UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona

GRADO EN INGENIERÍA EN GEOINFORMACIÓN Y GEOMÁTICA
TRABAJO DE FIN DE GRADO

GEORREFERENCIACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE RESTOS ARQUEOLÓGICOS EN ZONAS REMOTAS. APLICACIÓN EN UN CASO PRÁCTICO EN GUINEA ECUATORIAL.

Proyectista: Arturo Nguema Onufriev
Directores: Carlos Gracia y Felipe Buill
Convocatoria: Septiembre/Octubre 2022

Resumen

El objetivo del trabajo ha sido evaluar las capacidades de un sistema GNSS de bajo coste, C099-F9P de U-BLOX, para obtener un posicionamiento lo suficientemente preciso como para georreferenciar un levantamiento topográfico y fotogramétrico en una zona sin infraestructura GNSS de referencia cercana.

Para evaluar el sistema se ha realizado un test en el área metropolitana de Barcelona, con observaciones, en tres zonas de condiciones diferentes. El método de observación ha sido estático con sesiones de entre 1 y 4 horas en distintas franjas horarias con el fin de calcular vectores independientes usando como referencia 9 estaciones permanentes de organismos regionales, nacionales e internacionales.

Para ello se estableció tres radios en función de la distancia a los puntos de observación: 'Cercano' (20 km), 'Intermedio' (entre 150 y 220 km) y 'Lejano' (entre 1300 y 2200 km). El post-procesamiento se realizó con el software comercial Magnet Tools de TOPCON. Los resultados se contrastaron con coordenadas obtenidas con un receptor geodésico TOPCON HiPer-Pro y con soluciones PPP del servicio online del CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning).

Los cálculos han mostrado que para radio 'Cercano' El post-procesamiento de vectores es equivalente al método PPP con 1 cm de diferencia en planimetría y altimetría. Para radio 'Intermedio' 15 cm en planimetría y 25 cm en altimetría. Y para radio 'Lejano' 30 y 50 cm respectivamente.

En la segunda parte se ha puesto en práctica el método desarrollado en un poblado aislado de Guinea Ecuatorial usando una estación de referencia a una distancia 'Intermedia' y una "Lejana". Los resultados obtenidos del cálculo de vectores han sido de peor calidad de la esperada.

Por medio de observaciones con estación total se comprobó que las soluciones PPP daban mejores resultados que el post-procesamiento debido a la intensa actividad ionosférica en latitud ecuatorial con diferencias de hasta 1 m contrastando con los 2 cm obtenidos por PPP. Gracias a estos resultados de PPP se ha podido georreferenciar los trabajos topográficos y fotogramétricos que han servido para documentar restos del antiguo poblado de Asok Abia en el interior de la selva.

La conclusión es que, en este caso, no ha sido fiable emplear la placa C099-F9P para posicionamiento preciso basado en post-proceso de vectores largos, pero ha permitido obtener un posicionamiento de 2 cm de error mediante solución PPP pudiendo georreferenciar trabajos de campo incluso en latitudes con presencia de la 'anomalía ionosférica ecuatorial'.

Índice

1. Introducción ... 3
2. Desarrollo de metodología y evaluación ... 4
2.1 Selección del Receptor ... 4
2.2 Resumen técnico de la placa C099-F9P de U-BLOX ... 6
2.3 Diseño de la evaluación del receptor ... 9
2.4 Marco Temporal y Sistema de Referencia Terrestre ... 10
2.5 Observaciones GNSS ... 12
2.6 Selección de red de estaciones permanentes de referencia ... 16
2.7 Post-Procesado de las Observaciones ... 20
2.8 Resultados ... 22
2.9 Conclusiones de la evaluación ... 25
3. Aplicación práctica ... 26
3.1 Localización de Asok Abia (G.E.) ... 26
3.2 Trabajos de georreferenciación en Asok Abia (G.E.) ... 28
3.2.1 Materialización de bases ... 28
3.2.2 Sesiones de observación ... 29
3.2.3 Procesamiento de datos ... 29
3.3 Realización de trabajos topográficos en Asok Abia (G.E.) ... 30
3.3.1 Instrumento y accesorios ... 31
3.3.2 Poligonal ... 34
3.3.3 Radiación ... 35
3.4 Levantamientos fotogramétricos en Asok Abia (G.E.) ... 37
3.4.1 Metodología ... 37
3.4.2 Instrumentos de campo ... 38
3.4.3 Trabajos de campo ... 39
3.4.4 Trabajos de gabinete ... 40
3.5 Resultados ... 42
3.5.1 Resultados y evaluación de georreferenciación ... 42
3.5.2 Resultados fotogramétricos ... 45
4. Conclusiones ... 49
5. Bibliografía ... 51
6. Agradecimientos ... 52
7. Anejos ... 53
7.1 Anejo 1: Tablas de cálculo de coordenadas GNSS ... 53
7.1.1 Punto de observación RAVL ... 53
7.1.2 Punto de observación BUDE ... 54
7.1.3 Punto de observación SCUG ... 55
7.2 Anejo 2: Resultado de ajuste de poligonal y altimetría por MMCC ... 56

1. Introducción

El principal objetivo de este proyecto es evaluar la instrumentación y metodología de trabajo para el posicionamiento GNSS que permita la georreferenciación de levantamientos topográficos, fotogramétricos, arqueológicos, etc. en zonas remotas, con escasa o nula infraestructura de servicios de posicionamiento. Concretamente se evaluarán equipos de posicionamiento de bajo coste y fácilmente transportables a zonas remotas en comparación con los equipos GNSS topográficos convencionales.

El avance en microprocesadores crea nuevas posibilidades en la aplicación de tecnología. Por ejemplo, la tendencia del desarrollo del internet de las cosas (IoT) está favoreciendo la aparición de nuevos módulos de procesamiento, más ligeros y compactos con la capacidad de aumentar las prestaciones de dispositivos electrónicos tradicionales. Esta evolución tecnológica también afecta al campo de la geomática, especialmente en los módulos de posicionamiento preciso GNSS, la ubicación precisa de vehículos, etc (Blackman, 2022).

Este proyecto está dividido en dos partes: en la primera fase se realizan diferentes pruebas en Barcelona que permiten sacar conclusiones y determinar el equipo y metodología más adecuada para la georreferenciación en zonas remotas. La segunda parte del proyecto consiste en aplicar esta metodología en Asok Abia, un poblado aislado en la región continental de Guinea Ecuatorial, para georreferenciar restos arqueológicos, utilizando el instrumental y métodos testeados en las pruebas realizadas en Barcelona.

Partiendo de estos trabajos de georreferenciación en Asok Abia, se ha realizado un levantamiento topográfico y fotogramétrico para documentar los restos de un asentamiento, situado en el interior de la selva, previo al poblado actual. El estudio de los antiguos asentamientos de las tribus en la región continental del país es de interés arqueológico porque arrojan información sobre la manera en la que se desplazaban las tribus en épocas pasadas.

2. Desarrollo de metodología y evaluación

2.1 Selección del Receptor

La solución que se busca es de obtener posicionamiento preciso para cualquier lugar del globo terrestre incluyendo zonas remotas sin infraestructura local GNSS que pueda dar soporte a las sesiones de observación.

Pero, al mismo tiempo, utilizar dispositivos de bajo coste que ha aparecido últimamente en el mercado y que están compitiendo con los receptores GNSS tradicionales de elevada precisión.

En este caso no sólo es un tema de costes, sino que también hay condicionantes logísticos y circunstancias locales que pueden dificultar el traslado a zonas remotas de equipos caros, voluminosos y, en cierto modo, poco discretos.

En mayo de 2016 Google hizo accesibles los datos internos de los chips de los receptores GNSS que incorporan los teléfonos móviles con Android 7 (*Chen, 2019*). A partir de ese momento se empezaron a desarrollar aplicaciones que calculan el posicionamiento utilizando los datos sin procesar que reciben los móviles. Esto llevó aparejado la aparición de las primeras aplicaciones que eran capaces de registrar estos datos para su posterior utilización y, poco después, se incorporó el registro en el formato estándar RINEX.

Aunque los chips de los teléfonos ya eran multiconstelación sólo trabajaban en monofrcuencia. Hubo que esperar a mayo del 2018, fecha en que Xiaomi lanzó el primer teléfono que tenía acceso a dos frecuencias, el modelo Mi 8. El chip Broadcom BCM47755 era capaz de utilizar L1 y L5, por lo que se podían registrar datos bifrecuencia de las constelaciones GPS y GALILEO (*Robustelli, 2019*). Desde entonces se ha publicado varios estudios que demuestran interesantes resultados.

He tenido la posibilidad de hacer algunas pruebas con observaciones realizadas con este teléfono y es de destacar que las soluciones que se obtienen son algo inestables. El hecho de no disponer de una antena externa con patrones conocidos y con un mínimo plano de tierra hace que este teléfono sea muy sensible a errores de multipath e indeterminación de su centro radioeléctrico.

Otro aspecto limitante de este dispositivo es que la segunda frecuencia, L5, está actualmente disponible en pocos satélites. Esto puede limitar su efectividad en vectores largos que necesitan la multifrecuencia para mitigar el error ionosférico.

El segundo receptor que llamó nuestro interés ha sido el modulo receptor de U-BLOX, C099-F9P con procesador GNSS multibanda ZED-F9P. Este módulo se presentó al mercado por primera vez en abril de 2018 como primer módulo “mass-market” capaz de trabajar con 4 constelaciones y 3 frecuencias (*U-BLOX, 2018*). Con un precio muy ajustado y un tamaño reducido no ha tardado abrir nuevas posibilidades al mercado de posicionamiento de precisión. Incluso ya hay algunos fabricantes de soluciones GNSS para topografía de precio muy competitivo que integran este módulo en su interior.

Desde el punto de vista técnico, la decisión de escoger uno u otro equipo de observación GNSS se ha basado en: la consulta de estudios comparativos, análisis de la capacidad observacional de ambos receptores, examinación de la ficha técnica (para determinación de centro radioeléctrico), la facilidad de la puesta en marcha y tipo de datos resultantes.

Se ha realizado un cuadro comparativo entre coste y capacidades de ambos dispositivos que se resume en la Tabla 2.1.

Xiaomi Mi 8	
Ventajas	Fácil de transportar (175 g) y relativamente resistente. Posibilidad de realización de observaciones mediante App “Geo++ RINEX Logger” No necesita equipos o complementos adicionales Precio aproximado de 220€
Desventajas	Receptor bifrecuencia (L1 y L5) Centro de fase radio-eléctrico indeterminado (Necesidad de evaluación adicional)
U-BLOX - C099-F9P	
Ventajas	Fácil de transportar (173 g Antena + 150 g aprox. Placa) Receptor multifrecuencia (L1, L2, E5b y B2I) Centro de fase radio-eléctrico determinado por ficha técnica
Desventajas	Frágil, (Recomendable algún protector) Necesidad de alimentación por cable USB conectado a ordenador (portátil) Necesidad de ordenador para puesta en marcha mediante software ‘U-Center’ Precio aproximado de 287€

Tabla 2.1 *Comparación de ventajas y desventajas entre smartphone Xiaomi Mi 8 y receptor U-BLOX - C099-F9P*

En cuanto a comparación práctica de ambos dispositivos, se realizó una sesión de observación el día 18/02/2021 de 02:11:47 horas en Polinyá, Barcelona. Los datos se procesaron mediante el servicio online PPP (Precise Point Positioning) del CSRS (Canadian Spatial Reference System) y se empleó el software TEQC para cuantificar la calidad en los archivos de observación. Los resultados se pueden observar en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 respectivamente.

Tabla comparativa de coordenadas obtenidas con CSRS V3.50.2			
S.R.C. ITRF2014, Coordenadas Geocéntricas			
Dispositivo	C099-F9P (U-BLOX)	X	4776855.622 ± 0.05 m (95%)
		Y	180753.532 ± 0.03 m (95%)
		Z	4208591.768 ± 0.04 m (95%)
	Mi 8 (Xiaomi)	X	4776855.895 ± 5.83 m (95%)
		Y	180753.513 ± 2.54 m (95%)
		Z	4208591.714 ± 4.30 m (95%)

Tabla 2.2 *Comparación de coordenadas geocéntricas ITRF2014 entre smartphone Xiaomi Mi 8 y receptor U-BLOX - C099-F9P obtenidas mediante servicio online PPP del CSRS*

Tabla comparativa del análisis de calidad con TEQC		
Dispositivo	C099-F9P (U-BLOX)	Mi8 (Xiaomi)
Observables	L1, L2 y E5b	L1 y L5
Total satélites observados	56	43
Estimación multipath	L1-L2: 0.411 m	L1-L5: 2.008 m
	L1-E5b: 0.669 m	N/D
Nº de reinicios del reloj	1	2
Adelantos ionosféricos	48 cm/min	780 cm/min

Tabla 2.3 *Comparación de estimación de calidad de observaciones entre smartphone Xiaomi Mi 8 y receptor U-BLOX - C099-F9P obtenidas por procesamiento con software TEQC*

Analizando estos resultados previos, lo primero que llama la atención es que no se ha evaluado la señal B2I de BEIDOU en el dispositivo C099-F9P, mientras que en el archivo de reporte de errores aparece el mensaje:

"*! Notice! 'POLI0490.21O': C23 @ 2021 Feb 18 11:09:19.992: no phase or code pseudorange data*".

Lo que indica ausencia de observables, en este caso del satélite C23 de la constelación BEIDOU.

También se observa que a pesar de que las coordenadas son muy parecidas, el error asociado del smartphone es muy superior al de la placa U-BLOX. Por otro lado si tenemos en cuenta el número de observables que es capaz de procesar uno y otro dispositivo; el multipath estimado a partir de las combinaciones lineales de pseudorango y fase portadora; y los saltos de ciclo derivados de la ionosfera (se considera salto de ciclo un valor superior a los 400 cm/min (UNAVCO, 2014), definitivamente se optó por emplear el módulo de U-BLOX para el desarrollo de este trabajo.

2.2 Resumen técnico de la placa C099-F9P de U-BLOX

U-BLOX comercializa un kit de evaluación de su módulo ZED-F9P mediante la placa C099-F9P. Este kit de posicionamiento se compone de varias partes. Por un lado tenemos la placa (consultar Figura 2.1) que lleva integrado un módulo receptor ZED-F9P. Estas señales con captadas por la antena ANN-MB, que ha de estar conectada a la placa por cable coaxial. El kit incluye un plano de tierra metálico de pequeñas dimensiones (diámetro de 10 cm y 1 mm de grosor) cuya función es disminuir el efecto multipath en las observaciones. Por ultimo U-BLOX ofrece el software de evaluación U-Center que permite configurar los parámetros de observación y el formato de almacenamiento de los datos.

Especificaciones técnicas de la placa C099-F9P:

Peso	150 g (aprox.)
Dimensiones:	110 x 55 mm
Formas de alimentación:	USB
	Batería de polímero de litio (Li-Po)
	Corriente continua de 6 a 17 V mediante conector tipo Jack
Protocolos de entrada de datos:	NMEA, UBX, RTCM
Canales de emisión de datos:	USB, Bluetooth y Wi-Fi

Tabla 2.4 *Esquema de los componentes de la placa C099-F9P de U-BLOX obtenida del manual 'C099-F9P-AppBoard-ODIN-W2-uCX_UserGuide_(UBX-18055649)'*

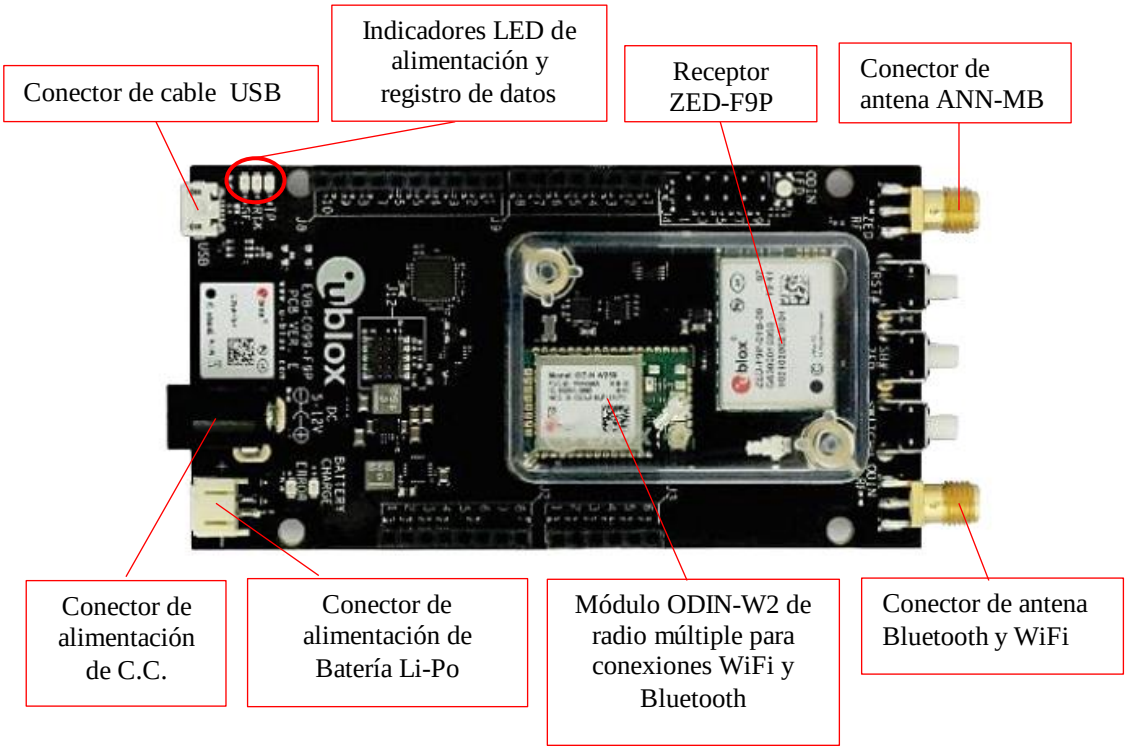


Figura 2.1 *Esquema de los componentes de la placa C099-F9P de U-BLOX obtenida del manual 'C099-F9P-AppBoard-ODIN-W2-uCX_UserGuide_(UBX-18055649).pdf'*

