

ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DINÁMICA DE TRANSFORMACIONES GEODÉSICAS EN FORMA DE MENSAJES *RTCM* Y SU EMISIÓN EN TIEMPO REAL

Capilla R.², Martín A.¹, Anquela A. B.¹, Zaragoza M.², Berné J.L.¹

¹Departamento de Ingeniería Cartográfica, U.P. Valencia

Camino de Vera s/n, 46022-Valencia

aemartin@upvnet.upv.es

²Instituto Cartográfico Valenciano

Av. Ingeniero Fausto Elio, 46022-Valencia

capilla_raq@gva.es

Palabras clave: GNSS, *ITRF*, transformación de DATUM, *CRS*, geoides, mensajes *RTCM*, RTK.

Abstract

El incremento de redes *GNSS* desplegadas en los últimos tiempos junto con el alto rendimiento alcanzado en el uso de las técnicas de generación de solución de red RTK tipo *Virtual Reference Station (VRS)*, *Master Auxiliary Concept* o la solución de red estándar *RTCM 3.1*, hacen de los servicios para posicionamiento *GNSS* una herramienta cada vez más utilizada. Uno de los aspectos más interesantes en estos momentos consiste en la posibilidad de definir servicios capaces de transmitir en tiempo real tanto transformaciones entre marcos *ITRF/ECEF (International Terrestrial Reference Frame/ Earth-centered Earth-fixed)*, como ondulaciones de geoides por parte del proveedor de los servicios para posicionamiento *GNSS*. Si bien, son aplicables transformaciones de Datum y modelos de geoides en los controladores GPS de campo, actualmente un área activa de investigación, reside en configurar desde el centro de control diferentes *streams* y mensajes *RTCM* generados dinámicamente, portadores de parámetros de cambio entre marcos de referencia así como información interpolada en una malla de geoides, enviados junto con el resto de información de correcciones diferenciales para DGPS/RTK.

Recientemente se ha revisado y actualizado, por parte del *Special Committee SC-104*, la versión del formato estandarizado *RTCM 3.1 (Radio Technical Commission for Maritime Services)*, con el fin de incluir un conjunto de nuevos mensajes transferibles a los receptores *GNSS rover (RTCM Standard 10403.1 - Amendment 1)*. Dentro del rango de mensajes *RTCM*, los que abarcan del 1021-1027 son los reservados para este propósito. En este artículo se evalúan las herramientas, resultados y ventajas de transmitir en tiempo real transformaciones actualizadas, con la finalidad de proporcionar al usuario final la posibilidad de trabajar en consistencia con distintos marcos, bien cuando se producen actualizaciones periódicas de la solución de coordenadas como resultado de la necesidad de alinear las redes *GNSS* con los sucesivos marcos *ITRF*yy, o bien cuando el usuario tenga la necesidad de trabajar en el Sistema de Geodésico de Referencia (SGR) distinto del actual ETRS89, permitiéndole asimismo, obtener la ondulación de geoides interpolada desde el centro de control.

1 Introducción

Hoy en día la tecnología *GNSS* proporciona coordenadas de alta precisión en tiempo real en el sistema de referencia geodésico de la red, debido fundamentalmente a las mejoras producidas en las técnicas de resolución de ambigüedades y modelado de fuentes de error al aplicar las técnicas de solución de Red RTK.

Los usuarios finales de las redes *GNSS* para posicionamiento en tiempo real, necesitan, en ocasiones, obtener sus coordenadas en el sistema de referencia horizontal local con altitudes ortométricas. Para ello se necesita que el cambio de Datum y el modelo del geoides a aplicar en campo, hayan sido introducidos y configurados con anterioridad en las controladoras *GNSS* por los fabricantes o los usuarios, convirtiéndose ellos mismos en los responsables de la buena calidad y estado actualizado de esas transformaciones. Dado que la transformación entre Sistemas Geodésicos de Referencia, no es única, es habitual que varios usuarios que, en teoría, trabajan en el mismo Sistema de Referencia de Coordenadas (*CRS*) utilicen diferentes modelos en las controladoras para trabajar en tiempo real a causa de las distintas fuentes que pueden consultar.

Esta situación ha cambiado drásticamente debido a la nueva definición publicada entre los años 2007 y 2008 de los mensajes *RTCM 3.1* por parte del *Special Committee RTCM-SC104*, ([15,16]), y en concreto, por la definición del rango de mensajes 1021-1027, capaces de transmitir en tiempo real transformaciones geodésicas entre marcos de referencia. La definición y la implementación del envío en tiempo real de mensajes con información de los *CRS* han sido investigadas y desarrolladas recientemente en [12].

Con estos mensajes transportados en tiempo real, las mediciones *GNSS* sobre un marco pueden ser automáticamente expresadas en otro marco de referencia y las altitudes elipsoidales pueden ser convertidas a altitudes ortométricas, al ser posible el transporte del valor de la ondulación del geoides en la posición del receptor móvil, lo que convertiría en innecesaria la introducción de las transformaciones en las controladoras de campo.

Otra importante ventaja es la administración central de estas transformaciones, con lo que la información emitida en tiempo real se encontraría actualizada y todos los usuarios utilizarían conjuntos de parámetros consistentes, y las mismas rejillas y/o modelos de geoides.

A continuación se describen los análisis efectuados en una red de estaciones de referencia GNSS para la generación y transporte vía IP (*NTRIP, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), de diversos tipos de transformaciones geodésicas a través de los mensajes RTCM 3.1 recientemente definidos. Este tipo de servicio puede ser muy útil para los usuarios que deban desarrollar sus trabajos de campo en el Sistema de Referencia Geodésico ED50, diferente del Datum oficial ETRS89 de las de redes GNSS, además se introduce una comparativa en la implementación de mensajes RTCM para el geoides gravimétrico local de la región de Valencia [13], el modelo IBERGEO 2006 [17] y el global *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008) [14], en el envío de la ondulación.

