

UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

EVALUACIÓN DE DISTINTAS SOLUCIONES DE POSICIONAMIENTO GNSS EN TIEMPO REAL CON RECEPTORES DE BAJO COSTE

Alumno: Rubén Moreno Guerrero

Tutor: M^a Clara de Lacy Pérez de los Cobos y
María Selmira Garrido Carretero

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogramétrica

Septiembre, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Doña M^a Clara de Lacy Perez de los Cobos y Doña María Selmira Garrido Carretero, tutoras del Trabajo Fin de Grado titulado: “Evaluación de distintas soluciones de posicionamiento GNSS en tiempo real con receptores de bajo coste”, que presenta Rubén Moreno Guerrero, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2018

El alumno:

Las tutoras:

Rubén Moreno Guerrero

M^a Clara de Lacy Pérez de los Cobos

María Selmira Garrido Carretero

Índice

1. Introducción.....	10
2. Sistemas GNSS	12
2.1. Introducción	12
2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	12
2.3. El Sistema GLONASS.....	14
2.4. El Sistema GALILEO.....	18
2.5. El Sistema COMPASS/BEIDOU.....	19
2.6. SBAS	20
3. Posicionamiento GNSS.....	22
3.1. Observación de código o pseudodistancia.	23
3.2. Observación fase.	25
3.3. Posicionamiento absoluto.....	29
3.3.1. Posicionamiento absoluto con observación de código.....	29
3.3.2. Posicionamiento absoluto con observaciones de fase.....	30
3.4. Posicionamiento relativo.	30
3.4.1. Método estático.....	33
3.4.2. Método cinemático.	33
3.5. Posicionamiento diferencial.....	34
3.5.1. Posicionamiento diferencial con observación de códigos.	34
3.5.2. Posicionamiento diferencial con observación de fase.....	36
3.5.3. Formato de transmisión RTCM.	38
3.6. Redes de Estaciones de Referencia Permanentes.....	40
3.6.1. RAP: Red Andaluza de Posicionamiento.....	41
4. Receptores GNSS.....	44
4.1. Receptores GNSS geodésicos.....	45
4.1.1. Antena.	46
4.1.2. Software para post-proceso (Infinity).....	46
4.2. Receptores GNSS de bajo coste.....	48
4.2.1. Antenas.....	51
4.2.1.1. Antena GPS.....	51
4.2.1.2. Antena UHF.....	51
4.2.2. Receptores.....	52
4.2.3. Módulo de adquisición y seguimiento.....	55
4.2.4. Software (u-Center).....	56

5. Metodología para la evaluación del posicionamiento GNSS con receptores de bajo coste.....	60
5.1. Calidad del equipo de medida. Norma ISO 17123-8.....	62
5.1.1. Método simplificado	65
5.1.2. Método completo.....	67
5.2. Calidad del posicionamiento RTK.....	73
5.2.1. Parámetros de calidad del posicionamiento RTK	73
5.2.2. Definición de puntos de control.	74
5.2.2.1. Preselección y prueba de alcance de la radio.....	74
5.2.2.2. Selección de puntos de control (líneas base corta y media)	76
6. Resultados del posicionamiento GNSS RTK con receptores de bajo coste.....	79
6.1. Calidad del equipo de medida.	79
6.1.1. Método simplificado.	83
6.1.2. Método completo.....	85
6.2. Calidad del posicionamiento RTK.....	94
6.2.1. Soluciones estáticas sin resolución independiente de ambigüedades.....	94
6.2.2. Soluciones estáticas con resolución independiente de ambigüedades.....	97
6.2.2.1. Línea base corta.....	98
6.2.2.2. Línea base media.	103
7. Conclusiones.....	108
8. Bibliografía	110