Especificaciones técnicas de la antena ANN-MB (Tabla 2.5 y Figura 2.2):

Peso:	173 g
Dimensiones:	82 x 60 x 22.5 mm
Conector, tipo de cable y longitud:	SMA (ANN-MB-00), RG174, 5 m
Temperatura de funcionmiento:	De -40 a +85 ˚C
Frecuencias operacionales:	De 1559 a 1606 MHz para L1
	De 1197 a 1249 MHz para L2, E5b y B2I
Desfase del centro radioeléctrico respecto al ARP:	Vertical: 8.9 mm para L1 y 7.6 mm para L2
	Horizontal: >5 mm en todas direcciones

Tabla 2.5 *Resumen de las características técnicas de la antena ANN-MB de U-BLOX obtenida del resumen 'ANN-MB_ProductSummary_(UBX-18047741).pdf'*

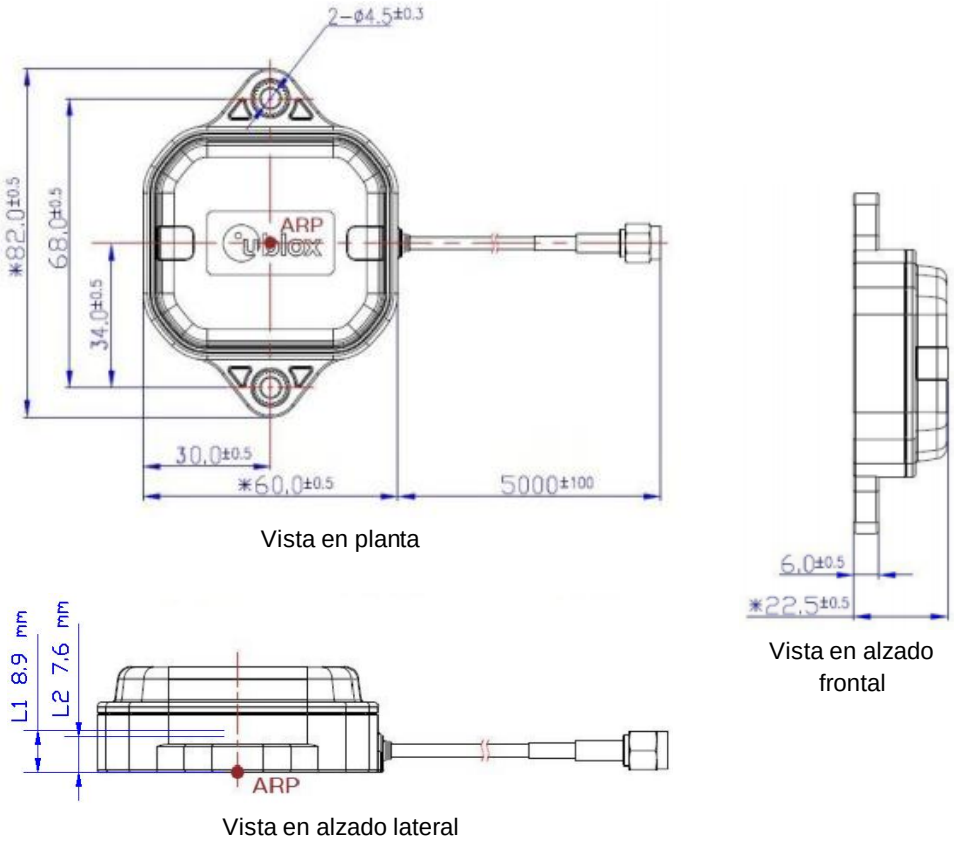


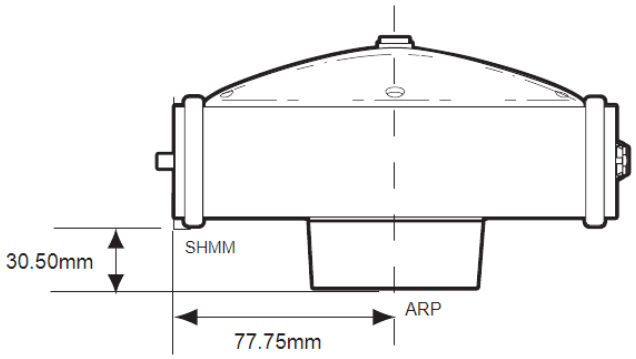
Figura 2.2 *Esquema de las dimensiones de la antena ANN-MB de U-BLOX obtenida del resumen 'ANN-MB_ProductSummary_(UBX-18047741).pdf'*

2.3 Diseño de la evaluación del receptor

Para comprender las razones de la metodología que se ha planteado desarrollar en este proyecto es necesario tener en cuenta que el tipo de receptor GNSS empleado para georreferenciar los trabajos topográficos y fotogramétricos no es habitual para este tipo de trabajos.

Este contexto condiciona a definir un método de posicionamiento bien definido. Partiendo del conocimiento generalizado de que las sesiones de observación superiores a una hora, ofrecen más fiabilidad que las sesiones de corta duración y que el empleo de efemérides precisas aumenta la precisión frente a efemérides radiodifundidas, el método de posicionamiento escogido fue el modo estático y tratamiento de datos en post-procesamiento. El cálculo de los vectores se realizaría de forma independiente para cada sesión de observación respecto a cada estación permanente GNSS. El motivo de procesarlos de forma individual es que no se busca aplicar un ajuste a las soluciones sino analizar las variaciones de los resultados de los vectores.

Para poder comparar estos resultados se realizaron observaciones con el receptor de doble frecuencia “HiPer Pro” de TOPCON capaz de adquirir y procesar señales de las constelaciones GPS y GLONASS. Estas observaciones se llevaron a cabo sobre los mismos puntos de observación que los destinados para evaluar la placa C099-F9P. Los detalles de interés para el post-proceso del receptor HiPer Pro se muestran en la Figura 2.3.



Desfase vertical del centro radioeléctrico respecto al ARP:	L1: 87.9 mm L2: 88 mm

Figura 2.3 *Imagen y esquema de las dimensiones del receptor HiPer Pro obtenida del manual ‘Manual_hiper_pro.pdf’. (TOPCON, 2004) Los valores del desfase radioeléctrico se han obtenido de la calibración de antena ANTEX del NOAA.*

Se definieron unos parámetros de cálculo que se mantuvieron en todos los procesamientos de vectores, tanto en la fase de evaluación del receptor en Barcelona como en la práctica en Guinea Ecuatorial. Este criterio permite analizar las variaciones de los resultados sin estar influenciados por parámetros internos de cálculo. Las variables que se ha contemplado en esta evaluación son:

- Distancia entre referencia y móvil.
- Franja horaria idónea para realizar las observaciones.
- Empleo de estaciones de referencia de distintos organismos.

Paralelamente al cálculo de las vectores, todas las observaciones se procesaron mediante el método PPP usando el servicio online del CSRS. Esto aportó información adicional con la que analizar los resultados. El método de posicionamiento PPP básicamente consiste en aplicar a las observaciones efemérides precisas, correcciones de relojes satelitales, modelos troposféricos e ionosfericos, calibración de antenas, etc.

Por último mediante el software TEQC de UNAVCO se evaluó la calidad de observaciones.

2.4 Marco Temporal y Sistema de Referencia Terrestre

Las estaciones de referencia escogidas para este test proceden de diferentes organismos: organismo regional *Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña* (ICGC) y organismo internacional, *International GNSS Service* (IGS, por sus siglas en inglés). Cada organismo realiza un ajuste particular sobre las estaciones permanentes que gestiona y ofrece coordenadas 'fijas' mediante reseñas de las estaciones que se actualizan periódicamente.

El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS, por sus siglas en inglés), ofrece un marco internacional a la comunidad geodésica mediante el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS, por sus siglas en inglés) y el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF, por sus siglas en inglés) constituyendo un sistema basado en coordenadas y velocidades que se obtienen a partir de la observación y monitoreo de un conjunto de estaciones permanentes empleando las siguientes técnicas: VLBI, LLR, GNSS, SLR y DORIS. Estas estaciones se encuentran repartidas por el globo terráqueo (Figura 2.4), siendo el IGS, el organismo encargado del monitoreo de dichas estaciones mediante metodología GNSS.

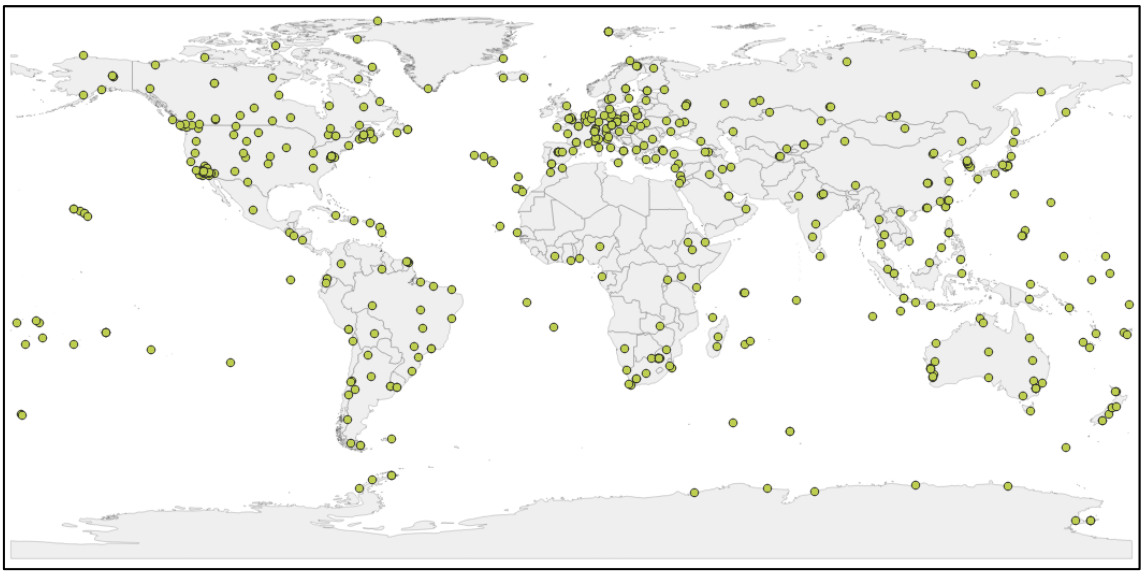


Figura 2.4 *Distribución mundial de las estaciones permanentes GNSS gestionadas por el IGS. Fuente: Mapa de elaboración propia con estaciones GNSS de web del IGS y mapa base de la web de Natural Earth. EPSG: 4326.*

Por tanto, el sistema de referencia terrestre internacional se basa en el comportamiento cinemático de las estaciones, siendo necesario el establecimiento de épocas temporales asociadas a las posiciones de las estaciones que se actualizan periódicamente. Siendo el ITRF2020 la última publicación actualizada de las coordenadas y velocidades de las estaciones GNSS.

A nivel europeo existe un marco de referencia propio, el EUREF. Este marco está supervisado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG, por sus siglas en inglés) estableciendo el ETRF donde las estaciones están fijadas a la placa tectónica euroasiática. La principal diferencia entre el marco europeo y en marco internacional es el elipsoide empleado, GRS80 y WGS84 respectivamente. La relación matemática entre ambos sistemas se estableció en el marco ITRF89, época 1989.0, equivalente al marco ETRF89 y dando lugar al sistema de referencia ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), (Altamim, 2018). Para realizar esta transformación se pueden emplear diferentes servicios en línea de calculadoras geodésicas de organismos científicos. En este proyecto se ha utilizado la del Real Observatorio de Bélgica.

Gracias a la interrelación entre entidades mencionada anteriormente, algunas estaciones permanentes regionales forman parte de la red global. En nuestro caso, la estación ESCO00ESP que está gestionada por el ICGC, además de constituir parte de la red CatNet, forma parte de la red EUREF. Y la estación EBRE00ESP es parte de la red del IGS además de las dos anteriores. Esto implica la posibilidad de obtener las velocidades asociadas a estas estaciones permanentes para una fecha concreta o un conjunto de fechas.

Debido a que las observaciones realizadas con el receptor C099-F9P de U-BLOX transcurrieron a lo largo de más de un año, entre el 23/02/2021 y 02/04/2022, se empleó la transformación de los marcos temporales para obtener coordenadas de las estaciones

de referencia para el mismo día en que se realizó cada sesión de observación. Como se mencionó anteriormente, las estaciones de organismos regionales disponen de reseñas con coordenadas, pero no ocurre lo mismo con las estaciones del EUREF e IGS, donde estas coordenadas se deben de obtener para un día o intervalo (época) concreta. Por esta razón las coordenadas de referencia de las estaciones del ICGC y las del IGS se obtuvieron empleado la calculadora geodésica del Real Observatorio de Bélgica, con coordenadas resultantes dentro del marco ITRF2008. Finalmente, se promedió las coordenadas de cada día de observación considerando estos valores promediados como coordenadas fijas de las estaciones de referencia para el procesamiento de las vectores. En la Tabla 2.6 se puede observar la importancia de trabajar en un mismo sistema de referencia y marco temporal.

Comparación entre distintos datums y marcos temporales para las mismas fechas			
Diferencias de coordenadas geocéntricas			
Estación GNSS	ITRF2014 - ITRF2008		
	Δx (m)	**Δy (m)**	**Δz (m)**
EBRE	-0.02	0.00	-0.02
AJAC	0.00	0.01	-0.01
ORID	0.00	0.00	0.01
GOPE	-0.01	0.00	-0.01
MAS1	-0.01	0.00	-0.01

Tabla 2.6 *Diferencias de coordenadas entre marcos temporales de las estaciones GNSS del IGS. Las coordenadas empleadas se encuentran en el intervalo de fechas comprendidas entre el 23/02/2021 y el 02/04/2022.*

2.5 Observaciones GNSS

Para realizar las observaciones se definieron tres franjas horarias: mañana (5:00 a 13:00), tarde (13:00 a 21:00), y noche (21:00 a 05:00) expuestas en la Tabla 2.7. El tratamiento en estas tres franjas permitió analizar la repetitividad de las soluciones con diferente geometría de los satélites. Por otro lado detectar si se apreciaba diferencia entre observaciones diurnas y nocturnas. El sistema de tiempo que se empleó fue el UTC, para reducir la probabilidad de introducir erróneamente el huso horario en los procesamientos y al mismo tiempo permitiría analizar los resultados a diferentes latitudes terrestres de forma más ágil.

Franjas horarias para observaciones GNSS (Tiempo UTC + 00:00)		
Mañana	Tarde	Noche
5:00 – 13:00	13:00 – 21:00	21:00 – 05:00

Tabla 2.7 *Establecimiento de franjas horarias para realización de sesiones de observación.*

Se realizaron un total de 9 sesiones de observación en Barcelona de diferente duración entre el 23/02/2021 y el 02/04/2022. Se seleccionaron tres zonas de observación: Un ático en el centro de la ciudad en el barrio del Raval, la cima de una pequeña colina en Sant Cugat (Can Mates) y un parque rodeado por vegetación frondosa de Collserola (Parc de la Budellera). Estos puntos de observación se denominaron RAVL, SCUG y BUDE respectivamente.

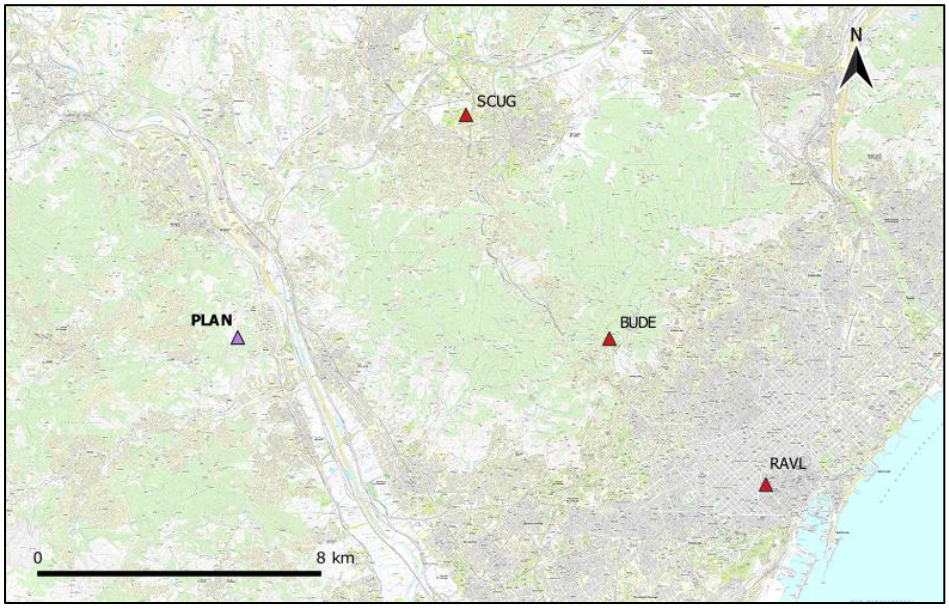


Figura 2.5 *Ubicación de los puntos de observación SCUG, BUDE y RAVL, y de la estación de referencia PLAN del ICGC*
Fuente: Mapa de elaboración propia con capa base obtenida por WMS del ICGC 'mapa topográfico 1:10000'. EPSG: 25831.

