CONTRASTE DE GEOIDES GRAVIMÉTRICOS CON OBSERVACIONES DE NIVELACIÓN GEOMÉTRICA Y GPS EN LA COMUNIDAD DE GALICIA

JOSÉ ANTONIO TARRÍO MOSQUERA
Profesor Dr. en I+D en Geotecnologías, Departamento de Ingeniería Geográfica, Universidad de Santiago de Chile, Chile
jose.tarrio@usach.cl

ALFONSO NÚÑEZ-GARCIA DEL POZO
Catedrático de Universidad de Salamanca, Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Universidad de Salamanca, España
U59@usal.es

Resumen: El presente trabajo explica la comprobación y contraste de diferentes modelos geoidales disponibles, aplicados en la zona noroeste de España, concretamente en la comunidad de Galicia y limítrofes, así como el norte de Portugal. El contraste de los modelos se realiza comparando las ondulaciones directas de los mismos con la ondulación calculada en clavos de nivelación de la REDNAP (red española de nivelación de alta precisión) sobre los cuales se observa y calcula la altura elipsoidal mediante observaciones GPS en modo estático con tiempos no menores a 3 horas, además se observan vértices de la red REGENTE del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de la Red Geodésica Nacional (RGN) de Portugal. Los puntos fiduciales son antenas activas de la red ERGNSS, ITACYL y de GALNET. Se realizaron observaciones en 136 puntos, 116 clavos REDNAP (Red Española de Nivelación de Alta Precisión) y 20 vértices geodésicos, uno de ellos en Portugal. Los modelos de comprobación empleados fueron **IBERGEO95** (Geoide Ibérico 1995), **EGM96** (Earth Gravitational Model 1996), **EGG97** (European geoid model EGG97), **IGG2005** (Iberian Gravimetric Geoid of 2005), **EGM08** (Earth Gravitational Model 2008) y la adaptación del mismo a REDNAP por el IGN, el **EGM08REDNAP**. Se eligieron clavos cada aproximadamente 10 km, y tratando de que a la vez fuesen puntos medidos por el IGN en ER. Los resultados arrojan diferencias en los vértices REGENTE con las coordenadas oficiales probablemente por el diferente marco de referencia, pero también se observa que tienen mayor precisión de la indicada. Los clavos de nivelación tienen en el 97 % de los casos mejor precisión a 12 mm. Con el contraste de los modelos se verificó que los de mejor adaptación son los más recientes y que la precisión indicada por los organismos oficiales en relación al EGM08REDNAP es sensiblemente inferior a la indicada.

Palabras Claves: Geodesy, GNSS (Global Navigation Satellite Systems), Geoide, Engineering.

Abstract: This work describes the physical and contrast of different geoid models availables, applied in the northwest of Spain, in the community and neighbouring of Galicia and northern Portugal. The model contrast is done by comparing the direct undulations with the one calculated on levelling nails using REDNAP (Spanish Network of High-precision Levelling); in which it is observed and calculated the ellipsoidal height using GPS measurements in static mode with time no less than 3 hours, also vertices are observed in the REGENTE (Spanish Geodesic Network for Space Technics) network from the National Geographic Institute (IGN) and the Portugal National Geodesic Network (RGN). The fiducial points are active antennas from the ERGNSS, ITACYL, and GALNET network. Observations were done on 136 points, 116 nails REDNAP and 20 geodetic vertices, one of them was made in Portugal. The test models used in this work were **IBERGEO95** (Geoide Ibérico 1995), **EGM96** (Earth Gravitational Model 1996), **EGG97** (European geoid model EGG97), **IGG2005** (Iberian Gravimetric Geoid of 2005), **EGM08** and an adapted version of EGM08 to REDNAP by IGN, and finally **EGM08REDNAP**. Nail separation was chosen to be about 10 km, and the position was the same that the one measured by IGN in ER. The results showed differences in REGENTE vertices with official coordinates probably because of the different frame system used, but also notes that are more accurate than indicated by IGN. Levelling nails are in 97% of the cases a better precision than 12 mm. Contrasting the models verified that the best fit is the most updated one, and it showed that the precision indicated by official organizations in relation to EGM08REDNAP is significantly lower than specified.

Key Words: Geodesy, GNSS (Global Navigation Satellite Systems), Geoid, Engineering.