Listado de Figuras

Figura 2.1: Generaciones de satélites GLONASS	16
Figura 2.2: Representación de los principales sistemas SBAS	21
Figura 3.1: representación de la señal GPS	23
Figura 3.2: representación de salto de ciclo	26
Figura 3.3: Simple diferencia	31
Figura 3.4: Doble diferencia	32
Figura 3.5: Despliegue territorial de las 22 antenas de la Red Andaluza de Posicionamiento	42
Figura 4.1: Ejemplo de un Receptor GNSS geodésico	44
Figura 4.2: Receptor GS10	45
Figura 4.3: Antena GNSS Leica Viva AS10	46
Figura 4.4: Interface general del Leica Infinity	47
Figura 4.5: Receptores uBlox C94-M8P	48
Figura 4.6: Placa base uBlox C94-M8P	49
Figura 4.7: uBlox C94-M8P con PC	50
Figura 4.8: Mensajes RTCM	51
Figura 4.9: Configuración puerto de Base	53
Figura 4.10: Configuración puerto de Rover	53
Figura 4.11: Configuración TMODE3 de Base	54
Figura 4.12: Configuración TMODE3 de Rover	54
Figura 4.13: Espacio de trabajo u-center	56
Figura 4.14: Barra de herramientas de comunicación	57
Figura 4.15: Lista de puertos COM disponibles.	55
Figura 4.16: Información satelital	55
Figura 4.17: Formato de trabajo.....	56
Figura 4.18: uBlox Base con batería externa	57
Figura 5.1: Representación puntos ISO	63
Figura 5.2: Mensajes RTCM recibidos en punto Castillo	75
Figura 5.3: Punto Depósito	76

Figura 5.4: Representación de puntos P1, P2, Depósito y Vértice UJAE de la RAP	77
Figura 6.1: Antena de la RAP UJAE	81
Figura 6.2 Punto UJAC	82
Figura 6.3: Punto UJAC con uBlox C94-M8P	83
Figura 6.4: Punto P1 con uBlox Rover	84
Figura 6.5: Pilar 2, uBlox de referencia	95
Figura 6.6: Representacion de valores de X estado FIXED	96
Figura 6.7: Representacion de valores de X sin estado	96
Figura 6.8: Campaña deposito, uBlox	97
Figura 6.9: Diferencias en planimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)	101
Figura 6.10: Diferencias en altimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)	101
Figura 6.11: Diferencias en planimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso) ...	106
Figura 6.12: Diferencias en altimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)	106

Listado de Tablas

Tabla 2.1: Especificaciones de las distintas generaciones de satélites GLONASS.	17
Tabla 5.1: Resumen secuencia de mediciones	65
Tabla 5.2: Resumen pruebas para alcance de radio	75
Tabla 5.3: Coordenadas estimadas de P1, P2 y Depósito	78
Tabla 6.1: Mediciones método simplificado	83
Tabla 6.2: Mediciones método completo muestra A	87
Tabla 6.3: Mediciones método completo muestra B	88
Tabla 6.4: Resolución método completo muestra A	89
Tabla 6.5: Resolución método completo muestra B	90
Tabla 6.6: Resultados test estadísticos	92
Tabla 6.7: Resultados incertidumbres	92
Tabla 6.8: Medición primera sesión línea corta	98
Tabla 6.9: Medición segunda sesión línea corta	99

Tabla 6.10: Medición tercera sesión línea corta	100
Tabla 6.11: Medición primera sesión línea media	103
Tabla 6.12: Medición segunda sesión línea media	105
Tabla 6.13: Medición tercera sesión línea media	105

1. Introducción

Este proyecto trata sobre el análisis de los receptores GNSS de bajo coste y comparativa con los receptores de alto coste que actualmente se utilizan en los trabajos de ingeniería y topografía.

A pesar de que generalmente se utilizan receptores GNSS de altas precisiones para lograr resultados precisos, en los últimos tiempos, existe un interés creciente en el uso de receptores de bajo costo por las prestaciones y calidades que estos pueden llegar a lograr.

Por esto se realizará el estudio de los procedimientos, precisiones, alcance y características de los receptores de bajo coste para determinación de los trabajos que se pueden realizar con este tipo de receptores. Para incrementar la precisión de posicionamiento de este tipo de dispositivos se requiere dar un paso más allá en la geodesia, ingresando en campos vecinos como la informática y la geomática.

Todos los procesos de medición están influenciados por errores aleatorios y sistemáticos por lo que la evaluación de la precisión y exactitud es una tarea crítica para lograr resultados que cumplan con las especificaciones de un proyecto determinado. Para esta evaluación se creó la norma ISO 17123-8 para sistemas de medición de campo GNSS en RTK que se introdujo en 2007 y se actualizó en 2015.

En este proyecto, se aplica el estándar ISO 17123-8 para evaluar el rendimiento RTK del receptor de bajo costo uBlox C94-M8P y poder comparar este tipo de receptores de bajo costo con los receptores geodésicos que se utilizan actualmente.

