IGS orbit and clock products." *GPS Solutions* 5:12–28. doi:10.1007/PL00012883.
- Renfro B, Harris RB, Tolman B, Gaussiran T, Munton D, Little J, Mach R, Nelsen S (2005) The open source GPS toolkit: a review of the first year. In: Proceedings of the 18th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2005) September, Long Beach, CA, USA
- Rodrigo F. Leandro, Marcelo C. Santos and Richard B. Langley: "Analyzing GNSS data in precise point positioning software." *GPS Solutions*, 2011, Volume 15, Number 1, Pages 1-13.
- Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. (2009): "GNSS data management and processing with the GPSTk". *GPS Solutions*. Volume 14, Number 3, 293-299, DOI: 10.1007/s10291-009-0149-9, Springer Verlag.
- Wget: <http://www.gnu.org/software/wget/> (2012/04/25).
- Zurutuza, J. and Sevilla, M. J. (2006). Deformations monitoring by integrating local and global reference systems. *Geodetic Monitoring: from Geophysical to Geodetic Roles IAG / Springer Series*, vol. 131. pp. 48-55 Springer Verlag.
- Zurutuza, J. and Sevilla, M. J. (2007): "Influence of the Cutoff Angle and the Bearing in High-Precision GPS Vector Determination". *Journal of Surveying Engineering*. Vol 133, nº 2, pp. 90-94.
- Zurutuza, J. and M. J. Sevilla (2009): Dependence of the GPS high-precision solutions on the considered tropospheric model. Spain-China Symposium on Geophysical & Geochemical Geosystems, Zaragoza junio 2009.
- Zurutuza, J. and M. J. Sevilla (2011): "Tropospheric Modeling and Fixed Stations Constraints in Precise GPS Computations: Case Study". *Journal of Surveying Engineering* 137, 53; [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000039](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000039) (7 pages).

Control vertical de la Falla activa de Balanegra a partir de perfiles de nivelación de alta precisión

Vertical monitoring of the active Balanegra Fault from high-precision levelling profiles

Borque, M.J.⁽¹⁾, Marín-Lechado, C.⁽²⁾, Pedrera, A.⁽²⁾, Galindo, J.⁽³⁾, López Garrido, A. C.⁽⁴⁾, Adán, R.⁽¹⁾, Gil, A.J.⁽¹⁾.

(1) Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. Spain. (mjborque@ujaen.es)

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Granada, Spain.

(3) Dpto. Geodinámica. Universidad de Granada. Spain.

(4) Instituto Ciencias de la Tierra. CSIC. Granada. Spain

SUMMARY

The Balanegra fault zone has a NW-SE trend, a southwestwards dip and constitutes the western boundary of the Campo de Dalías. It is located in the transition between the southern border of the Internal zones of the center-eastern Betic Cordilleras and the Alborán Sea. In this region, a system of conjugate active normal faults is developed that also includes faults with northeastwards dip (e.g. Loma del Viento fault). They indicate a current NE-SW extension of the shallow crust. This deformation occurs simultaneously to the NW-SE to NNW-SSE shortening that develops from Late Miocene the ENE-WSW folds responsible for the elevation of the relief and the uplift of Sierra of Gador.

The Balanegra fault zone has geological features that indicate a recent activity, such as the rectilinear character of the coast line, remarkable elevation of marine terraces, the formation of Quaternary wedge deposits and the tilting associated to the activity of secondary fault surfaces. Also, in the region seismic series happened in 1993-1995 that could be related to the activity of the southern extension of this fault zone. All these characteristics underline that this is one of the most interesting faults for active tectonic studies along the northern border of the Alborán Sea. However, only partial observations of this structure can be carried out, since the downthrown block is submerged.

This active fault has been monitored for a 4-year period from two high-precision levelling profiles. In this paper the main results are shown.

1. INTRODUCCIÓN

La falla de Balanegra tiene orientación NO-SE, buzamiento al SO y constituye el límite occidental del Campo de Dalías. Se localiza en el borde meridional de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas centro-orientales y el Mar de Alborán. En esta región se desarrolla un sistema de fallas normales conjugadas activas que incluye fallas con buzamiento hacia el NE (Falla de la Loma del Viento) e indican una extensión actual NE-SO de la parte más superficial de la corteza. Esta deformación se produce simultáneamente al acortamiento en dirección NO-SE a NNO-SSE que desarrolla desde el Mioceno superior grandes pliegues de ejes ENE-OSO y que son responsables de la elevación del relieve y de la formación de la Sierra de Gador (Figura 1).

La falla de Balanegra tiene rasgos geológicos que indican una actividad reciente, tales como el carácter rectilíneo de la línea de costa, elevación notable de terrazas marinas, la formación de cuñas de depósito cuaternarias y el basculamiento asociado a la actividad de superficies de falla secundarias. Además, en la región ocurrieron series sísmicas en 1993-1995, que se pueden asociar a la actividad de esta zona de falla y su extensión meridional. Todas estas características hacen que sea una de las fallas más interesantes para estudios de tectónica activa del borde septentrional del Mar de Alborán. Sin embargo, sólo se pueden realizar observaciones parciales de esta estructura, ya que el bloque hundido se encuentra sumergido (Figura 2).

Esta falla activa ha sido controlada durante un período de 4 años a partir de las remediciones de dos perfiles de nivelación de alta precisión. En este trabajo se presentan los principales resultados.

2. LOCALIZACIÓN DE LOS PERFILES

Se han instalado dos perfiles de nivelación a través de la parte sur de la Falla de Balanegra, situados en el sector más cercano al enjambre sísmico de 1993-1994 (Figuras 3a y 3b). Estos perfiles cortan perpendicularmente la parte terrestre de la Falla de Balanegra, desde el bloque elevado hasta la línea de costa, aunque la zona de falla se prolonga mar adentro. El perfil septentrional tiene

aproximadamente 900 m de longitud y se extiende entre los puntos de referencia 996 a 997, y el perfil meridional tiene 400 m de longitud y discurre entre los puntos 991 a 993. En cada extremo del perfil se han colocado dos clavos en roca o en construcciones antiguas para garantizar su estabilidad. (Figura 4).

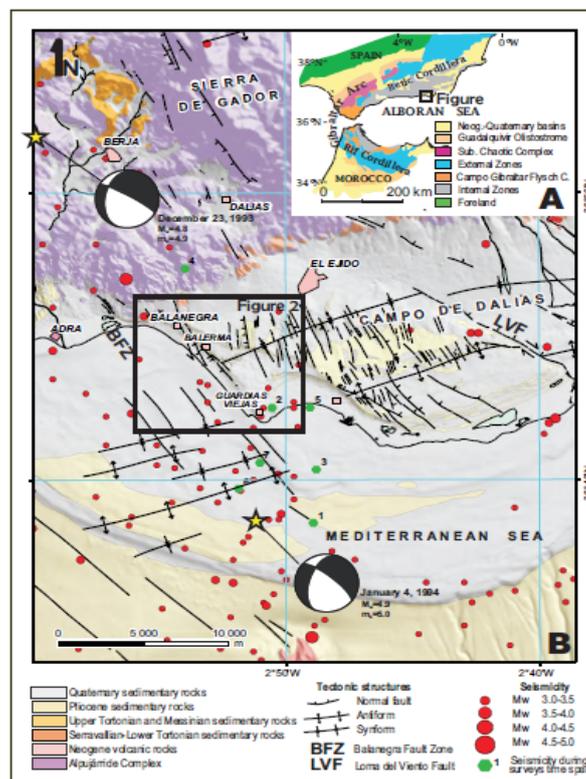


Figura 1. Falla de Balanegra: Mapa Geológico.

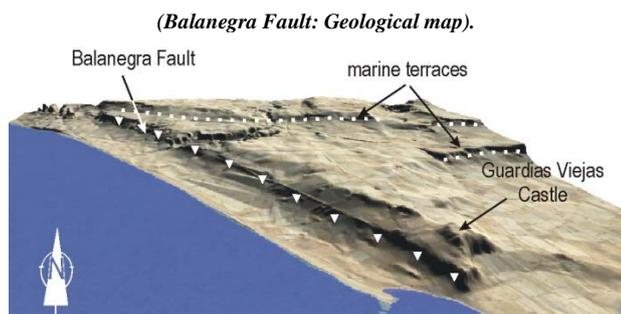


Figura 2. Modelo digital de la Falla de Balanegra.
(Digital terrain model of Balanegra Fault Zone showing the fault scarp and marine terraces (10x10m). Vertical exaggeration has been applied for a better view.).

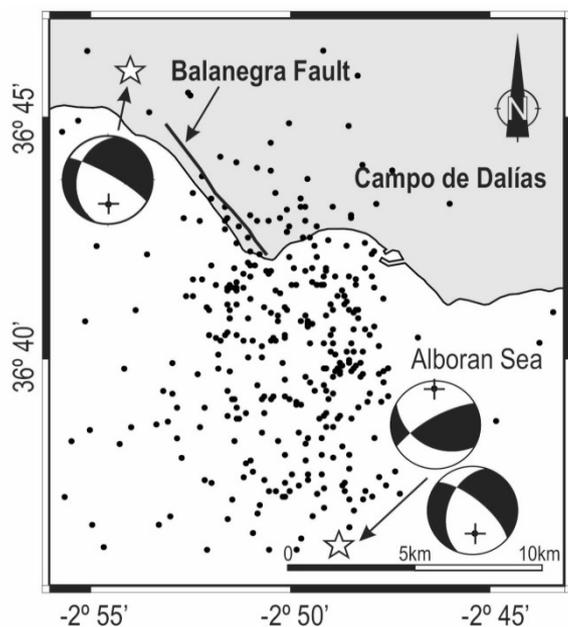


Figura 3a. Epicentros y mecanismos focales cercanos a la Falla de Balanegra.
(Epicentres and focal mechanisms near Balanegra Fault.).

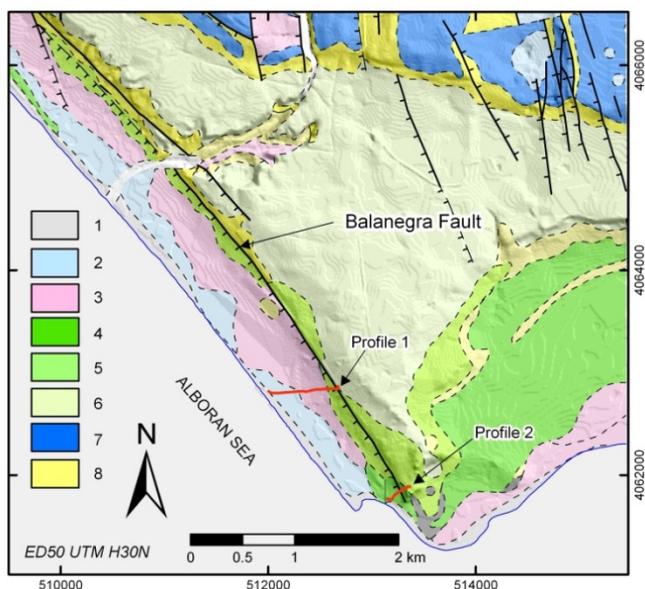


Figura 3b. Falla de Balanegra. Perfiles NAP.
(High-precision levelling profiles in Balanegra Fault).

3. NIVELACIÓN DE ALTA PRECISIÓN (NAP)

La cuantificación de movimientos verticales a través de la comparación de desniveles obtenidos mediante NAP en diferentes campañas es una técnica extendida para la monitorización de fallas activas y para el control de deformaciones asociadas a sismos (Marín-Lechado et al. 2010) (Giménez et al. 2009). El método está basado en la variación de los desniveles medidos a lo largo del perfil de nivelación en diferentes campañas, dándonos información sobre deformaciones acumuladas alrededor de fracturas importantes en el área de interés y en la época considerada.

La precisión obtenida en este tipo de nivelaciones dependerá del instrumental utilizado, de la metodología seguida y de los métodos de ajuste (Ihde, 1987). Por ello, el procedimiento y equipamiento utilizado en todas las campañas ha sido idéntico, minimizando cualquier influencia y error sistemático, y siempre siguiendo las recomendaciones del IGN (Instituto Geográfico Nacional) para nivelaciones denominadas de alta precisión.

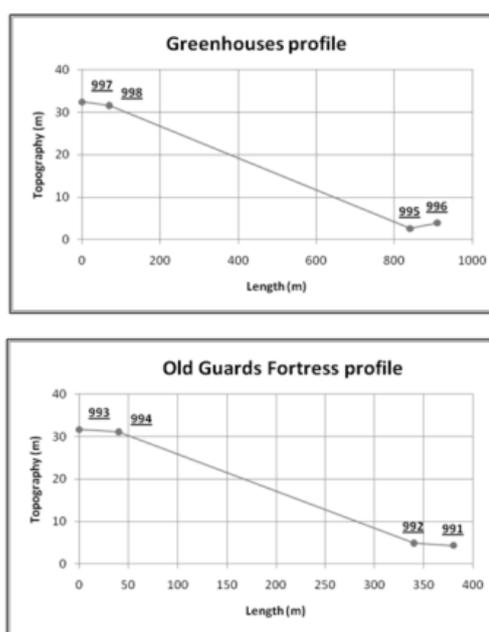


Figure 4. Perfiles topográficos en la Falla de Balanegra.
(Topography profiles in Balanegra Fault).

El equipo utilizado consistió en un nivel digital Leica DNA03, dos miras invar de 3 metros de longitud, dos bases que garantizaban una posición estable de la mira a lo largo de todo el perfil y un trípode de longitud fija. Todos los datos fueron almacenados automáticamente en la memoria interna de nivel con una desviación de estándar de $\pm 0.3 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ en nivelación doble garantizada por el fabricante. Las medidas fueron tomadas automáticamente, libres de la influencia de curvatura terrestre, y corregidas automáticamente de error de colimación. Cada nivelación comenzó y acabó siempre con la misma mira para evitar el error de talón. El perfil fue observado en los dos sentidos (nivelación doble), y el método usado fue punto medio con un protocolo de observación BFFB (atrás, adelante, adelante, atrás) y con una distancia entre nivel y mira de 20 metros, consiguiendo un balance final de distancias inferior a 10 centímetros. Para prevenir errores de refracción, la línea de la nivelada siempre tenía que ser superior a 50 centímetros. Los gradientes de temperatura fueron pequeños durante la campaña de observación y el intervalo de tiempo entre lecturas mínimo.

Los desniveles entre clavos de nivelación se han obtenido a partir de los datos brutos registrados en campo, promediando desniveles de ida y vuelta, con una tolerancia máxima entre dichos desniveles de $\pm 1.5 \text{ mm} \sqrt{K}$, donde K sería la distancia nivelada expresada en kilómetros.

Para evaluar la precisión de los desniveles obtenidos con nivelación geométrica de alta precisión se considera sólo la precisión del equipo $\sigma_{\text{ISO-LEV}}$ (ISO 17123-2, Levels).

La desviación estándar $\sigma_{\Delta H}$, en mm, del desnivel entre dos puntos de nivelación, se obtiene mediante la expresión:

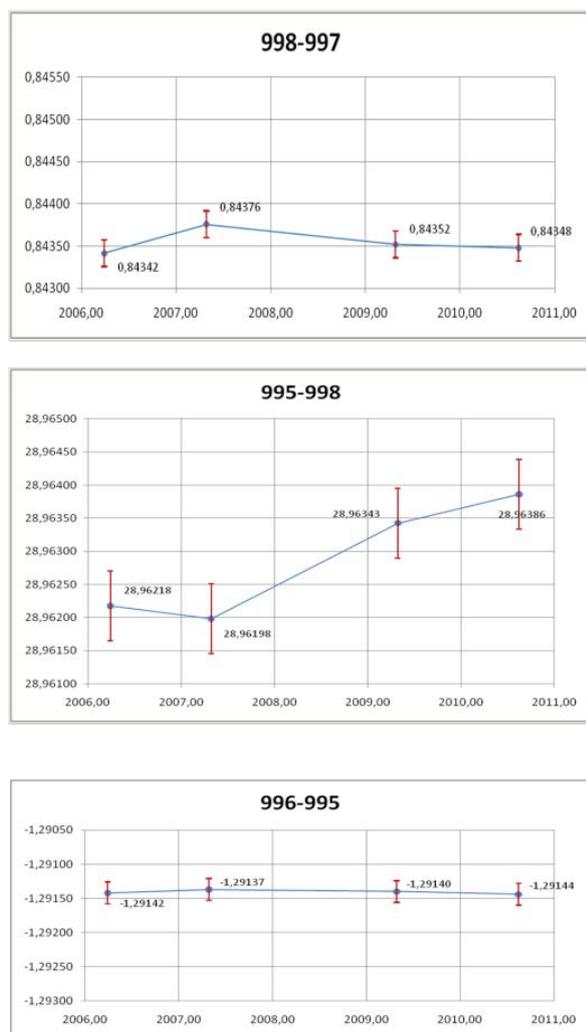
$$\sigma_{\Delta H} = \pm \sigma_{\text{ISO-LEV}} \sqrt{k}$$

donde: $\sigma_{\text{ISO-LEV}}$, es la desviación estándar experimental de 1 km de doble nivelación y k la longitud, en kilómetros, de la nivelación.

En la determinación de movimientos verticales recientes (MVR) mediante la comparación de nivelaciones de precisión el método utilizado se basa en la comparación de los desniveles brutos (no compensados) obtenidos entre señales niveladas en campañas diferentes, así al comparar desniveles de diferentes épocas de observación la precisión con la que lo obtendremos, atendiendo a la ley de propagación de las varianzas, sería:

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\Delta H_1})^2 + (\sigma_{\Delta H_2})^2} = \pm \sigma_{\text{ISO-LEV}} \sqrt{k} \sqrt{2}$$

Este estudio presenta los resultados obtenidos en cuatro campañas de NAP (2006, 2007, 2009 y 2010) realizados sobre la falla de Balanegra, donde para asegurar la representación de errores máximos, todas las barras del error son iguales a dos veces una desviación estándar obtenida. (Figuras 5 y 6).

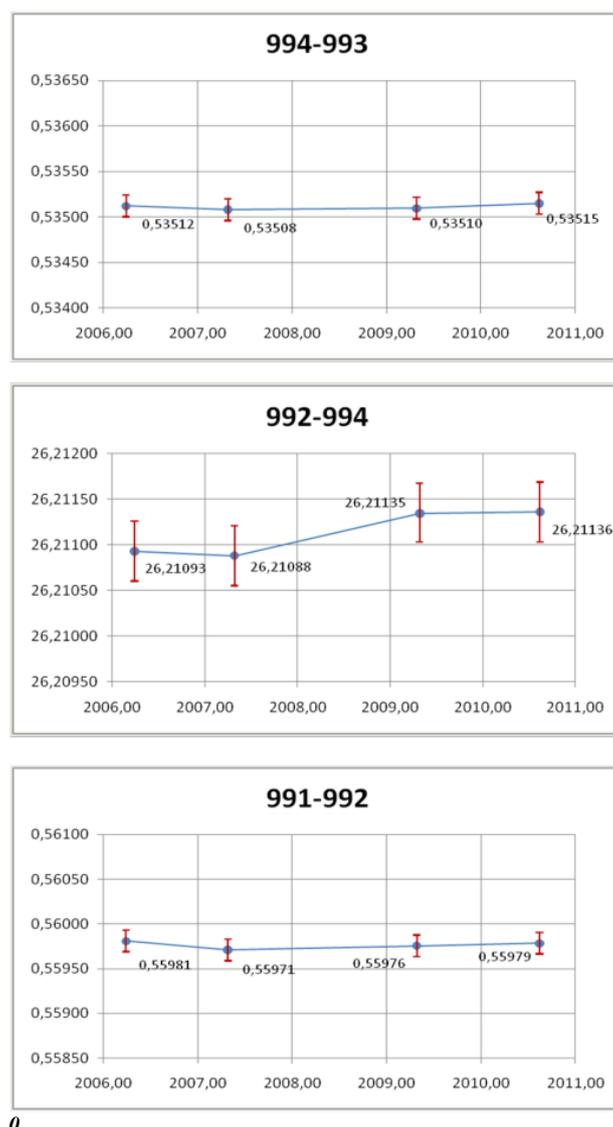


0Figure 5. Desniveles en el Greenhouses Profile (en metros). Las barras de error corresponden a dos desviaciones estándar (2σ).

1 (Height differences in metres in the Greenhouses Profile. Errors bars are equal to two standard deviations).

4. RESULTADOS

Se ha producido un aumento de la deformación vertical a través de los perfiles. Sin embargo, no se encontró relación directa con los sismos registrados. Los terremotos con magnitud de 3.1 y 3.2 en 2006 no produjeron deformación vertical instantánea, como podría haberse esperado. Por otro lado, la máxima deformación ocurrió en un período en el que sólo hubo un terremoto de baja magnitud. Si se consideran las relaciones entre salto y magnitud de Wells y Coppersmith (1994), la ruptura del subsuelo fue demasiado pequeña para llegar a la superficie durante la deformación cosísmica. En cualquier caso, la deformación acumulada en los extremos meridional y septentrional del segmento de falla puede haber dado lugar a una respuesta tardía y lenta en la parte central del segmento de falla.



0Figure 6. Desniveles en el Old Guards Fortress Profile (en metros). Las barras de error corresponden a dos desviaciones estándar (2σ).