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la implantación actual del datum geodésico ETRS89 en Europa, el uso del GNSS para mediciones, comprobaciones, replanteos y

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

sobre todo georreferenciaciones, fundamentalmente en posicionamiento relativo cinemático, sea mediante la solución de base simple o base de red (VRS, FKP, PRS, MAC, etc…); hace necesario un modelo geoidal de precisión para poder tener un cálculo adecuado de H mediante la fórmula de ondulación de primer orden: $N=h-H$ que para la Península Ibérica presenta valores positivos de N de aproximadamente 50 metros.

El problema que plantean los modelos geoidales actuales (no las superficies de referencia escaladas) que están a disposición del usuario, además de la precisión, es que la referencia altimétrica a la que se refiere no suele ser la oficial de cualquier país, por tanto debe de hacerse un contraste de los mismos con puntos fiduciales oficiales de altitud conocida y altitudes GNSS. Otro problema es, que a veces las altitudes elipsoidales que se toman como dato no tienen la suficiente precisión como para hacer el contraste entre ondulaciones del modelo geoidal y las obtenidas entre diferencias de altitudes conocidas, esto es medidas con períodos cortos y en simple frecuencia, con horizontes GNSS deficientes, desde puntos fiduciales con poca precisión etc…

Lo que se planteó en este proyecto es hacer la observación, procesado y ajuste de observaciones GNSS sobre una serie de clavos de la REDNAP y vértices REGENTE (a efectos de comprobación del marco), para obtener coordenadas en ETRS89 con la precisión esperable de $\sigma_{xyz}\leq 0.015\ m$, aplicado todo ello al ámbito noroeste de España, particularmente a la comunidad de Galicia.

Una vez realizado esto, se realiza el contraste con los modelos siguientes modelos geoidales gravimétricos:

- IBERGEO 95
- EGM96
- EGM97
- IGG2005
- EGM2008
- EGM08REDNAP. [1]

Los puntos de control que se emplearán por pertenecer a una red de clase B1 [2], serán las estaciones de referencia de las redes públicas ERGNSS e ITACYL para cubrir la zona limítrofe con Castilla-León y Portugal, y las redes GALNET y SMARNET-GALICIA; de éstas últimas se hará comprobaciones para probar la precisión de sus coordenadas, y la consistencia del marco de referencia.

2 ANTEPROYECTO

En la actualidad para los trabajos de ingeniería, generalmente en obras viales, la altimetría con sistemas GNSS, implica el conocimiento de un geoide, con la precisión suficiente para no tener que acortar las zonas de trabajo a ámbitos de pocos kilómetros. En el año 2007, trabajos realizados por un equipo de Geodesia de Constructora San José, en la comunidad de Galicia, arrojaron diferencias del orden de 10 cm y superiores en el modelo EGM08REDNAP, las cuales a nivel de ingeniería de construcción no son asumibles. Este hecho motivó realizar el contraste de los modelos disponibles, para esta parte de la península ibérica, analizando ondulación directa de los mismos, y ondulación GNSS medida sobre clavos de nivelación, viendo el de mejor ajuste.

2.1 Objetivos

Los objetivos marcados fueron, por tanto:

1. Comprobación de la fiabilidad de la red de orden cero que se usa para el cálculo de las alturas elipsoidales de los clavos de la REDNAP, analizando los resultados obtenidos.
2. Mejorar de la precisión en la altura elipsoidal h en los clavos REDNAP esperando sea mejor que 1.5 cm, para asimilarla a la de los clavos del IGN.
3. Contraste con modelos geoidales gravimétricos: IBERGEO 95, EGM 96, EGG 97, IGG 2005, EGM08, EGM08REDNAP.

A priori, el modelo geoidal de mejor adopción se espera que sea el más actual, el EGM08, fruto del mayor grado y orden en el desarrollo de los armónicos esféricos; pero se debe validar la superficie de corrección EGM08REDNAP, que según [1], es de 38 mm de promedio y desviación estándar, pero en la cual se han encontrado errores mayores, como se indicaba, fruto probablemente de mediciones GNSS sobre clavos con horizontes no despejados como se ve en la Ilustración 2-1 Horizonte GPS deficiente, o de distancias a vértices REGENTE largas si se compara con el tiempo de medición sobre los mismos clavos. [3]

Ilustración 2-1 Horizonte GPS deficiente

2.2 Planificación

Debido a las precisiones requeridas, el método de observación GNSS usado ha sido el estático relativo con medidas de fase. Cualquier campaña GNSS mediante esta técnica necesita de, al menos,