2 Generación dinámica en tiempo real de los mensajes de transformación geodésica.

2.1 Estandarización de los nuevos mensajes RTCM 3.1 para transformaciones geodésicas

La definición de los nuevos mensajes de transformación RTCM 3.1 1021 a 1027 con las especificaciones para Sistemas de Referencia de Coordenadas (CRS), se establecen en el documento RTCM 100-2007-SC104 y *Amendment 1* del estándar RTCM 10403.1 [16]:

- El mensaje 1021 proporciona espacio reservado para los parámetros Bursa-Wolf aplicables con la expresión linealizada o estricta de la transformación de Helmert y espacio para la transformación de Molodensky.
- El mensaje 1022 proporciona los parámetros Badekas-Molodensky, incluyendo las coordenadas del baricentro origen, que deben coincidir con las coordenadas del baricentro del área de los servicios RTK.
- El mensaje 1023 proporciona en tiempo real los valores de los nodos (también denominados residuales) de dos mallas. Una de ellas debe contener la rejilla definida por coordenadas geodésicas elipsoidales ϕ, λ , en cuyos nodos se encuentran expresados en segundos de arco, los desplazamientos de la transformación de Datum en latitud y longitud elipsoidales, y la otra debe corresponder a la malla de geoides, con los valores de ondulación conocidos para los nodos de la anterior rejilla.
- El mensaje 1024 proporciona los mismos residuos anteriores, pero utilizando cuadrículas definidas por coordenadas Norte y Este. Los mensajes 1023 y 1024 deben ser transmitidos en diferentes *streams* vía *NTRIP* si ambas cuadrículas existen.

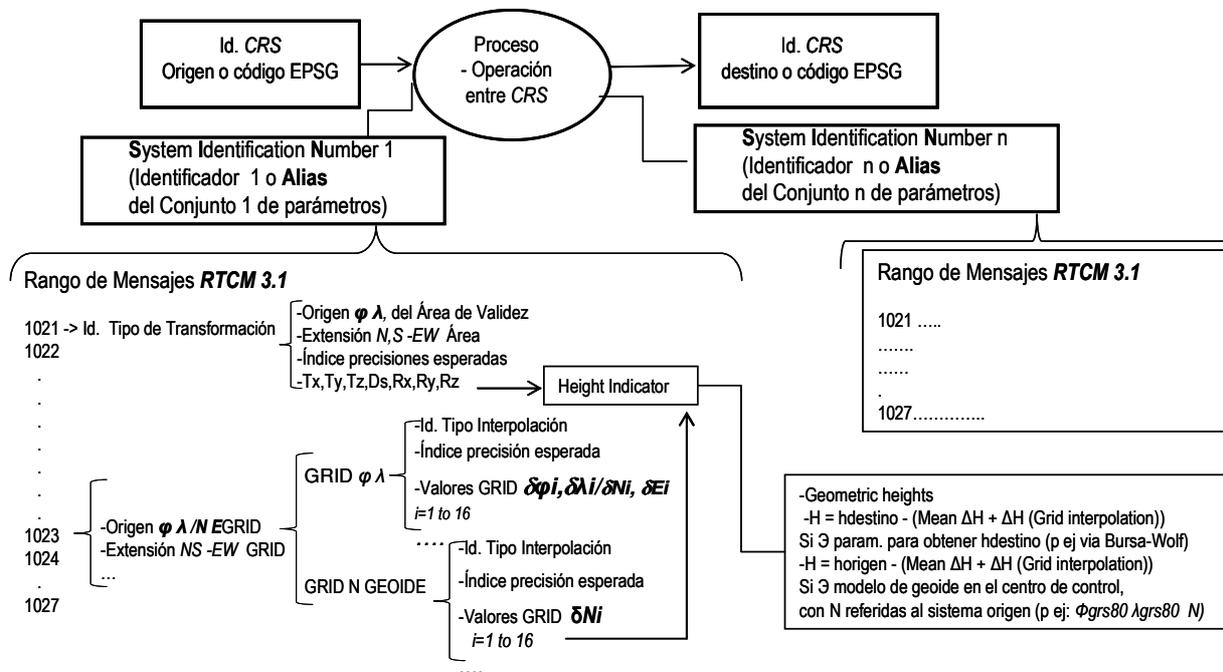


Figura 1: Diagrama general de definiciones y procesos con los mensajes 1021-1024

Las especificaciones de los mensajes 1025, 1026 y 1027 proporcionan la definición y transporte vía IP de distintos Sistemas de Referencia de Coordenadas (CRS), para proyecciones cartográficas tales como la cónica conforme de Lambert, la proyección oblicua de Mercator, etc... Estas proyecciones se corresponden con las recomendaciones de Map Projections for Europe de Eurogeographics, [2]. Cada uno de estos mensajes, al ser implementado debe ser transmitido en un solo *stream* identificado por un único *Mountpoint* asignado.

2.2 Implementación y transporte de los mensajes de transformación 1021-1022

Los modelos de transformación de Datum para la realización de la transición ETRS89-ED50 es un problema ampliamente tratado para la península, [11,7].

El conjunto de parámetros utilizados en la encapsulación del mensaje 1021 desde el procesador central RTK de la red corresponde a los valores de la expresión lineal de la transformación de Bursa-Wolf peninsular, y la calculada utilizando la red geodésica de la región de Valencia, esta última con más de 1500 puntos de coordenadas precisas conocidas en ETRS89 y ED50, ver Figura 3. La adopción del Datum ETRS89 en esta densificación geodésica, conocida como Red Geodésica de Cuarto Orden de la Comunidad Valenciana, ha sido posible gracias al reprocesamiento y ajuste tridimensional de toda la infraestructura, incluyendo los resultados de las nuevas campañas de campo, ([6,8]), actuando como densificación de la red nacional REGENTE (IGN). De igual forma, los nuevos mensajes de transformación han sido analizados con los servicios para posicionamiento en tiempo real que proporciona la Red de Estaciones de Referencia GNSS de Valencia (conocida como Red ERVA), proyecto ejecutado y administrado por el ICV, ([8,9]).