2 (Height differences in metres in the Old Guards Fortress Profile. Errors bars are equal to two standard deviations).

Por ello, la tasa de desplazamiento vertical determinada en la zona de falla de Balanegra puede ser una consecuencia de la reptación asísmica o de la deformación elástica acumulada. Los terremotos históricos e instrumentales de magnitud moderada cerca de Falla de Balanegra muestran un lapso de tiempo promedio entre ellos de unos 100 años durante los últimos 5 siglos. Si asumimos una tasa promedio de deslizamiento vertical de 0,43 mm/año durante los próximos 100 años, el deslizamiento vertical final sufrido en el perfil septentrional sería de 4 cm. Las ecuaciones de desplazamiento

máximo frente a magnitud de Wells y Coppersmith (1994) indicarían una magnitud de 5,7, similar a las magnitudes instrumentalmente registradas. Por lo tanto, el desplazamiento medido podría estar relacionado con la deformación elástica y la acumulación de energía asociada con la sismicidad de magnitud moderada. Este deslizamiento es heterogéneo en el período de monitorización, ya que se produjeron la mayoría de los movimientos, entre septiembre de 2007 y mayo de 2009, a lo largo del perfil septentrional ($1,45 \pm 0,74$ mm en 19 meses, con una tasa de deformación vertical de $0,92 \pm 0,47$ mm / año).

El deslizamiento vertical más elevado detectado en el norte de este perfil debe indicar que la Falla de Balanegra está bloqueada hacia el extremo sur de la zona de la falla en este período, donde se produjeron los terremotos principales de la serie 1993-1994.

5. CONCLUSIONES

En los próximos 100 años se esperan terremotos de esta falla de magnitud 5 a 6.5, lo que representa un riesgo sísmico que debe ser tenido en cuenta.

En los próximos años es esencial la medida del desplazamiento vertical con métodos de nivelación de alta precisión para determinar la variabilidad de la deformación vertical y sus relaciones con la sismicidad baja y moderada. Estos datos son esenciales para establecer el comportamiento de fallas activas lentas.

6. REFERENCIAS

Ihde, J. (1987). Improved precision levelling for deriving significant vertical movements of the earth's crust. *Journal of Geodynamics*, 8, 313–320.

Giménez, J.; Borque, M.J.; Gil, A.J.; Alfaro, P.; Estévez, A.; Suriñach, E. (2009). Comparison of long-term and short-term uplift rates along an active blind reverse fault zone (Bajo Segura, Se Spain). *Studia Geophysica & Geodaetica*, 53, 81-98.

Marín-Lechado, C.; Galindo-Zaldívar, J.; Gil, A.J.; Borque, M.J., de Lacy, C.; Pedrera, A.; López-Garrido, A.C.; Alfaro, P.; García-Tortosa, F.; Ramos, I.; Rodríguez-Caderot, G.; Rodríguez-Fernández, J.; Ruiz-Costán, A.; Sanz de Galdeano-Equiza, C. (2010). Levelling profiles and a GPS network to monitor the active folding and faulting deformation in the Campo de Dalias (Betic Cordillera, Southeastern Spain). *Sensors*, 10, 3504-3518.

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width and surface displacement. *Bulletin Seismological Society of America*, 84, 974-1002.

Control Geodésico de Deformaciones en la Falla de Baza a partir de mediciones GPS Geodetic Deformation Monitoring of the Baza Fault from GPS

Antonio J. Gil ⁽¹⁾, Francisco J. García Tortosa ⁽²⁾, Pedro Alfaro ⁽³⁾, Jesús Galindo ⁽⁴⁾, Ángel Carlos López Garrido ⁽⁵⁾, María Clara de Lacy ⁽¹⁾, Patricia Ruano ⁽⁴⁾, Antonio Pedrera ⁽⁶⁾, Carlos Sanz ⁽⁵⁾, María Jesús Borque ⁽¹⁾, Juan A. Armenteros ⁽¹⁾, Manuel Avilés ⁽¹⁾

⁽¹⁾Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén (España). ajgil@ujaen.es

⁽²⁾Dpto. Geología. Universidad de Jaén. España.

⁽³⁾Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. España.

⁽⁴⁾Dpto. Geodinámica. Universidad de Granada. España.

⁽⁵⁾Instituto Ciencias de la Tierra. CSIC. Granada. España.

⁽⁶⁾Instituto Geológico y Minero de España. Granada. España.

SUMMARY

The Baza fault is the most important active fault in the Guadix-Baza Basin (GBB). The GBB is the largest intramontane basin of the central Betic Cordillera. The basin preserved a glacial paleosurface, which represents one of the best markers of the recent deformation in the basin. The Baza fault is a normal fault, 37 km long, with a NW-SE to N-S strike, and dipping between 45° and 65° ENE. The fault has several roughly parallel splays which are more numerous at the southern end and merge into a narrow fault zone northwards. Its movement divided the basin into two sub-basins, the Guadix to the west and Baza to the east, determining the distribution of sediments in the basin. Overall, the fault zone displaces the glacial about 100 m. Assuming an age for the glacial between 205 and 600 ka, the vertical slip rates estimated for the Baza fault, range from 0.17 to 0.49 mm/year. This fault was probably responsible of the 1531 Baza earthquake, which represents the largest event recorded in the historical seismic catalogue of the area. This fault has been monitored for a 4-year period from GPS campaigns. In this paper the first results are shown.

1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Cordillera Bética está situada en la parte occidental del Orogéno Alpino Mediterráneo. En la actualidad está sometida a una compresión principal NNW-SSE y, en su sector central, a una extensión aproximadamente perpendicular de dirección ENE-WSW a NE-SW. La extensión se acomoda principalmente por fallas normales con una dirección NNW-SSE. Esta extensión deforma los materiales pertenecientes a las zonas Interna y Externa de la cordillera, así como al relleno sedimentario de las cuencas intramontañas presentes en la misma, entre ellas la de Guadix-Baza.

La cuenca continental de Guadix-Baza (CGB) es una gran cuenca intramontaña situada en la parte central de la Cordillera Bética (Fig. 1.), sobre el contacto entre sus zonas Interna y Externa. Tradicionalmente se ha dividido en dos grandes sectores o subcuencas, la de Guadix (o sector occidental) y la de Baza (o sector oriental). Ambos sectores se encuentran separados en buena medida por la falla de Baza (Alfaro et al., 2008; García Tortosa et al., 2008) que es una de las principales fallas normales activas de este sector central de la Cordillera Bética y cuya actividad ha sido responsable de la división de la cuenca controlando, en parte, la sedimentación en ambos sectores a lo largo de la historia endorreica de la cuenca (Alfaro et al., 2008; García-Tortosa et al., 2008).

La figura 1 es un mapa geológico simplificado de la cuenca de Guadix-Baza, que muestra las principales estructuras activas en la misma. B.F.: falla de Baza; G.F.: falla de Galera; Gr.F.: falla de Graena; Z.F.: falla del Zamborino; A-B.F.: falla de Alfahuara-Botardo; E-G.F.: falla del E de Guadix; W-N.F.: falla del W del Negrátin; B.F.: falla de Benamaurel; N-C.F.: falla del N de Cúllar.

La falla de Baza (Fig. 2) es una falla normal de 37 km de longitud, que tiene una dirección que varía de NO-SE a NS y un buzamiento que oscila entre 45° y 65° hacia el ENE. La zona de falla presenta varias ramas, más o menos paralelas, que son más abundantes en la mitad sur de la zona de falla, mientras que hacia el norte convergen hasta unirse en una fractura principal. La figura 2 muestra dos cortes geológicos representativos de la zona de falla y algunas fotografías panorámicas. En el mapa geológico de la falla se indica la situación de ambos cortes.

A partir de varios marcadores geológicos y geomorfológicos, se han estimado las tasas de desplazamiento vertical de esta falla que varían entre 0.17 y 0.49 mm/año (García Tortosa et al., 2011).

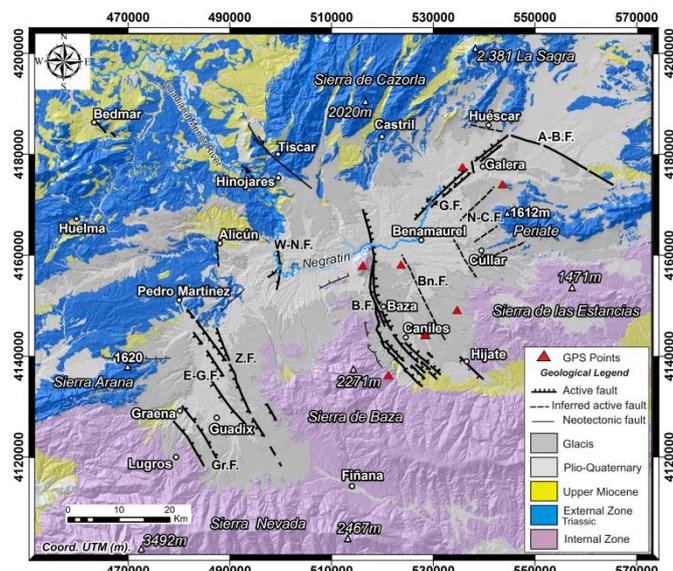
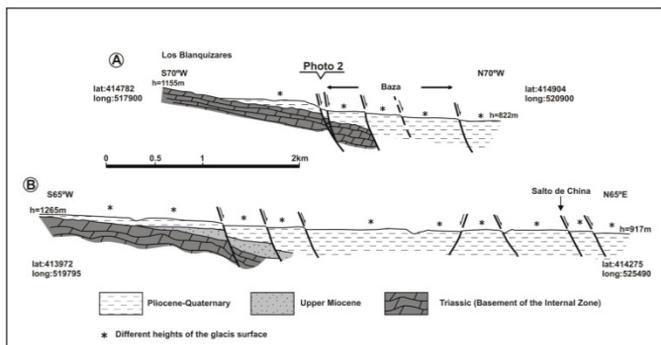
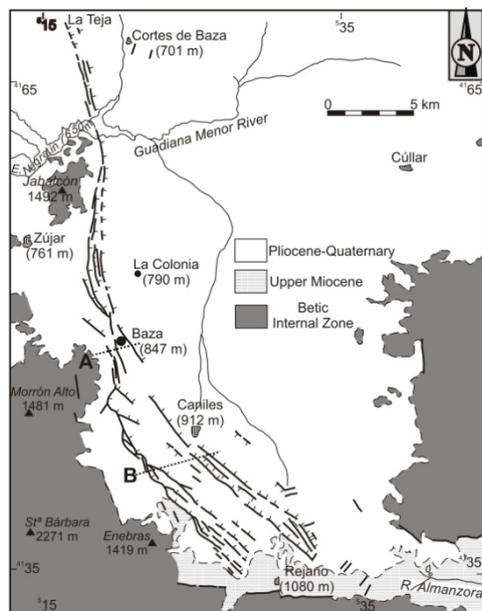


Figura 1 - Mapa geológico simplificado de la CGB. (GBB simplified geological map.)



(a) – Cortes geológicas. (Geological sections)



(b) – Mapa geológico de la zona de falla. (Geological map of the fault zone.)



(c) – Vista panorámica 1. (Panoramic view 1)



(d) – Vista panorámica 2. (Panoramic view 2)

Figura 2 (a, b, c, d) – Cortes geológicas de la zona de falla de Baza. Modificado de García-Tortosa et al. (2011). (Geological sections of the Baza fault zone. Modified from García-Tortosa et al. (2011))

2. RED GPS DE LA FALLA DE BAZA

En el año 2008 se diseñó y monumentó una red GPS constituida por siete puntos de control. Estos puntos se situaron tanto en el bloque de muro como en el de techo a lo largo de su trazado intentando, en la medida de lo posible, que estuviesen alejados de la zona de falla. El objetivo de esta red es la cuantificación geodésica de los desplazamientos 3D que se están produciendo en esta falla y su comparación con las estimaciones geológicas. La figura 3 muestra la instalación de la señal en roca en el punto “Enebro”. Las primeras campañas se han realizado en septiembre de 2009 y 2010. Los equipos GPS utilizados son Leica Geosystem GX1230 con antenas LEIAX1202.



Figura 3 – Instalación del punto Enebro. (Enebro point installation.)

Las figuras 4, 5 y 6 muestran los equipos GPS en medición en la campaña de 2009, en los puntos Enebro, Talhe y Sismitas.



Figura 4 – 5200 Enebro.



Figura 5 – 5600 Talhe.



Figura 6 – 5700 Sismitas.

El procesado de los datos GPS se ha realizado con Bernese 5.0 (Dach et al., 2007) utilizando las dobles diferencias de fase como observables, efemérides precisas IGS (Dow et al., 2005) y excentricidades absolutas de antenas. El campo de velocidades se estima en ITRF2005 utilizando NEVE, software desarrollado por el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia de Roma (Italia). Las velocidades residuales se obtienen considerando el polo de Euler, dado por Devoti et al. (2008). La figura 7 muestra las velocidades horizontales residuales estimadas a partir de las campañas de septiembre de 2009 y 2010.

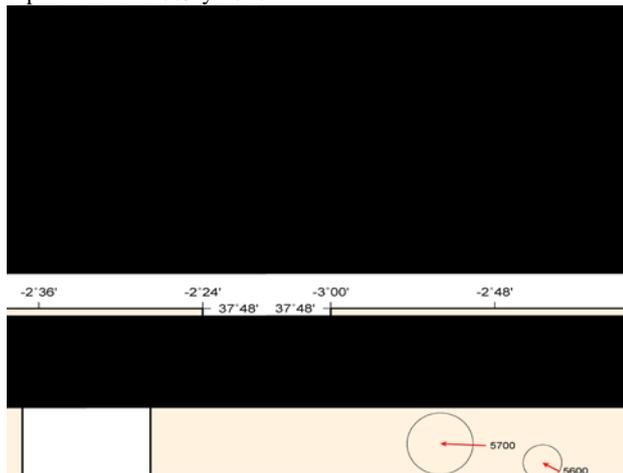


Figura 7 – Velocidades residuales estimadas de la red de Baza. (Estimated residual velocities for the Baza network.)

3. CONCLUSIONES

Por primera vez se ha presentado el campo de velocidad residual estimado para la red geodésica de la falla de Baza, a partir de las campañas GPS de 2009 y 2010. Próximas campañas mejorarán la estimación de las velocidades en esta región y disminuirán la incertidumbre.

Estos datos resultarán de gran interés para mejorar los cálculos de peligrosidad sísmica ya que esta falla es, probablemente, la responsable del terremoto de Baza de 1531, el más devastador ocurrido hasta la fecha en la cuenca de Guadix-Baza, con casi 400 víctimas mortales.

4. AGRADECIMIENTOS

Los estudios realizados han sido financiados por los proyectos: MEC-CSD2006-0041, MICINN-AYA2010-15501, CGL2011-30153-C02-02 (Fondos FEDER), y por el grupo de investigación RNM-282 del Plan Andaluz de Investigación. Algunas figuras han sido creadas utilizando Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998).

5. REFERENCIAS

- Alfaro, P., Delgado, J., Sanz de Galdeano, C., Galindo Zaldívar, J., García Tortosa, F.J., López Garrido, A.C., López Casado, C., Marín, C., Gil, A.J., and Borque, M.J. (2008). "The Baza Fault: a major active extensional fault in the central Betic Cordillera (south Spain)". *Int. J. Earth Sci.* 97, 1353-1365.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl, Eds. (2007). "Bernese GPS Software, Version 5.0, User Manual". *Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland.*
- Devoti, R., Riguzzi, F., Cuffaro, M., Doglioni, C. (2008). "New GPS constraints on the kinematics of the Apennine subduction". *Earth and Planetary Science Letters*, 273 (1-2), 163-174.
- Dow, J.M.; Neilan, R.E.; Gendt, G. (2005). "The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade". *Adv. Space Res.*, 36, 320-326.
- García Tortosa, F.J., Alfaro, P., Galindo Zaldívar, J., Gibert, L., López Garrido, A.C., Sanz de Galdeano, C., and Ureña, M. (2008). "Geomorphologic evidence of the active Baza fault (Betic Cordillera, South Spain)". *Geomorphology* 97, 374-391.
- García Tortosa, F.J., Alfaro, P., Galindo Zaldívar J., Sanz de Galdeano, C. (2011). Glacis geometry as a geomorphic marker of recent tectonics: the Guadix-Baza Basin (South Spain). *Geomorphology* 125, 517-529.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998). "New improved version of the Generic Mapping Tools released". *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

Red GPS Topo-Iberia: Resultados Preliminares obtenidos en el Centro de Análisis de la UJA

Topo-Iberia GPS Network: Preliminary Results at UJA Analysis Centre

Antonio J. Gil⁽¹⁾, María Clara de Lacy⁽¹⁾, Antonio M. Ruiz⁽¹⁾, Juan A. Armenteros⁽¹⁾, Raquel Adán⁽¹⁾, Manuel Avilés⁽¹⁾, Federica Riguzzi⁽²⁾, Roberto Devoti⁽²⁾ y el grupo GPS de Topo-Iberia.

⁽¹⁾Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. España, ajgil@ujaen.es

⁽²⁾Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sez. CNT, Roma, Italia

SUMMARY

The project “Geociencias en Iberia: Estudios integrados de topografía y evolución 4D: Topo-Iberia” (Ref.CSD2006-00041) is supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness. Its objective is to understand the interactions in the Iberian Peninsula (SW Europe) between deep, shallow and atmospheric processes, through a multidisciplinary approach linking Geology, Geophysics and Geodesy. As part of this project a network of 26 continuous GPS stations, covering the Spanish part of the Iberian Peninsula (22 stations) and Morocco (4 stations) has been established. The major objective behind the establishment of this array is to monitor millimetre level deformation of the crust due to Nubia and Eurasian tectonic plates. More specific goals of the project include the identification of the areas and/or specific seismic faults which exhibit higher deformation rates, which could imply an increased seismic hazard in these specific areas. In December 2008, the network installation was completed and all the stations were fully operational. Data analysis is performed at three different analysis centres: Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), University of Barcelona (UB) and University of Jaen (UJA). Different approaches to processing GPS data by using different software are being carried out. The first coordinate time series and the velocity field computed so far at UJA analysis centre are presented.

1. INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica y sus márgenes, con un relieve que evidencia la intensidad y gran dispersión de las deformaciones tectónicas recientes, constituye un laboratorio natural idóneo para desarrollar investigaciones sobre su topografía y evolución 4-D. El objetivo del proyecto “Geociencias en Iberia: Estudios integrados de topografía y evolución 4D: Topo-Iberia” es comprender la interacción entre procesos profundos, superficiales y atmosféricos, integrando investigaciones en Geología, Geofísica y Geodesia.

El empleo de técnicas GPS para el control de deformaciones del terreno, permite la monitorización de áreas tectónicamente activas y la detección de movimientos relativos de pequeña magnitud (por debajo del centímetro), como sucede en las zonas de la península Ibérica. Así, con el fin de monitorizar las deformaciones milimétricas de la corteza debidas a los movimientos de las placas tectónicas Eurasia y Nubia, se ha instalado una red de 26 estaciones GPS permanentes estratégicamente situadas: 22 estaciones en la parte española de la Península Ibérica y 4 en Marruecos. Dentro de otros objetivos del proyecto se incluye también la identificación de áreas y fallas sísmicas específicas que presenten velocidades de deformación mayores, lo que supondría un mayor riesgo sísmico en dichas zonas.

2. RED GPS PERMANENTE TOPOIBERIA

Una serie de nuevas estaciones GPS permanentes se han instalado como complemento a otras redes GPS pertenecientes a diferentes instituciones (EUREF, IGS y Agencias Regionales de Gobierno). Después de un período inicial de diseño, adquisición de nuevos equipos, monumentación y puesta en marcha de los mismos, en la actualidad la red GPS de Topo-Iberia consta de veintiséis estaciones operativas (Figura 1). Estos sistemas autónomos se han diseñado incluyendo un receptor GPS y una antena GNSS Choke-Ring, un panel solar, dos baterías y un módem GPRS (Figura 2). Como norma general, los equipos se han instalado sobre el terreno, situando las antenas en pilares de hormigón sobre afloramientos rocosos. Sólo en casos donde las condiciones ambientales lo aconsejaban, se han empleado radomos protectores de antena, como es el caso de la estación NEVA situada en el Observatorio de Sierra Nevada (Granada).

El funcionamiento de la red se inició a principios de 2008, estando todas las estaciones operativas en diciembre del mismo año. De las 26 estaciones, 22 se encuentran en diferentes regiones de España y las otras 4 están ubicadas en lugares estratégicamente seleccionados en el norte de Marruecos para completar la visión general de la cinemática actual en la Península Ibérica y el sur de las áreas vecinas, incluyendo la cadena del Atlas.