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

dos receptores, de todas maneras la posibilidad de usar tres o incluso más facilitó el trabajo de campo; aunque por otra parte necesitó mucha mayor planificación. Se ha decidido abordar el trabajo, abaratando en lo máximo posible los costes del mismo ya que ningún organismo financiaba el proyecto. Para ello se ha tratado de emplear al menos tres equipos por jornada de observación (todas ellas en sábados debido a restricciones de disponibilidad de los propios equipos), usando algún día 11 equipos GNSS observando simultáneamente. La Ilustración 2-2 Puntos Fiduciales disponibles, nos muestra los datos iniciales disponibles:

Ilustración 2-2 Puntos Fiduciales disponibles

Donde se pueden ver las líneas de nivelación REDNAP, en verde, la red REGENTE (rojo) y en color azul, amarillo y verde, las redes SMARTNET, GALNET e ITACYL respectivamente. El primer problema se plantea con la elección de los puntos fijos para dotar a los clavos de nivelación de cota elipsoidal. Se debe además dar respuesta aspectos importantes, como son:

- Emplear como puntos fiduciales los vértices REGENTE, red pasiva.
- Emplear las bases de las redes activas, algunas de ellas muy lejanas como las del ITACYL, otras poco densificadas Smartnet, ERGNSS y otras en fase de iniciación GALNET.
- Los observables de los receptores de todas las redes son GPS y/o GNSS, es decir, algunos de ellos aún no disponen de tecnología aún de observables GLONASS.

Para dar solución a lo anterior, se decide usar GALNET y ERGNSS como red de orden cero, debido fundamentalmente a la mayor cobertura del territorio de la comunidad, y usar las demás redes como apoyo en caso de caída de datos de la primera; además se decide emplear solo observables GPS. [4]

La distancia máxima entre puntos fiduciales es de 70 km aproximadamente, por lo que según [5], se establecerá un tiempo de medición para equipos bifrecuencia en estático según Tabla **Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.**-1 Tiempos de medición GNSS:

*Tabla **Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.**-1 Tiempos de medición GNSS posicionamiento relativo estático*

RECEPTOR	ESTÁTICO CONVENCIONAL
L1	30min + 3 min/km
L1+L2	20 min + 2 min/km

Por tanto el tiempo de medición mínimo sobre cada punto era de 2 horas, que aumentamos a 3 horas, debido al tiempo de desplazamiento entre puntos, y poder dar así simultaneidad a todos los datos.

A fin de contrastar datos, y por si durante la observación alguna antena de las redes activas no operase, en cada jornada se observó también un vértice REGENTE, sumando al final 20 vértices, pudiendo así comprobar también la red REGENTE.

Se hizo un análisis de las líneas de nivelación disponibles en la zona noroeste de la Península Ibérica, las cuales detallamos a continuación:

1. Línea 405: desde Ribadeo (nodo 99) hasta Salas en Asturias (nodo 98).
2. Línea 406: desde Lugo (nodo 100) hasta Ribadeo (nodo 99).
3. Línea 10407: desde Carracedelo en León (nodo 101) hasta Lugo (nodo 100).
4. Línea 408: desde Bembibre en León (107) hasta Carracedelo en León (nodo 101).
5. Línea 410: desde A Gudiña (nodo 103) hasta Carracedelo en León (nodo 101).
6. Línea 411: desde Benavente (nodo 104) hasta A Gudiña (nodo 103).
7. Línea 542: desde Verín (nodo 106) hasta A Gudiña (nodo 103).
8. Línea 543: desde Verín (nodo 106) hasta frontera Portuguesa (nodo 125).
9. Línea 544: desde Ourense (nodo 127) hasta Verín (nodo 126).
10. Línea 545: desde Ourense (nodo 127) hasta Porriño (nodo 129).
11. Línea 546: desde Porriño (nodo 129) hasta frontera Portuguesa (nodo 128).
12. Línea 547: desde Porriño (nodo 129) hasta Santiago de Compostela (nodo 130).
13. Línea 548: desde Portomarín (nodo 131) hasta Santiago de Compostela (nodo 130).
14. Línea 549: desde Portomarín (nodo 131) hasta Ourense (nodo 127).