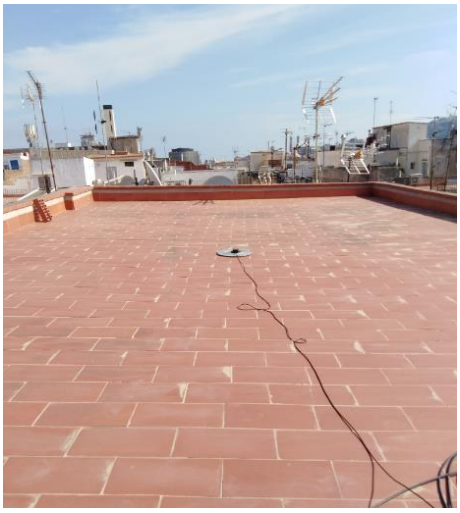
El motivo de la elección de los puntos de observación corresponde a diferentes supuestos. RAVL se encuentra en zona urbana y al encontrarse en una terraza elevada debería de captar todas las señales de los satélites, aunque no se descarte influencia del multipath. SCUG ha sido interesante por imitar la zona donde podría instalarse una estación permanente GNSS o un vértice geodésico ya que ofrece un amplio ángulo de cielo observable. Por último, BUDE es un punto con cielo visible mucho menor debido a que el entorno presenta abundante vegetación en comparación con los otros dos puntos. Este hecho presuponía que este punto ofreciera las mayores variaciones de coordenadas en el test.

El primer obstáculo a resolver en campo fue la manera en la que poder fijar la antena ANN-MB a un mismo punto de observación en diferentes sesiones. Debido a la geometría de la propia antena y a la ausencia de una base de sujeción se decidió usar el plano de tierra metálico. Sobre este plano de tierra se marcó el perímetro de la antena y a partir de la forma cuadriculada se trazó líneas perpendiculares que llegasen a los extremos del plano de tierra. A continuación, en cada punto de observación, se marcó el perímetro del plano de tierra y la extensión de las líneas perpendiculares, de manera que cada vez que se colocaba el instrumento había que hacer coincidir las líneas con las marcas de referencia (ver Fotografía 2.1).

Fotografía 2.1 Sesión de observación 01/04/2021, Budellera. Marcas de referencia para colocación de la antena

Punto de observación RAVL:

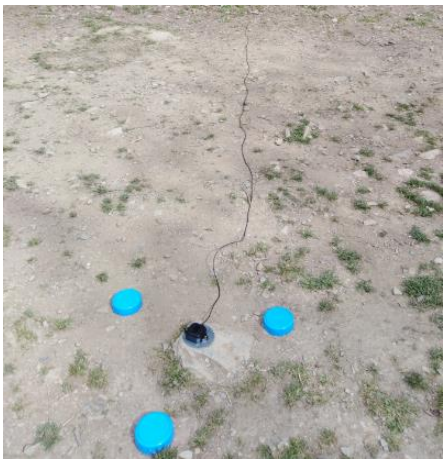
En este punto de observación se empleó, adicionalmente, un soporte para macetas metálico como plano de tierra de forma circular de 30 cm de diámetro y 1 mm de grosor. Este plano de tierra presenta un borde saliente de 8 mm a lo largo de todo el perímetro de forma que al ser colocado sobre una superficie plana, actúa como una base de 8 mm de altura. Esta altura se ha considerado como distancia vertical desde el suelo a la referencia ARP de la antena.



Sesión de observación 25/03/2021, RAVL (Raval, Barcelona)			
S.R.C.: WGS84, Proyección UTM, Huso 31 N. Referencia altimétrica: EGM2008			
Coordenadas promediadas PPP	X (m)	Y (m)	H (m)
	430260.983	4581557.596	34.411

Punto de observación BUDE:

Este punto se estableció sobre el extremo de una roca saliente. Fue el elemento más estable que se encontró en la zona y que pudiera cumplir la condición de estar los más alejado posible de muros y vegetación. Se empleó el plano de tierra del kit de U-BLOX considerando altura cero para la referencia ARP de la antena.



Sesión de observación 01/04/2021, BUDE (Parc de la Budellera, Barcelona)			
S.R.C.: WGS84, Proyección UTM, Huso 31 N. Referencia altimétrica: EGM2008			
Coordenadas promediadas PPP	X (m)	Y (m)	H (m)
	425842.242	4585689.825	356.935

Punto de observación SCUG:

El plano de tierra se colocó encima de una base metálica circular sujeta al terreno. La altura de la antena en este caso también es cero.

Sesión de observación 13/03/2021, SCUG (Turó de Can Mates, Barcelona)			
S.R.C.: WGS84, Proyección UTM, Huso 31 N. Referencia altimétrica: EGM2008			
Coordenadas promediadas PPP	X (m)	Y (m)	H (m)
	421804.061	4591993.023	187.461

Para inicializar la placa C099-F9P, es necesario hacerlo desde el software U-Center perteneciente al mismo fabricante U-BLOX. Hay diferentes tipos de observaciones que puede realizar este dispositivo y permite configurar varios parámetros de observación. En nuestro caso estas configuraciones se resumen en la Figura 2.6.

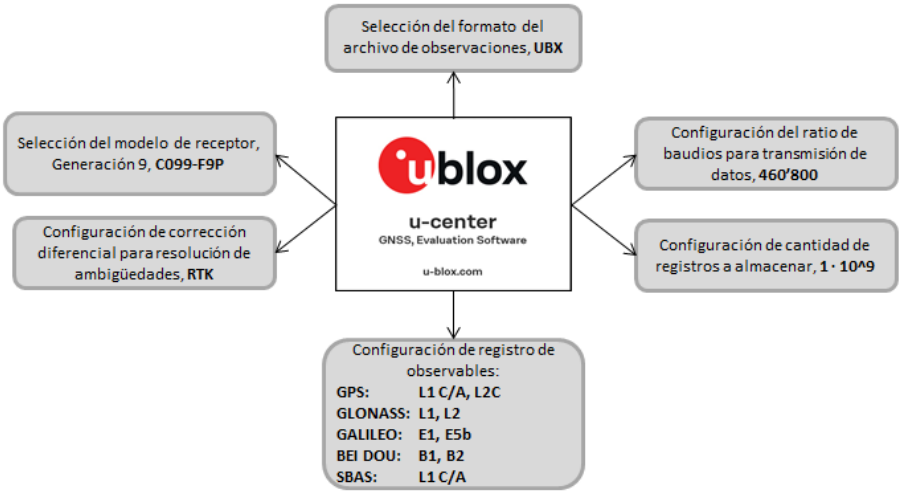


Figura 2.6 *Esquema de configuración para observaciones en modo estático con software U-Center*

2.6 Selección de red de estaciones permanentes de referencia

Para analizar el efecto de la distancia entre estación de referencia (estaciones permanentes GNSS) y el receptor móvil (C099-F9P de U-BLOX) se establecieron tres radios: 'Cercano', 'Intermedio' y 'Lejano'.

El radio 'Cercano' se estableció en 20 km de los puntos de observación RAVL, BUDE y SCUG. La estación permanente GNSS escogida fue PLAN del ICGC. El resumen de los detalles de la estación se puede consultar en la Tabla 2.8.

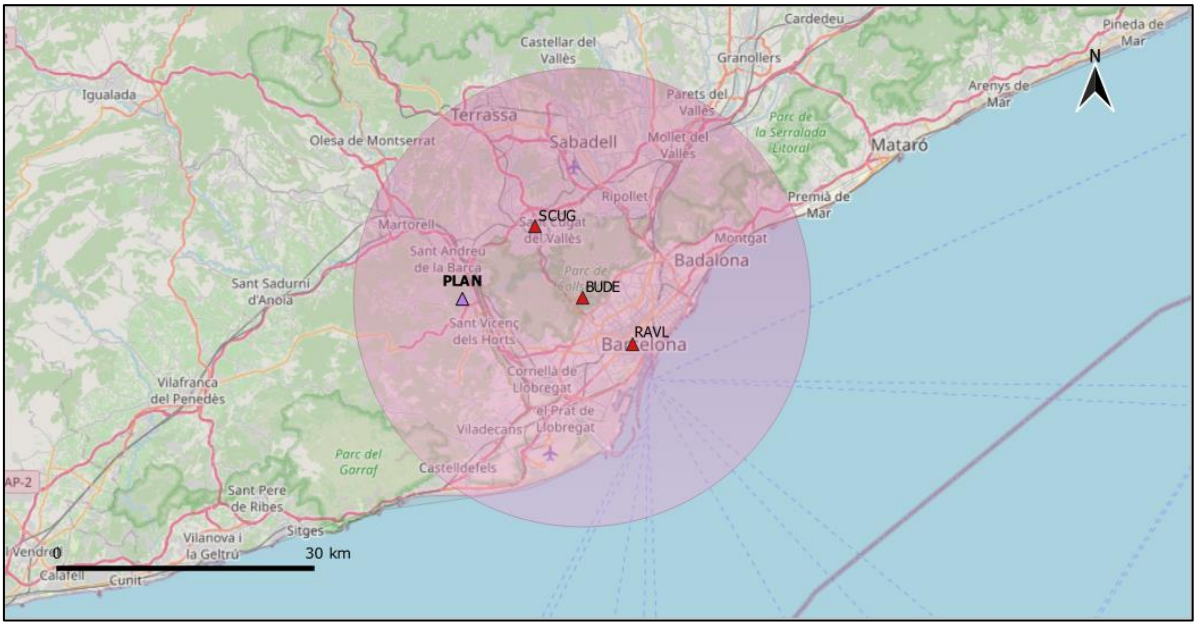


Figura 2.7 *Alcance del radio 'Cercano' desde los puntos de observación. Estación correspondiente PLAN*
Fuente: Mapa de elaboración propia con capa WMS de OSM. Escala 1:500000. EPSG 25831

Nombre		PLAN00ESP			
Organismo responsable		ICGC (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña)			
Localidad		Les Planes, Barcelona, España			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 31 N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		415342.348	4585714.709	270.009	319.974
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		4787328.627	166086.238	4197602.921	
Modelo de antena		LEIAR25.R4 - NONE			
Modelo de receptor		LEICA GR50			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.8 *Resumen de las características de la estación GNSS PLAN*

El radio 'Intermedio' se estableció entre 150 y 220 km de los puntos de observación con las siguientes estaciones GNSS escogidas: ESCO (ICGC), EBRE (ICGC) y AJAC (IGS). La estación AJAC se encuentra a mayor distancia que establece el radio 'Intermedio' (Consultar Figura 2.8). En este caso se ha decidió incrementar esta franja intermedia hasta los 560 km. Las características de las estaciones se puede consultar en las tablas siguientes: Tabla 2.9, Tabla 2.10.

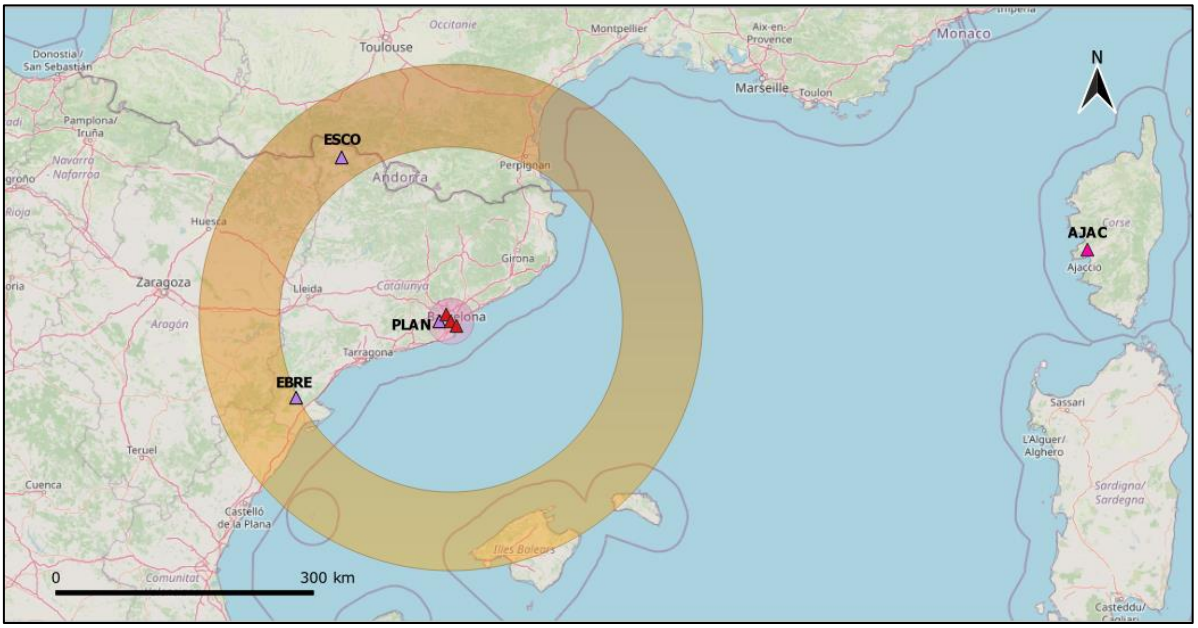


Figura 2.8 *Alcance del radio 'Intermedio' desde los puntos de observación. Estaciones correspondientes EBRE y ESCO*

Fuente: Mapa de elaboración propia con capa base obtenida por WMS de OSM. Escala 1:5000000. EPSG 25831

Nombre		EBRE00ESP			
Organismo responsable		ICGC (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña)			
Localidad		Roquetes, Tarragona, España			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 31 N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		288524.324	4521900.725	57.618	107.803
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		4833519.976	41537.427	4147461.752	
Modelo de antena		LEIAR25.R4 - NONE			
Modelo de receptor		LEICA GR50 - 4.31/7.403			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.9 *Resumen de las características de la estación GNSS EBRE*

Nombre		ESCO00ESP			
Organismo responsable		ICGC (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña)			
Localidad		Escornacrabes, Lleida, España			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 31 N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		334179.828	4728774.821	2454.089	2508.434
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		4696264.768	79978.810	4304245.193	
Modelo de antena		LEIAR25.R4 - NONE			
Modelo de receptor		LEICA GR50			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.10 *Resumen de las características de la estación GNSS ESCO*

Nombre		AJAC00FRA			
Organismo responsable		IGN-RGP (Centro Operacional EUREF)			
Localidad		Ajaccio, Francia			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 32 N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		480318.329	4641749.462	50.075	98.782
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		4696989.214	723994.783	4239678.742	
Modelo de antena		TRM115000.00 - NONE			
Modelo de receptor		LEICA GR50 - 4.51			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.11 *Resumen de las características de la estación GNSS AJAC*

El radio 'Lejano' se estableció a una distancia entre 1300 y 2200 km empleando las estaciones GNSS: MAS1, GOPE y ORID. Las tres son gestionadas por el IGS su localización sobre el mapa se puede observar en la Figura 2.9 y sus características principales se pueden consultar en las siguientes tablas (Tabla 2.12, Tabla 2.13 y Tabla 2.14) respectivas:

Nombre		MAS100ESP			
Organismo responsable		ESOC (Centro Operacional EUREF)			
Localidad		Maspalomas, Gran Canaria, España			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 28N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		437599.011	3071192.168	153.595	197.135
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		5439192.149	-1522055.183	2953455.099	
Modelo de antena		LEIAR25.R4 - NONE			
Modelo de receptor		SEPT POLARX5 - 5.4.0			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.12 *Resumen de las características de la estación GNSS MAS1*

Nombre		GOPE00GZE			
Organismo responsable		Observatorio Geodésico Pecny (Centro Operacional EUREF)			
Localidad		Ondrejov, Republica Checa			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 33N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		484609.035	5529058.341	547.605	592.616
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		3979315.872	1050312.752	4857067.276	
Modelo de antena		TPSCR.G3 - TPSH			
Modelo de receptor		TRIMBLE ALLOY - 5.45			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.13 *Resumen de las características de la estación GNSS MAS1*

Nombre		ORID00MKD			
Organismo responsable		BKG (Centro Operacional EUREF)			
Localidad		Ohrid, Macedonia del Norte			
Ubicación	SRC: ETRS89 Proyección: UTM Huso 34N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		482713.069	4552910.641	730.750	773.010
	Coordenadas ITRF2008 Época: 23/02/21 - 02/04/22	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		4498451.440	1708267.305	4173592.009	
Modelo de antena		LEIAR25.R4 - LEIT			
Modelo de receptor		LEICA GR30 - 4.51/7.710			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 2.14 *Resumen de las características de la estación GNSS MAS1*

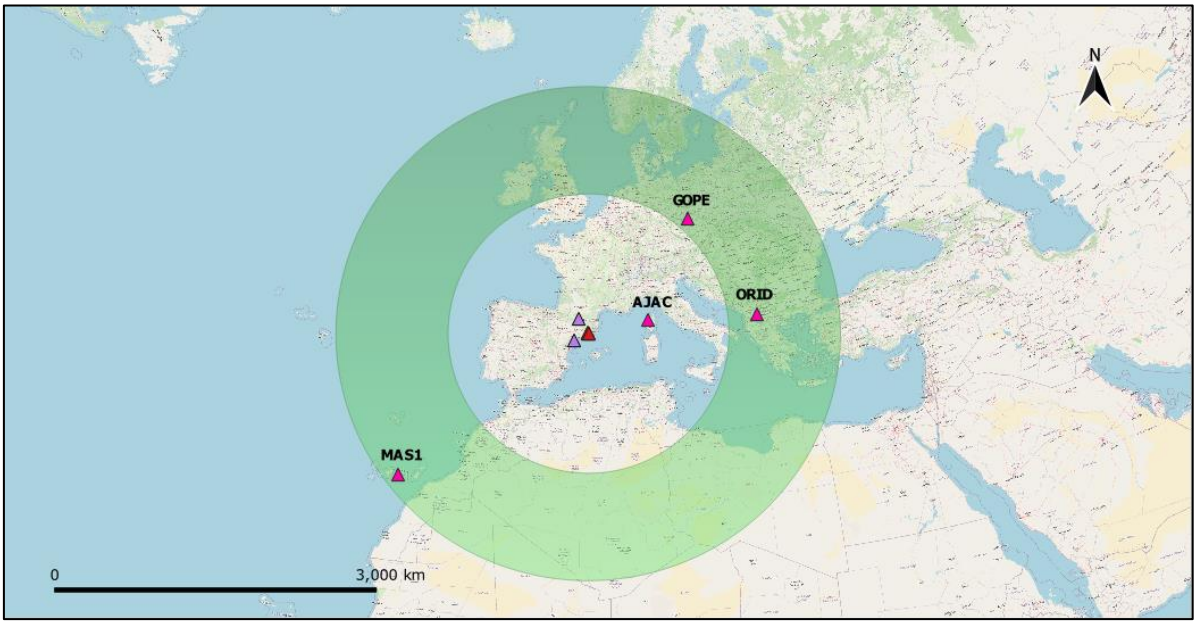


Figura 2.9 *Alcance del radio 'Lejano' desde los puntos de observación. Estaciones correspondientes: GOPE, ORID y MAS1*
Fuente: Mapa de elaboración propia usando capa base del WMS de OSM. Escala 1:40000000. EPSG 25831