El trabajo está organizado en 8 capítulos en los que se estructuran de la siguiente manera:

- El presente capítulo de introducción, donde se marcan las directrices del proyecto y objetivos que se pretenden.

- En el segundo capítulo se habla sobre la historia y fundamentos teóricos de los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) los cuales son indispensables para poder definir y determinar unas coordenadas.

- En el capítulo tres nos centraremos en hablar de los tipos de posicionamiento que se puede realizar y sus diferentes clasificaciones ya sea por el tipo de dato que registra el receptor o por el número de receptores utilizados para la medición entre otros.

- Después de hablar de los sistemas y sus posicionamientos, en el capítulo 4 nos centraremos en los receptores en sí, hablando tanto de los receptores geodésicos como de los receptores de bajo coste.

- En el capítulo 5 haremos un estudio de toda la teoría necesaria para el tratamiento de la calidad de las medidas gracias a la ISO 17123-8 la cual especifica los procedimientos de campo que se deben adoptar al determinar y evaluar la precisión y exactitud de los sistemas de medición de campo GNSS de los receptores de bajo coste.

- Ya vista toda la teoría y metodología necesaria para el estudio de la calidad de las medidas, en el capítulo 6 se muestran todos los resultados de las diferentes pruebas a las que se han sometidos los receptores para determinación de su calidad de medida.

- Para terminar se presentan las conclusiones en el capítulo 7 de todos los valores obtenidos así como un análisis de los receptores de bajo coste identificando diversas aplicaciones potenciales de este tipo de receptores que podrían resultar competitivos frente a otros receptores geodésicos bastante más costosos.

- El capítulo 8 muestra la bibliografía empleada para la realización de este proyecto.

2. Sistemas GNSS

2.1. Introducción

Para hablar de sistemas GNSS debemos definir el término GNSS (Global Navigation Satellite System). Se denomina así, de forma genérica a los Sistemas de Navegación por Satélites que proporcionan un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independientemente de las condiciones atmosféricas, de forma continua en cualquier lugar de la Tierra y permite proporcionar posición de un objeto o persona.

Dependiendo del tipo de receptor que utilicemos y la forma de trabajar podemos obtener precisiones que pueden oscilar desde varios metros hasta incluso milímetros.

El primer sistema operativo fue el sistema GPS, gestionado por el ejército de los Estados Unidos por ello, a pesar de desarrollarse otros sistemas, en la cultura social es un término tan extendido que se confunde con el término GNSS, que engloba además del GPS a otros sistemas de navegación por satélite como son GLONASS, GALILEO, BEIDOU...

2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de 32 satélites y utiliza trilateración.

En la década de 1960, el sistema de navegación terrestre OMEGA, basado en la comparación de fase de las señales emitidas a partir de pares de estaciones terrestres, se convirtió en el primer sistema mundial de radio de navegación. Las limitaciones de estos sistemas impulsaron la necesidad de una solución de navegación más universal con más precisión.

La armada estadounidense aplicó esta tecnología de navegación utilizando satélites para proveer a sus flotas posiciones actualizadas y precisas. El sistema debía cumplir los requisitos de globalidad, abarcando toda la superficie del globo lo que llevó a producir diferentes experimentos como el Timation y el sistema 621B en desiertos simulando diferentes comportamientos.

Así surgió el sistema TRANSIT, que quedó operativo en 1964, y hacia 1967 estuvo disponible, además, para uso comercial militar. TRANSIT estaba constituido por una constelación de seis satélites en órbita polar baja, a una altura de 1074 km. Tal configuración conseguía una cobertura mundial pero no constante. La posibilidad de posicionarse era intermitente, pudiéndose acceder a los satélites cada 1,5 horas. El cálculo de la posición requería estar siguiendo al satélite durante quince minutos continuamente.

En 1967, la U.S. Navy desarrolló el satélite Timation, que demostró la viabilidad de llevar a bordo relojes precisos, una tecnología requerida por el GPS.

Posteriormente, en esa misma década y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, portando cada uno de ellos uno de estos relojes y estando todos sincronizados con una referencia de tiempo determinado.

