

## Impacto de las calibraciones individuales en antenas GNSS multiconstelación *Impact of individual calibrations on multiconstellation GNSS antennas*

GONZÁLEZ HIDALGO, Miguel <sup>(1)</sup>; AZCUE INFANZÓN, Esther <sup>(1)</sup>; SÁNCHEZ SOBRINO, José Antonio<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geográfico Nacional, Calle General Ibañez de Ibero, 3 – 28003, Madrid. mghidalgo@mitma.es, eazcue@mitma.es, jassobrino@mitma.es

### **SUMMARY**

*All GNSS antennas have their own calibration with the corresponding values of phase center variation. These calibrations tables for each brand and model can be relatives to a reference antenna or they can be absolute calibration obtained by robots or anechoic chambers. These absolute calibrations can be standard to a brand and model or individual for each specific antenna.*

*The International GNSS Service (IGS) and other institutions provide absolute calibrations for the different antenna models which allow us to do an approximate correction of phase center variations and its variations. The difference between the radioelectric center and the mechanical or physical center generates a residual error by eccentricity that can be up to several milimeters in a GNSS observable. To achieve an optimal correction for this error the antennas must be individually calibrated (multiconstellation, multifrequency).*

*The goal of this research is to quantify the positioning difference between GNSS measurements from antennas with absolute standard calibrations versus antennas with absolute individual calibrations. For this purpose, different antennas of the ERGNSS network have been taken and the measurements taken during a month considering the absolute individual calibrations with the same measurements without considering these individual calibrations*

### **PALABRAS CLAVE**

Asamblea Hispano Portuguesa, Geodesia, Antena, Calibración Individual

### **INTRODUCCIÓN**

En este estudio se va a cuantificar la diferencia entre el uso de calibraciones genéricas o individuales en las medidas de posicionamiento GNSS. Para ello, se han tomado distintas antenas de la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS) de cálculo preciso y se han comparado las coordenadas obtenidas considerando la calibración absoluta individual de las antenas con las coordenadas obtenidas sin considerar esas calibraciones individuales.

El artículo está dividido en cuatro secciones. En la primera de ella se presentan los conceptos básicos de antenas. En la segunda sus métodos de calibración. Posteriormente se describen la red y los distintos tipos de antenas (marcas y modelos) utilizados en el estudio, así como la metodología empleada. Y en la última sección se mostrarán los resultados y las conclusiones obtenidas en este estudio.

### **CONCEPTOS BÁSICOS**

El propósito básico de una antena de usuario del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es la recepción de las señales de navegación de todos los satélites GNSS visibles.

Por otro lado, las antenas de transmisión a bordo de los satélites GNSS son bastante diferentes y emplean grandes conjuntos de antenas para crear haces globales de alta ganancia orientados a toda la superficie de la Tierra.

Este artículo está centrado en las primeras.

Antes de ello, se describen brevemente de las características básicas de las antenas en un sistema GNSS.

Las antenas son elementos básicos de cualquier sistema de radiofrecuencia, ya sea para transmisión de audio y video, comunicación

o radionavegación. Una antena sirve como interfaz entre el circuito eléctrico del sistema de radiofrecuencia y el espacio libre. En una antena transmisora, las corrientes eléctricas se convierten en ondas electromagnéticas. Por el contrario, una antena receptora vuelve a convertir esas ondas de radio en corrientes eléctricas. Los sistemas GNSS transmiten sus señales en la llamada banda L del espectro electromagnético. En la siguiente figura se puede ver la asignación de frecuencias para distintos sistemas de navegación por satélite.