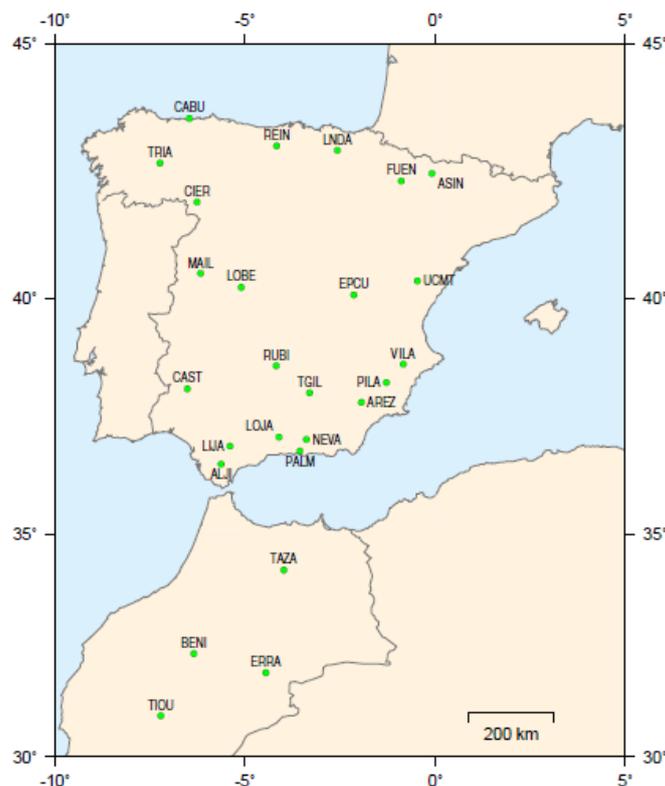


Figura 1 - Mapa de estaciones de GPS Topo-Iberia. (Map of Topo-Iberia CGPS Sites).

3. PROCESADO DE DATOS EN LA UJA

El análisis de datos del conjunto formado por las estaciones GPS nuevas y las ya existentes, se lleva a cabo en tres centros de análisis diferentes: el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), la Universidad de Barcelona (UB) y la Universidad de Jaén (UJA) mediante el uso de diferentes programas: GIPSY-OASIS, GAMIT y BERNSE respectivamente.

El análisis de los datos en la UJA se realiza con el programa científico Bernese 5.0 (Dach et al., 2007). En particular, utiliza las dobles diferencias de fase como observables; las órbitas precisas del IGS y los parámetros de orientación de la Tierra se mantienen fijos, aplicándose las correcciones absolutas de centro de fase - dependientes de la elevación del satélite- proporcionadas por el IGS (Dow et al, 2005). Se estima una solución diaria en un marco de referencia débilmente constreñido, cercano a la condición de deficiencia de rango. Esta solución poco constreñida se calcula en un marco de referencia intrínseco, definido por las propias observaciones, que se diferencia de un día a otro por las traslaciones de red rígidas, manteniendo las distancias entre estaciones siempre bien definidas. Los constreñimientos para la realización del marco de referencia escogido son impuestos sólo a posteriori. A continuación, las soluciones diarias débilmente constreñidas procedentes de los distintos clusters se fusionan en soluciones globales mínimamente constreñidas de toda la red aplicando la teoría clásica de mínimos cuadrados (Bianco et al., 2003). Por último, estas soluciones mínimamente constreñidas se llevan al marco de referencia ITRF2005.



Figura 2 – Estación TGIL, vista general -arriba-, panel solar –abajo izq.- y receptor GPS –abajo dcha.- (TGIL site, general view -top-, Solar panel -bottom left- and GPS receiver -bottom right-)

El campo de velocidades se estima mediante el uso de un software especialmente diseñado para ello (NEVE), desarrollado por el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di Roma (Italia), que trabaja con un modelo estocástico completo. Dicho campo se

calcula a partir de las series temporales en ITRF2005. Simultáneamente se calculan las velocidades junto con las componentes anuales y los desplazamientos ocurridos en épocas de cambios instrumentales. Los errores asociados a las velocidades se derivan de la propagación directa de las matrices de covarianza diarias. Las series temporales preliminares se han calculado con los datos disponibles de las estaciones GPS desde mayo de 2008 hasta el 16 de Abril de 2011. En la Figura 3 se muestran las series temporales para la estación TGIL.

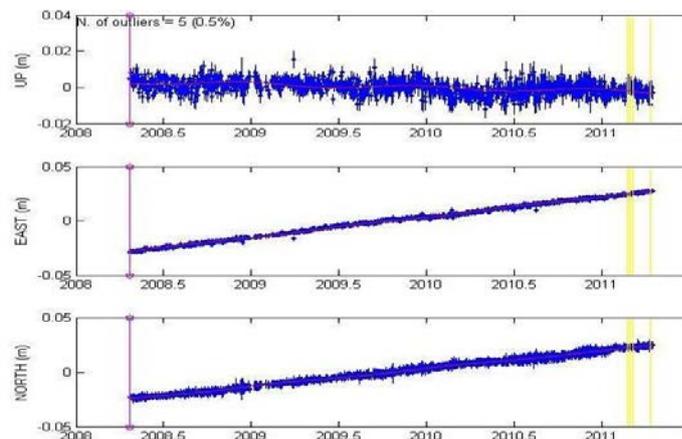


Figura 3 - Series temporales -componentes N, E y UP- en ITRF2005 para TGIL. (Time Series in N, E, UP components in ITRF2005 for TGIL)

4. CAMPO DE VELOCIDADES GPS

La determinación del campo de velocidades permite conocer las características de la deformación actual de la corteza terrestre en la Península Ibérica. Las velocidades respecto del marco de referencia ITRF2005 y las velocidades residuales respecto de la placa Euroasiática se muestran en las Figuras 4 y 5 respectivamente. El polo de Eurasia empleado ha sido tomado de *Devoti et al. (2008)*.

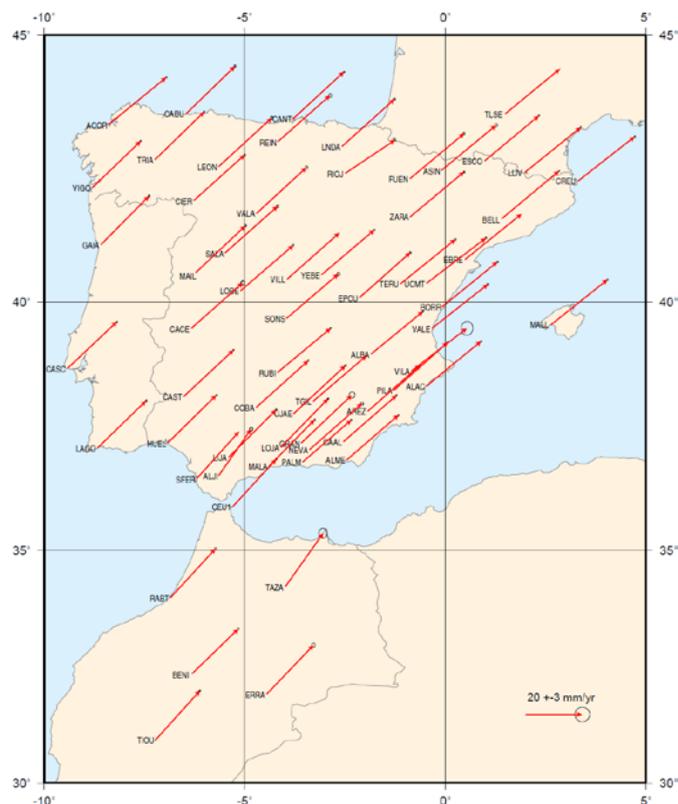


Figura 4 – Campo de Velocidades Topo-Iberia en ITRF2005 (Velocity field Topo-Iberia in ITRF2005)

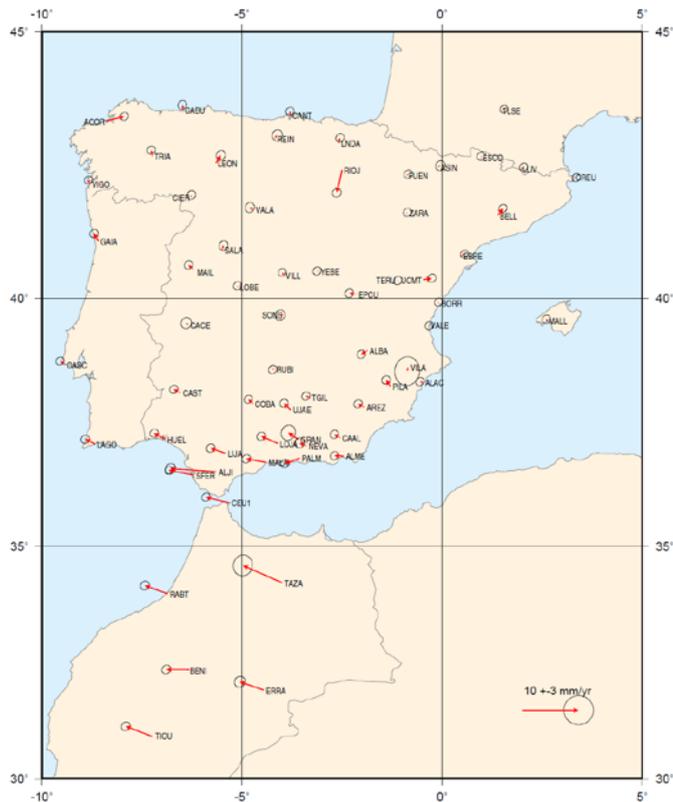


Figura 5 – Velocidades residuales respecto de la placa Euroasiática
(Residual velocities with respect to the Eurasian fixed plate)

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A partir de este primer análisis de datos proporcionados por la red GPS de Topo-Iberia, se puede concluir que las estaciones muestran una incertidumbre media en las componentes horizontal y vertical de 1.2 mm/año y 5 mm/año, respectivamente. Las velocidades estimadas son congruentes con otros estudios geofísicos relacionados con la convergencia de las placas Eurasia y Nubia.

Se espera que series temporales más largas mejoren las estimaciones de las velocidades. Además, en los próximos meses se procederá al cálculo de las series temporales en el marco de referencia ITRF2008, vigente desde el 16 de Abril de 2011.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Programa Consolider-Ingenio 2010, en particular, por el proyecto Topo-Iberia CSD2006-0041 del Ministerio de Economía y Competitividad de España. Algunas figuras fueron hechas usando Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998).

7. REFERENCIAS

- Bianco, G., Devoti, R., Luceri, V. (2003). Combination of loosely constrained solutions. *IERS Tech. Note* **30**, 107–109.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl, Eds. (2007). Bernese GPS Software, Version 5.0, User Manual, Astronomical Institute, University of Bern. Bern. Switzerland.
- Devoti, R., Riguzzi, F., Cuffaro, M., Doglioni, C. (2008). New GPS constraints on the kinematics of the Apennine subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, **273** (1–2), 163–174.
- Dow, J.M.; Neilan, R.E.; Gendt, G. (2005). The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade, *Adv. Space Res.*, **36**, 320–326.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998). New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.

Control de deformaciones en el puerto de Málaga (sur de España) mediante series temporales de interferometría radar de satélite

Deformation monitoring in the port of Málaga (southern Spain) with SAR interferometry time series

Antonio M. Ruiz⁽¹⁾, Joaquim J. Sousa⁽³⁾, Miguel Caro⁽²⁾, Antonio J. Gil⁽¹⁾, Ramon F. Hanssen⁽²⁾, Zbigniew Perski⁽⁴⁾, Jesús Galindo-Zaldívar^(5,6) y Carlos Sanz de Galdeano⁽⁶⁾

⁽¹⁾Dept. de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, University of Jaén, Spain, amruiz@ujaen.es, ajgil@ujaen.es

⁽²⁾Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, Delft University of Technology, The Netherlands, r.f.hanssen@tudelft.nl, m.carocuena@tudelft.nl

⁽³⁾Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, jjsousa@utad.pt

⁽⁴⁾Polish Geological Institut – NRI, Carpathian Branch, Poland, zper@pgi.gov.pl

⁽⁵⁾Departamento de Geodinámica, CSIC - University of Granada, Spain, jgalindo@ugr.es

⁽⁶⁾Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC - University of Granada, Spain, csanz@ugr.es

SUMMARY

Multi-temporal InSAR methods are effective tools for monitoring and investigating surface displacement on Earth based on conventional radar interferometry. These techniques allow us to measure deformation with uncertainties of one millimeter per year, interpreting time series of interferometric phases at coherent point scatterers (PS). Considering the regular revisit time and wide-area coverage of satellite radar sensors, and that PS usually correspond to buildings and other man-made structures, these techniques are particularly suitable for application in urban environments. Nowadays, there is an increasing demand for regular monitoring and accurate measuring of coastal changes for coastal zone management. In the scope of a research project in order to assess the evolution of coasts and quantify changes in coastal morphology, we study the stability of the port of Málaga, an international seaport located in the city of Málaga in southern Spain, on the Costa del Sol coast of the Mediterranean Sea. We use ERS-SAR and Envisat-ASAR data sets from 1992 to 2009 over this area, and process them using SAR interferometry time series analysis to monitor the stability of this port infrastructure. A subsidence rate in the order of 1-3 mm/yr is detected.

1. INTRODUCTION AND STUDY AREA

The Port of Málaga, an international seaport, is the oldest continuously-operated port in Spain and one of the oldest in the Mediterranean. It is today an economic and logistical centre, generating wealth for the city and employment for its inhabitants. Moreover, the changes undergone by the port (the Port extension and the special city-Port plan) are now consolidated as an important reference point within the maritime and touristic sector of Southern Europe.

The port is dominated by imports, principally an annual throughput of nearly 2 million tonnes of break bulk within a total annual throughput of 3.1 million tonnes. A substantially smaller export trade is centered on processed food and construction equipment.

In order to assess the evolution of coasts and quantify changes in coastal morphology, we have designed a research project using satellite radar interferometry. The research results will also permit us to resolve very interesting issues as detect the areas of greatest subsidence in the southern peninsular coast and assess the consequences of such deformation. In this work, we study the stability of the port of Málaga.

The study area, the province of Málaga, is located at the southern coast of Spain in the Autonomous Community of Andalusia. It is bordered by the Mediterranean Sea to the south (Fig. 1).

The capital, Málaga, is the southernmost large city in Europe. It lies on the Costa del Sol ("Coast of the Sun") of the Mediterranean Sea. It is also situated at the southern Betic Cordillera (southern Spain).

2. DATA AND METHOD

In this work, Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR (StaMPS/MTI) that combines both persistent scatterer (PS) and small baselines (SB) methods, allowing the identification of scatterers that dominate the scattering from the resolution cell (PS) and slowly-decorrelating filtered phase (SDFP) pixels, was applied. StaMPS is a software package that implements

an InSAR persistent scatterer (PS) method developed to work even in terrains devoid of man-made structures and/or undergoing non-steady deformation. StaMPS-MTI (Multi-Temporal InSAR) is an extended version of StaMPS that also includes a small baseline method and a combined multi-temporal InSAR method. The StaMPS framework was initially developed for PS applications in natural terrain (Hooper et al., 2004; 2007) and since, has been expanded to include short baseline analysis (Hooper, 2008). StaMPS PS analysis uses primarily spatial correlation of the phase to identify phase-stable pixels, as opposed to temporal correlation, and it does not assume any approximate model of displacements (e.g. Ferretti et al., 2001; Kampes, 2005). A requirement is that the displacement gradients in space and time should not be steep for proper unwrapping. Once coregistering master and slave images, a series of interferograms is constructed which also uses the most precise orbit information available. An evaluation of interferometric phase differences in time is done to obtain the potential PS points. Finally, temporally coherent of natural reflectors in SAR images are detected due to their correlated phase behavior over time. Then, the displacement of each individual PS point is estimated by the technique.

In addition, SB analysis (Berardino et al., 2002) aims to detect pixels whose phase decorrelates little over short time intervals. Interferograms having mutual small baselines combinations are created based on the available of image. SB method searches to make phase unwrapping easier by selecting small baselines interferograms and filtering the phases. It creates a network of interferograms to estimate heights and deformation with respect to one single master image.

Finally, StaMPS/MTI combines both sets of results (PS+SDFP) to improve phase unwrapping and the spatial sampling of the signal of interest.

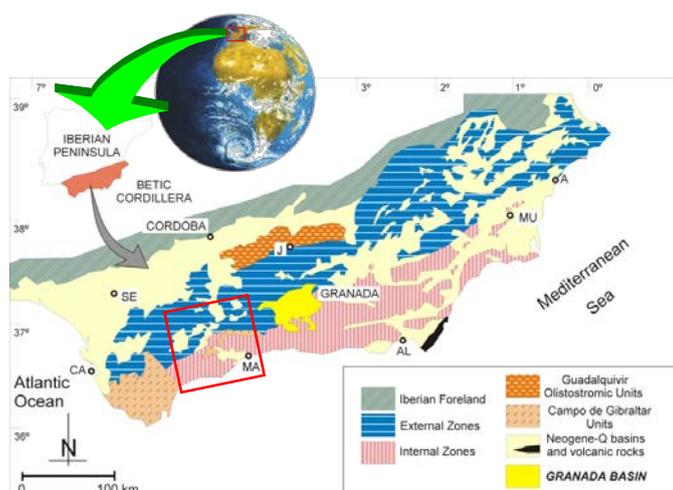


Figure 1 - Location of the study area in the Betic Cordillera, southern Spain. Cobertura of radar images is depicted by the red box.

were selected in order to avoid Doppler centroid differences of more than 700 MHz.

A SRTM C-band DEM with resolution of 3 arc-seconds (90 m) and 10 meter height accuracy was used as an external DEM in this study to remove the topographic phase from the differential interferograms.

Precise orbit data for ERS-1/2 and Envisat satellites were provided by TU Delft and ESA.

For both processing (ERS and Envisat), the master image selection is based minimising perpendicular, Doppler and temporal baselines (Hooper et al., 2007). Orbits 12108 (13/08/1997) and 15314 (02/02/2005) were selected respectively for ERS and Envisat stacks (Fig. 2).

The data were processed using StaMPS/MTI to determine Line-Of-Sight (LOS) displacements (Fig. 3). Interferograms were created with DORIS.

3. RESULTS AND DISCUSSION

According to the geological map of Málaga (Estévez and Chamón, 1978) (Fig. 4) practically all the town of Málaga is situated over Quaternary and Pliocene soft sediments, unconformably

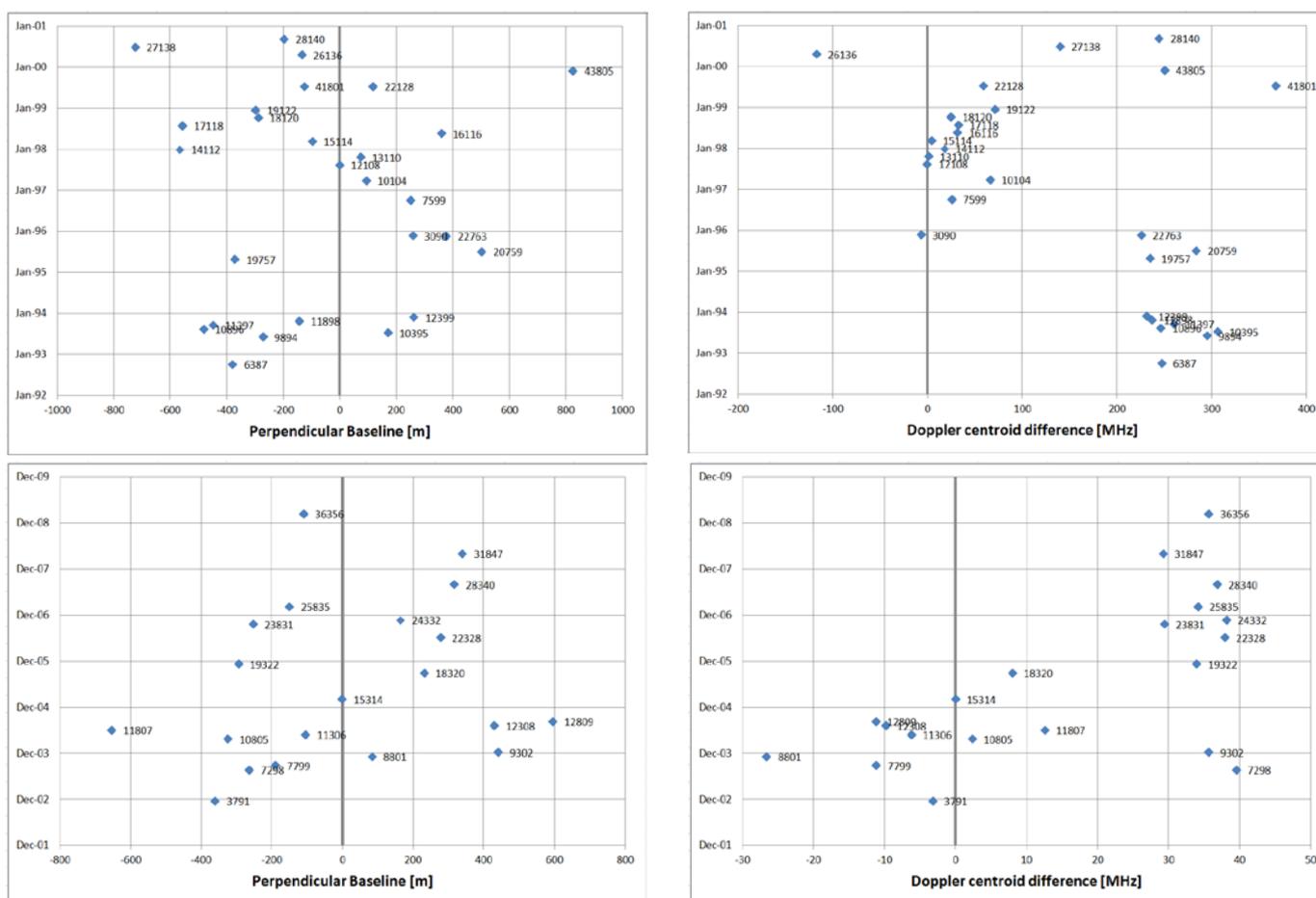


Figure 2 – Perpendicular baselines and Doppler centroid differences respect to the selected master image for ERS (above) and Envisat (below) stacks.