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

15. Línea 550: desde Lugo (nodo 100) hasta Portomarín (nodo 131).
16. Línea 581: desde Betanzos (nodo 132) hasta Santiago de Compostela (nodo 131).
17. Línea 582: desde Lugo (nodo 100) hasta Betanzos (nodo 132).
18. Línea 583: desde Ribadeo (nodo 99) hasta Betanzos (nodo 132).
19. Línea 801: desde Baralla (nodo 212) hasta Cangas del Narcea (nodo 213).
20. Línea 10407: desde Carracedelo en León (nodo 101) hasta Barralla (nodo 212).
21. Línea 20407: desde Baralla (nodo 212) hasta Lugo (nodo 100).
22. Ramal 1583: desde Foz (583056) hasta el puerto de Foz (1583003).
23. Ramal 5583: desde Fene (583196) hasta Mugardos (5583027).
24. Ramal 06853: desde Ferrol (4583013) hasta el puerto de Ferrol (6583026).

Lo que hace un total de 21 líneas y 3 ramales; sumando un conjunto de aproximadamente 1400 clavos de nivelación, es decir, puntos con cota ortométrica de alta precisión para comparar con cota elipsoidal GNSS, pero con menor precisión, en torno a 0.100 metros en el 81 % de las señales y peor en las demás. Como se desprende de las líneas anteriores esta precisión no nos permite alcanzar el objetivo final al ser la cota elipsoidal de precisión deficiente. Se midió un clavo cada aproximadamente 10 km, con lo que se obtienen al final 116 puntos más 21 vértices geodésicos, uno de ellos portugués y otro de ellos perteneciente a EUREF. Para realizar toda la observación se emplearon 20 días de observación, 9,5 horas de media midiendo, 136 puntos medidos con una media de 7 puntos por día.

La Ilustración 2-3 Esquema de toda la observación, muestra los puntos, vértices y estaciones fiduciales empleadas:

Ilustración 2-3 Esquema de toda la observación

2.3 Procesado

El procesado de las líneas base, se realizó con software comercial, en este caso LGO v7.1, con la siguiente configuración:

- Empleo de efemérides precisas del IGS.
- Empleo de correcciones relativas de antena de la NGS.
- Modelos atmosféricos automáticos.

Un asunto importante a mencionar, es que se emplearon equipos LEICA, TOPCON, GEOMAX y TRIMBLE, donde la altura al Antenna Reference Point (ARP), fue de suma importancia, ya que al pasar a RINEX los formatos binarios de algún receptor, la altura se modificada; algo subsanado con las anotaciones de campo. Podemos decir por tanto que la altura de la antena presentaba un error nulo.

3 CÁLCULO Y AJUSTE DE COORDENADAS

Para el cálculo y ajuste de la red se empleó un programa propio desarrollado por el Dr. Alfonso Núñez, compilado en lenguaje fortran llamada “GPSRED”.

Los datos iniciales, son las coordenadas de los puntos fiduciales de las estaciones activas, y las líneasbase de la Ilustración 3-1, procedentes de LGO:

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

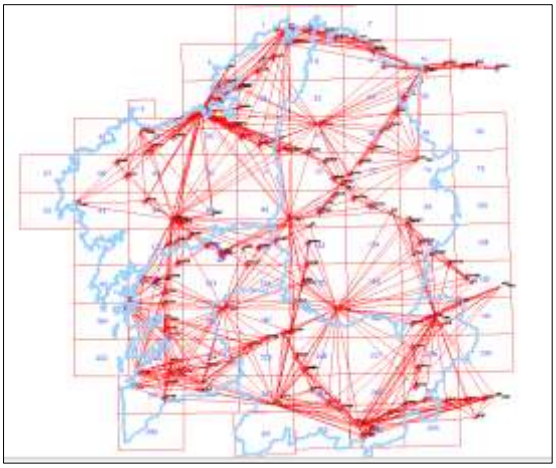

Ilustración 3-1 Líneas base de partida

Los estadísticos del cálculo y ajuste de la red fueron:

- Error cuadrático medio 0.007.
- Fiabilidad media de la red 0.185.