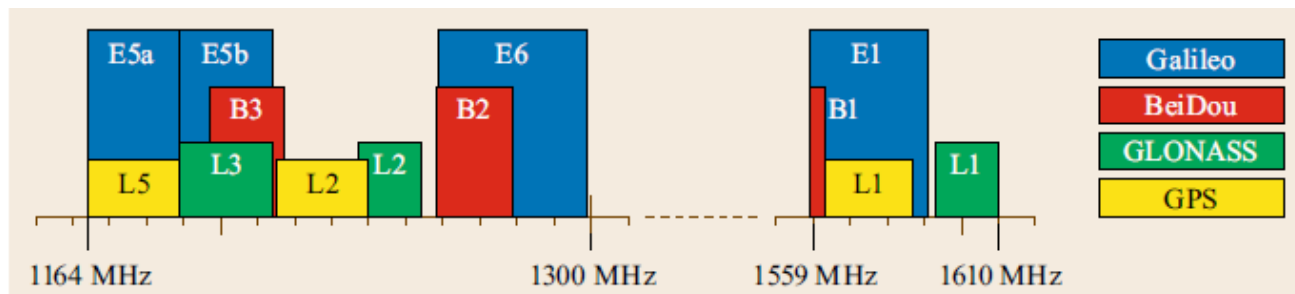


Figura 1: Localización frecuencias de los sistemas de navegación por satélite en la banda L. <sup>[1]</sup>

Antes de continuar con los distintos métodos de calibración se definen los parámetros básicos de una antena receptora GNSS. En primer lugar tenemos el punto de referencia de la antena (*Antenna Reference Point, ARP*) que se define como el punto físico o mecánico (y por tanto, bien conocido) donde se refiere la posición de la estación geodésica. El centro de fase (*Phase Center, PC*) es el punto al que se refieren las medidas GNSS (centro radioeléctrico) y depende de la dirección de entrada de la señal. Se considera como el punto desde el cual parece emerger toda la energía radiada. De este modo, el offset del centro de fase (*Phase Center Offset, PCO*) se define como la diferencia entre el punto de referencia de la antena y el centro de fase. Por último, la variación del centro de fase (*Phase Center Variation, PCV*) es la desviación que presenta el centro de fase respecto a un frente de ondas ideal como el que se ve en las líneas discontinuas de la Figura 2. Depende de la elevación y del azimut.

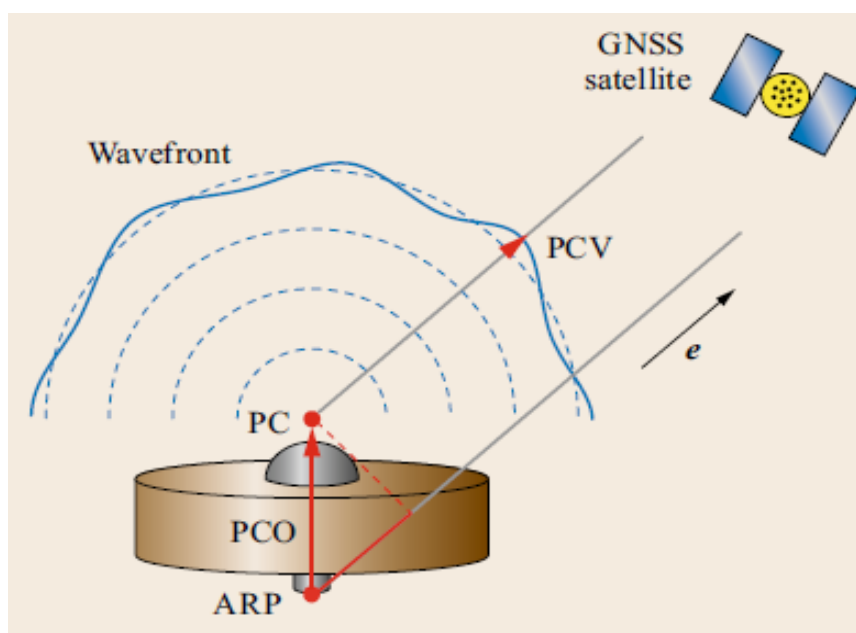


Figura 2: Esquema de los parámetros básicos de una antena. <sup>[1]</sup>

## MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DE ANTENAS GNSS

El rendimiento logrado en el posicionamiento basado en la fase de la portadora en la actualidad se basa en modelos de observación de alta precisión y una caracterización exhaustiva del sistema de medición. Para explotar la medición milimétrica de las observaciones de la portadora, es indispensable un conocimiento adecuado del centro de fase de la antena receptora. El Servicio Internacional GNSS (IGS) es una federación voluntaria de muchas agencias de todo el mundo que ponen en común

datos y recursos de estaciones permanentes GNSS para generar productos GNSS precisos.