The Málaga area is covered by a total of 31 ERS-1/2 SAR images from the ascending track 230 and frame 729 (October 1992 – November 2000) and 23 Envisat ASAR images from the ascending track 230 and frame 729 (November 2002 – February 2009). Due to ERS-2 gyroscope failure on January 2001, only images until 2001

deposited above the basement. The exception is the northern border of Málaga, where directly appears the basement mainly formed by Paleozoic diagenetic sediments of the Malaguide Complex –one of the complexes of the Betic Internal Zone.

The south part of the harbour of Málaga where has been detected one of the areas of subsidence was built in great part occupying part of the sea. The first coastal sediments, beach sediments, would be dragged, but under them the rest of the Quaternary and Pliocene sediments support the new harbour. In detritic rocks, the subsidence is mainly related to the presence of water saturated, clays and silts, mainly because they have high porosity and low permeability. If these sediments are loaded, they loss very slowly the interstitial water during compaction, decreasing the volume and finally determining the local subsidence. These harbour heavy constructions can explain the subsidence there located. Probably, this subsidence will continue several years, perhaps decades.

The sector of Teatinos, situated approximately 2.2 km to the west of the harbour, was crossed by a brook, which small valley opened in the proximities of the coast, disappearing before the shore. Several decades ago, this area corresponded to an agrarian land but nowadays is a district of the town. The singularity of this area is the

fact that the subsidence is restricted to a small sector. The first possible explanation, always within a process of compaction, is that this sector, crossed by the brook, had high porosity, also by the presence of clays and silts and was saturated in water. The decreasing in the water table may be related to this local subsidence, possibly due to the existence of a well now actively used.

In order to advance in the interpretation of the cause of the subsidence in both points, it is necessary to get information about the previous researches, particularly in what is referred to the geotechnical aspects, i.e., in the harbour, the information of the type of rocks in which have been situated the new constructions, the deep to the basement, completed by some data about the thickness of each formation and other possible characteristics of the underlying sediments. For the western sector, similar type of data is also useful, as well as the information of the possible wells and their flow and use.

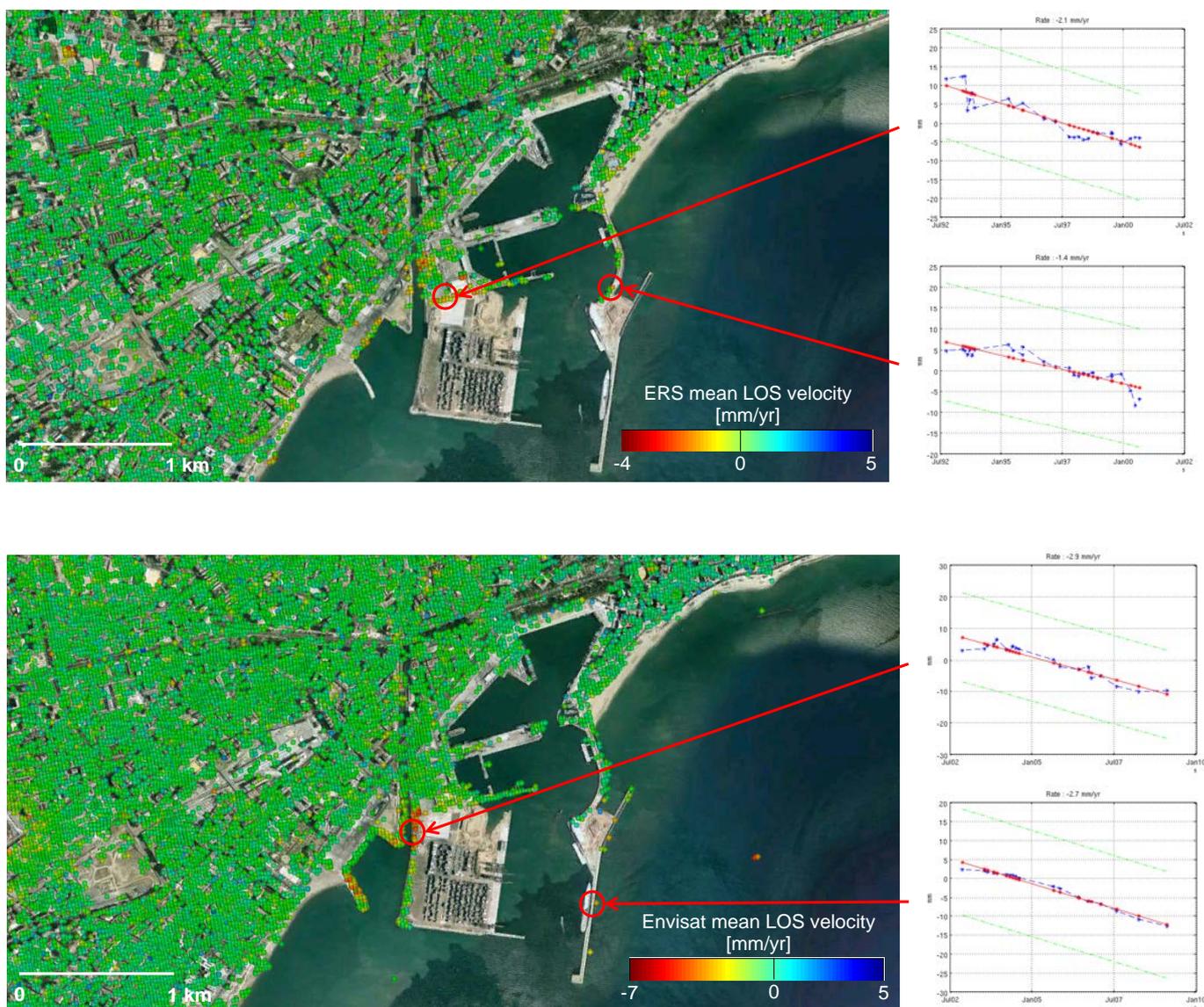


Figure 3 – ERS (above) and Envisat (below) mean LOS velocity over part of the city of Málaga. On the right, some time series plots of PS on the port area.

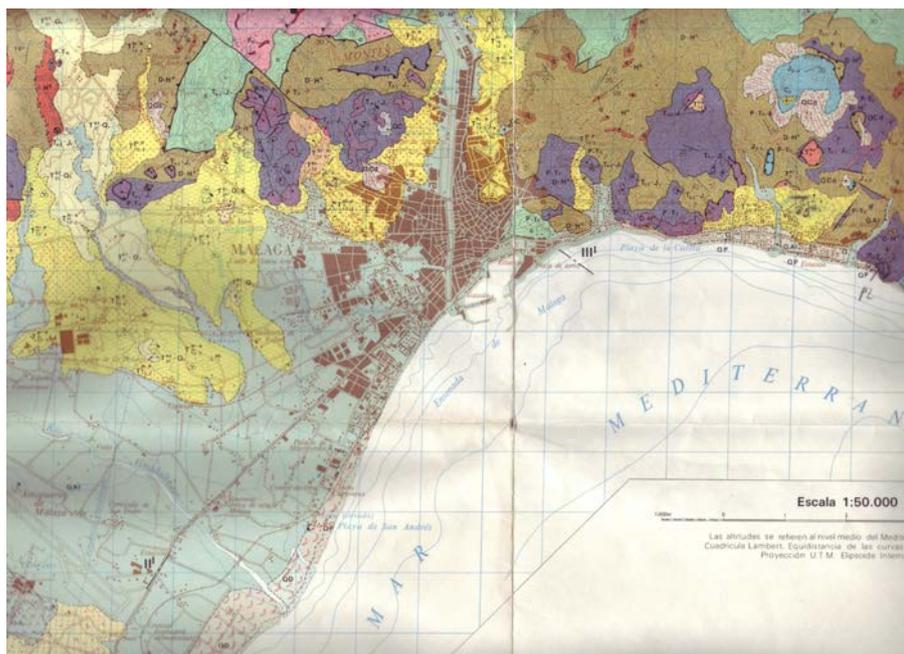


Figure 4 - Geological map of Málaga (Estévez and Chamón, 1978).

SEDIMENTOS POST-MANTOS			
CUATERNARIO	Q	Q	Indiferenciado
	GF	GF	Flecas
	GA1	GA1	Aluvial
	GD	GD	Dunas
PLEISTOCENO SUPERIOR	T ¹ G	T ¹ G, K	Aréolas y conglomerados
	GC	GC	Calizas
	QGr	QGr	Caracas
	Qtr	Qtr	Tobas
MIOCENO ANDALUCÉNICO	T ² G	T ² G	Residuals sin cementación
	T ² G, K	T ² G, K	Calizas
	T ² G	T ² G	Calizas con cementación
	T ² G	T ² G	Aréolas y conglomerados
	T ² G	T ² G	Aréolas
	T ² G	T ² G	Aréolas y Margas
	T ² G	T ² G	Aréolas y conglomerados

MALAGUIDE			
EOCENO INTERIOR	T ²	T ²	Caliza y margas
CRETACEO SUPERIOR	C ₁	C ₁	Caliza roja
	J ₁	J ₁	Caliza blanca
JURASICO MALM	T ₁ A	T ₁ A	Dolomita
DOGGER	F ₁ T ₁	F ₁ T ₁	Aréolas conglomerados, arenis y arcillas
LIAS	H ¹	H ¹	Conglomerado pélico
TRIASICO	G	G	Lías
PERMIANO	D ¹ H ¹	D ¹ H ¹	Dolomitas y filitas
CARBONIFERO	S ¹ D	S ¹ D	Calizas filitas y gréseas
DEVONICO	K	K	Calizas
SILURICO	KB	KB	Conglomerados silíceos
ORDOVICIO CAMBRICO	PC-S ¹	PC-S ¹	Filits y metaconglomerados
PRECAMBRICO			

Acknowledgements

This research was supported by the European Space Agency (ESA) in the scope of 7629 CAT-1 project. It has also been partially supported by AYA2009-10209, AYA2010-15501, PR2006-0330, ESP2006-28463-E, CSD2006-00041, and CGL2006-06001 projects funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation as well as RNM-282 research group of the Junta de Andalucía (Spain). The SRTM data were provided by USGS/NASA. Interferometric data were processed using the public domain SAR processor DORIS and StaMPS/MTI. The satellite orbits used are from Delft University of Technology.

4. REFERENCES

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375 – 83.

- Estévez C. and Chamón, C. (1978) Hoja geológica 1:50.000 n° 1053/67 (Málaga-Torremolinos). I.G.M.E., 32 p.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophys. Res. Lett.*, 31(23), doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. (2007) Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophys. Res. Lett.*, 112 (B07407), doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophys. Res. Lett.* 35, L16, 302, doi:10.1029/2008GL03465.
- Kampes, B. M. (2005). Displacement Parameter Estimation using Permanent Scatterer Interferometry, PhD Thesis, Delft University of Technology.

Evaluación del posicionamiento NRTK en la región fronteriza entre Andalucía (España) y Portugal utilizando las redes activas RAP y RENEP

Evaluation of NRTK positioning on the border region of Andalusia (Spain) and Portugal using the RAP and RENEP active networks

M^a Selmira Garrido ⁽¹⁾, Elena Giménez ⁽¹⁾, Juan A. Armenteros ⁽¹⁾, M^a Clara de Lacy ⁽¹⁾ y Antonio J. Gil ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén. Campus de Las Lagunillas. 23071. Jaén. mgarrido@ujaen.es

SUMMARY

Nowadays, real-time GNSS networks allow centimetre-level positioning accuracy using a network-based strategy. These “active” networks realize a reference frame and propagate it to the users. The correct realization of the reference frame is crucial in order to support real-time and post-processing solutions. In border regions, the coherence between the reference frames propagated by neighboring active networks is a critical problem. In addition, the accuracy and precision of NRTK positioning tend to degrade outside the network where the rover is not surrounded by reference stations and the NRTK corrections are extrapolated. This fact contributes to reduce the NRTK performance compared with optimal geographic conditions for the rover location inside the network. In order to perform a comparative study of the high-accuracy NRTK positioning services offered by the RENEP and RAP networks, a national and a local RTK network respectively, with similar characteristics, a study area on the border between Portugal and the Community of Andalusia (South Spain) is chosen to assess service coverage, time to fix ambiguities and accuracy and precision of network-based real-time positioning. In this study the test results of post-processed and simultaneous NRTK positions at six test points located in this border region are presented. Upon comparing the post-processed position for each test point, as estimated with respect to each of the two active networks analyzed, the discrepancies found in 3D were less than 2 centimeters. The results of network-based RTK positioning were found to be successful within a 2 cm precision level in the east and north components and 4 cm for the up component. The results also confirm that the NRTK positioning accuracy is about 2 cm in horizontal and 4 cm in vertical, which can satisfy the requirement of real-time positioning users at a centimetric accuracy level, even in border regions considering extrapolated NRTK solutions.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las redes destinadas al posicionamiento preciso en tiempo real, también conocidas como “redes activas” o “redes RTK (Real Time Kinematic)”, han cobrado un gran protagonismo en todas aquellas aplicaciones relacionadas con el ámbito de la Geomática. Las aplicaciones topográfico-geodésicas y cartográficas principalmente del posicionamiento basado en una red RTK (NRTK-*Network based RTK Positioning*), se ven ampliadas con otras como la agricultura de precisión, el guiado de maquinaria, el control de flotas, etc. Entre las principales ventajas que ofrece este posicionamiento destacan la modelización precisa de las fuentes de error que intervienen en el posicionamiento RTK, la mejora en la resolución de ambigüedades, la ampliación del área de trabajo al reducirse los errores dependientes de las distancia o la posibilidad de contar con un marco de referencia estable (Vollath et al., 2002; Euler and Zebhauser, 2003) y desde un punto de vista práctico, el aumento de la rentabilidad y el rendimiento en el trabajo. El auge de estas redes en los últimos años ha llevado a que un altísimo porcentaje de los países y/o regiones europeas dispongan de al menos una red regional, o en su defecto estatal, de carácter activo. No obstante, en las zonas fronterizas, la coherencia entre los marcos de referencia propagados por redes activas vecinas puede ser un problema crítico (Benciolini et al., 2008). A este hecho hay que unir que la exactitud y precisión del posicionamiento NRTK tienden a degradarse fuera de la red, donde el “rover” no está rodeado por estaciones de referencia y las correcciones NRTK son extrapoladas (Garrido et al., 2011). Estos hechos pueden reducir el rendimiento en comparación con el posicionamiento NRTK en óptimas condiciones geográficas. Para llevar a cabo un estudio comparativo de los servicios de posicionamiento preciso NRTK que ofrecen las redes RENEP y RAP, una red nacional portuguesa y una red regional española con características similares, se ha elegido un área de estudio en la frontera entre Portugal y la Comunidad de Andalucía (sur de España). En esta zona se evaluará la consistencia entre los marcos de referencia implicados, la cobertura de los servicios y la exactitud y la precisión alcanzados en el posicionamiento NRTK.

2. REDES GNSS ACTIVAS EN EL SO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

En el suroeste de la Península Ibérica contamos con las redes de carácter activo RAP y RENEP. La Red Andaluza de Posicionamiento, más conocida por sus siglas, RAP, es una red de carácter regional que opera en Andalucía (España) (Figura 1). Actualmente está formada por 22 estaciones de referencia, todas ellas equipadas con receptores GRX1230 Pro de Leica Geosystems. El marco de referencia de la RAP ha sido calculado en ETRS89 (ETRF05- época media de observación 2007.14).

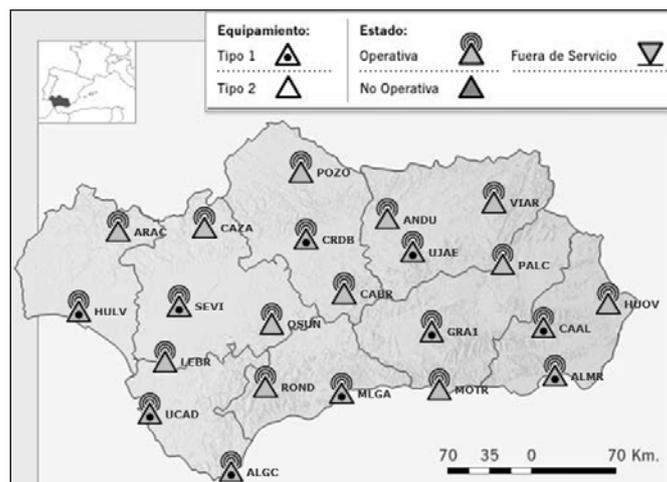


Figura 1 – Red RAP (RAP network)
(<http://www.juntadeandalucia.es/obraspublicasytransportes/redandaluzadeposicionamientorap>)

Al igual que RENEP ofrece solución de red basada en el modelo MAC (*Master Auxiliary Concept*) (Euler et al., 2001) en formato estándar RTCM 3.0 (RTCM, 2004), pero utilizando sólo observaciones GPS.

RENEP es una red activa nacional portuguesa integrada por más de 40 estaciones de referencia distribuidas por la península, las islas Azores y Madeira (Figura 2). Se trata de una red mixta en cuanto al equipamiento de sus estaciones. Las coordenadas de sus estaciones de referencia han sido calculadas en ETRS89 (ETRF97- época media de observación 1995.4). Con el fin de garantizar un posicionamiento preciso en tiempo real, proporciona solución de red basada en el modelo MAC en formato estándar RTCM 3.0 y generada utilizando datos GPS y GLONASS.

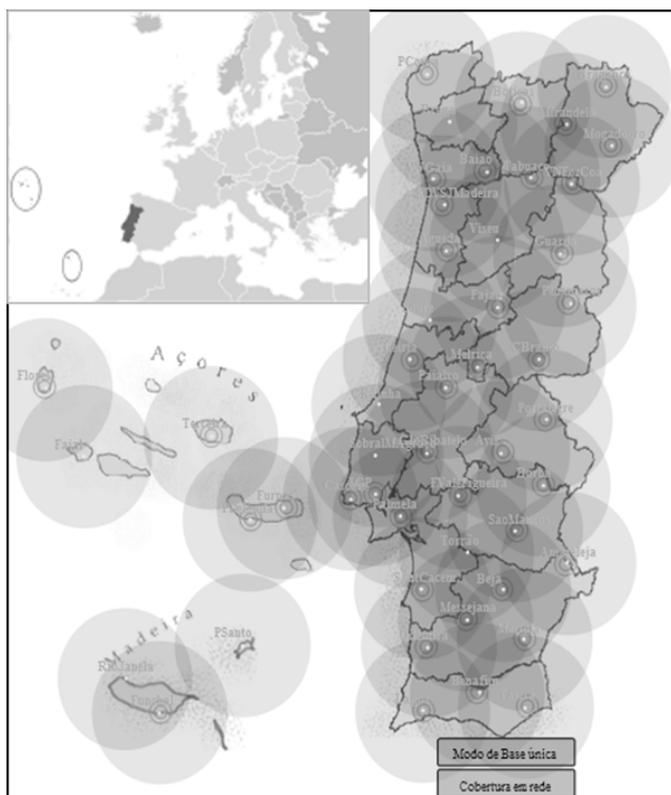


Figura 2 – Red RENEP (RENEP network)
(<http://www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/renep/renep.asp>)

3. METODOLOGÍA DE CONTROL

Con el objeto de evaluar el posicionamiento NRTK basado en las dos redes activas consideradas, se han seleccionado una serie de parámetros de evaluación entre los que se encuentran el análisis del marco de referencia de cada red, la cobertura de los servicios y la exactitud y la precisión alcanzados en el posicionamiento NRTK.

Para llevar a cabo esta evaluación se han seleccionado 6 puntos de control en una franja a lo largo de la frontera entre Portugal y la comunidad de Andalucía, identificados como MAJA, MIRA, MOJO, QUIN, SIEH y TOMZ (Figura 3). Todos ellos son vértices geodésicos pertenecientes a la red geodésica tridimensional española REGENTE (Barandillo and Quirós, 1996) y han sido observados durante la campaña realizada entre el 3 y el 6 de Noviembre de 2009. Dada la especial configuración de la zona de análisis, la elección de los puntos de control se ha realizado prestando especial atención a que estuvieran situados lo más cerca posible de la línea de frontera. No obstante, de los seis puntos de control, tres están muy próximos a esta línea (los tres puntos más al norte) mientras que los tres restantes, más al sur, se encuentran en sus proximidades.