2.7 Post-Procesado de las Observaciones

Debido a que las observaciones se almacenan en formato 'UBX' (formato propio de U-BLOX) el primer paso necesario fue convertir este formato a RINEX-3 mediante el programa RTKLIB. El software escogido para el procesamiento de las observaciones ha sido 'Magnet Tools versión 7.1.0', del fabricante TOPCON. Se ha empleado calibraciones de antenas a partir de archivos '.ATX' obtenidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). En el software se ha generado un modelo de antena para U-BLOX según los parámetros del fabricante. También efemérides precisas en formato '.SP3' descargadas a través del servicio FTP del Centro de Soporte Científico GNSS de la ESA (GSSC, por sus siglas en inglés). El diagrama de flujo de los trabajos se puede apreciar en la Figura 2.10. Se ha fijado un conjunto de parámetros de cálculo constantes para todas las observaciones y procesamientos:

- Formato de entrada de las observaciones RINEX-3
- Constelaciones GNSS permitidas: GPS, GLONASS, GALILEO y BEIDOU
- Mascara de elevación de 15°
- Modelo Troposférico 'Good y Goodman' basado en el modelo meteorológico global de 2018 (GMM2018)
- Precisión para posicionamiento estático de 2 y 5 cm en planimetría y altimetría respectivamente
- Grado de confianza de resultados al 95%
- Sistema de tiempo: UTC +00:00

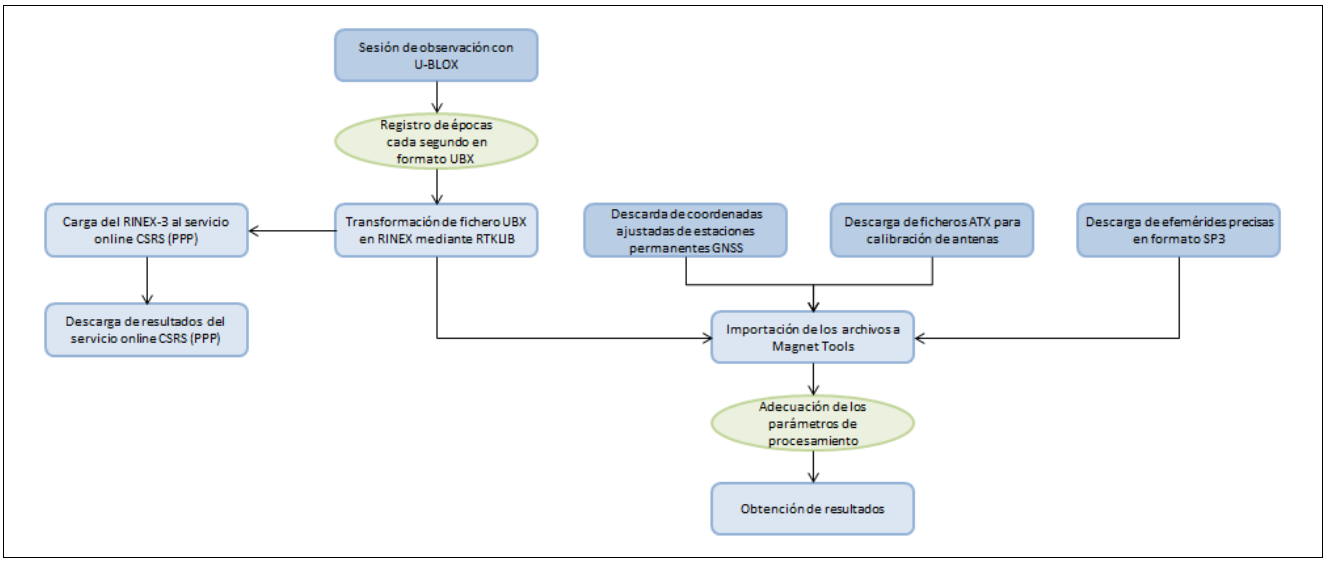


Figura 2.10 *Diagrama del flujo de trabajo*

Las coordenadas obtenidas con el receptor HiPer Pro se promediaron para cada punto de observación y se han tomado como coordenadas de referencia para las soluciones de la placa C099-F9P.

Calendario de la Observaciones:

Observaciones realizadas con C099-F9P de U-BLOX				
Franja horaria	Fecha (aaaa-mm-dd)	DOY	Duración (hh:mm:ss)	Lugar
Mañana	2021-03-13	072	03:02:38	Sant Cugat (SCUG)
Tarde	2021-04-05	095	03:30:18	Sant Cugat (SCUG)
Noche	2021-04-24	114	03:54:03	Sant Cugat (SCUG)
Mañana	2021-04-29	119	03:37:02	Budellera (BUDE)
Tarde	2021-04-01	091	03:31:42	Budellera (BUDE)
Noche	2021-05-28	148	03:26:58	Budellera (BUDE)
Mañana	2021-04-07	097	04:07:00	Raval (RAVL)
Tarde	2021-06-19	170	04:14:08	Raval (RAVL)
Noche	2021-08-21	233	04:16:24	Raval (RAVL)

Observaciones realizadas con HiPer Pro de TOPCON				
Franja horaria	Fecha (aaaa-mm-dd)	DOY	Duración (hh:mm:ss)	Lugar
Tarde	2022-03-18	077	02:02:49	Raval (RAVL)
Noche	2022-03-19	078	02:35:03	Raval (RAVL)
Mañana	2022-03-27	086	01:06:52	Budellera (BUDE)

2.8 Resultados

Se procesaron un total de 63 vectores con observaciones de la placa C099-F9P. De todos estos, siete no fijaron ambigüedades desde el punto de observación 'BUDE'.

Radio Cercano:

- Para el radio 'Cercano' desde el punto 'RAVL' (Raval), con PLAN a 15 km, en las tres sesiones de observación, la diferencia de coordenadas en promedio respecto a las coordenadas de referencia (HiPer Pro) fue de 2 cm en planimetría y 11 cm en altimetría obteniendo el mejor resultado en la sesión nocturna contrastando con la sesión de la primera hora.

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer Pro - U-BLOX C099-F9P						
Punto de observación RAVL						
Radio 'Cercano'	**PLAN**			**PPP**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	-0.01	0.03	-0.21	0.00	0.01	0.14
Tarde	-0.01	0.02	0.10	-0.01	0.00	0.14
Noche	**0.00**	**0.01**	**0.03**	0.00	0.00	0.15

- Desde el punto de observación 'BUDE' (Budellera), con PLAN a 10 km, esta diferencia resultó de 3 cm en planimetría y 16 cm en altimetría. También en esta ocasión los mejores resultados se obtuvieron de las sesiones de tarde y noche.

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer Pro - U-BLOX C099-F9P						
Punto de observación BUDE						
Radio 'Cercano'	**PLAN**			**PPP**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	-0.07	0.00	0.26	-0.04	0.00	0.19
Tarde	-0.01	0.01	0.14	-0.03	-0.02	0.22
Noche	**-0.01**	**0.00**	**0.09**	-0.03	0.01	0.17

- Finalmente para el punto de observación 'SCUG' (Can Mates) con PLAN a 9 km, la diferencia fue de 1 cm para los tres ejes de coordenadas siendo ligeramente mejor, el resultado de la tarde.

Diferencias de coordenadas C099-F9P Promedio - C099-F9P						
Punto de observación SCUG						
Radio 'Cercano'	**PLAN**			**PPP**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	-0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.03
Tarde	**0.00**	**0.00**	**-0.01**	0.01	-0.01	0.01
Noche	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.04

Radio Intermedio:

- Para el radio 'Intermedio', observando desde 'RAVL' las diferencias resultaron en 12 y 20 cm en planimetría y altimetría respectivamente con las vectores calculadas desde ESCO a 176 km, y EBRE a 154 km. La diferencia de la vector obtenida con AJAC (a 553 km) fue de 1 cm en planta y 15 cm en cota.

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer-Pro - U-BLOX C099-F9P						
Punto de observación RAVL						
Radio 'Intermedio'	**EBRE y ESCO**			**AJAC**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	0.06	0.11	0.23	0.26	0.12	0.19
Tarde	0.03	0.24	0.29	0.32	0.29	0.06
Noche	**0.01**	**0.00**	**0.08**	**0.01**	**0.00**	**0.15**

- Para el punto de observación 'BUDE', con ESCO a 170 km y EBRE a 151 km, las diferencias planimétricas resultaron en 21 cm y las altimétricas en 11 cm empleando estaciones permanentes del ICGC. La diferencia desde AJAC fue 26 y 36 cm en planta y cota respectivamente, con una distancia de 557 km.

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer-Pro - U-BLOX C099-F9P						
Punto de observación BUDE						
Radio 'Intermedio'	**EBRE y ESCO**			**AJAC**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	0.16	0.31	0.18	0.51	0.02	0.43
Tarde	0.34	0.06	0.02	0.24	0.04	0.62
Noche	**0.01**	**0.00**	**0.11**	**0.01**	**0.02**	**0.05**

- Por último, para el punto de observación 'SCUG', desde EBRE a 151 km y ESCO a 162 km, se obtuvo 11 cm de diferencia en planimetría y 16 en altimetría. Se apreció un incremento empleando la estación AJAC (a 560km), donde las diferencias resultaron en más de medio metro para los tres ejes.

Diferencias de coordenadas Topcon C099-F9P Promedio - C099-F9P						
Punto de observación SCUG						
Radio 'Intermedio'	**EBRE y ESCO**			**AJAC**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	0.17	0.24	0.37	1.47	0.81	4.27
Tarde	**0.01**	**0.01**	**0.03**	**0.01**	**-0.01**	**-0.07**
Noche	0.02	0.01	0.07	0.50	0.11	-0.81

En cuanto a la franja horaria, en todos los casos los mejores resultados se obtuvieron en sesiones de tarde o noche.

Radio Lejano:

- Para el radio 'Lejano' observando desde 'RAVL' con GOPE a 1366 km, ORID a 1555 km y MAS1 a 2248 km, se obtuvieron diferencias de 0.86 m en planimetría y 0.54 m en altimetría. Desde 'BUDE' las diferencias fueron de 1.27 m en planimetría y 1.46 m en cota. Mientras que desde 'SCUG' se obtuvo 66 cm en planta y 53 cm en altimetría para los tres ejes.

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer-Pro - U-BLOX C099-F9P			
Punto de observación RAVL			
Radio 'Lejano'	**GOPE, ORID y MAS1**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	0.67	0.50	1.04
Tarde	1.24	0.56	0.38
Noche	**0.33**	**0.18**	**0.21**

Diferencias de coordenadas Topcon HiPer-Pro - U-BLOX C099-F9P			
Punto de observación BUDE			
Radio 'Lejano'	**GOPE, ORID y MAS1**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	1.23	1.10	3.15
Tarde	1.52	0.66	0.71
Noche	**0.55**	**0.17**	**0.53**

Diferencias de coordenadas Topcon C099-F9P Promedio - C099-F9P			
Punto de observación SCUG			
Radio 'Lejano'	**GOPE, ORID y MAS1**		
Franja horaria	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)
Mañana	0.70	0.37	0.36
Tarde	**0.38**	**0.20**	**0.46**
Noche	0.62	0.45	0.78

Cabe destacar que la comparación de los resultados en cuanto a método de procesamiento (PPP y post-proceso) en radio 'Cercano', las diferencias planimétricas permanecieron por debajo del centímetro y las altimétricas llegando al centímetro en las sesiones de mañana y noche. Desde 'BUDE' los resultados planimétricos rondaron el centímetro y en altimetría se llegó a los 2 cm de diferencia, siendo el mejor resultado en la sesión de la mañana. En 'SCUG' se observaron resultados similares, con diferencias de 1 cm en planimetría y 2 cm en altimetría.

Los resultados del análisis de las observaciones realizadas con TEQC, mostraron que no se evaluó la señal B2I de BEIDOU por no aparecer en las grabaciones. Esto se reflejó en la relación porcentual de observaciones esperadas y las finalmente obtenidas con valores de 77% para 'RAVL', 59% para 'BUDE' y 74% para 'SCUG'. Presumiblemente el porcentaje menor obtenido desde 'BUDE' a parte de la ausencia de la señal B2I, es debido a la densa vegetación que rodea el punto de observación. Estos valores porcentuales reflejan la falta de observaciones de una cuarta parte de los observables, es decir una de las cuatro portadoras de fase que en principio la placa C099-F9P debe ser capaz de observar. En cuanto al comportamiento ionosférico, considerando valores superiores a los 400 cm/min para ser considerado un salto de ciclo, se obtuvo en promedio un valor de 18 cm/min para 'RAVL', 87 cm/min para 'BUDE' y 216 cm/min para 'SCUG'.

2.9 Conclusiones de la evaluación

La conclusión basada en estos resultados es que empleando estaciones de referencia próximas se puede alcanzar precisiones de 1 cm, a medida que la distancia incrementa, la precisión disminuye llegando fácilmente a diferencias de 1 m empleando distancias tipo radio 'Lejano'. Las sesiones nocturnas ofrecen mejores precisiones. En cuanto a la ubicación de los puntos de observación, claramente, desde 'BUDE' se obtuvo peores resultados y la fijación de ambigüedades no se produjo en la mitad de los casos. Esto indica que para obtener precisión de 1 o 2 cm las sesiones han de cumplir unas buenas condiciones de observación. Por otra parte, se ha observado que las soluciones PPP, pueden resultar equivalentes a los resultados de radio 'Cercano'. Las tablas completas de los resultados se pueden consultar en el Anejo 1.

3. Aplicación práctica

3.1 Localización de Asok Abia (G.E.)

Guinea Ecuatorial es un país de África central ubicado en el golfo de Guinea. Su geografía se divide en una región continental y varias regiones insulares, siendo la isla de Bioko, la que acoge la capital del país, Malabo, mientras que Bata es la principal ciudad de la región continental. La extensión del país es de 28051.46 km² y junto a la República del Congo, la República Democrática del Congo, la República Centroafricana, Gabón y Camerún forma parte de la Selva del Congo o también conocida como el 'Segundo Pulmón de la Tierra', después de la selva amazónica.

La climatología es de tipo ecuatorial con una temperatura media de entre de los 25 y 30 °C. En cuanto a estaciones, se dividen en época de sequía y época de lluvia. Las estaciones lluviosas están comprendidas entre marzo y junio, y entre septiembre y noviembre, con un promedio anual de precipitación superior a los 2000 mm y una humedad relativa del 90%.

La división administrativa consiste en ocho provincias:
Bioko Norte, Bioko Sur, Litoral, Centro Sur, Kie-Ntem, Wele-Nzas, Annobón y Djibloho, encontrandose esta última en fase de construcción para convertirse en la futura capital. Las siguientes dos sub-divisiones administrativas son distritos y municipios de forma que un distrito puede contener varios municipios.

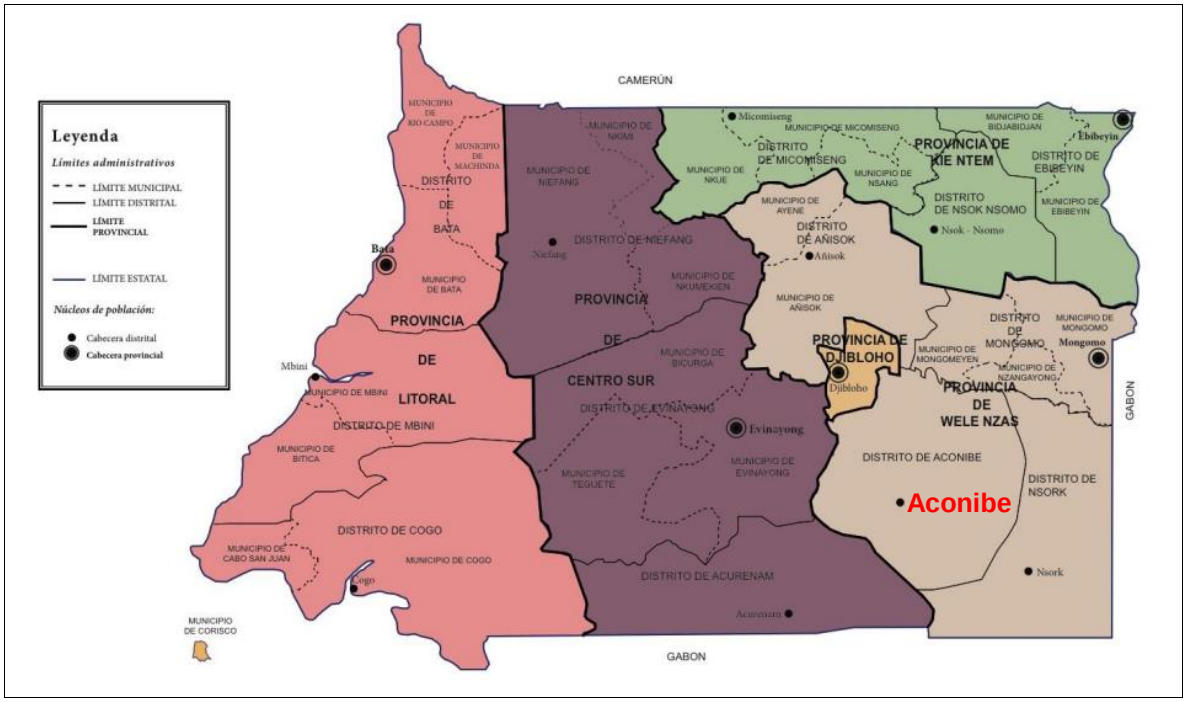


Figura 3.1 *Mapa de ordenación administrativa de la región continental de Guinea Ecuatorial*
Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Guinea Ecuatorial. Anuario 2021

Aconibe es uno de los cuatro distritos de la provincia de Wele-Nzas y conforma un núcleo urbano sin subdivisiones municipales. El poblado de Asok Abia, entre otros varios, se encuentra bajo la gestión administrativa de Aconibe. La población de Asok Abia es de aproximadamente 50 personas y se encuentra a unos 7 km del núcleo urbano en sentido sudoeste si se toma la carretera Aconibe – Acurenam (consultar Figura 3.2). El 72% de la población de Guinea Ecuatorial pertenece a la etnia Fang la cual es originaria de la región continental y de la que forman parte los habitantes de Asok Abia.