Durante muchos años varias instituciones han realizado calibraciones de antenas en estrecha colaboración con IGS. En la actualidad, estas calibraciones abarcan un amplio conjunto de antenas geodésicas de usuario.

Los valores de calibración de antena recomendados para el procesamiento geodésico y compatibles con los productos de órbita y reloj IGS se distribuyen como parte del modelo de antena del IGS, que se actualiza continuamente para incluir nuevas antenas y satélites. Los respectivos valores de PCO y PCV se distribuyen en un formato estandarizado *ANTenna Exchange* (ANTEX \*.atx), que facilita una aplicación coherente en el software de posicionamiento.

Se puede calibrar una antena de manera individual, donde los parámetros PCO y PCV solo se pueden aplicar a una antena en particular o bien se pueden calibrar de manera genérica (las denominadas "*type mean calibration*") donde se obtienen los parámetros para una cierta marca y modelo de antena, a partir de los datos de tres o más antenas calibradas individualmente y combinando las medias de sus resultados.

Las técnicas comunes para realizar estas calibraciones son mediante cámara anecoica o mediante calibraciones de campo, ya sean relativas (técnica ya en desuso) o absolutas (calibraciones con robot). Todas ellas pueden proporcionar información sobre el centro de fase y patrones para frecuencias individuales, pero difieren en varios aspectos prácticos.

Las mediciones en cámara anecoica se encuentran entre las primeras técnicas empleadas para la caracterización del PC de antenas geodésicas. Una cámara anecoica es una sala capaz de absorber radiación electromagnética. Esta cámara se construye recubriendo paredes, techos y suelo con un material especial que absorbe las ondas electromagnéticas. El material suele cortarse en pirámides de varios tamaños para que los reflejos restantes tiendan a propagarse en direcciones aleatorias, lo que suprime aún más su impacto en las mediciones de la antena.

En este método de calibración se utiliza una fuente de señal artificial, idealmente un simulador de señal GNSS, para proporcionar señales de navegación, y la respuesta de fase se mide mientras la antena de prueba gira alrededor de dos ejes independientes. Las características de este tipo de calibración son la reducción de los reflejos en la cámara comentados anteriormente, la mitigación del efecto *multipath* (multitrayectoria) en la cámara y el uso de ondas sinusoidales generadas.

Otra técnica para la calibración de antenas es la calibración de campo relativa. En este método la antena del receptor se calibra con respecto a una antena de referencia estándar a la que normalmente se le asignan valores de PCV nulos. Ambas antenas se colocan muy cerca en puntos bien estudiados y su posición relativa se determina a partir de observaciones diferenciales de fase de la portadora para obtener el PCO. Después los residuos de fase con respecto al PC calculado se utilizan para derivar los PCV.

Para superar las limitaciones de las calibraciones relativas en el análisis de redes geodésicas globales, el IGS pasó a un modelo de antena absoluto en Noviembre de 2006. Está basado en calibraciones de campo para antenas de usuario, que se obtienen a partir de medidas GNSS recogidas con una antena montada en un robot. En una calibración absoluta, todos los desplazamientos de la antena y las variaciones del centro de fase de la antena son independientes de la antena de referencia. La antena sometida a prueba se desplaza mediante un robot calibrado (movimiento controlado con precisión) de modo que un satélite determinado sea recibido en ángulos diferentes por las antenas de prueba y de referencia. Esta separación angular permite cancelar los efectos de la antena de referencia. A diferencia de una antena estática, el robot permite cambios rápidos de la dirección de puntería y del ángulo de rotación. De este modo, se pueden recoger observaciones de fase de la portadora con una cobertura de todo el hemisferio de la antena en una campaña breve de pruebas, en función de la cual se pueden inferir los valores de PCO y PCV. Al igual que las calibraciones en cámara, las calibraciones mediante robot se basan en el conocimiento muy preciso del movimiento del ARP durante los cambios de orientación de la antena.

Este método de calibración es el utilizado por el IGS en la actualidad para generar las calibraciones genéricas de las antenas ya que presenta distintas ventajas. Al ser una calibración al aire libre permite utilizar señales de GNSS reales, la señal se trata con un receptor GNSS y se mitigan los errores de *multipath* debido al movimiento del robot.