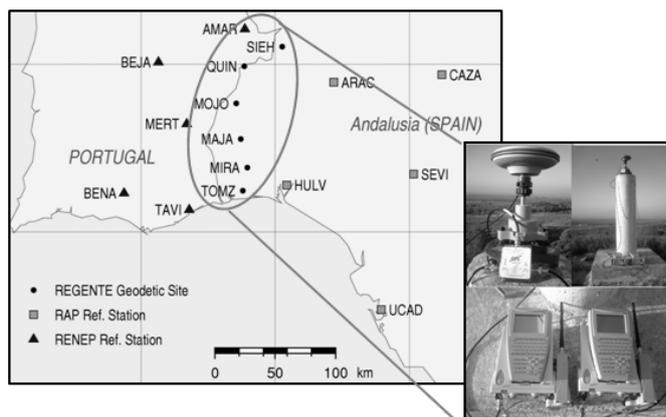


Figura 3 – Localización de puntos de control -vértices REGENTE- y de estaciones de referencia RAP y RENEP (Location of test points – REGENTE geodetic sites- and RAP and RENEP reference stations)

En cada uno de los puntos de control se han obtenido varias muestras relativas al posicionamiento NRTK y simultáneamente se ha realizado una observación en modo estático, utilizando para este propósito un splitter que permite la conexión de dos receptores GNSS a la misma antena (ver detalle de montaje en la Figura 3). La instrumentación empleada está compuesta por dos receptores geodésicos GPS LEICA GX1230 doble frecuencia con 12 canales en L1, 12 canales en L2, código y fase y capacidad para trabajar en tiempo real, una antena geodésica compacta Leica AX1202, antena SmartTrack L1/L2 con plano de tierra integrado, un teléfono móvil Siemens MC75 con tarjeta SIM Movistar, un splitter GPSSource de dos salidas amplificado y diverso material auxiliar (cables de conexión, flexómetro para medida de alturas, basada para estacionamiento en pilar sobre centrado forzado, etc).

Para cada punto se dispone de 45 posiciones NRTK por cada una de las dos redes activas consideradas en el estudio, distribuidas en 3 sesiones no consecutivas e identificadas como: S1(RAP), S1(RENEP), S2(RAP), S2(RENEP), S3(RAP), S3(RENEP).

Es importante destacar que se ha considerado una resolución independiente de ambigüedades en cada registro RTK, siendo almacenada la posición sólo si el tiempo de resolución de ambigüedades es inferior a 90 segundos. Asimismo, se ha aplicado un control de calidad tanto horizontal (CQ horizontal) como vertical (CQ height) antes del registro de cada posición NRTK, siendo fijados los valores máximos de CQ horizontal en 30 mm y de CQ height en 50 mm.

La observación estática ha sido post-procesada con respecto a los marcos definidos por las estaciones RENEP y RAP más cercanas. Las coordenadas de las estaciones de referencia son constreñidas a ± 2 mm en la componente Norte y Este y a ± 4 mm en altura. El procesamiento de las observaciones se ha realizado con Bernese V 5.0 (Dach et al. 2007) utilizando efemérides precisas (Dow et al., 2005). Los observables de fase han sido preprocesados en modo línea base utilizando triples diferencias. En la estimación final, basada en el modelo de las dobles diferencias combinación libre de ionosfera con efemérides precisas, se ha utilizado una máscara de elevación de 3 grados y se ha aplicado una ponderación en función de la elevación del satélite. Se han aplicado calibraciones del centro de fase de la antena utilizando correcciones absolutas del centro de fase y se estimaron parámetros específicos de la troposfera para todas las localizaciones. A priori, la refracción troposférica fue modelada utilizando el modelo Dry-Niell (Niell, 1996) y la componente húmeda restante fue estimada con carácter horario para cada estación usando la función Wet-Niell (Niell, 1996) sin sigmas a priori. El método QIF (*Quasi Ionosphere Free*) se utiliza para fijar las ambigüedades como enteros.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de los marcos de referencia

Las Tablas 1 y 2 muestran las discrepancias, en cada componente, planimétricas (2D) y espaciales (3D), entre las

coordenadas ETRS89 de cada punto de control estimadas en post-proceso a partir de los marcos de referencia RENEP y RAP y las coordenadas ETRS89 del vértice REGENTE facilitadas por el Instituto Geográfico Nacional español.

Tabla 1 - Discrepancias entre coordenadas estimadas respecto a RENEP y coordenadas REGENTE (Discrepancies upon comparing the RENEP based post-processing solutions with the REGENTE position)

Id.	Δe (m)	Δn (m)	Δh (m)	2D (m)	3D (m)
MAJA	0.013	-0.003	-0.009	0.014	0.016
MIRA	0.008	-0.016	-0.003	0.018	0.018
MOJO	0.014	0.004	-0.035	0.015	0.038
QUIN	0.005	-0.006	0.002	0.008	0.008
SIEH	0.009	-0.009	0.020	0.013	0.024
TOMZ	0.005	0.001	-0.006	0.005	0.008

Tabla 2 - Discrepancias entre coordenadas estimadas respecto a RAP y coordenadas REGENTE (Discrepancies upon comparing the RAP based post-processing solutions with the REGENTE position)

Id.	Δe (m)	Δn (m)	Δh (m)	2D (m)	3D (m)
MAJA	0.010	0.026	0.009	0.028	0.029
MIRA	0.000	0.008	0.009	0.008	0.012
MOJO	0.005	0.030	-0.023	0.030	0.038
QUIN	-0.003	0.019	0.010	0.019	0.022
SIEH	0.002	0.018	0.024	0.019	0.030
TOMZ	-0.002	0.028	0.003	0.028	0.029

4.2. Precisión y exactitud en el posicionamiento NRTK

Los resultados de precisión horizontal y vertical se presentan de forma gráfica en las Figuras 4 y 5 respectivamente. Los resultados estadísticos de exactitud, recogidos en las Tablas 3 y 4, están calculadas respecto a la solución Regente (exactitud absoluta) y con respecto a la solución post-proceso (exactitud relativa).

Tabla 3 – Exactitud horizontal y vertical obtenida por sesiones con la solución de red RAP (Horizontal and vertical accuracy by sessions based on RAP NRTK solutions)

Id.	E(m)	Exactitud absoluta			Exactitud relativa		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
MAJA	E _h	0.026	0.023	0.025	0.011	0.008	0.013
	E _v	0.018	0.007	0.018	0.020	0.016	0.018
MIRA	E _h	0.039	0.025	0.021	0.033	0.020	0.018
	E _v	0.022	0.066	0.029	0.027	0.072	0.035
MOJO	E _h	0.032	0.034	0.028	0.008	0.013	0.017
	E _v	0.027	0.030	0.041	0.014	0.026	0.034
QUIN	E _h	0.029	0.022	0.016	0.016	0.011	0.017
	E _v	0.020	0.031	0.023	0.023	0.038	0.029
SIEH	E _h	0.015	0.023	0.016	0.016	0.011	0.013
	E _v	0.025	0.071	0.062	0.031	0.047	0.041
TOMZ	E _h	0.026	0.034	0.026	0.007	0.009	0.005
	E _v	0.008	0.025	0.012	0.007	0.022	0.012

Tabla 4 – Exactitud horizontal y vertical obtenida por sesiones con la solución de red RENEP (Horizontal and vertical accuracy by sessions based on RENEP NRTK solutions)

Id.	E(m)	Exactitud absoluta			Exactitud relativa		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
MAJA	E _h	0.016	0.018	0.013	0.012	0.014	0.008
	E _v	0.094	0.081	0.082	0.085	0.072	0.073
MIRA	E _h	0.025	0.057	-	0.007	0.039	-
	E _v	0.005	0.001	-	0.008	0.002	-
MOJO	E _h	0.010	0.010	0.015	0.010	0.014	0.008
	E _v	0.057	0.089	0.059	0.022	0.054	0.024
QUIN	E _h	0.027	0.009	0.018	0.023	0.007	0.018
	E _v	0.013	0.014	0.007	0.013	0.011	0.006
SIEH	E _h	0.019	0.016	0.015	0.015	0.009	0.015
	E _v	0.025	0.017	0.017	0.016	0.016	0.021
TOMZ	E _h	0.029	0.020	0.016	0.025	0.016	0.012
	E _v	0.021	0.014	0.032	0.023	0.019	0.038

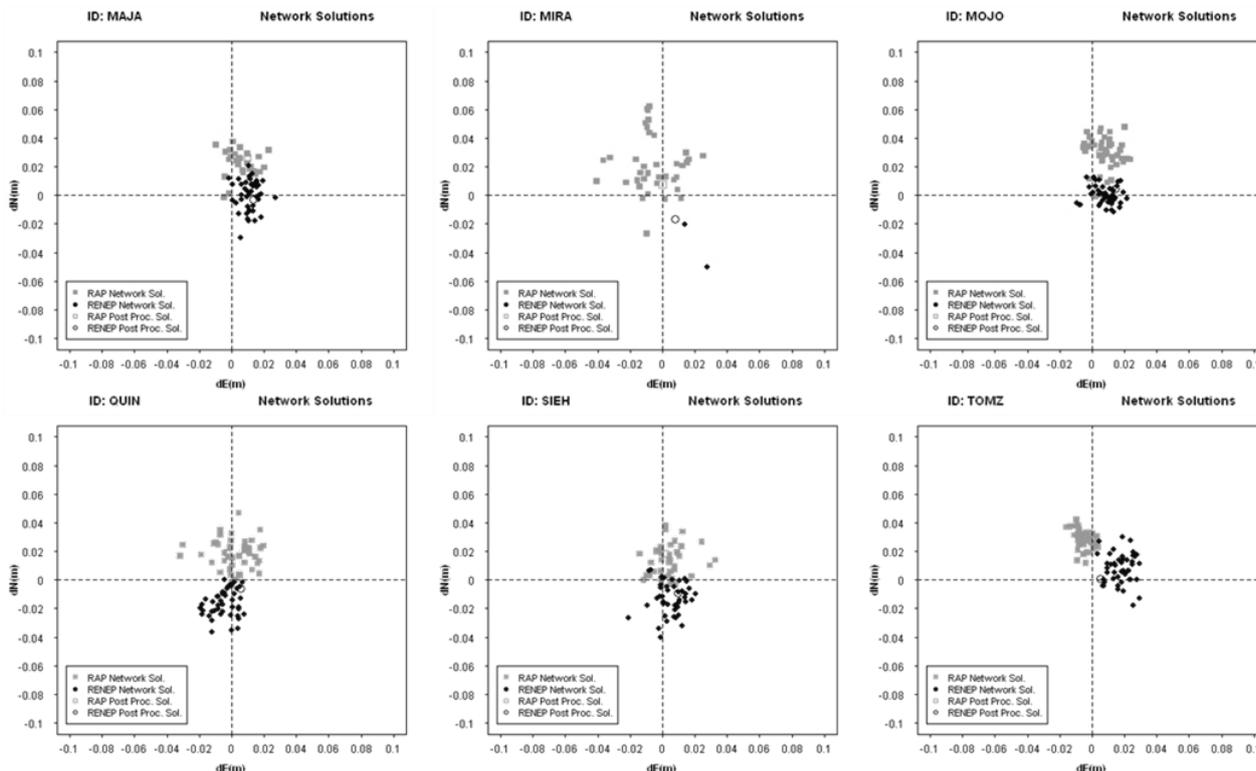


Figura 4 – Discrepancias horizontales con respecto a la solución REGENTE al considerar las soluciones NRTK de RAP y RENEP (Horizontal discrepancies with respect to the REGENTE solution considering the RAP and RENEP NRTK solutions)

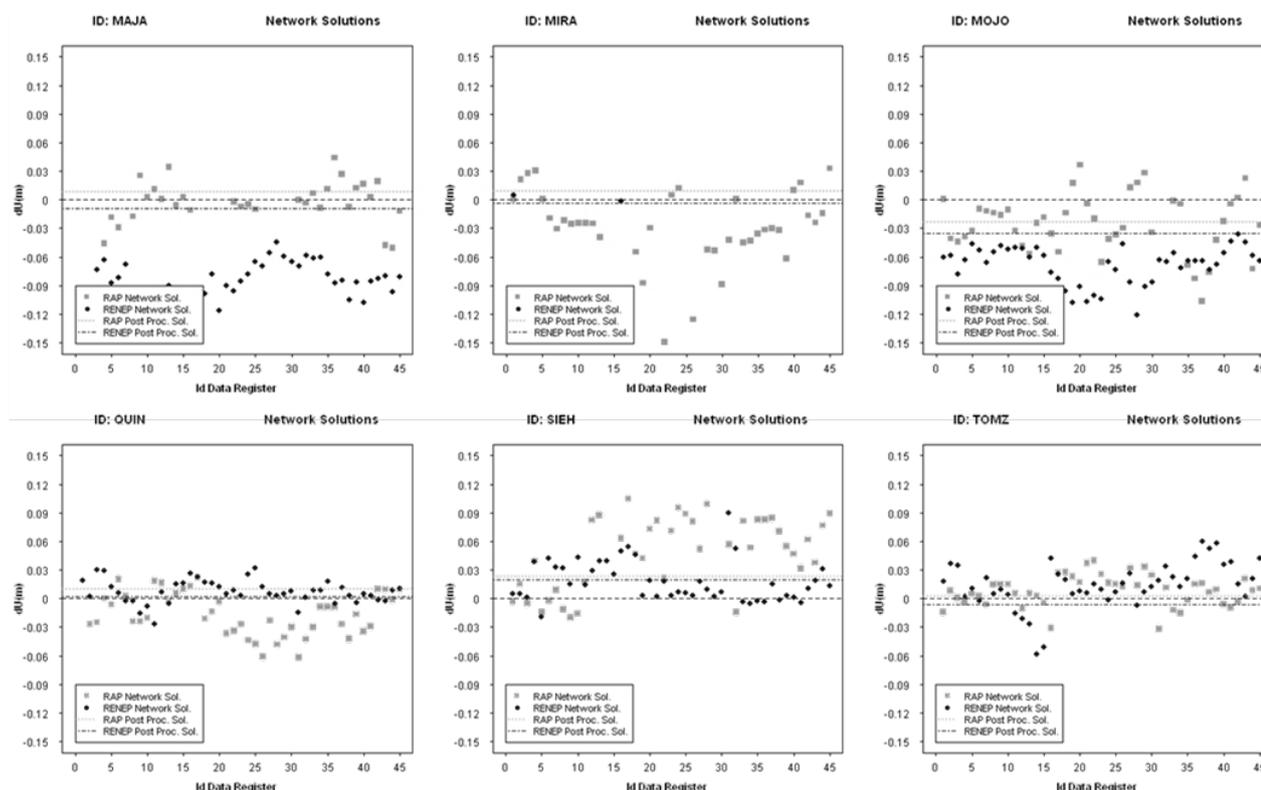


Figura 5 – Discrepancias verticales con respecto a la solución REGENTE al considerar las soluciones NRTK de RAP y RENEP (Vertical discrepancies with respect to the REGENTE solution considering the RAP and RENEP NRTK solutions)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La coherencia entre redes activas de regiones vecinas, al igual que ocurre con el caso de redes permanentes de carácter pasivo, se convierte en un problema crítico de cara al posicionamiento preciso, siendo necesario garantizar a los usuarios que operan en zonas de frontera que no obtendrán resultados significativamente diferentes en función de la red utilizanda. El análisis de los marcos de referencia implicados en este estudio refleja que las discrepancias entre las coordenadas REGENTE y las estimadas en post-proceso respecto a RAP y RENEP son inferiores a los cuatro centímetros. Asimismo, las discrepancias RENEP-REGENTE son inferiores a las de RAP-REGENTE. Resultados que ponen de manifiesto la mayor similitud entre los marcos de RENEP (ETRF97) y REGENTE (ETRF96) que entre RAP (ETRF2005) y REGENTE.

Pese a la distancia a las estaciones de referencia de las redes consideradas, los servicios de posicionamiento ofertados son accesibles en todos los puntos de control. Aunque sólo son registradas aquellas soluciones en las que el tiempo en fijar las ambigüedades de fase es inferior al minuto y medio, los tiempos de inicialización se mantienen estables para las dos redes consideradas.

Los registros de posición en tiempo real en los puntos de control permiten llevar a cabo un análisis de la precisión y exactitud en el posicionamiento RTK en esta zona de frontera. El análisis gráfico de precisión del posicionamiento RTK muestra un grado de dispersión en torno al valor de control en 2D muy reducido, encontrándose un altísimo porcentaje de las posiciones RTK dentro de un círculo de 5 cm de diámetro. El análisis por sesiones, tanto de los valores de precisión como de exactitud, refleja una alta repetibilidad, con valores inferiores en planimetría que en altimetría, como a priori cabe esperar. En todos los casos, el valor de la precisión en la componente altimétrica duplica a los valores de precisión en las componentes este y norte. Se garantiza asimismo el nivel de exactitud centimétrico en el posicionamiento RTK en zonas límite, tanto en la componente horizontal como vertical. Destacan los buenos resultados alcanzados en todos los puntos de control, pese a disponer de soluciones de red extrapoladas para ambas redes. Es

importante remarcar el hecho de que no se aprecian diferencias significativas entre las dos redes activas consideradas en cuanto a cobertura, tiempo de resolución de ambigüedades, precisión y exactitud. Ambas generan correcciones de red basadas en la metodología MAC y ofrecen un servicio gratuito de posicionamiento preciso, por lo que no hay signos evidentes que recomienden utilizar una red frente a otra en la zona de análisis.

6. REFERENCIAS

- Barandillo, A. and Quirós, R., (1996): "Proyecto REGENTE. Una nueva red geodésica nacional". *Física de la Tierra*, **8**, 23–28.
- Benciolini, B., Biagi, M., Crespi, M., Manzino, A.M., Roggero, M., (2008): "Reference frames for GNSS positioning services: Some problems and proposed solutions". *J. Appl. Geodesy*, **2**, 53–62.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M. (2007): "Bernese GPS software version 5.0 user manual". Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland, 612pp.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. and Gendt, G. (2005): "The International GPS Service: celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade". *Advance in Space Research*, **36**, 3, 320–326.
- Euler, H.J., Keenan, C.R., Zebhauser, B.E., Wübbena, G., (2001): "Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays". *Proceedings of ION GPS 2001*, Salt Lake City, UT, USA, Sep 11–14.
- Euler, H.J., Zebhauser, B.E., (2003): "The use of standardized network RTK messages in rover applications for surveying". *Proceedings of ION NTM 2003*, Anaheim, CA, January 22–24.
- Garrido, M.S., Giménez, E., De Lacy, M.C., Gil, A.J. (2011): "Surveying at the limits of local RTK networks: Test results from the perspective of high accuracy users". *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**, 2, 256–264.
- Niell, A.E. (1996): "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths". *J. Geophysical Research*, **101**, 3227–3246.
- RTCM (2004): "RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 3.0", RTCM Paper 30-2004/SC104-STD.
- Vollath, U., Landau, H., Chen, X., (2002): "Network RTK versus single base RTK – understanding the error characteristics". *Proceedings of ION-GPS 2002*, Portland, OR.

Agradecimientos. Esta investigación ha sido financiada por los proyectos AYA2010-15501 y CSD2006-0041 (Fondos FEDER). Se agradece la colaboración y el apoyo prestado por el Instituto Geográfico Portugués (red RENEP) y por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía y el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (red RAP).

Exactitud de un MDT obtenido a partir de datos LIDAR

Accuracy of a DTM obtained from LIDAR data

Alejandro Martínez de Agirre⁽¹⁾, Borja Rodríguez⁽¹⁾, y José Antonio Malpica⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad de Alcalá, Departamento de Matemáticas, Carretera Madrid-Barcelona, km. 33,600 (28871), Alcalá de Henares (Madrid), alejandro.martineza@uah.es, borja.rodriguez@uah.es, y josea.malpica@uah.es.

SUMMARY

LIDAR (Light Detection And Ranging) technology determines the distance from a laser emitter to an object or surface using a pulsed beam. This technology, with global navigation systems, is revolutionizing the way to get the DTMs (Digital Terrain Models). Due to this fact, it is essential to study the precision of the different models obtained from the raw data provided by the hardware of the laser-scanner. As a case study, an area corresponding to the external campus of the University of Alcalá de Henares has been a study. The LIDAR data used was the raw data (LAS files) provided by the laser-scanner hardware; each file covers an area of one square kilometer with a density of 0.5 points per square meter and a double pulse return. In order to obtain the DTM from the LIDAR raw data, first, data is rasterized to a grid of 1 meter resolution, which gives the DSM, second, using mathematical morphology and a further analysis of the return of double pulse, objects that do not correspond to bare soil are eliminated to obtain the DTM. The results obtained by comparison with the altimetry of the related to the geodetic network are very satisfactory.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Esta tecnología está revolucionando la manera de obtener los MDT (Modelo Digital del Terreno), ya que ofrece numerosas ventajas en la adquisición de datos digitales de elevación frente a los sistemas basados en fotogrametría: permite medir la altura real del terreno debajo de la vegetación, mantiene una precisión homogénea para todos los datos de la zona de estudio, y disminuye considerablemente los costes y los plazos de entrega en trabajos de grandes extensiones. Los MDT constituyen una herramienta primordial a la hora de realizar análisis y visualizaciones de múltiples aplicaciones en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Por este motivo, el principal objeto de estudio del presente trabajo es el de optimizar el proceso de extracción de los MDT a partir de datos LIDAR, y al mismo tiempo analizar tanto la precisión del algoritmo de extracción como la precisión altimétrica de los modelos generados automáticamente.

El sistema LIDAR aerotransportado está compuesto por un láser escáner, un receptor GPS que proporciona la posición del avión en cada momento, y un sistema inercial de navegación que informa de los giros del avión y de su trayectoria (Figura 1).