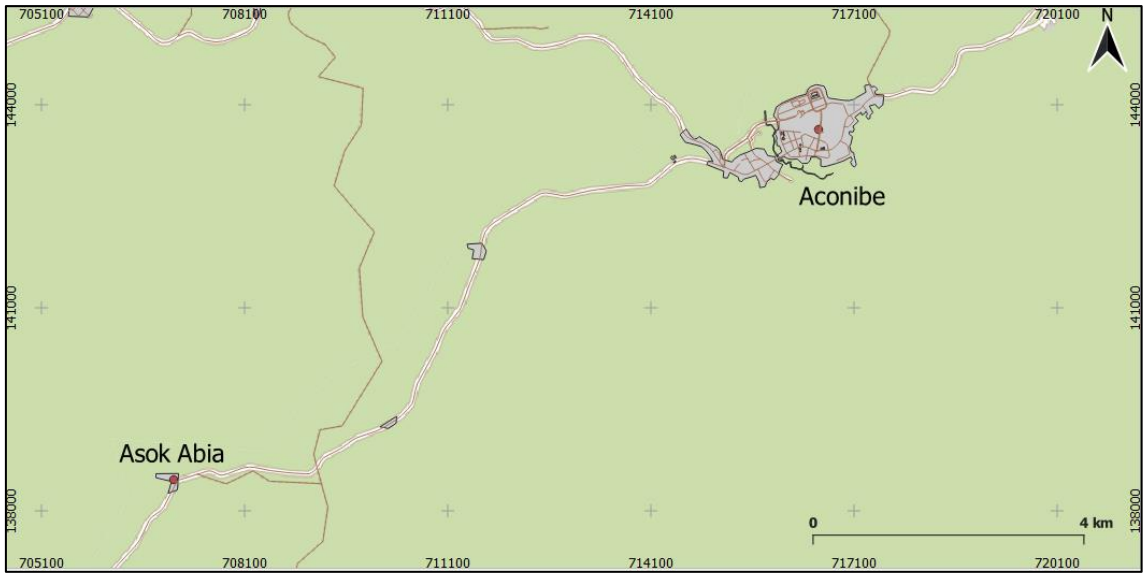


Figura 3.2 *Mapa de ubicación entre Aconibe y Asok Abia*
Fuente: Mapa de elaboración propia con datos de OSM. Escala 1:6000. EPSG 32632.

Fotografía 3.1 *Poblado Asok Abia 15/10/2021*

Fotografía 3.2 *Poblado Asok Abia 15/10/2021*

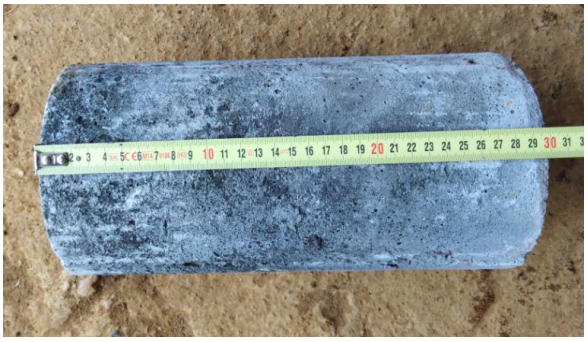
3.2 Trabajos de georreferenciación en Asok Abia (G.E.)

Los trabajos de campo se realizaron entre el 16 y el 29 de octubre de 2021. El equipo de campo diario estuvo integrado por un guía, dos técnicos auxiliares, y mi persona. Estos trabajos se dividieron principalmente en tres fases: Observaciones GNSS, trabajos topográficos y levantamientos fotogramétricos. A parte de las fases estrictamente geomáticas se realizó una inspección del terreno, tanto para determinar las zonas o elementos de interés topográfico y/o fotogramétrico como para el establecimiento de las bases de observación GNSS. La estación de lluvia caracterizó el avance y desarrollo de los trabajos.

Este apartado constituye la puesta en práctica del desarrollo de metodología y evaluación de la placa C099-F9P de U-BLOX, ya que los resultados de esta fase del proyecto tienen doble finalidad. El primer objetivo es comparar los resultados de los posicionamientos con los obtenidos en Barcelona. Por otro lado esta es la fase de partida para poder georreferenciar los trabajos topográficos y fotogramétricos.

3.2.1 Materialización de bases

En primer lugar, fue necesario localizar las zonas idóneas donde poder colocar el módulo de U-BLOX, es decir relativamente lejos de arbolado y de edificación, para asegurar el mayor ángulo posible de cielo observable. Dado que la carretera que pasa por el poblado es de las pocas zonas que cumplen tales características, se decidió establecer las bases de observación GNSS a los lados de la carretera y se denominaron B1 (BASE 1) y B2 (BASE 2). El material empleado fueron pilotes de hormigón prefabricado con dimensiones de 30 x 15 cm y la instalación de las mismas se llevó a cabo el día 16/10/2021 cavando un hoyo en la tierra de aproximadamente 25 cm de profundidad y colocando los pilotes sobre una capa de mortero de 5 cm.



Fotografía 3.3 *Alto de pilote de hormigón empleado para materializar las bases B1 y B2*

Fotografía 3.4 *Diámetro de pilote de hormigón empleado para materializar las bases B1 y B2*

3.2.2 Sesiones de observación

Se realizaron dos sesiones de observación en cada base en horario de mañana y noche. Los instrumentos empleados, a parte de la placa de U-BLOX, fue un jalón, un trípode de pinza y un soporte circular metálico con rosca adherida para jalón que sirvió de superficie plana a la antena ANN-MB. La distancia vertical entre el centro del pilote prefabricado y la referencia ARP de la antena se cuantificó en 1.543 m. La configuración de los parámetros de observación desde U-Center fueron idénticos que en Barcelona. La ubicación de las bases.

Franja horaria	Fecha (aaaa-mm-dd)	DOY	Duración (hh:mm:ss)	Lugar
Mañana	2021-10-16	289	01:11:38	Base-1 (Asok Abia)
Mañana	2021-10-16	289	01:02:47	Base-2 (Asok Abia)
Noche	2021-10-26	299	2:14:22	Base-1 (Asok Abia)
Noche	2021-10-28	301	3:22:38	Base-2 (Asok Abia)

Tabla 3.1 *Calendario de las sesiones de observación GNSS en Asok Abia*

Fotografía 3.5 *Sesión de observación GNSS diurna sobre BASE-2. 16/10/2021*

Figura 3.3 *Plano de tierra empleado en Asok Abia para las observaciones GNSS*

3.2.3 Procesamiento de datos

Para la obtención de las vectores se usaron dos estaciones GNSS de la red IGS, ‘NKLG00GAB’ y ‘YKRO00CIV’ (Consultar Tabla 3.2 y Tabla 3.3), las más próximas operativas a la zona de observación, a unas distancias aproximadas de 165 km y 1909 km respectivamente. Estas distancias corresponderían a radio ‘Intermedio’ y radio ‘Lejano’. El intervalo temporal para determinar la época de las coordenadas de referencia ITRF se estableció entre el 16/10/2021 y el 28/10/2021 (entre la primera sesión de observación y la última). Los parámetros constantes de procesamiento en el software Magnet Tools se

aplicaron igual que en la fase de evaluación incluyendo la calibración de antenas mediante archivos ‘ATX’ y efemérides precisas en formato ‘SP3’. De forma paralela las observaciones se procesaron mediante servicio online PPP del CSRS para comparar los resultados.

Nombre		N’koltang (NKLG00GAB)			
Organismo responsable		CNES - IGN (Instituto Geográfico Nacional de Francia)			
Localidad		N’koltang, Libreville, Gabón			
Ubicación	SRC: WGS84 Proyección: UTM Huso 32N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		574791.361	39120.339	21.520	31.506
	Coordenadas ITRF2008 Época: 16/10/21 - 28/10/21	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		6287385.704	1071574.900	39133.228	
Modelo de antena		TRM59800.00 - SCIS			
Modelo de receptor		SEPT POLARX5 - 5.4.0			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 3.2 *Resumen de las características de la estación GNSS NKLG*

Nombre		Yamoussoukro (YKRO00ICV)			
Organismo responsable		GGN – JPL (NASA)			
Localidad		Yamoussoukro, Costa de Marfil			
Ubicación	SRC: WGS84 Proyección: UTM Huso 30N Ref. alturas: EGM2008	X (m)	Y (m)	H (m)	h (m)
		252450.486	760019.160	241.538	270.256
	Coordenadas ITRF2008 Época: 16/10/21 - 28/10/21	X (m)	Y (m)	Z (m)	
		6306439.966	-578380.501	757956.733	
Modelo de antena		ASH701945C_M - NONE			
Modelo de receptor		JAVAD TRE_3 DELTA - 4.1.01			
Formato de observaciones		RINEX-3, datos horarios e intervalos cada segundo			

Tabla 3.3 *Resumen de las características de la estación GNSS YKRO*

3.3 Realización de trabajos topográficos en Asok Abia (G.E.)

En primer lugar se realizó una inspección visual de la zona el 18/10/2021. Se hizo un recorrido a pie a través de la vegetación para tener una idea de la distancia que existía entre las posibles ubicaciones de las bases de referencia y la zona de interés. Durante el recorrido se empleó una aplicación móvil de localización (Geo Tracker), que permitió establecer una primera idea del itinerario que debía seguir la poligonal. Este análisis previo permitió ubicar el emplazamiento de se encontraban algunas viviendas, una iglesia, una escuela y un manantial. En una primera aproximación la distancia entre el camino principal del antiguo poblado y el eje de la carretera actual que pasa por Asok Abia se cuantificó en unos 400 m en sentido paralelo.

Figura 3.4 *Mapa que muestra el itinerario y antiguas ubicaciones obtenidos con App Geo Tracker*
Simbología: En color amarillo viviendas, en color cian escuela, en color blanco iglesia, en color azul manantial.
Fuente: Mapa de elaboración propia con imagen raster obtenida con software SAS Planet. Escala 1:3000. EPSG 32632.

3.3.1 Instrumento y accesorios

Para los trabajos topográficos se empleó una estación total facilitada por el Instituto Nacional para la Conservación del Medio Ambiente (INCOMA) de Guinea Ecuatorial, junto a los siguientes accesorios: trípode de madera, jalón metálico, prisma y pinzas:

Estación total:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Spectra Precision, serie FOCUS
	Sensibilidad nivel tórico	30 ”
	Sensibilidad nivel esférico	8 ’
	Aumentos del anteojo	30 x
	Precisión angular	Horizontal 2 ”
		Vertical 5 ”
	Precisión distanciométrica	Con prisma ±(2+2 ppm × D) mm
		Sin prisma ±(3+2 ppm × D) mm
	Rango de distancias	Con prisma de 2.5 m a 4000 m
		Sin prisma 500 m
	Rango de temperatura ambiental	Entre -20 y +50 °C

Prisma	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	MYZOX, PG-2500GP
	Constante	0 y -30 mm
	Distancia de la base al centro del prisma	115 mm
	Diámetro	63.5 mm
Jalón	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	MYZOX, PP-260
	Sensibilidad nivel esférico	8’/2 mm
	Longitud	Min: 1480 mm, Max: 2600 mm
	Material	Aluminio
Trípode	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	MYZOX, PMW3-OL
	Longitud	Min: 1092 mm, Max: 1.754 mm
	Material	Madera
Trípode de pinza:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	MYZOX, PPS
	Longitud	Min: 760 mm, Max: 1230 mm
	Material	Aluminio

Estacas:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Elaboración propia
	Longitud	40 cm (aprox.)
	Material	Madera
Cinta métrica:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Tajima, Symron-S
	Longitud máxima	50 m
	Material	Fibra de vidrio
Flexómetro:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Stanley Works, Tylon
	Longitud máxima	5 m
	Material	Acero

3.3.2 Poligonal

Después de los trabajos de georreferenciación, el día 21/10/2021 se realizó una poligonal *orientada cerrada* de 1016.81 m de longitud, comenzando con el estacionamiento en BASE-2 (B2) y orientación de referencia en BASE-1 (B1), ambos puntos conocidos, calculados en la georreferenciación. En total se materializaron 14 bases formadas por estacas de madera de aproximadamente 40 cm de longitud hincadas en el suelo. La nomenclatura empleada para las bases de estaca consistió en una letra 'E' seguida de un numero entero en orden ascendiente. Las bases de especial interés fueron E3, E4 y E7 por ser los puntos con visuales adecuadas para posteriores radiaciones de los elementos encontrados.

Durante la realización de la poligonal se empleó un estadillo de campo en el que se registraba, a parte de las alturas de instrumento y prisma, los ángulos horizontales y verticales más la distancia correspondiente en círculo directo e inverso. Adicionalmente, las observaciones de campo se almacenaron en formato digital en la memoria interna de la estación total, que posteriormente se exportaron a ordenador en formato 'TXT'.

A parte de la poligonal principal, el día 25/10/2021, se realizó un itinerario *colgado* de tres estaciones: E15, E16 y E17, partiendo de E4. Este itinerario se realizó con el fin de ubicar aproximadamente el principal recurso hídrico y mostrar el desnivel que existe entre el antiguo poblado y el manantial. Por último, el día 26/10/2021 desde E4 se estableció una base *satélite* adicional E18. Esta base permitió visualizar la casa desde la parte posterior.
El procesamiento de los datos se trató con una hoja de cálculo en Excel. A priori, según las características del instrumento y del itinerario, la tolerancia para el error angular se determinó en 4 c, mientras que el obtenido en campo fue ligeramente superior a 1 c. Se realizó un ajuste planimétrico y altimétrico por mínimos cuadrados sin necesidad de iteración. En planimetría los resultados mostraron una diferencia entre B1 y B1' de 13 mm para el eje X y 5 mm para el eje Y. En altimetría esta diferencia fue en torno a 1 mm después del ajuste. La tabla de los ajustes corresponde al Anejo 2.

Fotografía 3.6 *Estacionamiento sobre B2 y orientación a B1. 21/10/2021*

Fotografía 3.7 *Base de poligonal E7. 21/10/2021*

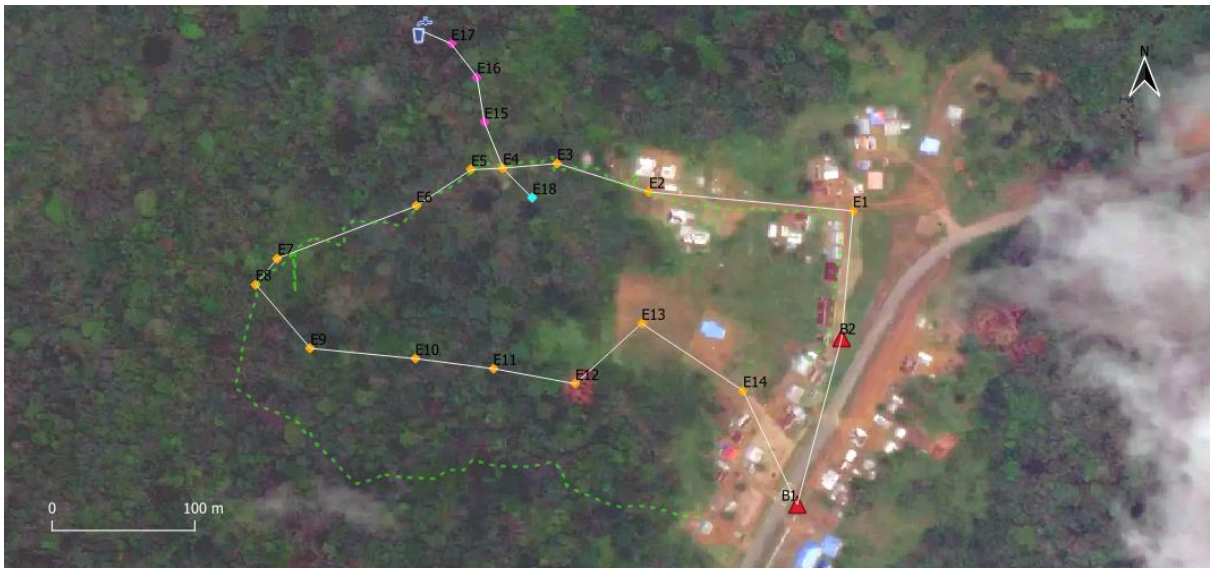


Figura 3.5 *Mapa que muestra el itinerario con App Geo Tracker y poligonal con las bases Simbología: En color rojo bases de referencia B1 y B2, en color naranja bases de la poligonal, en color magenta bases de itinerario colgado, en color cian base satélite. Fuente: Mapa de elaboración propia con imagen raster obtenida con software SAS Planet. Escala 1:3000. EPSG 32632.*

3.3.3 Radiación

Se puede distinguir tres diferentes objetivos de las radiaciones: Determinar la ubicación de los elementos encontrados; establecer bases auxiliares, como por ejemplo la E18; y por último y más importante, dar coordenadas a los puntos de control fotogramétricos. Se empleó la misma metodología en todos los casos, estacionando en bases pertenecientes a la poligonal y orientando el instrumento a otras bases de la misma. Para los puntos no ubicados en el suelo, se calculó el error transversal y longitudinal (E_T y E_L) considerando, el error angular del instrumento, promedio de alturas de prisma y las distancias radiadas.