En 1973 se combinaron los programas de la Armada y de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (este último consistente en una técnica de transmisión codificada que proveía datos precisos usando una señal modulada con un código de PRN (Pseudo-Random Noise: ruido pseudoaleatorio), en lo que se conoció como Navigation Technology Program (programa de tecnología de navegación), posteriormente renombrado NAVSTAR GPS.

Entre 1978 y 1985 se desarrollaron y lanzaron once satélites prototipo experimentales NAVSTAR, a los que siguieron otras generaciones de satélites, hasta completar la constelación actual, a la que se declaró con «capacidad operacional inicial» en diciembre de 1993 y con «capacidad operacional total» y utilidad civil en abril de 1995.

En 2009, el gobierno de los Estados Unidos ofreció el servicio normalizado de determinación de la posición para apoyar las necesidades de la OACI (International Civil Aviation Organization), y ésta aceptó el ofrecimiento.

La constelación GPS consiste en 24 satélites en órbitas circulares de 12 horas a una altitud de 20.200 kilómetros sobre la superficie terrestre y una inclinación de 55 grados sobre el ecuador. En la constelación nominal, cuatro satélites están interlineados en cada uno de los seis planos orbitales. La constelación fue seleccionada para provocar una alta probabilidad de cobertura satelital.

2.3. El Sistema GLONASS

GLONASS es un sistema de posicionamiento satelital de características en la práctica muy similares a GPS.

GLONASS (Russian Global Orbiting Navigation Satellite System) fue desarrollado paralelamente al GPS. El sistema es manejado por las Fuerzas Militares Rusas, teniendo importantes aplicaciones civiles.

Las pruebas de vuelo de GLONASS se iniciaron en octubre de 1982 con el lanzamiento del satélite "Kosmos-1413". El sistema GLONASS se declaró formalmente operativo en 1993. En 1995 se llevó a una constelación completamente operativa (24 satélites GLONASS de la primera generación). Una gran desventaja que debería haberse centrado en consistió en la falta de equipos de navegación civil y usuarios civiles.

La reducción de los fondos para la industria espacial en 1990 condujo a la degradación de la constelación GLONASS. En 2002, la constelación GLONASS consistía en 7 satélites que eran insuficientes para el apoyo de navegación del territorio ruso incluso con disponibilidad limitada. GLONASS estaba detrás del GPS en cuanto a las características de precisión, la vida útil activa de SV comprendía 3-4 años.

Las cosas mejoraron cuando el programa federal "Sistema de navegación global para 2002-2011" fue adoptado y lanzado en 2002.

A lo largo de este programa federal se lograron los siguientes resultados:

- El sistema GLONASS fue preservado, modernizado y comenzó a funcionar con satélites "GLONASS-K".
- Se modernizó el segmento de control terrestre que junto con la constelación orbital garantiza las características de precisión a un nivel acorde con los del GPS.
- Se modernizaron el Estándar Estatal de instalaciones de tiempo y frecuencia y las facilidades de definición de parámetros de rotación de la Tierra.

Hoy en día existe una gama cada vez más amplia de aplicaciones de tecnologías GNSS. Para cumplir con los requisitos del usuario, es necesario seguir mejorando el sistema GLONASS y el equipo de navegación del usuario. En primer lugar, se aplica a trabajos de alta precisión donde es necesaria una precisión en tiempo real a un nivel de un decímetro y un centímetro. También se refiere a las aplicaciones que se ocupan de la seguridad operacional por transporte aéreo, marítimo y terrestre. Se necesita una mayor eficiencia operativa de las soluciones de navegación y resistencia a interferencias GLONASS. Hay un número significativo de aplicaciones para profesionales y civiles donde el tamaño pequeño y la alta sensibilidad del equipo de recepción de navegación es crucial.

Para resolver nuevas tareas en nuevas condiciones de acuerdo con el Decreto Gubernamental # 189 del 3 de marzo de 2012 en 2012, se lanzó el nuevo programa federal "Mantenimiento, desarrollo y uso de GLONASS para 2012-2020".(Carlos Duarte Muñoz, 2016)

El nuevo programa federal considera lo siguiente:

- Soporte GLONASS con prestaciones garantizadas en un nivel competitivo.
- El desarrollo de GLONASS hacia la mejora de la capacidad destinada a lograr la paridad con los sistemas internacionales de navegación por satélite y el liderazgo de la Federación de Rusia en la navegación por satélite.