En la Figura 3 se puede ver un ejemplo de PCV de una calibración de antena geodésica mediante robot en la banda de frecuencia L1.

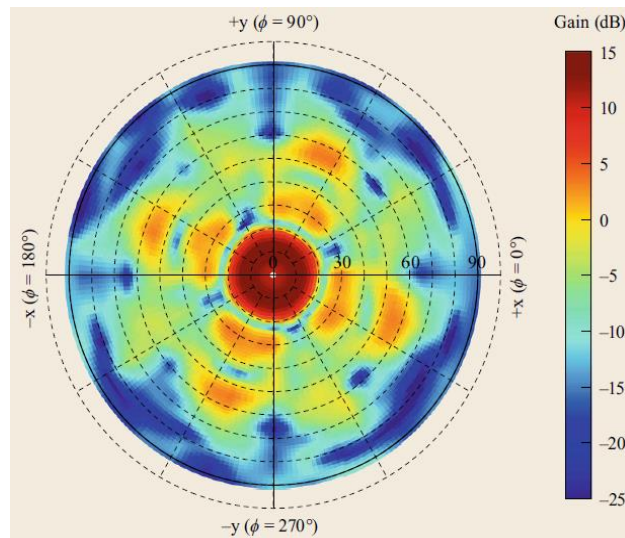


Figura 3: PCV de la antena choke-ring Trimble TRM 4532.00. [1]

### REDES, ANTENAS Y METODOLOGÍAS UTILIZADA EN EL ESTUDIO

Para la realización de este estudio se han utilizado un total de 132 estaciones permanentes GNSS pertenecientes a la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia (ERGNSS) y a la Red de Vigilancia Volcánica del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La red de estaciones permanentes del IGN constituye la referencia básica que da acceso al sistema ETRS89 de forma directa. Algunos de los objetivos de dicha red son: obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en todos los puntos de la red, contribución a la definición de los nuevos Marcos de Referencia Globales (ITRF) en el territorio nacional o ser puntos fundamentales de la Red Europea EUREF de estaciones permanentes (EPN) para la densificación de los marcos globales y definición del sistema ETRS89.

La Red de Vigilancia Volcánica de estaciones permanentes o de registro continuo tiene como principal objetivo el control de deformaciones en áreas volcánicas, como es el caso de las Islas Canarias. Mediante el procesamiento de los datos de estas estaciones es posible controlar la variación en el tiempo de la posición de la estación. Esto permite detectar un movimiento inusual que pudiera ocurrir como resultado de un cambio en el estado de la zona de estudio.

Del total de las 132 antenas estudiadas, 74 de ellas contaban con calibración genérica y 58 con calibración individual. En la Figura 4 se pueden ver las distintas marcas y modelos utilizados, así como su tipo de calibración.