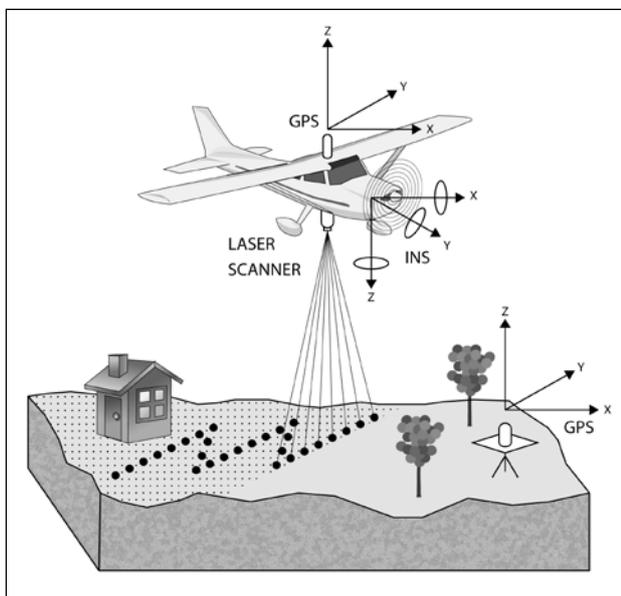


Figura 1 - Esquema de vuelo LIDAR

Mediante estos tres elementos, la tecnología LIDAR permite obtener las coordenadas planimétricas (x,y) y la elevación (z) de todos aquellos elementos reflejados en el escaneado, generando nubes de puntos tridimensionales (ver Figura 2). Los pulsos emitidos por el láser escáner pueden ser reflejados por edificios, árboles, coches, tendidos eléctricos, y/o cualquier otro objeto que se encuentre elevado sobre el terreno. La altura de dichos elementos no debe ser incluida en los MDT, ya que en éste se incluyen únicamente las alturas del terreno y no de los elementos existentes en él. Por este motivo, los filtros resultan imprescindibles para clasificar los puntos del terreno.

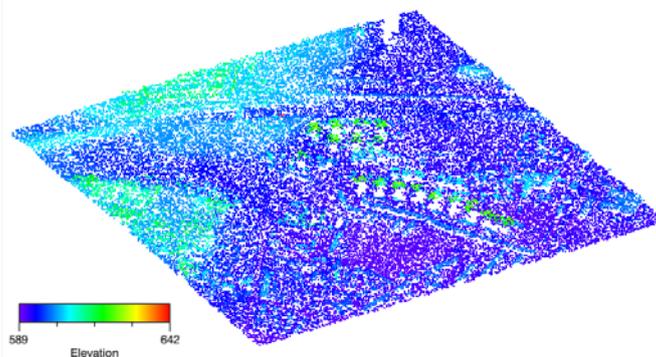


Figura 2 - Nube de puntos tridimensional obtenida por el LIDAR

La mayoría de los algoritmos existentes para la realización de dichos filtros pertenecen a casas comerciales y están bajo protección de copyright, por lo que no se suelen publicar en revistas científicas. En el ámbito académico, uno de los métodos más extendidos para el filtrado son los que utilizan morfología matemática. Lidenberg (1993) ya describía cómo la morfología matemática podía ser utilizada para el filtrado, y aconsejaba realizar una primera estimación para la superficie del terreno mediante un filtro de apertura sobre los datos con un elemento estructurante horizontal. Posteriormente, Kilian et al. (1996) llegaban a la conclusión de que el tamaño del elemento estructurante utilizado para el filtro de apertura es un parámetro crítico para el que no hay un valor óptimo, por lo que recomiendan utilizar una serie de filtros de apertura con elementos estructurantes de diferentes tamaños. Zhang et al. (2003) recomiendan un filtro morfológico progresivo donde la combinación de erosión y dilatación son empleados para filtrar los datos LIDAR. Estos filtros morfológicos pueden eliminar los elementos sobre el terreno, pero es difícil eliminar todos los elementos sobre el terreno

de diferentes tamaños (por ejemplo árboles y edificios) usando la misma ventana de filtrado. Este problema se resuelve incrementando el tamaño de la ventana de filtro morfológico gradualmente. En el presente trabajo, se ha utilizado la metodología del filtro morfológico progresivo, y al mismo tiempo se ha tratado de mejorar el algoritmo mediante el estudio de la diferencia de retornos de los pulsos LIDAR.

Una vez se ha generado el MDT a partir de datos LIDAR, es conveniente llevar a cabo un estudio sobre la exactitud planimétrica y altimétrica de los modelos generados. Hodson et al. (2004) llevaron a cabo un estudio de la precisión altimétrica de un MDT mediante puntos de referencia, obteniendo precisiones de 17 – 19 cm en vegetación baja y 26 cm en bosques. Kraus et al. (2004) plantean diversas metodologías para el estudio de la precisión de un MDT derivado del LIDAR respecto a un MDT generado con fotogrametría. Pacheco et al. (2011) concluyen que los MDT generados a partir del LIDAR son más consistentes en áreas urbanas debido a la presencia de espacios abiertos a nivel del suelo. En el trabajo que aquí se presenta se ha llevado a cabo una evaluación de la altimetría del MDT generado con la metodología propuesta, a partir de unos puntos de control obtenidos mediante tecnología GPS-RTK.

2. DATOS

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a archivos LAS proporcionados por el hardware del láser escáner aerotransportado en el vuelo LIDAR. Los vuelos LIDAR se hicieron a una altura

aproximada de 1800 metros y con una densidad mínima de 0.5 puntos por metro cuadrado, durante los veranos de 2006 y 2010, y cada archivo corresponde a un bloque de 1km x 1km.

El sensor utilizado en este estudio ha sido el ALS50-II de Leica-Geosystems diseñado para usos topográficos. Captura directamente la información altimétrica del terreno además de la información de intensidad retornada para diversos ecos de la señal. Las principales características del sensor utilizado son las siguientes: una altura de vuelo de entre 200 y 6000 metros, una frecuencia de hasta 150.000 Hz (150.000 pulsos/s), un ángulo de apertura entre 10 y 75 grados, una precisión de 11cm en altimetría, un paso de malla de 0.3 a 5 metros, y una densidad de puntos de hasta 12 puntos por metro cuadrado.

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo está dividido en dos partes, por un lado se ha desarrollado el algoritmo para la extracción automática de los MDT a partir de datos LIDAR, y por otro lado, se ha hecho un análisis sobre la precisión altimétrica de dichos modelos.

3.1. Extracción automática del MDT

La metodología utilizada para la extracción automática de MDT viene descrita detalladamente en Martínez de Agirre y Malpica (2010). Tanto en el siguiente diagrama (Figura 3) como en las próximas líneas, se explica de manera simplificada la forma en la que se han obtenido los diferentes modelos.

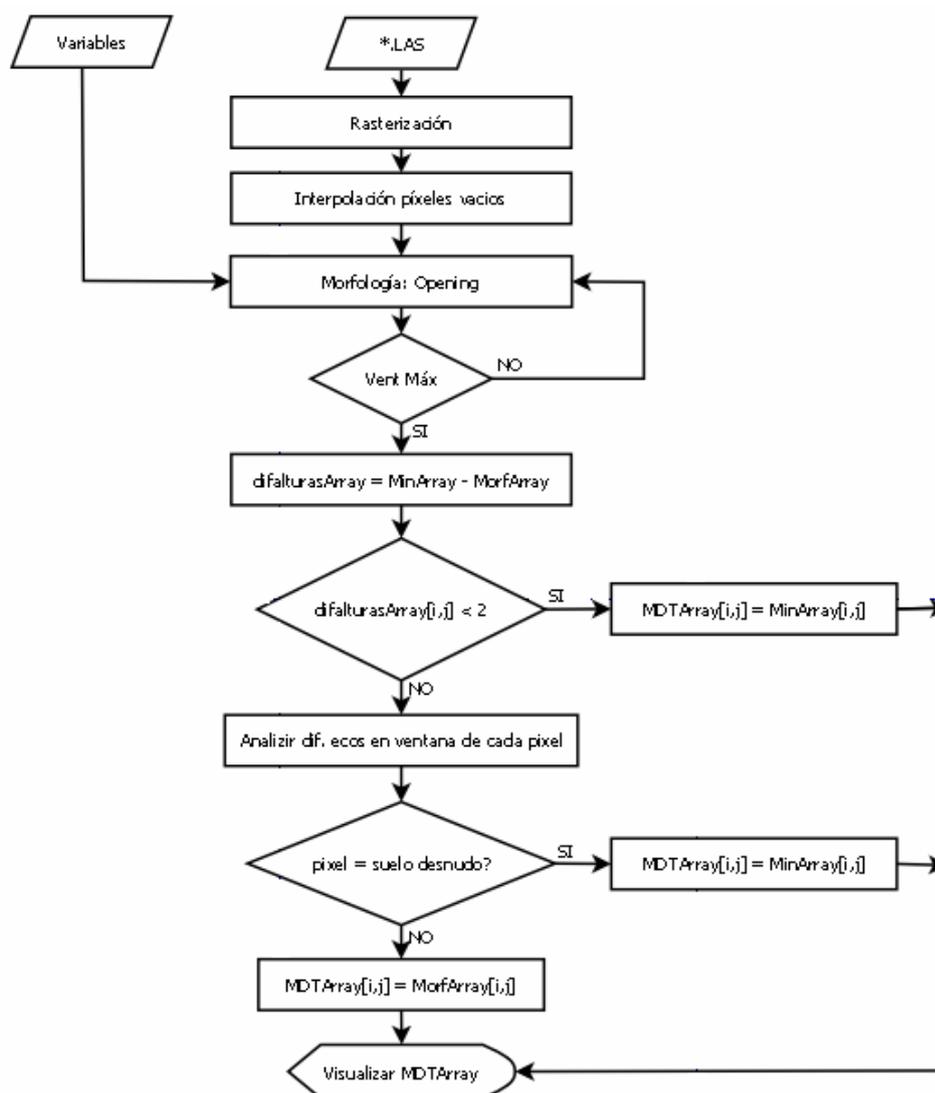


Figura 3 - Algoritmo de extracción de MDT a partir de datos LIDAR

Los **datos de entrada** de los que parte el algoritmo, son los archivos LAS que proporciona directamente el hardware del láser escáner aerotransportado. Cada archivo LAS corresponde, en este caso, a una extensión de 1km x 1km de la zona del campus externo de Alcalá de Henares, y tienen una densidad de 0.5 puntos por metro cuadrado.

El **preprocesamiento** de los datos consta de dos partes: Por un lado, la **rasterización** de los datos brutos proporcionados por los archivos LAS, ya que en estos archivos se tienen las coordenadas 3D da cada pulso. Streutker y Glenn (2006) proponen dividir los datos en celdas regulares donde cada una de ellas contenga un determinado número de puntos LIDAR dependiendo de la densidad. Y por otro lado, la **interpolación** de las celdas sin datos LIDAR se ha realizado mediante un método simple de interpolación, el de vecino más cercano. Según Bater y Coops (2009), ningún método de interpolación es superior a otro cuando se realizan interpolaciones de MDT con una densidad de puntos extremadamente densa, como con los datos LIDAR. Tras la rasterización de la nube de puntos proporcionada por el archivo LAS, y la interpolación de las celdas vacías, obtenemos el Modelo Digital de Superficies (MDS).

La **morfología matemática**, originalmente desarrollada por J. Serra (1982), tiene como objetivo la extracción de estructuras geométricas en los conjuntos sobre los que se opera, mediante la utilización de otro conjunto de forma conocida denominado elemento estructurante. El filtro de apertura utilizado en el algoritmo consiste en aplicar la erosión y la dilatación de forma consecutiva con cada elemento estructurante (ver Figura 4), y la morfología matemática progresiva consiste en la aplicación del filtro de apertura de manera progresiva, es decir, primero con una ventana 3x3, luego 5x5, etc.

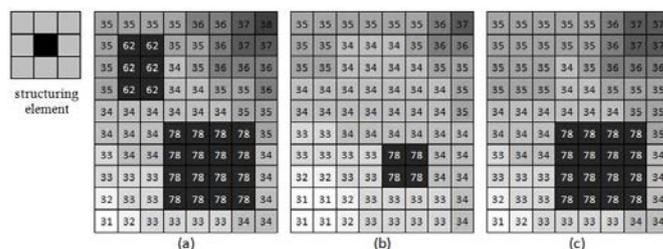


Figura 4 - Ejemplo de filtrado de objeto mediante el operados de apertura. (a) imagen original, (b) imagen obtenida tras el filtro de erosión con el elemento estructurante, y (c) imagen obtenida tras aplicar el filtro de dilatación sobre (b)

La **clasificación del suelo desnudo** se realiza para diferenciar los objetos elevados con el suelo desnudo. Para ello, se calcula la diferencia de altura de cada píxel entre la imagen obtenida por la morfología matemática progresiva y la imagen del MDS. Si esta diferencia es menor a un determinado umbral (por ejemplo, 2 metros), se considera como punto del terreno, y se le vuelve a asignar a dicho píxel el valor del MDS de nuevo.

El **análisis de diferencia de ecos o retornos** se hace sobre la imagen que resulta de la resta entre el retorno de máxima altura y el de mínima altura de cada píxel, y se estudia la diferencia de retornos de los píxeles colindantes al píxel de estudio, para discriminar los objetos sobre el terreno de los puntos del suelo desnudo. Si en una cierta ventana de análisis (por ejemplo, 15x15), un determinado número de píxeles (por ejemplo, 5%), tiene una diferencia de retornos mayor a un umbral preestablecido (por ejemplo, 2 metros), el píxel de estudio se considera como punto elevado sobre el terreno, y sino se considera como punto del suelo desnudo, y se le devuelve el valor inicial del MDS.

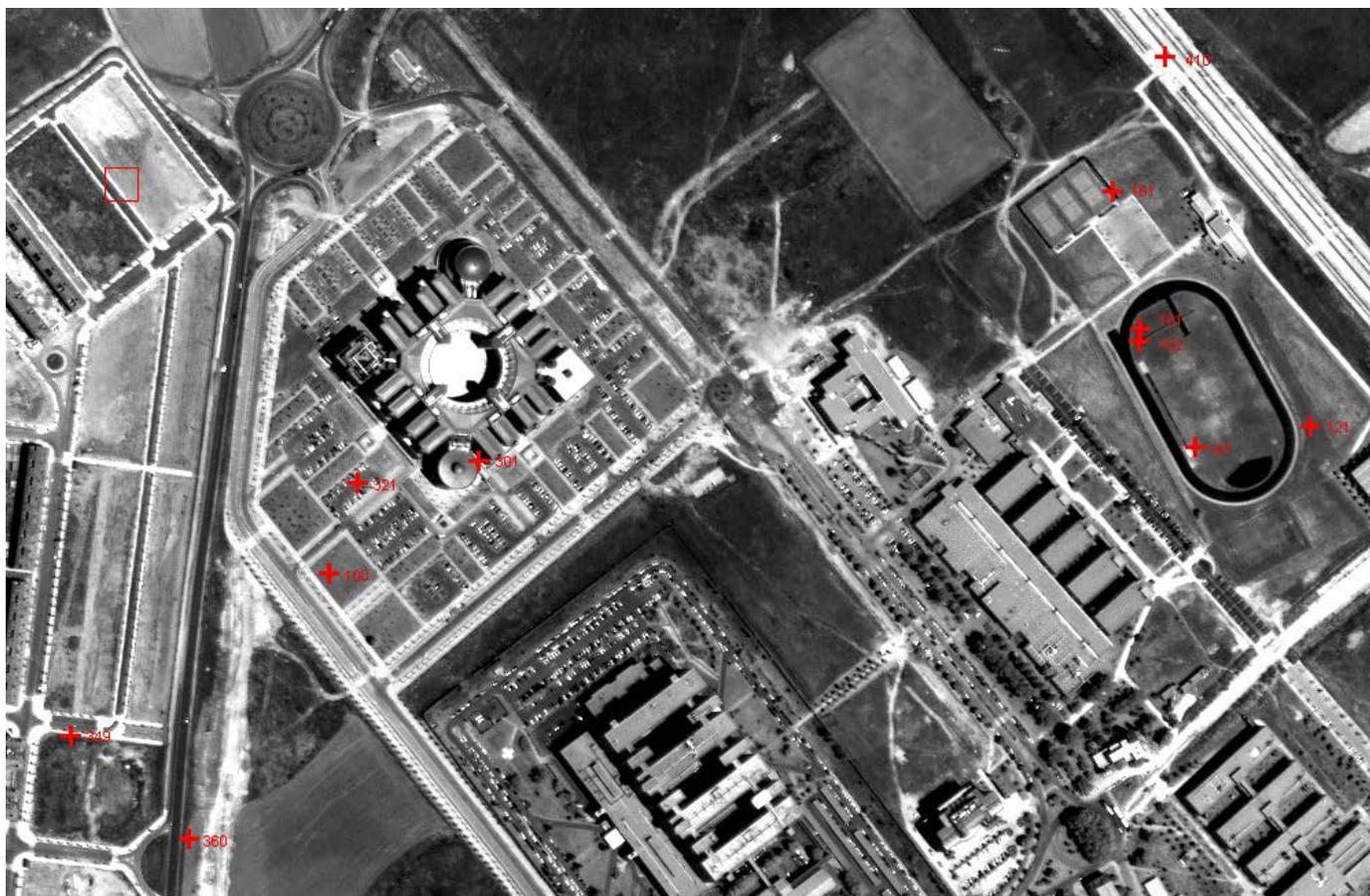


Figura 5 - Esquema de los puntos de control

3.2. Análisis de la precisión altimétrica

El análisis sobre la precisión altimétrica se ha llevado a cabo a través de la toma de puntos de control mediante la técnica GPS-RTK de la zona de estudio. Este estudio fue llevado a cabo por Enríquez y Gomez (2003). El punto base, localizado en el tejado del edificio de la escuela politécnica de la Universidad de Alcalá, se encuentra a 10km aproximadamente del vértice geodésico de “Las Cuevas”, y se utilizó la medida diferencial de fase para la obtención de la base línea mediante posicionamiento estático y post-proceso de observaciones.

Los puntos de control (ver Figura 5) se tomaron mediante radiación desde el punto base mediante GPS-RTK, con medida de fase y resolución de ambigüedades a tiempo real, de modo que el equipo móvil resuelve las ecuaciones de posicionamiento diferencial respecto a la base a partir de los observables propios y de la base. Las coordenadas de los puntos de control obtenidas en WGS84, tienen unos errores en torno al centímetro en planimetría, y de 2-3 centímetros en la altimetría.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos tanto en la generación automática de los diferentes MDT y en el estudio de la precisión altimétrica de los mismos han sido satisfactorios. En las siguientes líneas se muestran las evaluaciones realizadas.

4.1. Extracción automática del MDT

El algoritmo propuesto se ha evaluado en cuatro zonas diferentes que corresponden a superficies del terreno de 1km x 1km cada una de ellas. En la Figura 6 se muestran los resultados visuales obtenidos para una de las zonas de estudio, donde se puede ver; (a) la imagen PNOA de una de las zonas de estudio, (b) el modelo digital de superficies (MDS) obtenido a través de los datos LIDAR, (c) el MDT generado por el algoritmo propuesto, y (d) el MDT generado por el algoritmo y corregido manualmente. En esta imagen se puede apreciar que la zona de estudio está formada por pequeñas pendientes y un área urbana de reciente construcción. Puede observarse cómo el MDT obtenido mediante la metodología propuesta apenas necesita de edición manual.

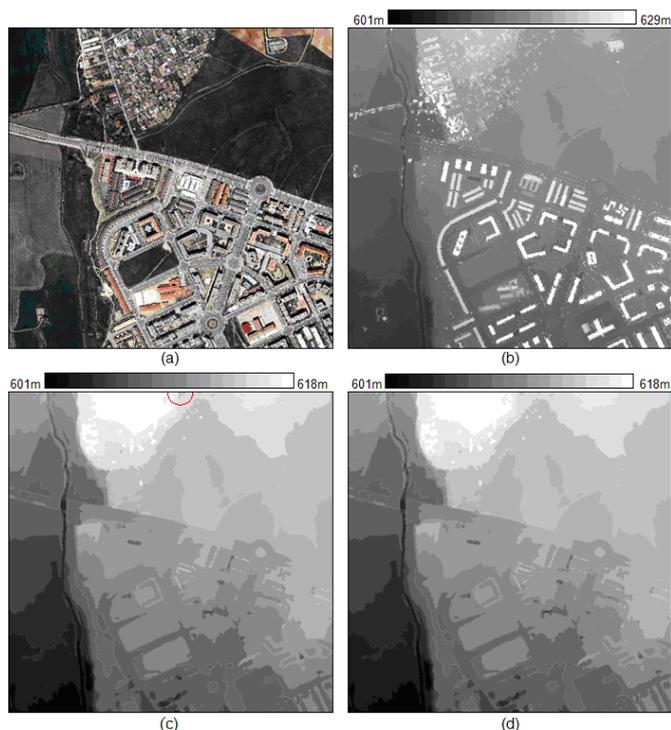


Figura 6 - (a) Imagen aérea en RGB, (b) MDS, (c) MDT obtenido mediante el algoritmo, y (d) MDT obtenido mediante el algoritmo y editado manualmente

En la Figura 7 se muestran los resultados visuales obtenidos para otra zona de estudio. En esta imagen se pueden ver edificios residenciales; grandes edificios como polideportivos, plazas de toros, o naves industriales; y suelo en construcción. Se puede apreciar en el MDT extraído por el algoritmo como alguno de los grandes edificios no se ha eliminado correctamente, por lo que se ha tenido que recurrir a la edición manual para filtrar dichos edificios.