Un segundo aspecto a desarrollar y analizar en este apartado es la transmisión de la transformación de Datum entre ED50 y ETRS89 calculada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). La rejilla para la transición de Datum de extensión Península+Baleares, adopta el formato binario *NTv2* (National Transformation version 2) como se describe en [11], (Figura 2), que cumple la necesidad de una transformación continua para todo el territorio y se convierte en una herramienta reversible fácil de integrar en software comercial o software libre. Debido a la heterogeneidad y propagación de residuos del Datum ED50, el conjunto clásico de siete parámetros no es suficientemente preciso para garantizar una transición consistente entre ED50 y ETRS89. Una alternativa eficiente y exitosa es la interpolación bilineal entre valores de los nodos de la rejilla obtenidos modelando la distorsión con el método de superficies de mínima curvatura, que se plasma en la rejilla *NTv2* del IGN.

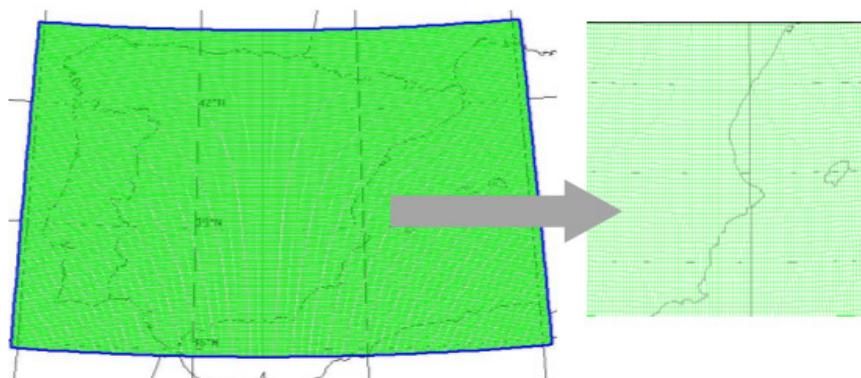


Figura 2: Extensión de la rejilla *NTv2* (IGN).

En el caso de ser necesario obtener en tiempo real resultados con la transformación y precisión de la rejilla *NTv2*, tal y como se ha citado en el texto, los mensajes *RTCM* para la transformación de Datum pueden ser generados dinámicamente a partir de los valores de una rejilla, pero, en el caso del cambio ETRS89-ED50, deben ser encapsulados adicionalmente en el mensaje *RTCM* 3.1 1021 enviado conjuntamente con el mensaje 1023/1024.

Un tercer aspecto de análisis es el siguiente: los proveedores de los servicios de posicionamiento deben utilizar productos IGS, por lo que las redes están constreñidas al marco *ITRF* y más reciente. Los marcos de referencia definidos, es decir, las coordenadas y velocidades de las estaciones, son actualizadas aproximadamente cada cinco años. La última realización del marco de referencia internacional *ITRF2005* se caracteriza, entre otros aspectos, por adoptar modelos absolutos para variaciones de centro de fase de la antena ([1,5]).

Para evitar los saltos y discontinuidades, entre otros problemas, y armonizar las futuras realizaciones del sistema ETRS89, estableciendo así un único marco de forma convencional para toda Europa, EUREF recomienda adoptar el marco *ETRF2000* como marco de referencia común [4]. De cualquier forma, la decisión de adoptar un cambio de marco *ETRFxx* puede producir discontinuidades en las posiciones de las estaciones que deben ser tenidas en cuenta, [5], por lo que el mensaje 1021 podría ser implementado y utilizado para enviar a los usuarios la

transformación o traslación que alinee las actuales coordenadas con la solución obtenida del alineamiento *ITRFyy/ETRFyy* anterior. Para implementar este punto, es necesaria la encapsulación de los *offsets* globales entre marcos de acuerdo con la estandarización establecida en los mensajes *RTCM 3.1* del tipo 1021.

Por último, reseñar que el mensaje adicional 1028 será definido y se dedicará a la transformación *ECEF –Plate Fixed* en un futuro por parte del *RTCM Working Group*, [16].

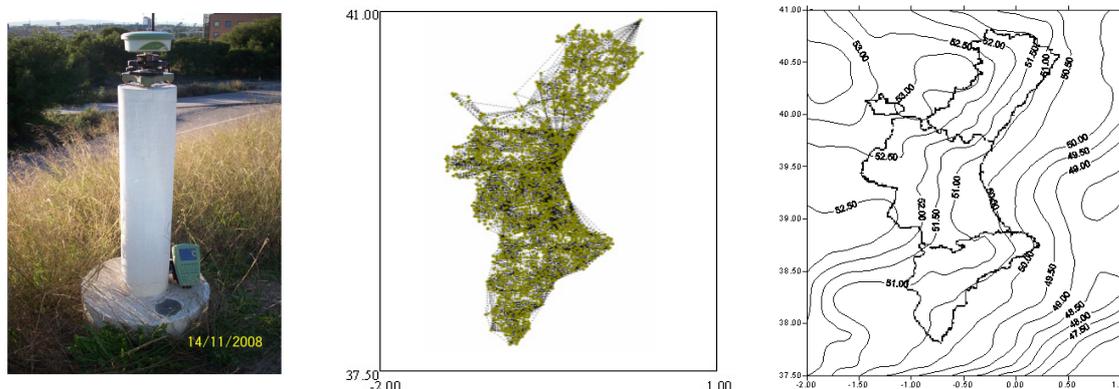
2.3 Transporte de ondulaciones del geoide en tiempo real

El reciente modelo de geoide gravimétrico de alta precisión y resolución para la Comunidad Valenciana, [13], ha sido uno de los modelos analizados para la generación dinámica de ondulaciones en tiempo real, Figura 4, junto con *IBERGEO 2006* y el *EGM2008*.