E_T (m)	E_L (m)
0.010	**0.005**

Desde la base E7 con orientación a E6 se pudo determinar la parcela donde se encontraba la casa de José Ndong Abaga con tres puntos. No se encontró restos de estructura de la vivienda, ya que fue construida con materiales de origen vegetal, como la hoja de palma de nipa ('Nypa fruticans') o corteza de árbol 'Xylopia aethiopica', y por tanto biodegradables. Además hay que tener en cuenta que posteriormente esta parcela se usó como área de cultivos. El lugar actualmente se encuentra repleto de vegetación joven.

Fotografía 3.8 *Edificación de tipo tradicional, Soha (Acurenam)*

Fotografía 3.9 *Emplazamiento de la casa de José Ndong Abaga*

A partir de la base E17, la última base del itinerario colgado, se pudo radiar las dimensiones de la principal fuente de agua del que se ha nutrido los habitantes del antiguo poblado. Este manantial de origen natural se determinó por seis puntos perimetrales y un punto de profundidad.

Los dos elementos localizados del antiguo poblado objeto de un levantamiento fotogramétrico fueron los restos de estructura de la vivienda de José Obama Ndong y la última edificación que aún queda en pie perteneciente a Baltazar Nze Ntutum, hecha de tablas de madera y tejado de planchas de zinc.

Fotografía 3.10 *Manantial radiado desde E17. 25/10/2021*

Fotografía 3.11 *Restos de edificación de José Obama Ndong. 27/10/2021*

Fotografía 3.12 *Última casa perteneciente a Baltazar Nze Ntutum. 27/10/2021*

La zona de los restos de la vivienda de José Obama Ndong se pudo radiar desde la base E3 tomando como referencia la base E2. Esta radiación consistió en la determinación de las coordenadas de catorce puntos de control fotogramétricos. La diferencia entre las coordenadas ajustadas de E2 y las calculadas a partir del levantamiento varían en 2 mm en planimetría.

La base E18 se materializó estacionando en E4 con referencia a E3. Desde ambas bases se dio coordenadas a dieciséis puntos de control fotogramétricos, tres puntos de fachada y otros tres de la losa. Comparando entre las coordenadas ajustadas de E3 y las obtenidas de E3 en este levantamiento, se apreció una diferencia de 1 cm en planta.
Los datos de campo se almacenaron en la memoria de la estación total y en estadillo de campo, aunque para el cálculo de coordenadas de los puntos se emplearon los almacenados por el instrumento.

Para al procesamiento de las observaciones, se empleó una hoja de cálculo de Excel. Las distancias observadas no se transformaron a distancias UTM debido a la reducida área de levantamiento, con distancias máximas rondando los 30 m. Esto supone una diferencia de 1 mm entre emplear distancia reducida y distancia UTM.

3.4 Levantamientos fotogramétricos en Asok Abia (G.E.)

3.4.1 Metodología

La metodología empleada consistió en los siguientes puntos:

- En campo:
  - Evaluación visual del estado de los elementos a levantar.
  - Instalación de los puntos de control
  - Radiación de los puntos de control
  - Realización de la toma fotográfica.

- En gabinete:
  - Transferencia de datos a ordenador
  - Usando el software ‘Photoscan (Versión 1.2.5)’ :
    - Importación de las fotografías
    - Orientación del bloque fotográfico
    - Identificación y determinación de los puntos de control en las fotografías
    - Generación del modelo ‘Tie Points’
    - Generación de la nube de puntos densa
    - Generación de MDE
    - Generación de orto fotografía

3.4.2 Instrumentos de campo

Smartphone:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Huawei, Y7 Prime 2018 (LDN-LX2)
	Sensor cámara	BSI CMOS
	Distancia focal	3 mm (equivalente a 35 mm)
	Apertura	f/2.2
	Sensibilidad ISO	Min: 100, Max: 3200
	Obturador	Min: 1/8000 s, Max: 8 s
	Tamaño de imagen	4128 x 3096 px (13MP)
	Resolución	72 ppp
	Profundidad bits	24 bits
	Formato de imagen	JPG
Cámara:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Sony, Cyber-shot DSC-W210
	Sensor	Super HAD CCD
	Tamaño de sensor	1/2.3 "
	Distancia focal	5 mm
	Apertura	1 / 2.8
	Sensibilidad ISO	Min: 10, Max: 3200
	Obturador	Min: 1/4 s, Max: 1/1600 s
	Tamaño de imagen	4000 x 3000 px (12MP)
	Resolución	72 ppp
	Profundidad bits	24 bits
	Formato de imagen	JPG
Dianas:	**Especificaciones técnicas**	
	Marca/Modelo	Materials World, elaboración propia
	Dimensiones	100 x 100 x 3.5 mm
	Resistencia a temperatura	-20 y 90 °C
	Resistencia a climatología	Si a lluvia e intemperie
		No a rayos UVA de larga exposición
	Material	Polipropileno celular
Clavos:	**Especificaciones técnicas**	
	Longitud	100 mm
	Material	Acero

3.4.3 Trabajos de campo

Como se mencionó en el apartado anterior, se localizaron dos zonas de interés para un levantamiento fotogramétrico: los restos de la casa de José Obama Ndong (aproximadamente 40 m²) y la casa de Baltazar Nze Ntutum (49.2 m²). Los trabajos fueron realizados entre el 26/10/2021 y el 29/10/2021. Debido al estado de abandono, fue necesario un desbroce y apartamiento de la vegetación previo. La instalación de los puntos de control, numerados con una 'D' seguido de número entero, se materializó con la ayuda de clavos. Tanto en la zona de los restos, como en la casa, se pretendió que la distribución de las dianas fuese lo más dispersa posible en planta y alzado para evitar un alineamiento de las mismas y que pudieran aportar su referencia a los tres ejes de coordenadas. Para conseguir este fin, en la zona de los restos, los puntos de control se clavaron en suelo, estacas y árboles. En la zona de la casa, a parte del suelo, las dianas se clavaron directamente en las fachadas. El clima lluvioso y a la densidad de la vegetación crearon unas condiciones de iluminación homogénea lo que permitió obtener bloques fotogramétricos con un bajo porcentaje de áreas quemadas.

Con las dianas radiadas, explicadas en el apartado 3.3.3., se procedió a realizar la toma fotográfica.

- **<u>Zona de interés 'restos':</u>**

  Se realizaron dos sesiones fotográficas, una con smartphone el día 27/10/2021 y otra con cámara el día 29/10/2021 obteniendo 128 y 225 fotografías respectivamente con un total de 353. Durante las sesiones no se empleó zoom ni flash. Con la cámara SONY, los parámetros de captura se configuraron a modo 'Paisaje' dando lugar a los siguientes valores de exposición: focal = 5.35, apertura = f/2.8 e ISO = 125. Usando el smartphone, se estableció el enfoque automático para fotos estáticas 'AF-S', de modo que la exposición quedó de la siguiente manera: focal = 2.2, apertura = 3.462 y una ISO variable entre 200 y 560. Las características de apertura de las cámaras (f/2.2 y f/2.8) no permitieron trabajar con una profundidad de campo tal que permitiera obtener una nitidez de la imagen a distancias relativamente cortas. Este obstáculo se solucionó reduciendo la distancia entre cada par de fotografías, lo que por otro lado aumentó el porcentaje de solape entre las mismas. El inconveniente principal de esta forma de trabajo fue que se perjudicó la esencia de 'metodología no invasiva' que caracteriza a la fotogrametría arquitectónica, ya que fue necesario pisar algunas zonas que luego formarían parte del propio modelo.

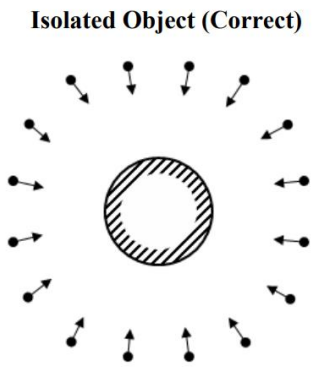


Figura 3.6 *Posición de cámara recomendada para capturar un objeto aislado. Manual PhotoScan*

- **Zona de interés 'casa':**

La sesión fotográfica se realizó el día 27/10/2021 con el smartphone obteniendo 134 fotografías. Los parámetros de cámara establecidos fueron idénticos a los usados en la zona 'restos'. Al existir una estructura definida y continua (las fachadas), se realizó un barrido en una y otra dirección para cada fachada asegurando un solape suficiente entre cada par de fotografías. La forma de realizar los barridos fue la siguiente: se posicionó la cámara en orientación perpendicular a la fachada y de forma intencionada se realizó una inclinación o apertura con un ángulo de entre 15 y 30 ° respecto a la perpendicular favoreciendo la consolidación de la geometría epipolar. Las fotografías se realizaron aproximadamente cada medio metro.

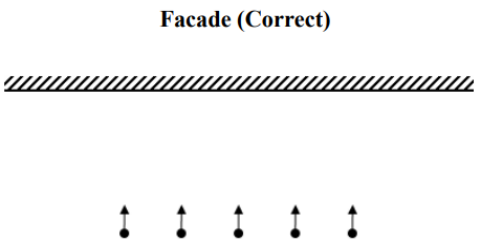


Figura 3.7 *Posición de cámara recomendada para superficies planas tipo fachada. Manual PhotoScan*

3.4.4 Trabajos de gabinete

El software de procesamiento fotogramétrico empleado es 'Photoscan de Agisoft, versión 1.2.5.' creando un proyecto para cada levantamiento. Los requerimientos óptimos del sistema para el correcto funcionamiento del programa se describen a continuación:

- Sistema operativo: Windows XP o posterior (64 bits), Mac OS X Snow Leopard o posterior, Debian/Ubuntu (64 bits)
- Procesador Intel Core i7
- 12 GB de RAM

El número de fotos que PhotoScan puede procesar depende de la memoria RAM disponible y parámetros de reconstrucción utilizados. Suponiendo que la resolución de una sola foto es del orden de 10 MP, con 2 GB de memoria RAM es suficiente para hacer un modelo a partir de entre 20 a 30 fotos. Con 12 GB de RAM se podrían procesar hasta entre 200 y 300 fotografías (AGISOFT, 2016). Para proyectos de mayor envergadura existe la posibilidad de usar las versiones actualizadas del software mediante el modelo de distribución de software SaaS.

Una vez exportadas las fotografías se cargaron en el software. Al no disponerse de los parámetros internos de las cámaras (smartphone y cámara SONY), se utilizó el proceso de orientación del bloque fotográfico mediante un ajuste por autocalibración a partir de los puntos de apoyo de los bloques fotogramétricos.

Proyecto 'restos-3D':

En este proyecto se importaron las fotografías de las dos cámaras fotográficas a la vez. El bloque fotográfico quedó orientado localmente generando una nube de puntos dispersa con 434639 coincidencias en al menos un par de fotos, quedando alineadas 344 fotografías de 352, es decir, en un 97.7% (una fotografía se descartó por estar defectuosa). A continuación se calcularon los parámetros internos y externos del bloque fotogramétrico. No se observó problemas de compatibilidad entre las distintas fuentes de datos (Figura 3.8). En cuanto a la estimación de la calidad radiométrica de las fotografías, el promedio resultó en 59% para la cámara SONY y en 68% para el smartphone, según el algoritmo del software (Buill, 2007).

Figura 3.8 *Identificación de puntos comunes entre las fotografías DSC06544.jpg y IMG_20211027_082217.jpg*

A continuación se procedió a ubicar los marcadores sobre las dianas empleando el mismo identificador que en la radiación. Aunque PhotoScan tiene la opción de trabajar directamente con sistemas de referencia oficiales, en este proyecto, las coordenadas proyectadas UTM se insertaron manualmente, produciendo una relación directa entre coordenadas imagen y coordenadas terreno lo que equivale la georreferenciación del modelo. El error medio obtenido fue de 22 mm, después de descartar el punto de control 'D22' por presentar un error anómalo de 1.58 m.

Para la generación de la nube de puntos densa el parámetro de calidad se definió como 'Alta', obteniendo de resultado una nube de más de 37 millones de puntos. A partir de esta nube se generó un modelo digital de elevaciones y por último la ortofotografía, con dimensiones de pixel de 2 mm.

Proyecto 'casa-3D':

El algoritmo de procesamiento para este elemento fue idéntico al de 'Restos-3D'. A partir de las 134 fotografías, quedaron alineadas 133, más de un 99%. La nube dispersa se generó con 125780 puntos, mientras que la nube densa resultante fue de 8.5 millones de puntos. Para la georreferenciación, de los 16 puntos de control se emplearon 13 en un principio. Las dianas 'D9', 'D12' y 'D13' habían quedado descartadas por presentar coordenadas anormales. A partir del resto de puntos de apoyo se obtuvo un error medio de 22 mm. A partir de la nube densa, se creó una malla y una ortofotografía de la fachada principal de la vivienda (fachada Nordeste).

Para su elaboración se descartó las dianas (D10, D11, D14, D15 y D16) leídas desde la base satélite E18, reduciendo el error del modelo a 7 mm y generando una ortofoto resolución de 1 mm por pixel de dimensiones 2907 x 7898. La transformación de coordenadas se realizó por MMCC en una hoja de Excel mediante un sistema de cuatro parámetros (Transformación de Helmert) usando como referencia las dianas 'D3' y 'D1' y quedando 'D2' como punto de control.

3.5 Resultados

3.5.1 Resultados y evaluación de georreferenciación

Basándonos en los resultados obtenidos en Barcelona se pudo comprobar que, en condiciones ideales, tanto las observaciones realizadas con la placa C099-F9P como los resultados PPP ofrecían diferencias de coordenadas de 1 cm respecto al receptor HiPer Pro. Al no disponer de un receptor geodésico para contrastar como en el caso de Barcelona, las soluciones PPP sirvieron como referencia orientativa para determinar la calidad de los procesamientos de los vectores.

En total se procesó 8 vectores, de las cuales no se consiguió calcular el vector YKRO-BASE-2 del 28/10/2021 por falta de observaciones de la estación de referencia. El resto de consiguieron fijar ambigüedades. En el caso de la estación de referencia NKLG, encontrándose a una distancia de 165 km (radio 'Intermedio'), con un ángulo de cielo visible adecuado y observaciones en franjas horarias nocturnas, se esperaba obtener unas diferencias de orden centimétrico. Para la estación de referencia YKRO, a una distancia de 1909 km (radio 'Lejano') estas diferencias deberían ser del orden de medio metro.

Radio Intermedio:

Para radio 'Intermedio', observando desde BASE-1, el resultado mostró una diferencia planimétrica y altimétrica de más de 1.5 m para el vector del día 16/10/2021. En una sesión de mayor duración en observación nocturna el día 26/10/2021, el resultado tampoco entró dentro de los valores esperados de 1 cm en planta y 11 cm en cota, obteniendo 29 cm en planta y 38 cm en cota. Observando desde BASE-2, el mismo día 16/10/2021 la diferencia planimétrica resultó en 15 cm y en 46 cm para altimetría sobrepasando de nuevo los valores esperados. La sesión del 28/10/2021 en horario nocturno y de mayor duración desde BASE-2 del resultó incluso peor que la sesión anterior, con una diferencia de más de medio metro en planimetría y altimetría.

Diferencias de coordenadas PPP - NKLG						
Datum WGS84 Projection UTM Huso 32 N, Altura ortométrica						
Punto de observación	**Fecha**	**Franja horaria**	**Horas Obs.**	**X (m)**	**Y (m)**	**H (m)**
BASE1	16/10/2021	Mañana	1:11:38	-1.21	-1.11	-1.69
	26/10/2021	Noche	2:14:22	0.03	-0.29	-0.38
BASE2	16/10/2021	Mañana	1:02:47	-0.04	-0.15	-0.46
	28/10/2021	Noche	3:22:38	0.34	-0.43	-0.62

Radio Lejano:

Para una distancia de radio 'Lejano', donde se esperaba valores de 30 y 50 cm en planimetría y altimetría respectivamente, se obtuvo valores superiores a los dos metros, aunque los resultados altimétricos quedaron muy por debajo de los 50 cm.

Diferencias de coordenadas PPP - YKRO						
Datum WGS84 Projection UTM Huso 32 N, Altura ortométrica						
Punto de observación	**Fecha**	**Franja horaria**	**Horas Obs.**	**X (m)**	**Y (m)**	**H (m)**
BASE1	16/10/2021	Mañana	1:11:38	-4.12	-0.53	-1.00
	26/10/2021	Noche	2:14:22	-2.36	0.60	-0.06
BASE2	16/10/2021	Mañana	1:02:47	-3.63	0.54	0.03

Dado que las bases de observación (BASE-1 y BASE-2) tenían la finalidad de emplearse como referencias para la georreferenciación de los trabajos topográficos y fotogramétricos se decidió aprovechar las 6 medidas de distancias leídas entre las bases con la estación total. El objetivo fue comparar las distancias a partir de las coordenadas obtenidas por procesamiento PPP, las obtenidas mediante post-proceso y las observadas con estación total. Para poder comparar las tres distancias, los datos obtenidos con estación total se redujeron a la proyección UTM.