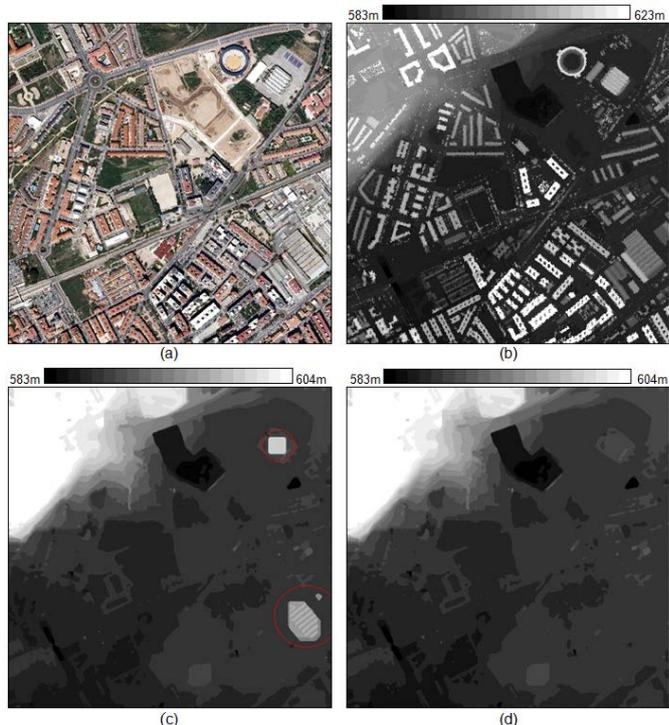


Figura 7 - (a) Imagen aérea en RGB, (b) MDS, (c) MDT obtenido mediante el algoritmo, y (d) MDT obtenido mediante el algoritmo y editado manualmente

En la Tabla 1 se muestra un análisis cuantitativo de la precisión del algoritmo en las dos zonas de estudio. El análisis se ha realizado, a nivel píxel, comparando los diferentes modelos generados por el algoritmo con los modelos editados manualmente.

Tabla 1 - Exactitud de los MDT generados por el algoritmo

	Cambios (MDS-MDT)[%]	Exactitud [%]
Figura 6	10.91	99.87
Figura 7	26.02	94.91

En la Figura 6 el 10.91% de los píxeles han sufrido cambios entre el MDS y el MDT (corregido manualmente), con un porcentaje de píxeles correctamente cambiados del 99.87%. En la Figura 7, donde hay más edificaciones, el cambio entre el MDS y el MDT ha sido del 26.02%, de los cuales el 94.91% se ha hecho de manera correcta.

La Figura 8 y la Figura 9 representan la diferencia que existe entre los MDT obtenidos por el algoritmo sin el análisis de diferencia de retornos, los MDT en los que se lleva a cabo el análisis de diferencia de retornos, y el MDT editado manualmente en la zona 3 y la zona 4 respectivamente.

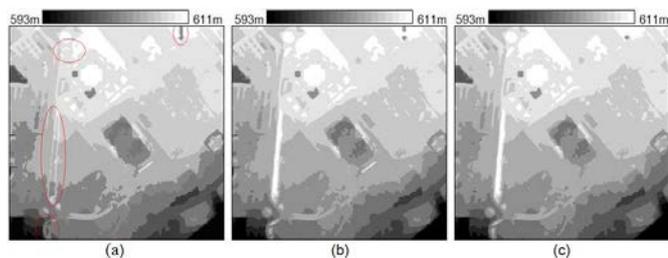


Figura 8 - (a) MDT obtenido automáticamente sin el análisis de retornos, (b) MDT obtenido automáticamente con el análisis de retornos, y (c) MDT corregido manualmente

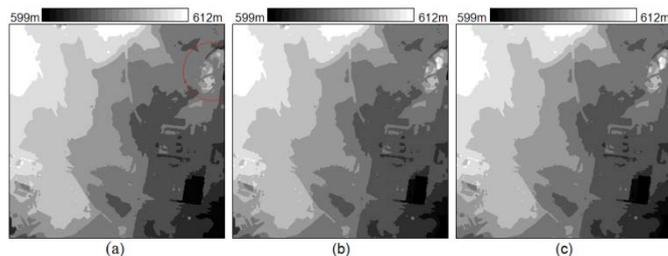


Figura 9 - (a) MDT obtenido automáticamente sin el análisis de retornos, (b) MDT obtenido automáticamente con el análisis de retornos, y (c) MDT corregido manualmente

Las elipses rojas que se pueden apreciar en las imágenes, representan las zonas donde el análisis de diferencia de retornos mejora el algoritmo. De la misma manera, se ha realizado otro análisis para cuantificar la mejora del algoritmo al incluir el análisis de diferencia de retornos. En la siguiente tabla se puede apreciar que dicho análisis mejora significativamente los resultados obtenidos.

Tabla 2 - Exactitud de los MDT generados por el algoritmo considerando el doble retorno o pulso (drecha) y sin considerarlo (centro)

	<i>camb (MDS-MDT) [%]</i>	<i>exac (sin ecos) [%]</i>	<i>exac (con ecos) [%]</i>
Figura 8	13.08	90.93	97.55
Figura 9	5.34	94.28	97.31

En la Figura 8, el porcentaje de píxeles que han sufrido cambios entre el MDS y el MDT ha sido del 13.08%. Cuando se ejecuta el algoritmo sin tener en consideración el análisis de doble retorno, los píxeles cambiados correctamente se quedan en el 90.93%; sin embargo, cuando el algoritmo realiza el análisis de doble pulso, el porcentaje de píxeles correctamente modificados asciende hasta el 97.55%. La Figura 9, sufre cambios en el 5.34% de la imagen, y ejecutando el algoritmo sin el análisis de doble pulso se consigue un 94.28% de precisión a la hora de obtener el MDT, pero al considerar dicho análisis, la precisión se eleva hasta el 97.31%.

4.2. Análisis de la precisión altimétrica

En este trabajo se ha realizado un análisis para evaluar la precisión altimétrica del MDT generado con un vuelo LIDAR. Para ello se han utilizado una serie de puntos de control, en los que se han llevado a cabo mediciones GPS-RTK y se ha comparado la coordenada Z medida de cada punto de control con la altura del correspondiente píxel en el MDT.

En la Tabla 3 y 4 se muestran las altitudes medidas con GPS y generadas con el MDT para los 11 puntos de control que se han tomado. El GPS proporciona alturas elipsoidales, esto es, referidas a un elipsoide de referencia; sin embargo uno de los vuelos LIDAR que se han utilizado (el de 2006) consta de alturas ortométricas, es decir, referidas al geoide. Para poder comparar estas dos alturas,

ambas deben estar referidas a una misma superficie de referencia. Se ha utilizado un modelo de geoide para transformar las alturas elipsoidales proporcionadas por el GPS en alturas ortométricas. El procedimiento seguido para comparar las alturas con el MDT obtenido a partir del vuelo LIDAR de 2010 ha sido menos problemático, ya que estas alturas están referidas al elipsoide. Debido a esto, el análisis de los MDT obtenidos a partir del vuelo de 2010 se ha realizado de manera directa.

Tabla 3 - Evaluación de las altitudes del MDT generado con el vuelo LIDAR del año 2006

Punto	h (elip)	H (orto)	H (MDT)	dif. H
P100	660,231	608,554	608,670	-0,116
P101	659,593	607,926	608,060	-0,134
P102	659,599	607,932	608,070	-0,138
P121	659,620	607,952	608,050	-0,098
P141	659,540	607,871	608,020	-0,149
P161	659,776	608,112	608,280	-0,168
P301	675,182	623,509	623,800	-0,291
P321	659,868	608,193	608,350	-0,157
P349	657,691	606,009	605,910	0,099
P360	658,161	606,487	606,640	-0,153
P410	660,310	608,650	608,890	-0,240

En la Tabla 3 se muestra el análisis de las altitudes del MDT generado con el vuelo del año 2006. Se puede observar que las diferencias entre la altitud GPS (orto) y la del MDT están muy por debajo del metro, llegando a ser de apenas 10 centímetros en algunos casos.

Tabla 4 - Evaluación de las altitudes del MDT generado con el vuelo LIDAR del año 2010

Punto	h (elip)	H (orto)	h (MDT)	dif. h
P100	660,231	608,554	660,280	-0,049
P101	659,593	607,926	659,660	-0,067
P102	659,599	607,932	659,680	-0,081
P121	659,620	607,952	659,710	-0,090
P141	659,540	607,871	659,540	0,000
P161	659,776	608,112	659,830	-0,054
P301	675,182	623,509	675,300	-0,118
P321	659,868	608,193	659,940	-0,072
P349	657,691	606,009	657,600	0,091
P360	658,161	606,487	658,240	-0,079
P410	660,310	608,650	660,330	-0,020

La Tabla 4 representa el análisis llevado a cabo para los datos del año 2010. Se pueden observar mejoras respecto a los datos de la Tabla 3, ya que las diferencias entre una y otra altura están por debajo de los 10 centímetros, llegando incluso en un punto a obtenerse la misma altitud en el MDT que con la medición GPS.

5. CONCLUSIONES

Como principales conclusiones podemos destacar que el algoritmo desarrollado para la obtención automática de MDT a partir de datos LIDAR corresponde a una metodología original, ya que a la ya estudiada morfología matemática, se le añade un análisis de diferencia de ecos o retornos. Este algoritmo genera unos modelos que en la mayoría de casos apenas necesitan de edición manual. Por

otro lado, estamos en condiciones de afirmar que los modelos digitales obtenidos a partir de los diferentes vuelos LIDAR, gozan de una gran precisión altimétrica respecto a los puntos de control de la zona de estudio.

6. REFERENCIAS

- Bater, C. W. and Coops, N.C. (2009): "Evaluating error associated with LIDAR-derived DEM interpolation". *Computer & Geosciences*, 35, 289-300.
- Enríquez, R. and Gomez, R (2003): "Estudio de la precisión cartográfica en imágenes satélite de alta resolución". *PFC Universidad de Alcalá*, 2003.
- Hodgson, M. E. and Bresnahan, P (2004): "Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assesment and Error Budget". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 70, No 3, March 2004, 331-339.
- Kilian, J., Haala, N. and English, M. (1996): "Capture and evaluation of airborne laser scanner data". *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*, 3, 383-388.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M. and Pfeifer, N. (2004): "Quality measures for Digital Terrain Models". *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July*.
- Lindenberg, J. (1993): "Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme". *Deutsche Geodätische Kommission, Series C, No. 400, München*.
- Martínez de Agirre, A. and Malpica, J.A. (2010): "Constructing a Digital Terrain Model from LIDAR data". *In the book Advances in Geoinformation Technologies 2010*, 47-59.
- Pacheco, A., Centeno, J., Assunção, M. and Botelho, M. (2011): "Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT". *Bol. Cienc. Geod., sec. Artigos, Curitiba*, v. 17, nº 3, 417-438.
- Serra, J. (1982): "Image Analysis and Mathematical Morphology". *London: Academic Press*.
- Streutker, D. R. and Gleen, N. F. (2006): "LIDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights". *Remote Sensing of Environment*, 102, 135-145.
- Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J. and Zhang, C. (2003): "A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (4), 872-882.

Infraestructura Geodésica en Gipuzkoa: trabajos iniciales y estado actual

Geodetic Infrastructure in Gipuzkoa: previous works and current state

J. Zurutuza⁽¹⁾, Miguel J. Sevilla⁽²⁾, M. C. Ruiz⁽³⁾, Josemari Aranburu⁽⁴⁾, Mikelo Elorza⁽⁴⁾, Faustino Gainzarain⁽⁴⁾

⁽¹⁾Dpto. de Geodesia Aplicada. Sociedad de Ciencias ARANZADI. Gipuzkoa. geodesia@aranzadi-zientziak.org

⁽²⁾Astronomía y Geodesia. Facultad de Matemáticas. Universidad Complutense. Madrid sevilla@mat.ucm.es

⁽³⁾GEOLan Donosti SL. Portuette 53B, Of. 314 - 20.018 San Sebastián. admin@geolandonosti.com

⁽⁴⁾Diputación Foral de Gipuzkoa. Plaza de Gipuzkoa 1. 20004 Donostia / San Sebastian. lizsit@gipuzkoa.net

SUMMARY

This paper describes the geodetic activities carried out within the Province of Gipuzkoa by the Council of Gipuzkoa. The first of the activities goes back to 1985, where a levelling network was designed and observed. Also that year, the Geodetic Network is densified (ROI) and a gravimetric geoid is determined in 1997, at the same time the first GPS Active Station starts being running by the Council of Gipuzkoa. In 2002, after the quality check of the levelling network, ED50->ETRS89 transformation parameters divided in zones to cover all the area are computed. In 2005 the GPS-RTK Active Network of Gipuzkoa is developed and the High Accuracy Levelling Network is designed and started being surveyed. In 2005 the gravimetric Network is also surveyed. From 2005 and on, the main tasks are focused in the maintenance of the geodetic infrastructures, including the upgrades of the Active Stations. 2007 is the year when a tide gauge is installed to fulfill the geodetic dotation and in 2009 a study of the Sea Level Variation on the Biscay Gulf by means of Satellite Altimetry techniques is reported. Each year, the linking of the tide gauge to the other geodetic networks is performed.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan las actividades de índole geodésica realizados por la Exc. Diputación Foral de Gipuzkoa en dicho Territorio. El inicio de dichas actividades se remonta a 1985, cuando se diseñan tanto la Red de Nivelación de Precisión como el diseño, ubicación y monumentación de la Red de Cuarto Orden. Dichos trabajos terminan en 1986 y 1987 respectivamente, si bien la Red de Cuarto Orden definitiva se calculó en 1995 cuando se culminaron las Redes de 4º Orden en Bizkaia y Alava. En 1997 se procede a la instalación de la primera estación activa GPS permanente en el Palacio de Diputación en San Sebastián. En 2002, tras un control de calidad de la Red NP existente, se calculan parámetros de transformación ETRS89-ED50 por zonas para toda la Provincia. En 2005 se crea la Red RTK GPS Activa de Gipuzkoa y se llevan a cabo campañas de densificación de la NAP y de las señales Pasivas (más de 1000 señales en un Territorio de menos de 2.000 km²). También en 2005 se diseña y observa la Red Gravimétrica de Gipuzkoa. A partir de 2005, los trabajos se han centrado en el mantenimiento de la infraestructura geodésica y la actualización de las estaciones Permanentes. En 2007 se añade GLONASS a todas las estaciones de la Red Activa para completar la dotación geodésica, se instala un mareógrafo asociado a una nueva Estación GNSS para la determinación del nivel del mar y en 2009 se hace un estudio acerca de la variación del nivel medio del mar en el Golfo de Bizkaia por medio de altimetría por satélites. En 2010 son ya más de 600 km nivelados mediante técnicas NAP. Los estudios prosiguen con el mantenimiento de las infraestructuras geodésicas y con los análisis de series temporales.

2. MARCO LEGAL

El marco Legal de dichas actividades se refleja en distintas disposiciones que no van a ser detalladas, si bien sí se indicará que:

- Bajo el régimen privativo de las Instituciones Forales recogido en la Constitución Española, Estatuto de Autonomía del País Vasco y Ley de Territorios Históricos (Ley 27/1983 de 25 de Noviembre), la Diputación Foral de Gipuzkoa mantiene desde el siglo pasado una Infraestructura Geodésica en Gipuzkoa.
- Y esta infraestructura es gestionada actualmente (Decreto Foral 16/2012, de 2 de Abril) por el **Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio**.

3. NIVELACIÓN

En 1985 se inicia un proyecto de nivelación de toda la provincia. Esta primera nivelación transcurría por todas las carreteras (una señal cada 2 km) y municipios de Gipuzkoa. En total, la red NP (Figura 1) de 9 anillos y 10 ramales, constaba de 475 señales, siendo la precisión requerida de $3\text{mm} \sqrt{k}$ entre clavos consecutivos, $5\text{mm} \sqrt{k}$ en anillos, $10\text{mm} \sqrt{k}$ en ramales y se ajustó por mínimos cuadrados.

Posteriormente, en 2002, se procede a realizar un control de calidad de la Red NP. Para ello, se verificaron en torno al 10% del total de tramos existentes, abarcando señales en diferente orografía. El resultado fue que la Red NP de Gipuzkoa era, en el peor de los casos, en torno a $12\text{mm} \sqrt{k}$ (siendo k la distancia nivelada en kilómetros; en este caso, $k=1$). Esa precisión podía parecer suficiente en 1990 (hace un cuarto de siglo), pero era claro que las necesidades de 2000 (Siglo XXI) eran muy superiores. Por ello, se diseñó una estrategia de densificación para transformar la Red NP en una Red NAP de Gipuzkoa, enlazada a RedNAP del IGN (IGN, 2001), iniciada en 2001 y completada en 2008 (Barbadillo et. al., 2008).

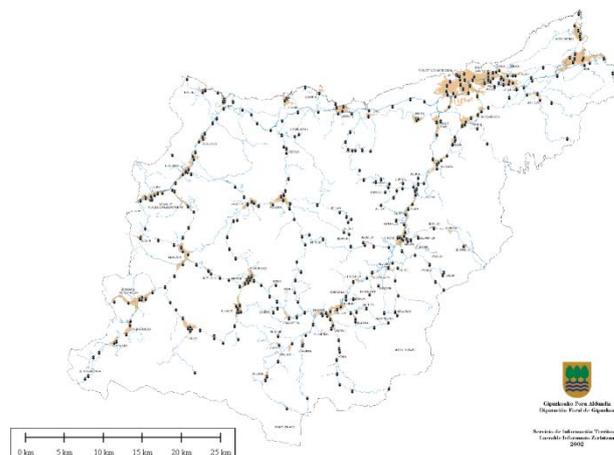


Figura 1 – Red NP en 2002 (NP Network in 2002).

Entre 2005 y 2009 se nivelaron más de 600 km (Figura 2), es decir, entre 120 y 150 km anuales, conforme a las Normas de la Sección de Nivelaciones del Servicio de Geodesia del IGN, observando nuevas señales y las antiguas señales NP.

Se combinaron las nuevas observaciones NAP con los antiguos desniveles en aquellos tramos todavía no nivelados, a fin de llevar todas las señales altimétricas al mismo marco. Dado que varias señales habían desaparecido y otras se habían movido, el proceso de preparación y depuración de los desniveles fue tedioso. El proceso seguido fue:

1. Ajuste de los nuevos desniveles a REDNAP (ajuste libre).
2. Ajuste de los nuevos desniveles fijando todas las estaciones REDNAP.
3. Ajuste libre de los 972 viejos desniveles (sólo de aquellos en los que al menos una señal fuera desconocida) a la Red Altimétrica previa. En este ajuste se descartan las señales que se han movido.
4. Ajuste final de los viejos desniveles fijando las alturas NAP previamente conocidas.

El resultado obtenido habiendo fijado todas las señales NAP es decir, la solución del los viejos desniveles ajustados a las nuevas

alturas, fue de $7 \text{ mm} \sqrt{k}$. Actualmente y a falta de completar los 150 km restantes de trabajos de nivelación, gran parte de las señales son NAP (392) y no se aconseja el empleo de señales NP (294) salvo en situaciones extraordinarias.



4. RED GEODÉSICA

La Red de Cuarto Orden, que había sido diseñada en 1985, se materializa en 1987. El cálculo final se acomete de manera conjunta en toda la Comunidad del País Vasco en 1995, tras implantarse redes similares en Bizkaia y Alava. En la figura 3 se muestra la ROI y la RGN final en Gipuzkoa.



Figura 3 – Red Geodésica Nacional y ROI. (National Geodetic Network and ROI.)

La Red de 4º Orden tiene una distancia media, entre vértices, de 2,7 km. Los trabajos de monumentación fueron muy costosos, al igual que las expropiaciones, ya que los Vértices tenían que tener

servidumbre de acceso y visuales entre ellos. En la figura 4 se muestra un ejemplo de subida de los hitos a las áreas montañosas.



Figura 4 – Trabajos adicionales a la ROI. (ROI additional works.)

5. GPS

En 1997 se instala la primera estación GPS de doble frecuencia en el Palacio de Diputación, en el centro de San Sebastián. Fue de las primeras instaladas en España con datos rinex de libre acceso para postproceso y fue la precursora de todos los trabajos GPS realizados posteriormente.

En 1999 se procede al cálculo de parámetros de transformación ETRS89(IGS)-ED50 para todo el Territorio (Fig. 5). Si bien éstos no eran únicos (se crearon 15 zonas), su característica, y principal novedad, era que estaban referidas a la estación GFA.

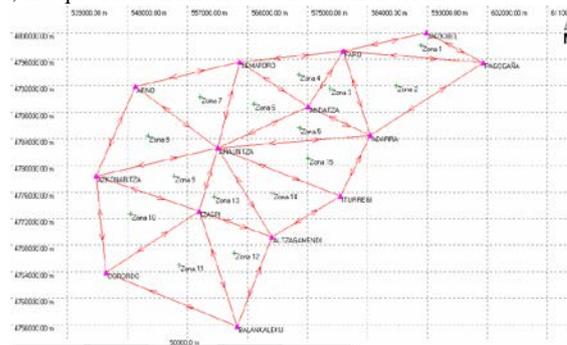


Figura 5 – Trabajos adicionales a la ROI. (ROI additional works.)