Este modelo de geoide se basa en la técnica Eliminar-Restaurar siguiendo el escenario Stokes-Helmert a partir de los siguientes datos:

- Modelo geopotencial global- *EIGEN-CG03C* hasta grado y orden 360. Este modelo es una combinación de datos de los satélites *CHAMP* y *GRACE* y datos altimétricos y gravimétricos de la superficie terrestre.
- Más de 13000 observaciones de gravedad validadas, tanto terrestres como marinas, del *IGN*, *BGI*, *Sandwell & Smith* (altimetría de satélite) y propios.
- Más de 100 cuadrículas de 25x25 km del modelo digital de elevaciones del Servicio Geográfico del Ejército con 25x25 metros de resolución y precisión métrica.
- 12 cartas náuticas y el mapa batimétrico del mar Balear y Golfo de Valencia han sido digitalizados y completados con información batimétrica de altimetría de satélite para la generación de un modelo digital batimétrico.

El modelo de geoide obtenido se ha contrastado con otros (*EGM96*, *IBERGEO06*, *EGG97*, *IGG2005*) a partir de puntos de *GPS/nivelación* mostrando una mejora significativa. La ondulación del geoide interpolada en tiempo real ha sido generada y encapsulada en los mensajes *RTCM* tipo 1023.



Figuras 3 y 4 : Infraestructura geodésica pasiva de Valencia y Modelo de Geoide GECV07 para la Comunidad Valenciana. Elipsoide de referencia *GRS80*

2.4 Arquitectura, encapsulación y flujo en tiempo real de los parámetros de transformación

Una parte crítica del proceso es la implementación y adaptación de las transformaciones, que deben ser cargadas en módulos externos o embebidos dentro del servidor generador de correcciones de Red RTK.

Para su aplicación en tiempo real de manera eficiente, entre el receptor móvil y el procesador central de la red es necesaria la comunicación de forma *bidireccional*, aunque técnicamente parte del rango de mensajes (1021,1022), son aplicables también en modo *uni-direccional* o modo *broadcast* en el *stream* de una sola estación. En el caso *bidireccional*, la sentencia *NMEA-GGA* transmitida desde el receptor móvil al servidor, es reenviada por el software de administración de redes *GNSS* y solución de red RTK al módulo que, a continuación, genera la transformación estandarizada en formato *RTCM 3.x*, (cambio de Datum /marco / información sobre el *CRS* y/o ondulación de geoide), y la encapsula para el transporte *NTRIP*, Figura 5.

Para el caso de los mensajes 1021-1022, la definición del área de validez es fijada en el módulo de transformación y consiste en las coordenadas latitud y longitud del origen y la extensión del área de cobertura del servicio.

Los mensajes que pertenecen al rango 1023-1024 de *RTCM 3.1*, contienen los residuales obtenidos a partir de una malla de ondulaciones del geoid o de transformación entre SGR en latitud, longitud, ambas mallas deben ser cargadas en el procesador central; la extensión de estas mallas debe ser la del área de cobertura del servicio. En este tipo de estandarización a través de rejilla o malla, cuando el procesador RTK recibe la sentencia *NMEA*, como transformación dinámica se genera una nueva submalla con la posición del receptor móvil en el centro, Figura 5.