Dado que la separación entre BASE-1 y BASE-2 no era considerablemente grade como para alterar notoriamente las lecturas del distanciometro de la estación total, se escogió el promedio de estas mismas distancias como referencia para calcular qué distancia, (PPP o post-proceso) se ajustaba más. Estos valores se calcularon en una hoja de Excel generando el siguiente cuadro comparativo:

Comparación de distancias GNSS y Estación Total entre B1 y B2				
Promedio Estación Total	120.767 m			
Fechas Observación GNSS	Post-proceso. Distancia (m)	Diferencia (m)	PPP Distancia (m)	Diferencia (m)
(B2) 16/10/21 - (B1) 16/10/21	119.510	1.26	120.739	0.03
(B2) 28/10/21 - (B1) 16/10/21	119.726	1.04	120.772	**0.00**
(B1) 26/10/21 - (B2) 16/10/21	120.630	0.14	120.750	0.02
(B1) 26/10/21 - (B2) 28/10/21	120.842	**-0.07**	120.783	-0.02

Como se puede observar, las distancias calculadas con procesamiento PPP se acercan considerablemente más a la distancia promedia realizada con estación total. Esto pone de manifiesto que las soluciones PPP en este trabajo ofrecieron mejor precisión que los procesamientos de vectores.

Sin embargo la duda generada a partir de estos resultados fue del porque se producía tanta discrepancia entre el cálculo de las vectores y las soluciones PPP en comparación con los resultados obtenidos en Barcelona.

Según los resultados del análisis TEQC, el promedio del registro de observaciones es del 72%, prácticamente igual que en las pruebas de Barcelona. Las alteraciones ionosféricas resultaron ser de 47 cm/min en promedio, es decir, sin superar los 400 cm/min para considerarse un salto de ciclo (según manual TEQC) y la cantidad de 1 reinicio del reloj por cada sesión no daban indicios de alteraciones significativas como para generar resultados tan dispersos.

Se procedió a analizar los datos de mapas de la ionosfera a partir de archivos IONEX de los mismos días de observación GNSS, pudiendo crear un fichero en formato ASCI para ser importado como un raster a QGIS. El resultado del mapa ionosférico (Figura 3.9) pudo corroborar el aumento de la actividad ionosférica en latitud ecuatorial en comparación con las alteraciones ionosféricas bajas producidas en Barcelona.

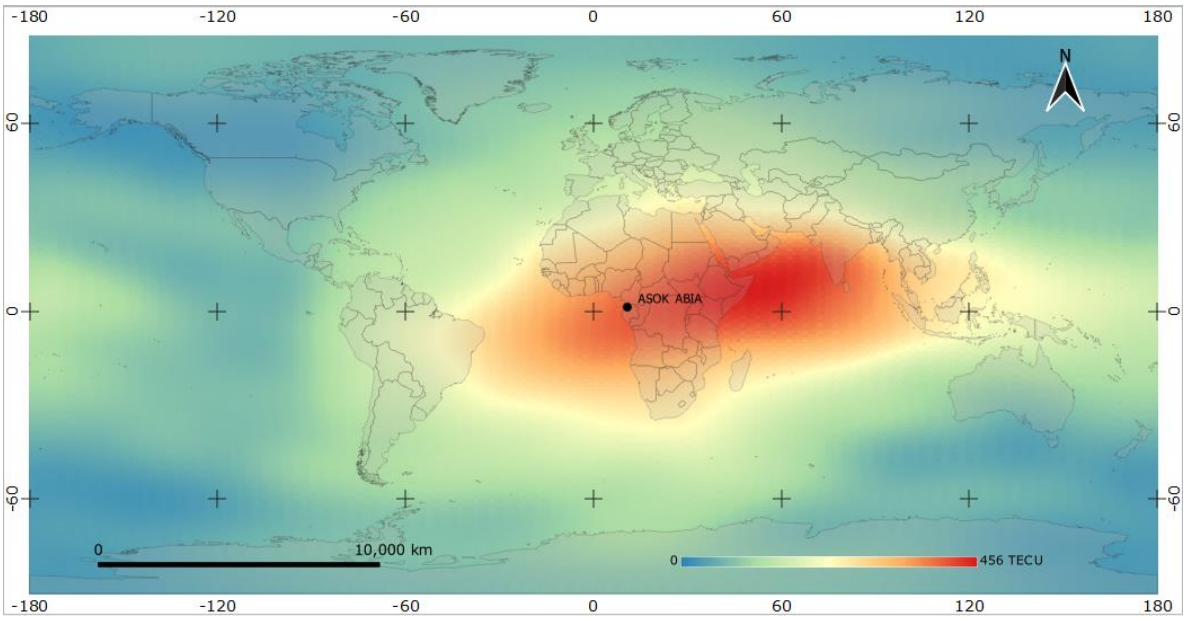


Figura 3.9 *Estado de la ionosfera entre las 12:00 y las 14:00 horas UTC + 0 del dia16/10/2021*
Fuente: Mapa de elaboración propia elaborado a partir del archivo 'esag2890.21i' descargado de la web de CDDIS y mapa base de la web de Natural Earth. EPSG: 4326.

Este fenómeno ionosférico se conoce como 'Anomalía Ecuatorial' presente a lo largo de esta latitud. Dado que el CSRS, para procesar las observaciones mediante la técnica PPP, emplea varios parámetros modelados que constituyen fuentes de error en posicionamiento GNSS, entre estos parámetros se encuentran los modelos ionosféricos (Banville, 2020).

3.5.2 Resultados fotogramétricos

Tablas de ajuste de los bloques fotogramétricos:

Proyecto 'Restos 3D'

Label	Accuracy_(m)	Error_(m)	X_error	Y_error	Z_error	X_var	Y_var	Z_var
D18	0.005	0.025	0.000	0.003	-0.025	0.001	0.001	0.001
D19	0.005	0.032	-0.003	-0.002	0.032	0.001	0.001	0.001
D20	0.005	0.128	-0.008	0.003	0.127	0.001	0.001	0.001
D21	0.005	0.074	-0.006	0.011	0.073	0.001	0.001	0.001
D22	0.005	0.014	-0.008	0.011	-0.004	0.001	0.001	0.001
D23	0.005	0.012	0.004	0.002	-0.012	0.001	0.001	0.001
D24	0.005	0.006	-0.003	-0.005	0.003	0.001	0.001	0.001
D25	0.005	0.051	-0.019	-0.014	-0.046	0.001	0.001	0.001
D26	0.005	0.122	0.034	-0.061	-0.100	0.001	0.001	0.001
D27	0.005	0.063	-0.007	-0.012	-0.061	0.000	0.000	0.000
D28	0.005	0.025	0.003	-0.007	-0.024	0.001	0.001	0.001
D29	0.005	0.097	0.008	-0.014	0.096	0.001	0.001	0.001
D30	0.005	0.031	0.007	-0.002	0.030	0.001	0.001	0.001
D31	0.005	0.052	-0.020	-0.010	-0.047	0.001	0.001	0.001
Total error		**0.023**	**0.005**	**0.006**	**0.022**			

En color negro Punto de apoyo
En color rojo Punto de control

Proyecto 'casa-3D'

Label	Accuracy_ m)	Error_(m)	X_error	Y_error	Z_error	X_var	Y_var	Z_var
D1	0.005	0.005	-0.002	-0.003	0.002	0.001	0.001	0.001
D2	0.005	0.011	-0.007	0.008	0.001	0.001	0.001	0.001
D3	0.005	0.006	0.005	-0.001	0.003	0.001	0.001	0.001
D4	0.005	0.003	-0.001	-0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
D5	0.005	0.010	0.003	0.008	-0.003	0.001	0.001	0.001
D6	0.005	0.035	0.014	0.027	-0.016	0.001	0.001	0.001
D7	0.005	0.007	0.003	-0.004	-0.005	0.001	0.001	0.001
D8	0.005	0.006	0.000	-0.006	0.000	0.001	0.001	0.001
D10	0.005	0.039	0.000	0.038	0.008	0.001	0.001	0.001
D11	0.005	0.032	0.014	0.028	0.008	0.001	0.001	0.001
D14	0.005	0.025	0.021	0.013	0.000	0.001	0.001	0.001
D15	0.005	0.039	0.000	0.038	0.006	0.001	0.001	0.001
D16	0.005	0.048	-0.011	0.047	-0.002	0.001	0.001	0.001
Error total		**0.007**	**0.004**	**0.005**	**0.003**			

En color negro Punto de apoyo
En color rojo Punto de control

Comprobación gráfica de los productos:

Proyecto 'Restos 3D'

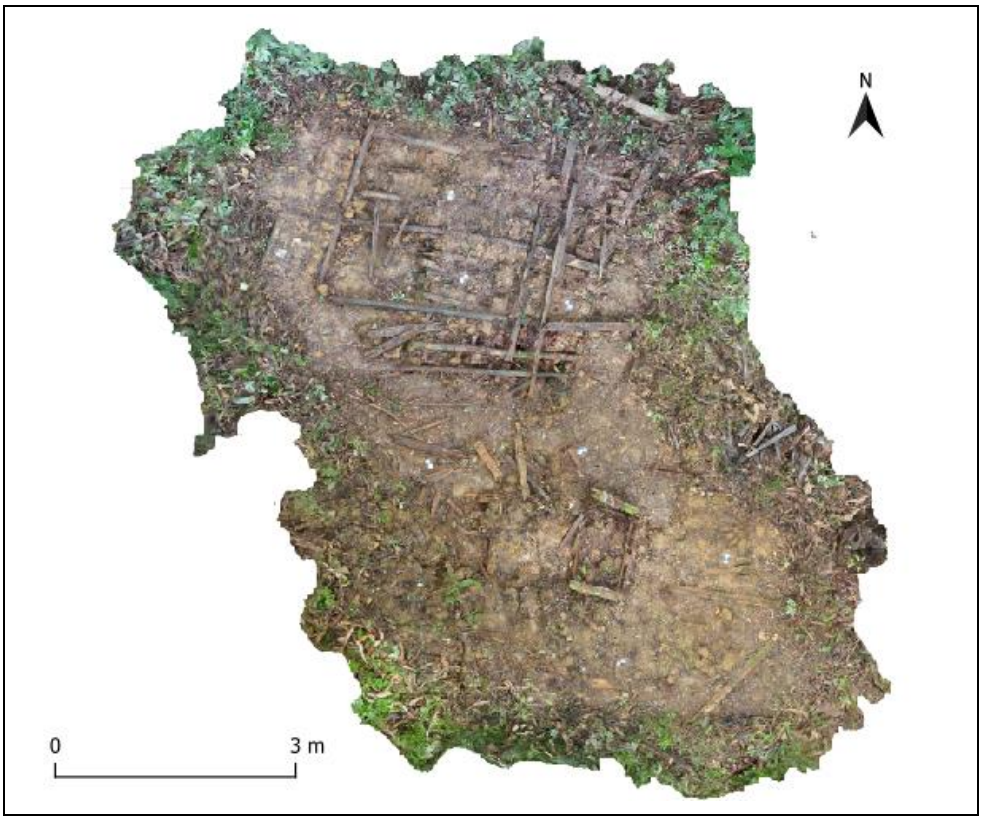


Figura 3.10 *Ortofotografia resultante de 'Restos'*

La forma de verificar visualmente los resultados fotogramétricos, se realizó importando los datos a QGIS versión 3.12 para comparar la calidad de la ortofotografía con los puntos de radiación. Se realizó, una medición rápida del punto 'D25' radiado respecto al centro de la diana y se obtuvo una diferencia planimétrica de 2 cm. Este valor coincide con la calidad de la georreferenciación respecto a la radiación estimada en por software *Photoscan,* consultar Figura 3.11.

Figura 3.11 *Comparación entre ortofotografía de 'restos' y punto el radiado 'D25'*

Proyecto 'casa-3D'

En la figura 3.12 se puede observar las fachadas Norte y Este de la edificación. La conservación de las paredes ha facilitado recrear con detalle el modelo de construcción que se ha empleado y los materiales (listones de madera).

Figura 3.12 *Nube de puntos densa de 'casa'. Fachadas Norte y Este*

En cambio en las fachadas Sur y Oeste, el evidente estado de deterioro ha dificultado la generación de la nube densa. Razón por la cual ha sido necesario realizar una breve limpieza de puntos de ruido generada en el proceso. Consultar Figura 3.13.

Figura 3.13 *Nube de puntos densa de 'casa'. Fachadas Sur y Oeste*

La ortofotografia final, resultado de varios procesos, se verificó con el software AutoCAD comprobando la distancia entre las dianas ‘D2’ y ‘D1’ con una diferencia de londitud de 2 mm entre las coordenadas transformadas por MMCC y la imagen insertada en el programa.

Figura 3.14 *Ortofotografía de la fachada Norte casa de Baltazar Nze Ntutum*

4. Conclusiones

En los test realizados de Barcelona con placa C099-F9P se consiguió obtener un posicionamiento de orden centimétrico en condiciones determinadas: sesiones de observación superiores a una hora, con observaciones en franjas horarias nocturnas y con estaciones de referencia próximas a la zona de observación.

La precisión que se puede lograr depende, aun empleando datos adicionales en el post-proceso como por ejemplo efemérides precisas o calibración de las antenas, de la distancia a la que se encuentren las estaciones de referencia. En los test realizados en Barcelona la diferencia de comportamiento en observaciones nocturnas, de menor actividad ionosférica, fue muy destacada en las observaciones de media y larga distancia.

Las observaciones realizadas en Guinea Ecuatorial dieron unos resultados peores de lo esperado, deducido de su dispersión y del contraste con medidas tomadas con Estación Total entre las bases de georreferenciación.

En un principio, en este proyecto el procesamiento PPP tenía como objetivo actuar como una solución alternativa para ser comparada con el post-procesamiento de y en cambio ha resultado ser la metodología que ha permitido georreferenciar los trabajos topográficos y fotogramétricos con más precisión. Las soluciones obtenidas con este método, mediante el servicio online del CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning), han dado una buena repetitividad i se alinean significativamente con los datos de Estación Total.

Consultando datos de monitorización de la actividad ionosférica correspondiente al día de las observaciones en Guinea se ha observado que existió una gran anomalía en esta zona. Este tipo de modelos de monitorización ionosférica son los que aplican los algoritmos de cálculo de los servicios PPP como el utilizado. Y esto explicaría los buenos resultados obtenidos en la solución PPP y los malos obtenidos en el cálculo de .

Por lo tanto, el empleo de placa C099-F9P para un posicionamiento de precisión, del orden centimétrico, en zonas sin soporte de infrastructura GNSS de referencia, no es fiable a menos que se empleen modelos ionosféricos para las soluciones. Las soluciones PPP son una alternativa para la georreferenciación de trabajos de campo incluso en presencia de gran actividad ionosférica.

No se han realizado las suficientes observaciones GNSS en latitud ecuatorial como para sacar concusiones definitivas, pero es de destacar lo sensible que se ha mostrado esta placa a los errores ionosféricos. Algo que ya se apreciaba en los test de Barcelona y que se ha confirmado en el proyecto de Guinea Ecuatorial. Sería recomendable continuar estudiando este aspecto para poder determinar las prestaciones reales que nos puede ofrecer esta placa.

Respecto a los resultados fotogramétricos, se ha demostrado que es posible documentar elementos arqueológicos o arquitectónicos con cámaras no métricas, como por ejemplo un

smartphone o una cámara reflex de gama baja. Las configuraciones de parámetros de disparo semiautomáticas (AF-S) permiten realizar sesiones fotográficas de una forma muy ágil y es especialmente útil cuando el clima o el tiempo no juegan a favor. Otro factor a tener en cuenta es el coste relativamente bajo de estos dispositivos y su facilidad de transporte.

Por tanto el objetivo de documentar restos arqueológicos, con recursos sencillos, se puede considerar alcanzado. Además, las técnicas fotogramétricas, han permitido retener un instante de la historia de un pequeño asentamiento, un instante que desaparecerá consumido por la naturaleza con el transcurso del tiempo. Más allá de los modelos geométricos obtenidos a partir de una rápida captura en campo, la técnica permite disponer de un registro de detalles, texturas y colores que pueden ser de utilidad en análisis posteriores.

5. Bibliografía

Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M. and Rodriguez Jordana, J. Fotogrametría arquitectónica. Barcelona: Edicions UPC, 2007. ISBN: 8483019205

AGISOFT. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.2* [en línea] 2016. S.l.: Agisoft LLC. [Consulta: 01 septiembre 2022]. Disponible en: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf

U-BLOX 2018., u-blox announces the first high precision GNSS module based on u-blox F9 technology. [en línea]. S.l.: [Consulta: 16 septiembre 2022]. Disponible en: https://www.u-blox.com/en/press-releases/u%E2%80%91blox-announces-first-high-precision-gnss-module-based-u%E2%80%91blox-f9-technology

Chen, B., Gao, C., Liu, Y. and Sun, P. 2019. Real-time Precise Point Positioning with a Xiaomi MI 8 Android Smartphone. *Sensors* [en línea]. Vol. 19, no. 12, pp. 2835. [Consulta: 16 septiembre 2022]. DOI 10.3390/s19122835. Disponible en: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/12/2835.

Robustelli, U., Baiocchi, V. and Pugliano, G. 2019. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. *Electronics* [en línea]. Vol. 8, no. 1, pp. 91. [Consulta: 18 septiembre 2022]. DOI 10.3390/electronics8010091. Disponible en: https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/91/htm.

UNAVCO. 2014. Teqc Tutorial Basics of Teqc Use and Teqc Products. *Unavco.org* [en línea]. [Consulta: 10 septiembre 2022]. Disponible en: https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf

Banville, S. 2020. *CSRS-PPP Version 3: Tutorial* [en línea]. S.l.: Canadian Geodetic Survey, Surveyor General Branch, Natural Resources Canada. [Consulta: 21 septiembre 2022]. Disponible en:https://webapp.csrs-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/sample_doc_filesV3/NRCan%20CSRS-PPP-v3_Tutorial%20EN.pdf

Blackman, J. 2022. Revenues from cellular IoT modules jump 58% – with Quectel, Telit, MeiG dominant. *Enterprise IoT Insights* [en línea]. [Consulta: 13 septiembre 2022]. Disponible en: https://enterpriseiotinsights.com/20220331/nb-iot/revenues-from-cellular-iot-modules-jump-58-with-quectel-telit-meig-dominant.