La precisión final de las coordenadas de los puntos se muestra en las ilustraciones 3-2 y 3-3:

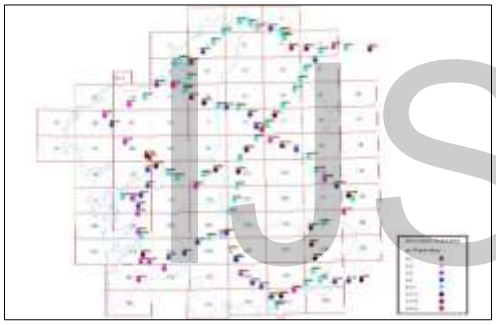

Ilustración 3-2 Precisiones en planimetría

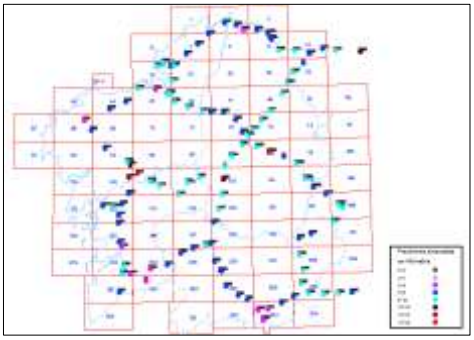

Ilustración 3-3 Precisión en altimetría

Donde las elipses del error de TODAS los puntos, están por debajo de 1.5 cm.

4 RESULTADOS

4.1 Red Regente

Los resultados de las diferencias de coordenadas en vértices REGENTE, entre las del IGN y las recalculadas son:

*Tabla **Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.**-2 Diferencias con REGENTE*

N° vértice	Δe	Δn	Δh
173	0.015	0.047	0.010
683	0.007	0.020	0.014
745	0.007	0.029	0.005
1143	0.003	0.013	0.001
2163	0.007	0.021	-0.010
4430	0.004	0.028	0.003
4673	-0.001	0.026	0.031
4865	-0.001	0.030	0.018
9553	0.006	0.023	0.016
9766	-0.001	0.012	0.034
12065	0.001	0.029	0.033
12204	0.000	0.027	0.000
12524	0.002	0.013	
15515	0.001	0.010	0.011
18498	-0.004	0.012	-0.015
19072	-0.002	0.024	0.057
26235	-0.003	0.015	-0.006
26373	0.010	0.007	0.014
30334	0.004	0.027	-0.003
30527	-0.009	0.014	0.010
Media	0.002	0.021	0.012
Desv. Típica	0.005	0.010	0.018
	0.031	0.049	-0.038

Según la Tabla **Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.**-2 Diferencias con REGENTE, se puede observar claramente un sesgo en la componente N de las mismas, quedando además reflejado en el vértice LAGOA, perteneciente a la red EUREF. El vértice 12524 no presenta diferencia en altura porque pertenece a la red ROI.

4.2 Contraste de modelos. Resultados

Los resultados del contraste de modelos geoidales, deben mostrarse de dos maneras, uno con el modelo "escalado", y otro con las ondulaciones directas, ya que salvo dos, los demás son globales.

Ilustración 4-1 Contraste de modelos con diferencias directas

Ilustración 4-2 Contraste de modelos con diferencias escaladas

Según la Ilustración 4-1 Contraste de modelos con diferencias directas, en Galicia EGG97 y EGM08 tienen similar precisión. Si analizamos la Ilustración 4-2 Contraste de modelos con

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

diferencias escaladas, EGM08 mejora la adaptación, pero el de mejor precisión es EGM08REDNAP.

Haciendo un análisis pormenorizado en los clavos de nivelación, según la Ilustración 4-3 Histograma de diferencias EGM08REDNAP:

Ilustración 4-3 Histograma de diferencias EGM08REDNAP

Se observan desviaciones superiores a los 4 cm en al menos la mitad de los puntos medidos, llegando en algunos casos a superar los 10 cm.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se evaluaron, de forma exhaustiva varios modelos geoidales presentes, uno de ellos escalado, se validó también la red pasiva REGENTE. Se puede afirmar por tanto lo siguiente:

Respecto de la red REGENTE:

- Tiene una precisión mayor a la indicada sobre todo en planimetría, es decir mayor precisión de 5 cm.
- Presenta, A PRIORI, un sesgo de 2 cm en componente n, esto puede ser debido a cambios entre la época de ERGNSS-GALNET y REGENTE ya que todas pertenecen al mismo sistema ETRS89. El vértice 683, perteneciente a EUREF89 también presenta el mismo sesgo teniendo a priori mayor precisión.