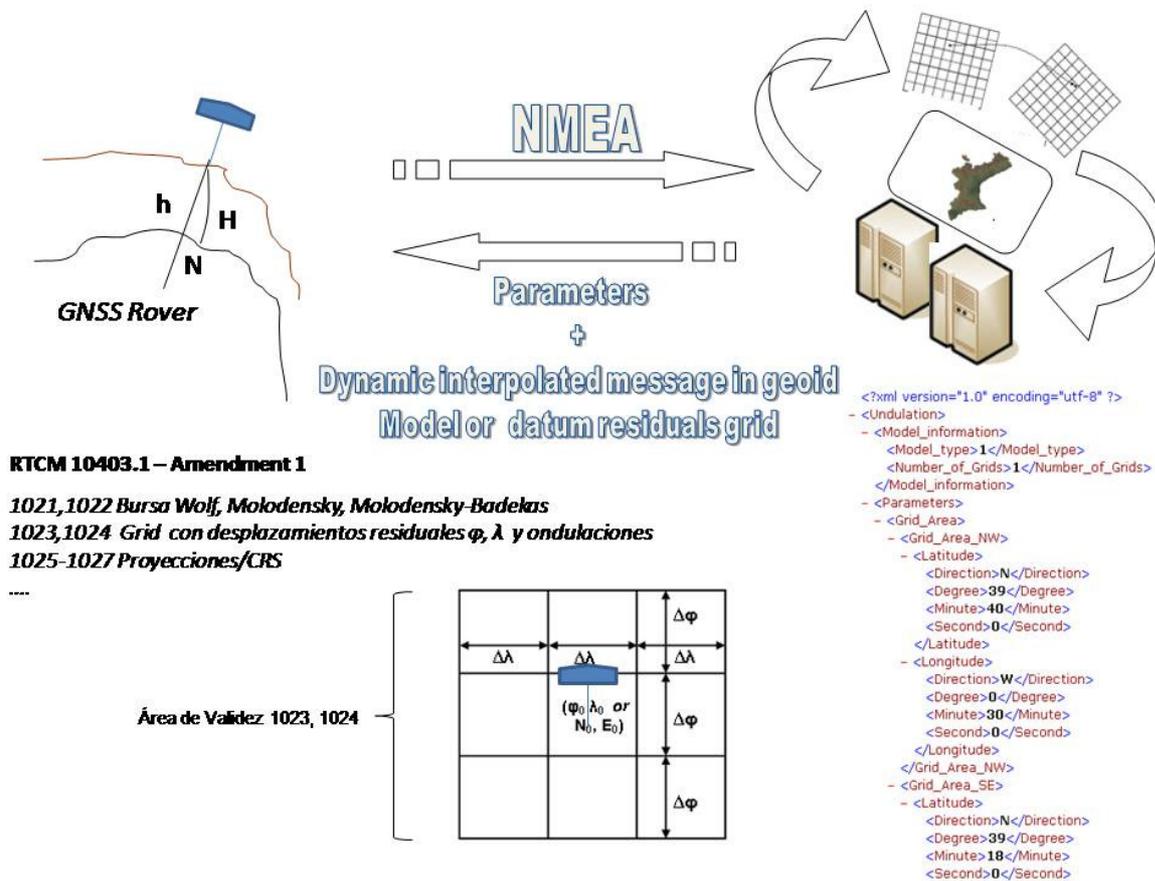


Figura 5: Diagrama de flujo de datos y arquitectura

El área de validez en este caso corresponde a la nueva submalla definida por un subconjunto de nodos que lo rodean, entre 4-16, (cambiando así el significado de área de validez para los mensajes 1023-1024 con respecto al 1021-1022). Los valores conocidos a partir de los nodos de la submalla se envían para la interpolación en el *rover*, cuyo método es a su vez especificado en los mensajes transmitidos. Interpolaciones del tipo Bilineal, Bicuadrática, o bicúbica son contempladas para las transformaciones geodésicas definidas en *RTCM 3.1*.

Los campos de datos de los mensajes *RTCM* del tipo *char* (carácter), bit o entero se definen en el centro de control *GNSS* y se incluyen dentro del flujo *RTCM* con el fin de especificar el método de interpolación, los parámetros de los elipsoides, y/o sistema *CRS* origen y destino o código *EPSG* (*European Petroleum Survey Group*), Figura 1. El Número de Identificación del Sistema (SIN) se emplea para todos los mensajes relacionados con el mismo conjunto de parámetros de transformación. Según se define en el *Amendment 1* del estándar *RTCM 10403.1*, el número SIN es necesario en caso de implementar varias transformaciones geodésicas en el centro de control y su transmisión por uno o varios *streams*, [12]. Cada transformación es emitida, también, utilizando un puerto TCP y/o identificada por un *Mountpoint*.

Las tolerancias de los valores residuales interpolados se establecen en los estándares de los mensajes de transformación 1023-1024, debiendo ser consideradas cuando se utilizan mallas o rejillas de gran extensión o gran separación entre nodos, (Tabla 1). Ello supone que los valores interpolados para una determinada posición *NMEA* que excedan estas tolerancias no son aptos para ser emitidos según los estándares *RTCM*.

Esta cuestión puede resultar crítica en los bordes del área ocupada por los modelos o rejillas, o en mallas de poca resolución. Por tanto, la eficacia en la generación dinámica de mensajes *RTCM 3.1* depende, por un lado, de la densidad y precisión de los datos de transformación entre los *CRS* origen y destino, y por otro, de la potencia de cálculo e interpolación “al vuelo” en grandes mallas en el procesador de solución de red.

Elemento	Tolerancia según estándar <i>RTCM</i> 3.1	Descripción
Data Field 199 (<i>DF199</i>)	$\delta\phi_i \pm 0.00765$ [en seg. de arco]	Residuos en la latitud del punto <i>i</i>
Data Field 200	$\delta\lambda_i \pm 0.00765$ [en seg. de arco]	Residuos en la longitud del punto <i>i</i>
Data Field 201	$\delta h_i \pm 0.255$ metros	Residuos en <i>h</i> del punto <i>i</i>

Tabla 1: Tolerancias del *RTCM* 10403.1 para valores interpolados en las mallas de ϕ , λ y ondulaciones de geoide.

De hecho, un modelo de geoide global como el *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008), presenta valores para δh_i muy superiores a la tolerancia si se utiliza la malla de paso superior a 2x2 minutos para envío en mensajes estandarizados tipo 1023. La adaptación del *EGM2008* supone realizar un remuestreo a malla de 1'x1', Figura 6.

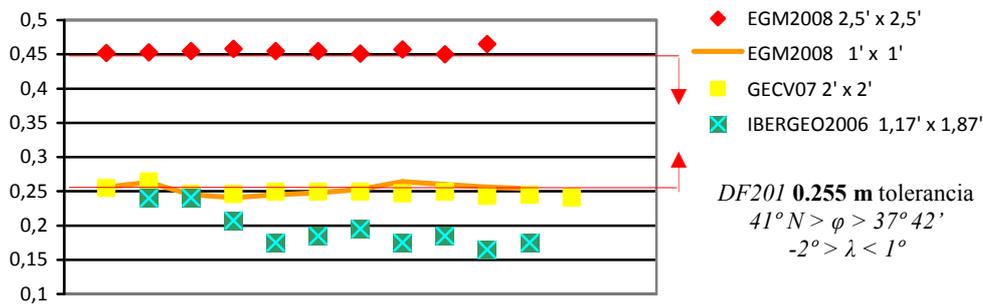


Figura 6: Valores de la interpolación $a_0+a_1x+a_2y+a_3xy$ entre los nodos de mallas de Geoide para transporte en *RTCM* 3.1 1023/1024. Unidades en metros. (GECV07 Geoide de la Comunidad Valenciana).