Altamim, Z. 2018. EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. *Etrs89.ensg.ign.fr* [en línea]. [Consulta: 6 agosto 2022]. Disponible en: http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf.

6. Agradecimientos

En primer lugar agradecer a los directores del proyecto Carlos Gracia y Felipe Buill, por dejarse convencer en participar en esta aventura. Sin su orientación y dedicación constante esto no podría haber comenzado... ni acabado.

En segundo lugar agradecer al Director Nacional de INCOMA (Instituto Nacional para la Conservación del Medo Ambiente de Guinea Ecuatorial), Antonio Micha Ondo Angue por todo el apoyo recibido. Su soporte ha permitido solventar los problemas instrumentales, logísticos, anímicos, etc., durante toda la fase práctica de este proyecto. Así mismo agradezco a todo el equipo de técnicos de la institución por el acogimiento y ánimos ofrecidos.

En tercer lugar las gracias son para el equipo en los trabajos de campo: Clemente Nso, Deogracias Ondo, Baltazar Nze, Jose Antonio Owono, Juan Nsue y por supuesto Gervasio Ntutumu. Gracias por estar ahí y luchar contra las adversidades del bosque para conseguir coordenadas.

Y finalmente, agradecimiento a mi familia, por tanta paciencia, tanta que a veces sin comprender el ‘para qué’ simplemente ha estado ahí.

7. Anejos

7.1 Anejo 1: Tablas de cálculo de coordenadas GNSS

7.1.1 Punto de observación RAVL

Radio-1 (Cercano)								
Instrumento: Topcon Hiper-Pro								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
18/03/2022	17:37 - 19:40 (02:02)	430260.979	4581557.600	34.552	0.001	-0.001	0.000	0.001
19/03/2022	23:58 - 02:33 (2:35)	430260.980	4581557.598	34.553	0.000	0.001	-0.001	0.001
PROMEDIO		**430260.980**	**4581557.599**	**34.553**	**0.000**	**0.001**	**0.000**	**0.001**
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430260.990	4581557.567	34.758	-0.01	0.03	-0.21	0.21
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.993	4581557.576	34.455	-0.01	0.02	0.10	0.10
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.980	4581557.590	34.524	0.00	0.01	0.03	0.03
PROMEDIO		**430260.988**	**4581557.578**	**34.579**	**0.01**	**0.02**	**0.11**	**0.11**
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PPP RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430260.979	4581557.590	34.417	0.001	0.009	0.135	0.14
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.986	4581557.600	34.413	-0.006	-0.001	0.139	0.14
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.983	4581557.598	34.402	-0.003	0.001	0.150	0.15
PROMEDIO		**430260.983**	**4581557.596**	**34.411**	**0.00**	**0.00**	**0.14**	**0.14**

Radio-2 (Intermedio)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
EBRE -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430261.056	4581557.560	34.837	-0.08	0.04	-0.28	0.30
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.930	4581558.081	34.032	0.05	-0.48	0.52	0.71
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.972	4581557.595	34.704	0.01	0.00	-0.15	0.15
PROMEDIO		**430260.986**	**4581557.745**	**34.524**	**0.04**	**0.18**	**0.32**	**0.39**
ESCO -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430261.031	4581557.415	34.373	-0.05	0.18	0.18	0.26
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.996	4581557.593	34.485	-0.02	0.01	0.07	0.07
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.977	4581557.598	34.559	0.00	0.00	-0.01	0.01
PROMEDIO		**430261.001**	**4581557.535**	**34.472**	**0.02**	**0.06**	**0.08**	**0.11**
AJAC -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	Δz	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430260.719	4581557.483	34.358	0.26	0.12	0.19	0.35
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.664	4581557.312	34.488	0.32	0.29	0.06	0.43
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.972	4581557.595	34.704	0.01	0.00	-0.15	0.15
PROMEDIO		**430260.785**	**4581557.463**	**34.517**	**0.19**	**0.14**	**0.14**	**0.31**

Radio-3 (Lejano)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
GOPE -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430260.772	4581556.777	34.201	0.21	0.82	0.35	0.92
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430260.395	4581557.294	35.249	0.58	0.30	-0.70	0.96
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.962	4581557.565	34.519	0.02	0.03	0.03	0.05
PROMEDIO		**430260.710**	**4581557.212**	**34.656**	**0.27**	**0.39**	**0.36**	**0.64**
ORID -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430260.233	4581557.153	35.661	0.75	0.45	-1.11	1.41
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430259.801	4581557.206	34.391	1.18	0.39	0.16	1.25
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430260.569	4581557.636	34.637	0.41	-0.04	-0.08	0.42
PROMEDIO		**430260.201**	**4581557.332**	**34.896**	**0.78**	**0.29**	**0.45**	**1.03**
MAS1 -> RAVL	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
07/04/2021	09:02 - 13:09 (4:07)	430262.047	4581557.829	36.208	-1.07	-0.23	-1.66	1.98
19/06/2021	12:05 - 16:20 (4:14)	430262.949	4581558.592	34.821	-1.97	-0.99	-0.27	2.22
21/08/2021	00:45 - 05:01 (4:16)	430261.546	4581558.072	35.062	-0.57	-0.47	-0.51	0.90
PROMEDIO		**430262.181**	**4581558.164**	**35.364**	**1.20**	**0.57**	**0.81**	**1.70**

7.1.2 Punto de observación BUDE

Radio-1 (Cercano)								
Instrumento: Topcon Hiper-Pro								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> BUDE	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
27/03/2022	09:00 - 10:07 (01:07)	425842.210	4585689.820	357.126				
PROMEDIO		**425842.210**	**4585689.820**	**357.126**				
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx	Δy	Δz	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425842.220	4585689.813	356.987	-0.01	0.01	0.14	0.14
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425842.278	4585689.824	356.869	-0.07	0.00	0.26	0.27
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.217	4585689.821	357.040	-0.01	0.00	0.09	0.09
PROMEDIO		**425842.238**	**4585689.819**	**356.965**	**0.03**	**0.00**	**0.16**	**0.164**
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PPP BUDE	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425842.240	4585689.842	356.909	-0.03	-0.02	0.22	0.22
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425842.248	4585689.825	356.941	-0.04	0.00	0.19	0.19
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.238	4585689.807	356.955	-0.03	0.01	0.17	0.17
PROMEDIO		**425842.242**	**4585689.825**	**356.935**	**0.03**	**0.01**	**0.19**	**0.19**

Radio-2 (Intermedio)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
EBRE -> BUDE	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425842.528	4585689.864	357.083	-0.32	-0.04	0.04	0.32
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425842.135	4585690.197	356.969	0.08	-0.38	0.16	0.42
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.223	4585689.827	357.009	-0.01	-0.01	0.12	0.12
PROMEDIO		**425842.295**	**4585689.963**	**357.020**	**0.14**	**0.14**	**0.11**	**0.29**
ESCO -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425842.573	4585689.894	357.124	-0.36	-0.07	0.00	0.37
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425841.967	4585690.056	357.338	0.24	-0.24	-0.21	0.40
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.219	4585689.823	357.013	-0.01	0.00	0.11	0.11
PROMEDIO		**425842.253**	**4585689.924**	**357.158**	**0.20**	**0.10**	**0.11**	**0.29**
AJAC -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425841.975	4585689.780	356.505	0.24	0.04	0.62	0.67
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425841.697	4585689.798	356.697	0.51	0.02	0.43	0.67
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.225	4585689.802	357.171	-0.01	0.02	-0.05	0.05
PROMEDIO		**425841.966**	**4585689.793**	**356.791**	**0.25**	**0.03**	**0.36**	**0.46**

En color rojo son soluciones flotantes

Radio-3 (Lejano)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
GOPE -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425841.897	4585689.276	356.839	0.31	0.54	0.29	0.69
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425840.844	4585690.521	356.743	1.37	-0.70	0.38	1.58
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.289	4585689.759	357.192	-0.08	0.06	-0.07	0.12
PROMEDIO		**425841.677**	**4585689.852**	**356.925**	**0.59**	**0.44**	**0.25**	**0.80**
MAS1 -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425844.667	4585687.094	348.048	-2.46	2.73	9.08	9.79
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425843.470	4585690.340	356.027	-1.26	-0.52	1.10	1.75
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425843.614	4585690.188	357.594	-1.40	-0.37	-0.47	1.53
PROMEDIO		**425843.917**	**4585689.207**	**353.890**	**1.71**	**1.20**	**3.55**	**4.36**
ORID -> BUDE	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
01/04/2021	14:00 - 18:00 (3:32)	425841.299	4585689.791	357.209	0.91	0.03	-0.08	0.92
29/04/2021	08:00 - 12:00 (3:37)	425840.283	4585690.569	356.466	1.93	-0.75	0.66	2.17
28/05/2021	21:00 - 01:00 (3:27)	425842.044	4585689.887	358.176	0.17	-0.07	-1.05	1.07
PROMEDIO		**425841.209**	**4585690.082**	**357.284**	**1.00**	**0.28**	**0.60**	**1.38**

7.1.3 Punto de observación SCUG

Radio-1 (Cercano)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P (Promedio post-proceso)								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> SCUG	Horas	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
PROMEDIO		**421804.063**	**4591993.012**	**187.444**				
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PLAN -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421804.071	4591993.021	187.440	-0.01	-0.01	0.00	0.01
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421804.061	4591993.010	187.456	0.00	0.00	-0.01	0.01
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421804.058	4591993.006	187.435	0.01	0.01	0.01	0.01
PROMEDIO		**421804.063**	**4591993.012**	**187.444**	**0.01**	**0.01**	**0.01**	**0.01**
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
PPP -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421804.057	4591993.025	187.474	0.01	-0.01	-0.03	0.03
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421804.055	4591993.026	187.430	0.01	-0.01	0.01	0.02
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421804.072	4591993.018	187.479	-0.01	-0.01	-0.04	0.04
PROMEDIO		**421804.061**	**4591993.023**	**187.461**	**0.01**	**0.01**	**0.03**	**0.03**

Radio-2 (Cercano)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
EBRE -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421804.336	4591993.204	188.068	-0.27	-0.19	-0.62	0.71
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421804.074	4591993.021	187.457	-0.01	-0.01	-0.01	0.02
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421804.086	4591993.032	187.338	-0.02	-0.02	0.11	0.11
PROMEDIO		**421804.165**	**4591993.086**	**187.621**	**0.10**	**0.07**	**0.25**	**0.28**
ESCO -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421804.126	4591992.724	187.324	-0.06	0.29	0.12	0.32
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421804.065	4591993.020	187.395	0.00	-0.01	0.05	0.05
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421804.072	4591993.012	187.401	-0.01	0.00	0.04	0.04
PROMEDIO		**421804.088**	**4591992.919**	**187.373**	**0.02**	**0.10**	**0.07**	**0.14**
AJAC -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421802.596	4591992.199	183.170	1.47	0.81	4.27	4.59
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421804.055	4591993.026	187.518	0.01	-0.01	-0.07	0.08
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421803.561	4591992.906	188.255	0.50	0.11	-0.81	0.96
PROMEDIO		**421803.404**	**4591992.710**	**186.314**	**0.66**	**0.31**	**1.72**	**1.88**

Radio-3 (Lejano)								
Instrumento: U-BLOX C099-F9P								
SRC: WGS84, Proyección UTM Huso 31 N. Altura ortométrica, Ref. EGM2008								
GOPE -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421802.336	4591992.371	187.961	1.00	0.09	-0.03	1.00
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421803.999	4591992.977	187.459	-0.66	-0.51	0.47	0.96
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421803.668	4591992.041	188.367	-0.33	0.42	-0.44	0.69
PROMEDIO		**421803.334**	**4591992.463**	**187.929**	**0.67**	**0.34**	**0.31**	**0.89**
MAS1 -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421805.759	4591994.368	186.860	-0.41	-0.53	0.09	0.68
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421805.793	4591993.838	186.071	-0.45	0.00	0.88	0.99
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421804.489	4591993.308	187.919	0.86	0.53	-0.97	1.40
PROMEDIO		**421805.347**	**4591993.838**	**186.950**	**0.57**	**0.35**	**0.65**	**1.02**
ORID -> SCUG	Hora	X (m)	Y (m)	H (m)	Δx (m)	Δy (m)	ΔH (m)	Δ 3D (m)
13/03/2021	11:00 - 15:00 (3:02)	421802.125	4591991.885	186.564	0.70	0.49	0.96	1.29
05/04/2021	14:00 - 19:00 (3:30)	421802.870	4591992.464	187.565	-0.04	-0.08	-0.04	0.10
24/04/2021	21:00 - 02:00 (3:54)	421803.484	4591992.790	188.442	-0.66	-0.41	-0.92	1.20
PROMEDIO		**421802.826**	**4591992.380**	**187.524**	**0.47**	**0.33**	**0.64**	**0.86**

7.2 Anejo 2: Resultado de ajuste de poligonal y altimetría por MMCC

	Comprobacion-1				Comprobacion-2							
	Coordenadas UTM aproximadas		Coordenadas UTM corregidas		Tramo	Acimut Dir.Ccorregido	Distancia UTM	Coord. Parciales Corregidas		Coord. UTM Corregidas		
	X	Y	X	Y				x'	y'	X	Y	
B1	**707019.402**	**138273.856**	**707019.402**	**138273.856**						**707050.548**	**138390.531**	**B2**
B2	**707050.548**	**138390.531**	**707050.548**	**138390.531**	B2-E1	5.5765	89.417	7.822	89.074	707058.370	138479.605	E1
E1	707058.365	138479.605	707058.370	138479.605	E1-E2	305.8741	143.342	-142.732	13.207	706915.638	138492.812	E2
E2	706915.630	138492.789	706915.638	138492.812	E2-E3	319.1470	67.348	-64.324	19.952	706851.314	138512.764	E3
E3	706851.301	138512.725	706851.314	138512.764	E3-E4	294.5893	38.089	-37.951	-3.233	706813.3625	138509.5304	E4
E4	706813.352	138509.475	706813.362	138509.530	E4-E5	296.7435	22.326	-22.297	-1.142	706791.066	138508.389	E5
E5	706791.056	138508.315	706791.066	138508.389	E5-E6	262.8521	46.080	-38.455	-25.388	706752.611	138483.001	E6
E6	706752.627	138482.888	706752.611	138483.001	E6-E7	277.0230	103.756	-97.071	-36.640	706655.540	138446.361	E7
E7	706655.593	138446.150	706655.540	138446.361	E7-E8	244.6289	23.938	-15.440	-18.293	706640.100	138428.067	E8
E8	706640.164	138427.847	706640.100	138428.067	E8-E9	154.9360	59.005	38.366	-44.829	706678.466	138383.238	E9
E9	706678.531	138383.019	706678.466	138383.238	E9-E10	106.2322	73.737	73.384	-7.207	706751.850	138376.031	E10
E10	706751.914	138375.805	706751.850	138376.031	E10-E11	108.1295	55.077	54.629	-7.014	706806.479	138369.017	E11
E11	706806.542	138368.784	706806.479	138369.017	E11-E12	111.6225	58.518	57.546	-10.624	706864.024	138358.393	E12
E12	706864.086	138358.151	706864.024	138358.393	E12-E13	52.9131	62.774	46.372	42.311	706910.396	138400.704	E13
E13	706910.462	138400.458	706910.396	138400.704	E13-E14	137.3264	85.338	71.085	-47.217	706981.481	138353.486	E14
E14	706981.547	138353.242	706981.481	138353.486	E14-B1	171.7167	88.198	37.908	-79.636	**707019.389**	**138273.850**	**B1'**
										707019.402	**138273.856**	**B1**

0.013	0.005
Error X (m)	**Error Y (m)**

Error asociado con fiabilidad del 95%		
0.04	**±σ dxE1**	m
0.01	**±σ dyE1**	m
0.05	**±σ dxE2**	m
0.10	**±σ dyE2**	m
0.06	**±σ dxE3**	m
0.14	**±σ dyE3**	m
0.06	**±σ dxE4**	m
0.17	**±σ dyE4**	m
0.06	**±σ dxE5**	m
0.19	**±σ dyE5**	m
0.06	**±σ dxE6**	m
0.19	**±σ dyE6**	m
0.07	**±σ dxE7**	m
0.20	**±σ dyE7**	m
0.06	**±σ dxE8**	m
0.21	**±σ dyE8**	m
0.06	**±σ dxE9**	m
0.19	**±σ dyE9**	m
0.06	**±σ dxE10**	m
0.16	**±σ dyE10**	m
0.06	**±σ dxE11**	m
0.13	**±σ dyE11**	m
0.06	**±σ dxE12**	m
0.09	**±σ dyE12**	m
0.06	**±σ dxE13**	m
0.06	**±σ dyE13**	m
0.04	**±σ dxE14**	m
0.02	**±σ dyE14**	m
405.44	**±σ dΣE1**	cc
476.30	**±σ dΣE2**	cc
704.65	**±σ dΣE3**	cc
1039.93	**±σ dΣE4**	cc
816.75	**±σ dΣE5**	cc
541.19	**±σ dΣE6**	cc
561.84	**±σ dΣE7**	cc
781.76	**±σ dΣE8**	cc
682.64	**±σ dΣE9**	cc
671.76	**±σ dΣE10**	cc
674.70	**±σ dΣE11**	cc
658.76	**±σ dΣE12**	cc
551.29	**±σ dΣE13**	cc
404.85	**±σ dΣE14**	cc

	Cota (m)		Error Asociado (m)
E1	682.045	±	0.001
E2	692.658	±	0.001
E3	695.935	±	0.001
E4	697.387	±	0.002
E5	698.831	±	0.002
E6	702.655	±	0.002
E7	704.993	±	0.002
E8	705.225	±	0.002
E9	701.280	±	0.002
E10	699.462	±	0.002
E11	696.649	±	0.002
E12	693.415	±	0.002
E13	693.894	±	0.001
E14	689.364	±	0.001
B1'	683.325	±	0.001