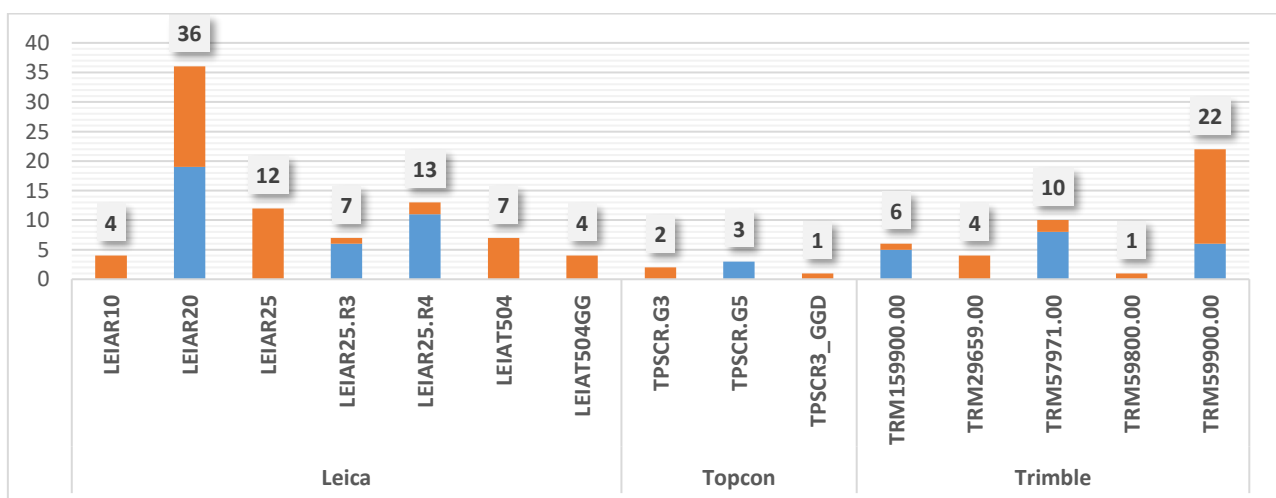


Figura 4: Marca y modelos de las antenas del estudio. En color naranja calibraciones genéricas y en azul individuales.

En cuanto a la metodología de trabajo, en el IGN hay un Centro de Análisis de datos GNSS que realiza para varios proyectos un procesamiento continuo de datos procedentes tanto de las estaciones permanentes de la red ERGNSS, como de otras redes, además de ser Centro de Análisis Local de EUREF.

Los diferentes procesos continuos de cálculo para estos proyectos se realizan con el software Bernese en su versión 5.2.

En este estudio se ha seguido la metodología de trabajo de estos proyectos, con alguna particularidad.

Se han realizado dos procesamientos idénticos para el conjunto de los datos con una única diferencia entre ambos. En uno de ellos se han utilizado las calibraciones individuales de las antenas en los cálculos y en el otro no. El periodo temporal del estudio abarca un total de 5 semanas (desde la semana GPS 2195 hasta la semana GPS 2199). Para todas las estaciones se han utilizado datos RINEX diarios a 30 segundos. Para el modelo de variación del centro de fase (PCV) de las antenas se ha tomado el proporcionado por el IGS (igs14.atx), excepto para las antenas con calibración individual, que tenían su propio PCV.

Las características de los procesamientos quedan resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 1: Características de los procedimientos utilizados en el estudio

	CÁLCULO 1 (sin calibraciones individuales)	CÁLCULO 2 (con calibraciones individuales)
Software	Bernese 5.2	Bernese 5.2
Periodo temporal del estudio	5 semanas (semanas GPS 2195 a 2199)	5 semanas (semanas GPS 2195 a 2199)
Número total de estaciones	132	132
Sistemas GNSS	GPS + GLONASS + Galileo	GPS + GLONASS + Galileo
Órbitas precisas de los satélites	CODE	CODE
Procesamiento de la solución	Dobles diferencias	Dobles diferencias
Modelo PCV	igs14.atx (para las 132 antenas)	igs14.atx (74) + calibraciones individuales (58)
Datos RINEX	Diarios a 30 segundos	Diarios a 30 segundos
Modelo de mareas	FES2004	FES2004
Modelo de troposfera	Vienna Mapping Function (VMF1)	Vienna Mapping Function (VMF1)
Modelo de ionosfera	CODE	CODE

El flujo de trabajo se divide en tres etapas.

En primer lugar se procesan los archivos RINEX del periodo elegido con un procesamiento de dobles diferencias para obtener las coordenadas de todas las estaciones de nuestra red. Seguidamente, los ficheros SINEX de soluciones obtenidos para cada día se agrupan en un solo archivo de coordenadas mediante una combinación. Y por último se comparan los juegos de coordenadas obtenidos en los dos procesamientos (con y sin calibraciones individuales).

Las diferencias obtenidas en esta comparación se pueden ver en la Figura 5 (Península y Baleares) y la Figura 6 (Islas Canarias). Solo se muestran los valores que superan los 0.55 mm en valor absoluto en la componente Up.