Del mismo modo el envío de rejilla con modelado de distorsión para el cambio de Datum basada en el formato *NTv2* (IGN), requiere un tratamiento previo. La interpolación entre los valores de los nodos de la rejilla Península+Baleares para su envío estandarizado en *RTCM* 3.1, excedería la tolerancia establecida en el campo 199, 200 del mensaje (Tabla 1). Una posible solución es el envío conjunto de los mensajes 1021-1023, puesto que el transporte conjunto de ambos sí que es soportado.

En el mensaje 1021 se enviaría una transformación conforme, y a través del mensaje 1023 los valores de una nueva malla que contenga la componente de la transformación de Datum que modele la distorsión restante. Por lo que sería necesario descomponer los valores de la rejilla *NTv2* binaria en dos componentes, conformidad y modelado de distorsión, para su transporte, u obtener este residual del mismo proceso de cálculo de rejilla. A efectos de evaluación, se ha elaborado una malla remuestreada en cuyos nodos se conoce la diferencia entre la aplicación de una transformación conforme y la transformación modelando la distorsión con superficies de mínima curvatura. Es decir, el mensaje 1023 transmite, no la transformación de Datum sino un valor que se predice del residual restante equivalente al modelado de distorsión.

3 Análisis de campo.

Para la toma de datos en campo, se han utilizado dos equipos *rover GNSS* diferentes que soportaban los nuevos mensajes *RTCM* 3.1.

Las pruebas han consistido en la generación de la transformación dinámica en tiempo real en el procesador del Servicio de Red RTK, del cambio de SGR ETRS89 a ED50, y de la identificación de los nodos para la interpolación de la ondulación del geoide, para diversas posiciones ocupadas por un *rover*, siguiendo la estandarización de los mensajes según especificaciones del formato *RTCM* 3.1. Para ello se han realizado diferentes ocupaciones sobre un conjunto de puntos de coordenadas precisas que pertenecen a la Red Geodésica de Cuarto Orden autonómica, Figura 7, y sobre los vértices de la base de calibración de la Universidad Politécnica de Valencia, con el fin de evaluar el rendimiento de la transformación geodésica transportada por *NTRIP* a lo largo del movimiento a través de la base de calibración.



Figura 7: Puntos donde se han efectuado repetidas series de observaciones en posicionamiento en tiempo real.

El receptor móvil procesa los parámetros y residuales recibidos a partir de la configuración definida en el servidor y transmitida en uno de los campos de datos estandarizado. El rendimiento final tras la aplicación del rango de mensajes 1021, 1023-1024 depende de la precisión de la posición planimétrica efectuada en tiempo real, es decir, las condiciones de la observación y de latencia en el transporte tienen influencia en la posición del receptor móvil. En las pruebas efectuadas, las mediciones se realizaron con latencia y condiciones de constelación óptimas.

La tabla 2 muestra los resultados de las pruebas de campo. La primera fila muestra los estadísticos de las diferencias en coordenadas ϕ , λ del punto obtenidas con correcciones de red RTK en ETRS89 (precisión de la posición del punto), la segunda muestra la diferencia entre la aplicación de los parámetros a la posición de solución de red RTK y la aplicación de los mensajes de transformación transportados *RTCM* 3.1. La tercera es la diferencia entre la transformación de Datum aplicada a las coordenadas ETRS89 ajustadas y precisas del vértice y la obtenida aplicando los mensajes de transformación geodésica.

PDOP medio:1.6				
Latencia media:0.7 segundos				
	Media	σ	Max.	Min.
Precisión en Solución de Red RTK	0.009	0.002	0.014	0.006
Desviación aplicación transformación transportada -transformación calculada sobre solución de red RTK	0.003	0.003	0.017	0.000
Desviación transformación transportada –transformación aplicada sobre coordenadas conocidas ETRS89 (Precisión Transformación Transportada+ Precisión Posicionamiento)	0.024	0.013	0.063	0.007

Tabla 2: Estadísticos de las diferencias 2D en la emisión de transformación de SGR en mensaje *RTCM* 3.1 1021, ver texto para explicaciones. Unidades en metros.

Como puede apreciarse, al margen de la precisión nominal de los parámetros, el error de la transformación con los parámetros emitidos desde el procesador central RTK, es inferior a la precisión de las coordenadas obtenidas a partir de las observaciones con correcciones de red RTK en tiempo real (como era de esperar), así que se puede asumir que no existe error en la interpolación realizada con los mensajes de transformación generados en el procesador de la red o debido al transporte o latencia en las transformaciones geodésicas emitidas.

La correcta obtención de la ondulación del geoide transportada depende de la exactitud en la posición obtenida tanto en planimetría como en h elipsoidal, es decir, una posición errónea planimétrica genera una ondulación interpolada que no corresponde con la que se obtendría en las coordenadas exactas. Asimismo, la determinación de la h elipsoidal en tiempo real influye en la altitud ortométrica final obtenida en el receptor móvil. Para esta prueba la frecuencia para emitir mensajes residuales se asignó a 5 y 20 épocas *GNSS* únicamente para comparar resultados debido a que el receptor móvil *GNSS* se mueve dentro del área de validez dentro de una base de calibración en cada ocupación.

La tabla 3 muestra en la primera fila los estadísticos de las diferencias en coordenadas en planimetría del punto obtenido con correcciones de red RTK en ETRS89 (precisión planimétrica de la posición del punto en tiempo real), la segunda contiene los estadísticos de las diferencias en la determinación de h elipsoidal con correcciones de red RTK, la tercera muestra la diferencia entre las ondulaciones de geoide calculadas en la posición obtenida con correcciones de red y las ondulaciones recibidas a través de los mensajes de transformación emitidos (Diferencia entre ondulaciones transportadas o transmitidas en mensajes *RTCM* 3.1 y calculadas para la posición en tiempo real), la cuarta es la diferencia entre las ondulaciones de geoide calculadas a partir de las coordenadas geodésicas precisas ETRS89 ajustadas del vértice y las transmitidas a través de los mensajes de transformación *RTCM* 3.1.