En 2002, dado el amplio uso de los parámetros “unificados”, se amplía el proyecto y se decide implantar la “Red GPS de Estaciones Pasivas” (Zurutuza et. al., 2004) (Fig. 6) para que los usuarios hicieran RTK con dos equipos. Utilizando como estación principal la única estación activa de GFA, la Red de 4º Orden, la ROI y la recientemente ajustada REGENTE, del Instituto Geográfico Nacional (Regidor Gutiérrez et al., 2000), se observan con centrado forzoso un total de 18 Estaciones Pasivas (9 vértices REGENTE y 9 ROI), además de la Activa. La red de estaciones GPS se diseñó para cumplir los siguientes objetivos:

1. Integrar la estación activa en el marco de referencia ITRF00 y, por tanto, en el marco ETRS89.
2. Disponer al menos de una estación GPS de referencia precisa y de fácil acceso a distancias inferiores a 10 km desde cualquier punto del Territorio.
3. Integrar la red en los marcos geodésicos actuales: ITRF00, ETRS89 y ED50.
4. Establecer el marco de referencia para futuros trabajos a realizar en el Territorio.
5. Obtener parámetros de transformación de ETRS89 a ED50 precisos para todo el Territorio.

La campaña de observación se realizó entre finales de octubre y mediados de noviembre de 2002, con un total de 15 sesiones. Se utilizaron 7 receptores bifrecuencia con un intervalo de almacenamiento de 10 s. Las sesiones tienen observaciones comunes de al menos 6 horas. Las observaciones fueron calculadas con

Bernese V 4.2, en Marco IGS00, para lo cual se utilizaron estaciones EUREF (GRAS, ONSA, MATE, WTZR, CASC, MADR y BRUS).



Figura 6– Red Pasiva GNSS. (Passive GNSS Network).

En 2004 debido a la progresiva reducción de horizonte de la estación de la Diputación, se diseña y propone a las administraciones competentes de la CAPV una Red GPS activa ampliable a toda la comunidad, que se materializa en Gipuzkoa en 2005 con la creación de la Red GPS Activa de la Exc. Diputación Foral de Gipuzkoa. Esta red contaba con 3 nuevas estaciones y se abandona la estación de la Diputación. La red es monitorizada y procesada a diario y, entre los servicios más importantes ofrecidos destacan:

- RTK: todo tipo de correcciones (base-simple, Red, GPS, G+G,...),
- Servicio Automático de postprocesamiento,
- Servicio de PPP-online (en fase de implantación),
- Servicios de almacenaje NTRIP (en fase de implantación).

En 2005, con la Red Activa operativa, se decide densificar la Red Pasiva. Se instalan señales GPS precisas en fondos de valle y núcleos urbanos. Las características de las observaciones (procesadas en Marco IGS) fueron:

- Doble sesión, cambiando de antena para evitar sesgos,
- Duración mínima, 4 horas por sesión usando 4 receptores+Red Activa.
- Horizonte despejado si era posible, dada la orografía de Gipuzkoa,
- Si no había buen horizonte, se observa, además, otra señal cercana,
- Observar también clavos NP (futuros NAP) para posibles contrastes de geode o definición de Sup. Alt. De Referencia.

En total se observaron 229 señales (distancias máximas menores de 15 km), con diferencias entre las coordenadas de las sesiones distribuidas de la siguiente manera (sobre el 81% por encima de 5 cm de precisión):

Diferencia	N. de puntos	Porcentaje
Dif.< 5mm	30	13.1 %
5mm < Dif. <10 mm	34	14.8%
10 mm< Dif. < 20 mm	56	24.5%
20 mm< Dif. < 50 mm	65	28.4 %
50 mm <Dif. < 100 mm	15	6.6 %
100 mm < Dif. < 150 mm	9	3.9 %
Dif.> 150 mm	20	8.7 %

A partir de 2007, se incorpora una nueva Estación y todas las estaciones se actualizan para disponer de seguimiento GLONASS. Actualmente dos de las estaciones reciben señales GIOVE e IOV si bien no se suministran RINEX con estas observaciones.

Actualmente la Red cuenta con 4 estaciones propias (Fig. 7), integra 2 estaciones privadas sitas en Gipuzkoa, y 10 estaciones públicas y privadas de 7 redes del entorno. De este modo los usuarios cuentan con una red de estaciones más densa y robusta. Las estaciones propias se integran en 3 redes ajenas, de modo que los usuarios cuentan con 4 caster distintos de acceso a estaciones de Gipuzkoa. Las soluciones diarias con Page-NT y Bernese (semanales) nos permiten mantener desde 2005 un marco de velocidades y monitorizar las soluciones particulares de cada una de estas redes.



Figura 7 – Red Activa GNSS. (Active GNSS Network).

Para finalizar este Apartado, se adjunta una herramienta desarrollada para procesar “online” observaciones RINEX: PPP Online. Para utilizarla, el usuario simplemente ha de subir sus observaciones y se mostrarán, de forma totalmente automática, los resultados en pantalla para su descarga.

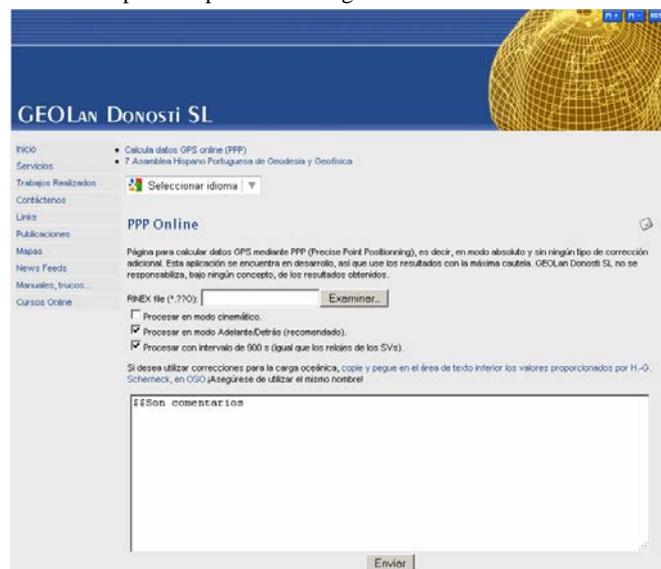


Figura 8 – Servicio PPP Online. (Online PPP Service).

6. GRAVIMETRÍA

En 2005 se decide crear la RGG (Red Gravimétrica de Gipuzkoa) (Sevilla et. al., 2006) (Fig. 9). La RGG consta de 11 estaciones y está enlazada con la estación gravimétrica absoluta de la Universidad Complutense de Madrid (Makinen et. al., 1990).

A lo largo del recorrido se hizo un perfil de calibración y se utilizaron las estaciones Aranda del Duero, Miranda de Ebro y San Sebastián, del IGN.



Figura 9 – Red gravimétrica de Gipuzkoa. (Gravimetric network of Gipuzkoa.)

El equipo de observación fue un gravímetro relativo Lacoste&Romberg modelo “GRAVITON-EG” nº 1194 (Figura 10). Para la toma de parámetros meteorológicos se utilizó una sonda de temperatura TESTO y un barómetro analógico THOMEN. Se utilizó un flexómetro para medir la altura del sensor sobre las señales de nivelación, a las cuales están referidas las cotas.



Figura 10 – GRAVITON EG5C. (GRAVITON EG5C.)

La precisión obtenida fue excelente, siendo la desviación típica posteriori de $1.77 \mu\text{Gal}$.

Una vez se disponía de la Red Gravimétrica, la siguiente tarea a llevar a cabo era la densificación de los valores de gravedad de todo el Territorio. Por ello, en 2006 se llevó a cabo el diseño y posterior densificación de la RGG.

Los puntos elegidos para su observación debían de cumplir con una serie de requisitos:

- Disponer de observaciones GPS precisas,
- Ser NAP,
- Cubrir todo el Territorio formando una malla lo más regular posible. 129 de estas señales ubicadas en zonas montañosas y de difícil acceso no cuentan con NAP.

Así, la RGG serviría para diversos fines como cálculo de geoide, crear mapas de anomalías,..., en definitiva, a ayudar a conocer la estructura interna del Territorio. En la figura 11 se adjunta la RGG densificada. En total, se observaron cerca de 250 señales adicionales (Figuras 11 y 12).

REDES GRAVIMÉTRICAS DE GUIPÚZCOA

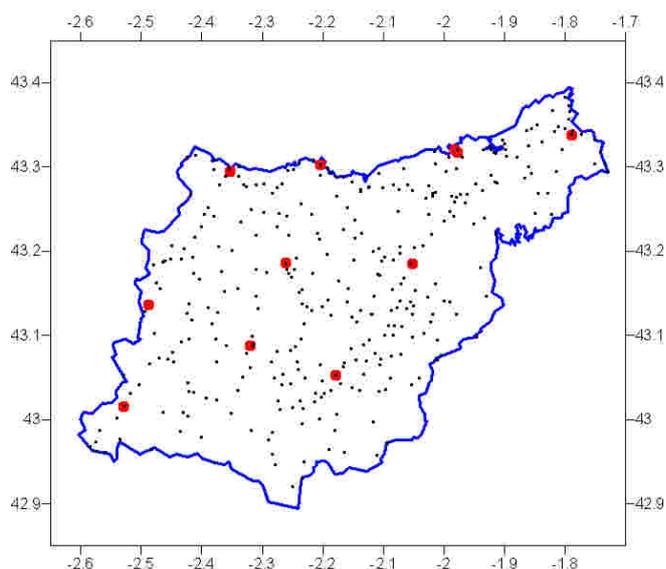


Figura 11 – Red Gravimétrica de Gipuzkoa (Gipuzkoa Gravimetric Network).



Figura 12– Estación de la Red Gravimétrica de Gipuzkoa (Gipuzkoa Gravimetric Network's Station).

7. MAREÓGRAFO Y ESTACIÓN GNSS DE PASAIA

Uno de los principales objetivos de la geodesia es la determinación del Nivel Medio del Mar. En Febrero de 2007 se instala un mareógrafo asociado a una antena GNSS (Vélez et. al., 2008). Para la selección del emplazamiento se visitaron diferentes localizaciones a lo largo de la Costa de Gipuzkoa, seleccionándose finalmente el Puerto de Pasaia, concretamente en el edificio de AZTI-Tecnalia dado el interés conjunto. Después de recabar y analizar la información sobre diversos tipos de mareógrafos (radar, presión, acústicos,...) se optó por utilizar un sensor PAROSCIENTIFIC para la medida del nivel del agua por inmersión con sensor de cuarzo digital “DIGIQUARTZ” modelo 8DP070-GV con electrónica inteligente modelo 735. El par GNSS-Mareógrafo está a una distancia en torno a los 30 m, a menos de 200 m de RedNAP y en la línea de nivelación que une España con Francia por Irún, siendo una estación privilegiada en este aspecto. En las figuras 13 y 14 se muestran los detalles del mareógrafo-Estación GNSS.

En la instalación del sensor se ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Instalación robusta: el sensor no puede recibir golpes ni sufrir variaciones posicionales.
- Flexible: para labores de mantenimiento
- Evitar el oleaje externo
- Permitir la recolocación del sensor siempre en el mismo sitio



Figura 13 – Estación de la Red Gravimétrica de Gipuzkoa (Gipuzkoa Gravimetric Network's Station).



Figura 14 – Estación GNSS para el Mareógrafo (Tide Gauge GNSS Station).

Desde los inicios de la actividad del mareógrafo, anualmente se verifican los enlaces del mareógrafo (TG) a las redes GNSS, NAP y la microrred de control (Fig. 15) para verificar la estabilidad posicional de las instalaciones (Sevilla et. al., 2011).

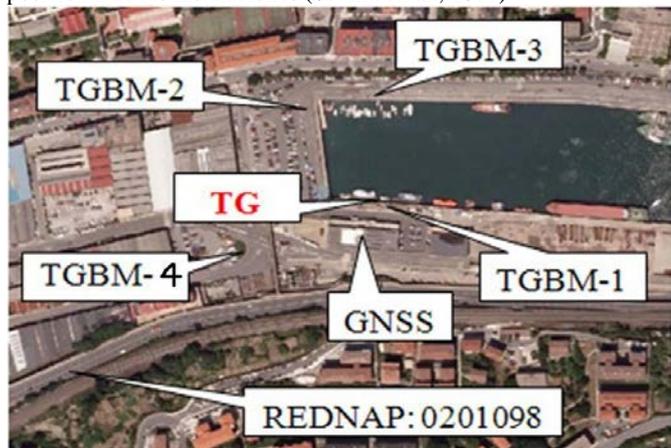


Figura 15 – Microrred de control del mareógrafo (Tide Gauge's control network).

Adicionalmente, se ha colocado un clavo en la terraza para facilitar las observaciones.

Los enlaces anuales se llevan a cabo de la siguiente manera:

- TG – TGBM1: nivelación geométrica,
- TGBM1 – clavo de la terraza: medida directa (recíprocas y simultáneas),
- Resto de Observaciones: NAP y GNSS.

Los resultados obtenidos año tras año garantizan la estabilidad de la infraestructura instalada. Esto permite, por tanto, aislar las medidas del nivel del mar respecto de las posibles variaciones por deformación de la corteza.

8. OTROS ESTUDIOS

Además de estos trabajos, se han realizado diversos estudios, entre los que destacan:

- Variación del Nivel Medio del Mar en el Golfo de Bizkaia (2008),
- Contraste de geoides EGM2008/Ibergeo2008 con la NAP de GFA (2009),
- Estudio de la estacionalidad del ZTD (2009),
- Anomalías de la gravedad (2009-...).

Respecto a los trabajos adicionales, caben reseñarse:

- Análisis anual de Velocidades de la Red GNSS, incluyendo estaciones propias y ajenas
- Red Pasiva: Observaciones en 2005 y reobservaciones en 2010 en marcos distintos. Está programada una nueva campaña en ITRF2008.
- Red Gravimétrica: Está programada una reobservación del enlace a la absoluta de Madrid.

9. CONCLUSIONES

La Infraestructura Geodésica de Gipuzkoa está materializada por la Red de Estaciones GNSS, la Red de Nivelación NAP y la Red de Gravimetría Básica. Las redes de Estaciones Pasivas en antiguos vértices geodésicos y en clavos horizontales, junto con los clavos NP y la aplicación de postproceso AutoPPP, tienen un carácter subsidiario de las anteriores redes y es necesario realizar una lectura atenta de sus reseñas. Se mantiene un documento abierto de recomendaciones

(<http://b5m.gipuzkoa.net/web5000/docu/geodesia/GomendioakRecomendacionesGeodesiaGipuzkoa.pdf>) que es descargado mensualmente una media de 137,5 veces y que señala cómo obtener los mejores resultados y optimizar el uso de esta infraestructura. Desde el año 2005 los usuarios han descargado 93.1 Gbs de datos RINEX para postproceso, la red GNSS cuenta con una media de 20.887 conexiones NTRIP anuales y se descargan mensualmente una media 169.9 reseñas, de los algo más de 1000 señales existentes en la actualidad.

La Infraestructura Geodésica de Gipuzkoa está concebida para que los usuarios tengan fácil acceso a su contenido vía web, orientada a desarrollar trabajos prácticos y abierta a su reprocesamiento por la integración de los nuevos modelos/observables (VMF1, GLONASS, GALILEO,...). La experiencia acumulada ha sido fundamental para reorientar las siguientes tareas, teniendo siempre presente que numerosos proyectos una vez completados pueden quedar obsoletos a muy corto plazo, dada la rápida renovación tecnológica y metodológica de este campo del conocimiento.

En el siglo XXI las Infraestructuras Geodésicas regionales sólo pueden ser dinámicas, una Geodesia estática está anticuada nada más nacer, ya que está superada por nuevos marcos internacionales (IGS05, IGS08, etc), regionales (EVRS), nuevos observables (Galileo, Compass), modelos globales (Mareas, troposfera, etc.), modelos gravimétricos homogéneos (Grace, Goce) frente a campañas heterogéneas (Gravimetría clásica), posicionamientos absolutos (PPP) frente a los relativos (Postproceso clásico), etc.

Dado que los usuarios actuales y futuros pueden trabajar prácticamente con la misma precisión instrumental que los Marcos de Referencia, es preciso integrar el trabajo de la comunidad científica, administración pública y usuarios hacia una Geodesia 2.0. El papel de la administración pública ha de ser facilitar esa tendencia colaborativa en beneficio de sus usuarios, del conocimiento científico y de la mejora continua de este tipo de infraestructuras.

10. REFERENCIAS

- Barbadillo A., Sanchez sobrino J.A., de la Cruz F, Quiros Donate R. (2008): "Compensación preliminar de la nueva Red española de nivelación de Alta precisión". 6 Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Tomar, Portugal, 11-14 febrero 2008.
- IGN (2001): Red Española de Nivelación de Alta Precisión –REDNAP– Infraestructura de infraestructuras. Boletín Informativo. AÑO II I ABRIL-JUNIO 2001 I Núm. 6.
- MAKINEN, J., R. VIEIRA, A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA (1990): Absolute Gravity Measurements in Madrid. *Bureau Gravimétrique International. Bulletin D'information* N° 67, pp. 168-172. Toulouse (Francia).
- Regidor Gutiérrez, J., J.F. Prieto Morín, J. Manuel Sanz Megia, R. Quiros Donate & A. Barbadillo Fernández, (2000): "El Proyecto REGENTE". VII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCAR 2000. Madrid, 16-20 Oct. 2000.
- Sevilla, M. J., J. Zurutuza and A. Martín (2011): Three Years of Tide Gauge Measurements in the Pasajes Harbour. FIG Working Week Bridging the Gap between Cultures Marrakech pp 1-12.
- Sevilla, M. J., Vélez, E. y Zurutuza, J. (A) (2006): "Red Gravimétrica del Territorio Histórico de Gipuzkoa". PUBLICACION - INSTITUTO DE ASTRONOMÍA Y GEODESIA, 25- 28. ISSN: 0213-6198. (2006).
- Vélez, E., Zurutuza J., Sevilla, M. J., Galparsoro, I., Antzizar, A. (A): "Estación Mareográfica del Puerto de Pasaia". PUBLICACION - INSTITUTO DE ASTRONOMÍA Y GEODESIA, 37- 41. ISSN: 0213-6198. (2008).
- Zurutuza, J., García, L. and Sevilla, M. J., (2004): "Red de estaciones GPS y estación permanente en Gipuzkoa." 4ª Asamblea hispanolusa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz, Portugal. Feb. - 2004.

Egileen Aurkibidea/Índice de Autores/Índice de Autores/Autor Index

A	
Adán, R.	89, 97
Agea, Z.	81
Alfaro, P.	93
Aranburu, J.	115
Armenteros, J. A.	93, 97, 105
Arnosó, J.	7, 43, 69
Avilés, M.	93, 97
B	
Barbadillo Fernández, A.	35
Barbadillo, A.	29
Benavent, M.	7, 43, 65, 69
Bethencourt Fernández, A.	21
Bethencourt-Fernández, A.	11
Borque, M. J.	89, 93
Bos, M. S.	43
C	
Caldera, S.	5
Cano, M. A.	29, 51, 57
Caro, M.	101
Casaca, J.	47
D	
Dalda Mourón, A.	35
Devoti, R.	97
E	
Elorza, M.	115
F	
Fernández Herreras, J. P.	17
Fraile Torrecilla, J.	17
G	
G. Montesinos, F.	7, 43, 69
Gainzarain, F.	115
Galindo, J.	89, 93
Galindo-Zaldívar, J.	101
García Tortosa, F. J.	93
García-Cañada, L.	57
García-Espada, S.	21
Garrido, M. S.	105
Gil, A. J.	89, 93, 97, 101, 105
Giménez, E.	105
Gonzalo, P.	51
H	
Hanssen, R. F.	101
Henriques, M. J.	47
Herrera, A.	5
L	
Lacy, M. C.	5, 93, 97, 105
Lamolda-Ordóñez, H.	11
López Garrido, A. C.	89, 93
López-Ramasco, J.	21
M	
Malpica, J. A.	109
Marín-Lechado, C.	89
Martín, A.	75, 81
Martínez de Agirre, A.	109
N	
Nuno Lima, J.	47
O	
Oliveira, S.	47
P	
Pascual, M.	51, 57
Pedreira, A.	89, 93
Perski, Z.	101
R	
Realini, E.	5
Reguzzoni, M.	5
Riguzzi, F.	97
Rodríguez, B.	109
Ruano, P.	93
Ruiz, A. M.	97, 101
Ruiz, M. C.	81, 115
S	
Sánchez Sobrino, J. A.	17, 29, 35
Santamaría-Gómez, A.	21
Sanz de Galdeano, C.	101
Sanz, C.	93
Sevilla, M. J.	65, 75, 81, 115
Sousa, J. J.	101
T	
Torres, João Agria	25
V	
Valdés, M.	29, 51, 57
Vélez, E.	7, 65, 69
Vieira, R.	7
Z	
Zurutuza, J.	65, 75, 81, 115