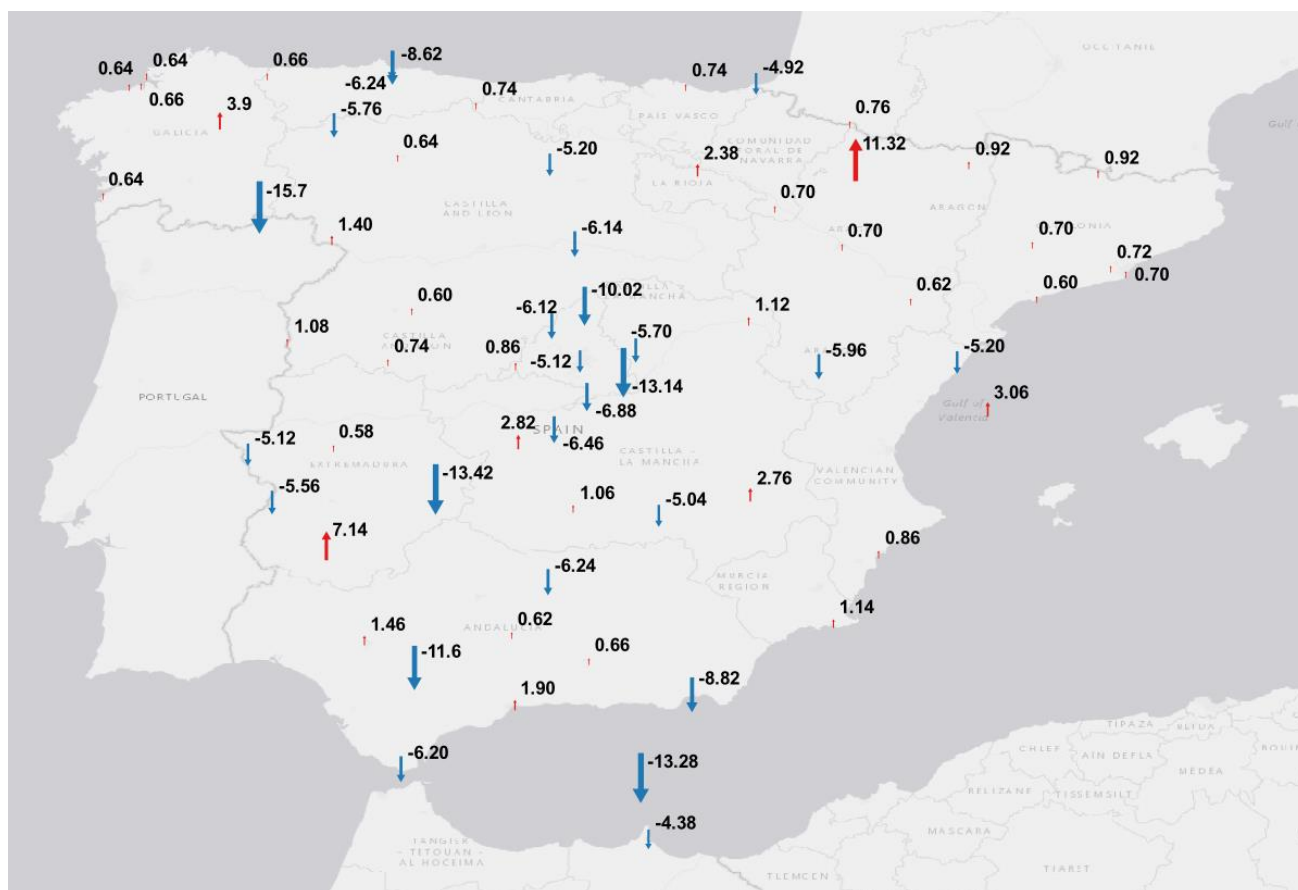


Figura 5: Diferencias entre coordenadas en la componente Up (Península y Baleares).



Figura 6: Diferencias entre coordenadas en la componente Up (Islas Canarias).

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para cuantificar el impacto de las calibraciones individuales en las antenas se ha realizado un estudio estadístico de los resultados obtenidos con los dos procesamientos realizados.

En primer lugar se muestran los resultados para las estaciones que no contaban con antenas con calibraciones individuales. Para estas estaciones con calibración genérica se ha obtenido un diagrama de cajas y bigotes (*box and whisker plot*) para cuantificar la media de las diferencias en valor absoluto en las coordenadas de las estaciones para cada uno de los dos procedimientos descritos en el apartado anterior. Se puede ver el resultado en la Figura 7. Las diferencias obtenidas en las tres componentes han sido las siguientes: Componente Norte 0.053 mm, componente Este 0.051 mm y componente *Up* 0.488 mm. Por tanto las diferencias no son significativas en este caso al situarse por debajo del medio milímetro en la componente *Up* (componente con una diferencia mayor).