PDOP medio:1.6 Latencia media: 0.7 seg.	Media	σ	Max.	Min.
Precisión planimétrica de la posición del punto	0.009	0.002	0.013	0.006
Precisión altimétrica de la posición del punto	0.014	0.004	0.025	0.008
Diferencia ondulaciones transportadas <i>RTCM</i> 3.1 y calculadas para posición RTK	-0.002	0.011	0.015	-0.027
Diferencia ondulaciones transportadas <i>RTCM</i> 3.1 y calculadas en coordenadas precisas ETRS89 (Precisión ondulación Transportada+ Precisión Posicionamiento)	-0.001	0.010	0.018	-0.024

Tabla 3: Estadísticos de los resultados de transmisión de ondulación del geoides GECV07, en mensaje *RTCM* 3.1 1023, ver texto para explicaciones. Unidades en metros.

Como puede apreciarse, el error en las coordenadas planimétricas observadas es inferior a 0.02 metros, por lo que el error en la ondulación del geoides debido a la precisión en planimetría en tiempo real puede ser despreciado. La tercera fila presenta resultados consistentes con los errores en la altura elipsoidal observada de la segunda fila (como es de esperar). Con lo cual el valor presentado en la cuarta fila llega a ser prácticamente el error de la interpolación, considerando la escasa influencia sobre la ondulación final del transporte de la misma y la precisión de la solución obtenida en tiempo real. Se adjuntan también datos sobre el transporte de ondulaciones de modelos globales tipo EGM2008, muestreado a malla de $1' \times 1'$:

PDOP medio:1.3 Latencia media: 0.8 seg.	Media	σ	Max.	Min.
Diferencia ondulaciones EGM2008 transportadas <i>RTCM</i> 3.1 y calculadas para posición RTK	-0.0033	0.0092	0.0000	-0.0110
Diferencia ondulaciones EGM2008 transportadas <i>RTCM</i> 3.1 y calculadas en coordenadas precisas ETRS89 (Precisión ondulación Transportada+ Precisión Posicionamiento)	0.0010	0.0094	0.0058	-0.0017

Tabla 4: Estadísticos de los resultados de transmisión de ondulación del geoides EGM2008 malla 1×1 , en *RTCM* 3.1 1023. Unidades en metros.

3.1 Transporte combinado de mensajes 1021, 1023.

Aplicaciones de la implementación del envío combinado de parámetros + malla o rejilla, son las siguientes:

-Envío de *offsets* entre las alineaciones con los marcos *ITRF05-ETRS89/ETRF05* y *ITRF00-ETRS89/ETRF00* en el mensaje 1021 y valores de ondulación del geoides (EGM2008) a partir del 1023.

	Media	σ	Max.	Min.
Diferencia transformación transportada por <i>RTCM</i> 3.1 y calculada para la posición RTK	-0,0030	0,008	0,006	-0,014
Diferencia transformación transportada y calculada sobre ETRS89 ajustadas	0,0033	0,0097	0,015	-0,01208

Tabla 5: Consistencia de resultados en ϕ , λ , H con el transporte en tiempo real de transformaciones. Traslación enviada correspondiente a las soluciones *ERVA08-ERVA06*. Unidades en metros.

Las conclusiones son las mismas si la transformación emitida es la estimación de cambio de marco entre diferentes alineaciones *ITRF* y *ETRF*, siempre que el *offset* estimado sea apreciable en el posicionamiento en tiempo real.

-Envío de la transformación de Datum ETRS89-ED50 en tiempo real implementada con modelado de distorsión. A través del mensaje 1021 se enviaría una transformación de 7 parámetros clásica, conjuntamente con el mensaje 1023, que consiste en los valores de una nueva malla con la componente de la transformación de Datum que modela la distorsión restante a partir de los valores calculados con la rejilla *NTv2*. Siendo posible en el mensaje 1023 el envío de otro grid para ondulaciones del geoides, completando así el paso en tiempo real de ϕ **GRS80**, λ **GRS80**, *h elipsoidal* \rightarrow *X, Y UTM-ED50+ H ortométrica*.

Para concluir, la tabla 6 muestra el rendimiento en la transmisión desde el centro de control del modelado de distorsión así implementado:

	Media	σ	Max.	Min.
Diferencia transformación conformidad+modelado de distorsión transportada por <i>RTCM</i> 3.1 y calculada con rejilla <i>NTv2</i> para la posición RTK	0.0005	0,003	0,003	-0,002
Diferencia transformación transportada conformidad+modelado de distorsión por <i>RTCM</i> 3.1 y calculada con rejilla <i>NTv2</i> sobre ETRS89 ajustadas (Precisión Rejilla transportada + Precisión Posicionamiento)	0.0016	0,007	0,0098	-0,002

Tabla 6: Consistencia de resultados en φ , λ , con el transporte en tiempo real de transformación “conformidad + modelo de distorsión” con GRID $\delta\varphi$, $\delta\lambda$, 1’x1’. Unidades en metros.

4 Conclusiones

Se ha introducido una breve descripción del uso y rendimiento de los nuevos mensajes de transformación *RTCM* 3.1 en una Red de Estaciones de Referencia *GNSS*, evaluando la generación en tiempo real y envío a través de los mensajes estandarizados de la transformación de Datum de ETRS89 a ED50 y la transformación de alturas elipsoidales a ortométricas utilizando varios modelos de geoide de distinta naturaleza (local, regional o global...).

Las pruebas de campo muestran muy buena consistencia entre las observaciones y las transformaciones planimétricas y/o altimétricas emitidas y aplicadas en tiempo real, ver tablas 2-6, por lo que, al utilizar estos nuevos productos, se dará una alternativa a la introducción de la transformación del Datum y el modelo del geoide por parte de los usuarios en sus controladoras de campo.