Respecto de los modelos geoidales:

- Los modelos que mejores resultados son los más recientes.
- La mejora con el modelo EGM08, es sustancial aumentando la precisión a valores por debajo de 0.050 m, lo cual también se trasmite a la superficie de corrección escalada del IGN, aunque llama la atención el cambio de signo de la media de uno al otro.
- La desviación típica del EGM08REDNAP es ligeramente peor en Galicia a lo que indica el IGN, un 77% de los puntos observados tienen la precisión que indican 3.8 cm, los demás tiene más error, hay puntos con -0.172 y 0.110 m de error, cuya distribución no sigue un patrón. Esto puede ser debido a las elipsoidales erróneas empleadas a nivel español al realizar la superficie de mínima curvatura.
- El empleo de EGM08REDNAP a nivel de ingeniería de detalle requiere una validación local, debido a la importancia de las alturas elipsoidales del IGN, empleadas para realizar el escalado.

En ese sentido, podemos marcar como futuras líneas de trabajos, una serie de aspectos que sería necesario acometer, o por organismos gubernamentales; o como en este caso por universidad ajenas, a priori a la comunidad gallega:

- En las fases iniciales de planificación y observación se han encontrado números obstáculos para hacer observaciones GNSS oficializadas, debido a la gran cantidad de redes activas GNSS, presentes en la comunidad de Galicia. Todas ellas se caracterizan por una buena precisión (salvo casos contados), pero el marco de referencia en algunos casos, o no está claro, o no está perfectamente detallado. El actual auge de las mediciones RTK en VRS puede hacer posible, a medio plazo, conseguir mayor densidad de alturas elipsoidales en las líneas de nivelación. Estas nuevas alturas elipsoidales, tomando una serie de cuidados, y con una marco único, puede llegar a tener precisiones por debajo de 1.5 cm a día de hoy inalcanzables, tal y como están planteadas las redes activas de Galicia.
- En de suma importancia en la sociedad actual globalizada, acometer un proyecto conjunto con la zona transfronteriza con Portugal, que puede ser aprovechado ya para futuros chequeos de Sistema Europeo de Referencia Altimétrico EVRS, (European Vertical Reference System). [6]
- Contraste y posterior uso, si el contraste fuese adecuado, del nuevo modelo geoidal de la E.S.A., de la misión G.O.C.E. Esta documentación apareció en la etapa final de redacción de la Tesis por lo que se incluirá una vez entregada la misma como trabajo postdoctoral para usos particulares. La información se relacionada con los datos GOCE se puede encontrar en : https://earth.esa.int/web/guest/earth-topics/solid-earth/Geoid

IJSER

IJSER © 2017
http://www.ijser.org

REFERENCIAS

[1] IGN, «EL NUEVO MODELO DE GEOIDE PARA ESPAÑA EGM08 - REDNAP,» Centro de Observaciones Geodésicas. IGN, 2008. [En línea]. Available: ftp://ftp.geodesia.ign.es/documentos/EL%20NUEVO%20MODELO%20DE%20GEOIDE%20PARA%20ESPA_A%20EGM08-REDNAP.pdf. [Último acceso: 10 2016].

[2] EUREF, «Red Permanente EUREF,» Red Permanente EUREF, 07 2016. [En línea]. Available: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coordinates/. [Último acceso: 10 2016].

[3] J. Regidor Gutiérrez, J. F. Prieto Morin, J. M. Sanz Mejía y R. y. B. F. A. Quirós Donate, «Proyecto REGENTE. Una nueva Red Geodésica Nacional,» *Topografía y Cartografía. ISSN 0212-9280.*, vol. XVIII , nº 105, pp. pp. 3-11, 2001.

[4] R. Ong, «Reliability of Combined GPS/GLONASS Ambiguity Resolution,» DEPARTMENT OF GEOMTICS ENGINEERING, 06 2010. [En línea]. [Último acceso: 10 2016].

[5] Hofmann-Wellenhof, GNSS Global Navigation Satellite Systems, 2008.

[6] V. U. o. Technology, «SC 1.3a: Europe. IAG Subcommission 1.3.a,» Department of Geodesy and Geoinformation 2016. Vienna University of Technology, 09 2016. [En línea]. Available: http://iag.geo.tuwien.ac.at/c1/sc13/sc13a/. [Último acceso: 10 2016].

[7] J. A. Tarrío Mosquera, «Repositorio Documental Gredos. Tesis Doctoral,» Universidad de Salamanca, 05 2014. [En línea]. Available: http://gredos.usal.es/jspui/handle/10366/125963. [Último acceso: 10 2016].

[8] I. GNSS, «Network Real Time Kinematic GPS,» Inside GNSS, 10 2013. [En línea]. Available: http://www.insidegnss.com/node/3686. [Último acceso: 10 2016].

IJSER