Diagrama de cajas y bigotes

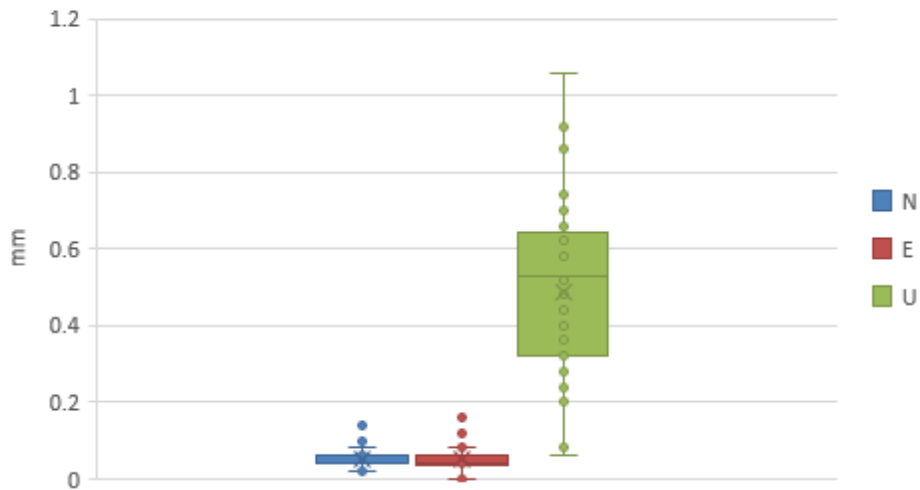


Figura 7: Media de las diferencias en las coordenadas de las estaciones sin calibración individual en las componentes NEU.

Sin embargo, para las estaciones que sí contaban con antenas calibradas individualmente, se aprecian diferencias significativas entre los dos procedimientos de cálculo seguidos, especialmente en la componente *Up*. Alcanzando diferencias de varios milímetros dependiendo de la marca y del modelo de antena utilizados tal y como podemos ver a continuación (Figura 8).