Así, es posible el transporte en tiempo real de actualizaciones de los nuevos modelos de geoide de alta resolución globales o regionales o la inclusión de nuevas versiones actualizadas de rejilla nacionales para la transformación de Datum, gracias a los procesadores de redes RTK y los módulos de fabricante externos o embebidos de transformación, siguiendo la estandarización de los mensajes *RTCM* 3.1.

La implementación y la preparación de mallas o rejillas para la generación dinámica de estos mensajes basados en los nuevos estándares desde el centro de control, constituye una tarea opcional para los administradores de redes *GNSS*, pero asegura que los usuarios finales de los servicios de posicionamiento en tiempo real tengan acceso y puedan escoger la información actualizada y centralizada de transformaciones establecidas a través de los flujos y productos emitidos vía *NTRIP*.

Por otro lado, el desarrollo de nuevas estandarizaciones y su aplicación por parte de los usuarios, implica adicionalmente cambios en herramientas y en hardware *GNSS*. Pero al margen de esta cuestión, las mejoras en estandarizaciones son relevantes para asegurar un posicionamiento consistente a través de las nuevas definiciones del *SSR* (State Space Representation) [18,19], que representa las componentes de errores individuales de propagación, retardos, órbitas y relojes, y supone una apuesta de futuro para la técnica *PPP* (Precise Point Positioning).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Reiner Jäger, de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Karlsruhe, las aportaciones derivadas de su investigación en la declaración e implementación de los nuevos mensajes *RTCM* 3.1 para emisión de transformaciones geodésicas, a Leica Geostystems, Trimble Ibérica y AI-top, por el soporte en herramientas y nuevas versiones de firmware empleados para los análisis y a Roser Soler por su asistencia en las salidas a campo. El fichero de rejilla para la transición ETRS89-ED50 en formato binario *NTv2* pertenece al IGN y ha sido tratado y transformado a formato XML por los autores del artículo para la implementación de los mensajes del rango 1023-1024, finalmente, los autores agradecen su colaboración a J. González Matesanz del IGN.

Referencias

- [1] Altamimi Z., Collilieux X. (2007). Accuracy assessment of the *ITRF* DATUM definition. VI Hotine-Marusi Symposium on theoretical and computational geodesy. IAG symposium, Vol. 132, 101-110.
- [2] Annoni A, Luzet C, Gubler E, Ihde J. (2003). Map Projections for Europe. EC- JRC –Eurogeographics. European Communities.
- [3] Barbadillo A., Quirós R. (1996). Proyecto REGENTE. Una nueva red geodésica nacional. Física de la Tierra, 8, 23-38.
- [4] Boucher C., Altamini Z. (2008). Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. EUREF IAG Subcommission.
- [5] Benciolini B, Biagi M, Crespi M, Manzano A.M., Roggero M. (2008). Reference frames for *GNSS* positioning services: Some problems and proposed solutions. J. Appl. Geodesy 2, 53-62
- [6] Berné J.L., Capilla R.M. (2004). Adopción del sistema ETRS89 en la Red Geodésica Autónoma de Valencia. IV Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz. Portugal

- [7] Berné, Cañas A, Capilla R. (2004). Métodos de Transformación entre Sistemas de Referencia Geodésicos. Instituto de Navegación de España Vol. 22.
- [8] Capilla R.M., Blat Puchades, E., Saa Gonzalez JM, Bretos J.J. (2005). Arquitectura y servicios de la red de Estaciones GPS/GNSS de Valencia. Quinta Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Sevilla 2006.
- [9] Capilla, R.M., Die, J; Estesó, E (2006). Diseño, aplicaciones integradas y rendimiento de la red activa GPS/GNSS de Valencia. 7 Setmana Geomàtica. Febrero 2007 –Barcelona.
- [10] Capilla, R.M., Martín, A., Anquela, A.B., Berné, J.L., Zaragoza, M. (2009). Datum transformation and geoid undulations transfer to GNSS real time positions through the new *RTCM* 3.1 transformation messages in local and regional GNSS networks. *GPS Solutions*, en prensa
- [11] González-Matesanz J., Dalda A., Malpica J.A. (2006). A range of ED50-ETRS89 DATUM transformation models tested on the Spanish geodetic network. *Surv. Rev.* Vol. 38, nº 302,
- [12] Jäger R., Kälber S. (2008). The new *RTCM* 3.1 transformation messages –declaration, generation from reference transformations and implementation as a server-client concept for GNSS services. International Conference GEOS 2008.
- [13] Martín A., Capilla R., Anquela A.B., Padín J., Berné J.L. (2008). High-precision and high-resolution gravimetric geoid determination in Valencia (Eastern Spain). I International congress on geomatic and surveying engineering, Valencia (Spain). Proceedings.
- [14] 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.
- [15] *RTCM* Special Committee No. 104 (2006). *RTCM* Standard 10403.1 for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3. Radio Technical Commission for Maritime Services.
- [16] *RTCM* Special Committee No. 104 (2007). *Amendment 1* to *RTCM* Standard 10403.1 for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3. Radio Technical Commission for Maritime Services.
- [17] Sevilla M.J. (2006). IBERGEO2006: Nuevo geoide centimétrico de la Península Ibérica. *Topografía y Cartografía*, Vol. XXIII, nº 135,3-10.
- [18] Wübbena, G. (2007). *RTCM* State Space Working Group –Mission Statement . *RTCM* Paper 075-2007-SC104-470
- [19] Wübbena, G. (2008). GNSS Network-RTK Today and in the Future Concepts and *RTCM* Standards. International Symposium on GNSS, Space-based augmentation systems and applications. Berlín, Alemania, 11-14 de Noviembre 2008.