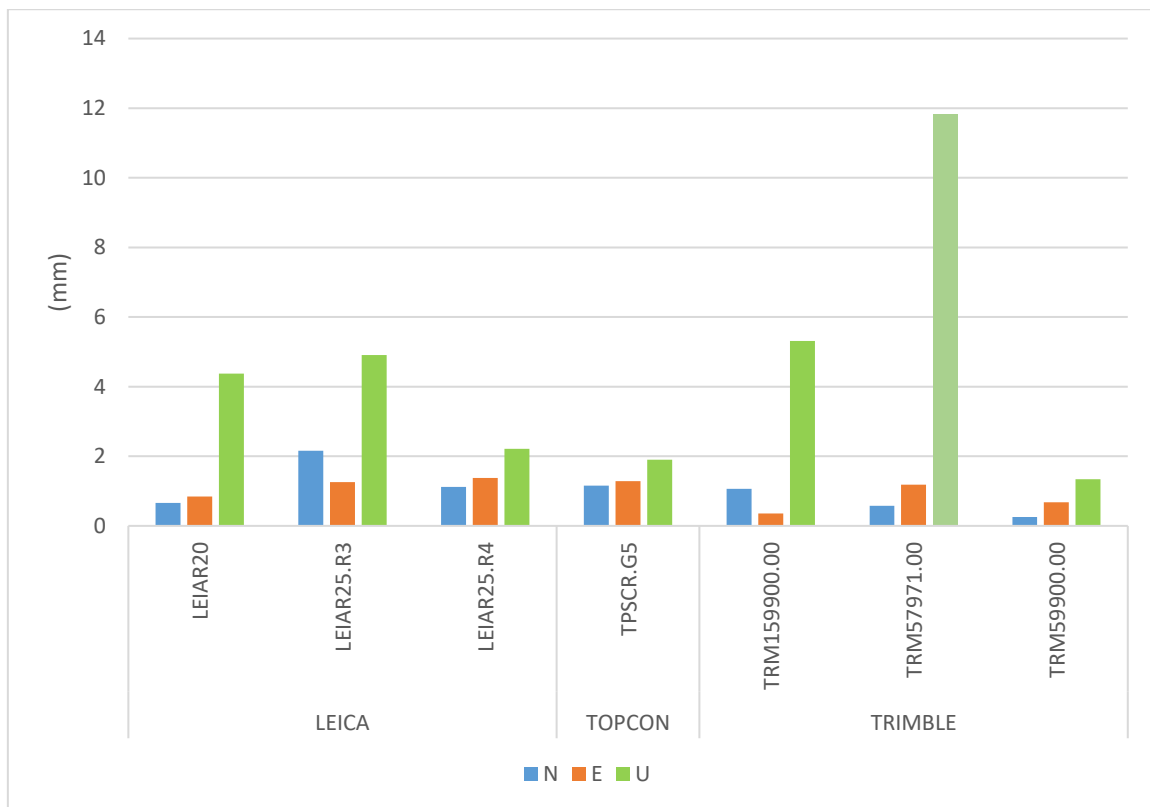


Figura 8: Media de las diferencias en las coordenadas de las estaciones con calibración individual por marca y modelo en NEU.

En la Tabla 2 se pueden ver los valores numéricos exactos de la figura anterior. Destaca en la marca Leica valores en la componente *Up* que superan los 4 mm para los modelos Leiar20 y Leiar25.R3 y en la marca Trimble valores que superan los 5 mm en el modelo TRM159900.00 y los 11 mm en el modelo TRM57971.00.

Tabla 2: Diferencias (en mm) de las componentes NEU por marca y modelo

		N	E	U
LEICA	LEIAR20	0.061	0.845	4.378
LEICA	LEIAR25.R3	2.157	1.257	4.903
LEICA	LEIAR25.R4	1.118	1.375	2.216
TOPCON	TPSCR.G5	1.153	1.287	1.900
TOPCON	TRM159900.00	1.060	0.360	5.308
TRIMBLE	TRM57971.00	0.573	1.180	11.825
TRIMBLE	TRM59900.00	0.253	0.677	1.337

## RESUMEN Y DESARROLLOS FUTUROS

En esta última parte del artículo se resumen los aspectos más destacados del estudio así como las conclusiones obtenidas.:

Se ha procesado el mismo conjunto de datos dos veces. En uno de ellos se han considerado las calibraciones individuales de las antenas y en el otro no.

Se han incluido señales de satélites Galileo en el procesamiento (además de GPS y GLONASS).

Se han detectado diferencias entre los procesamientos con calibraciones individuales y calibraciones genéricas, alcanzado alrededor de 1.2 cm en uno de los casos (antena Trimble TRM57971.00).

En el estudio estadístico para las estaciones que no contaban con calibración individual no se aprecian diferencias significativas.

En el estudio estadístico para las estaciones que sí contaban con calibración individual sí que se observa un impacto significativo.

Por tanto, a partir de los resultados obtenidos en este estudio, la inversión realizada en la calibración de antenas GNSS para trabajos de geodesia de precisión (donde se requieren precisiones del orden del milímetro) es un factor a tener en cuenta a la hora de obtener los mejores resultados posibles.

En cuanto a futuras líneas de investigación de este estudio, se podría ampliar la red observada añadiendo nuevas estaciones, aumentar el periodo temporal de los datos y repetir el experimento utilizando el fichero de calibración igs20.atx asociado al ITRF2020. En este sentido, cabe mencionar que el próximo reprocesamiento de datos históricos programado en EUREF, la corrección de las antenas se basará en igs20.atx. Este modelo de corrección se basa en nuevas correcciones de antenas de satélites y de receptores. Además, se ha decidido que si no se dispone de correcciones para una frecuencia específica, esas observaciones no se utilizarían en el reprocesamiento.

## REFERENCIAS

- [1] Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Chapter 17, 506-531.
- [2] GNSS. GPS. Fundamentos y aplicaciones en Geomática, Universitat Politècnica de València
- [3] International GNSS Service, <https://igs.org>
- [4] Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es>