- GLONASS utiliza tanto en el territorio de la Federación de Rusia como en el extranjero

El nivel de mejora de la capacidad GLONASS está determinado por un rango de direcciones de desarrollo, las principales de las cuales son las siguientes:

- Desarrollo de la estructura de constelación orbital GLONASS
- Transición para usar los satélites de navegación de la nueva generación "GLONASS-K" con capacidades mejoradas
- Desarrollo del segmento de control de tierra GLONASS que incluye la mejora del segmento de reloj y órbita GLONASS
- Diseño y desarrollo de aumentos:
 - o El Sistema de Corrección y Monitoreo Diferencial
 - o Sistema global de definición de alta precisión de información de navegación y órbita y reloj en tiempo real para usuarios civiles

El desarrollo del sistema GLONASS en beneficio de los crecientes requisitos de los usuarios y la competitividad del sistema está determinado principalmente por las capacidades del segmento espacial GLONASS. Las mejoras de capacidad a través de las generaciones de satélites GLONASS se enumeran en la tabla a continuación.

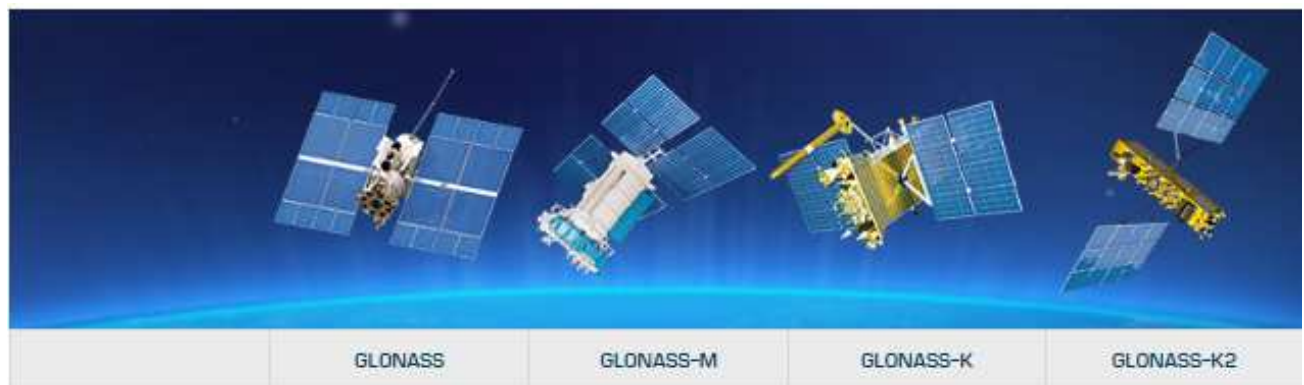


Figura 2.1: Generaciones de satélites GLONASS

	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K	GLONASS-K2
Tiempo de implementación:	1982-2005	2003-2016	2011-2018	2017 - actualidad
Estado:	Desarmado	En uso	Periodo de validación de orbita	En desarrollo
Número de satélites usados para la navegación :	24			
Parámetros orbitales:	Circular Altitud-19.100Km Inclinación - 64.8° Periodo - 11h 15min 44sec			
Número de planos orbitales:	3			
Número de satélites en cada plano:	8			
Peso en km:	1500	1415	935	1600

Tabla 2.1: Especificaciones de las distintas generaciones de satélites GLONASS

A diferencia del GPS y del Galileo, en el que cada satélite se identifica a través de un código PRN (Pseudo Random Noise) distinto transmitido en una misma frecuencia portadora, los satélites GLONASS transmiten el mismo código PRN en diferentes frecuencias portadoras. Es decir, a cada satélite se le asigna una frecuencia distinta en lo que se conoce como multicanalización por división en frecuencia o FDMA por sus siglas en inglés. Las señales se transmiten en dos bandas: L1 y L2. Las frecuencias portadoras para cada satélite están dadas por:

- Banda L1: $f_1 = (1.602 + 9k/16)$ GHz
- Banda L2: $f_2 = (1.246 + 7k/16)$ GHz

Donde $k = 0, 1, 2, \dots, 23$ es el número del satélite.

Debido a que GLONASS requiere bandas más amplias de espectro radioeléctrico que el GPS, ha habido presión por grupos de radioastrónomos por limitar su espectro. Esto derivó en que a finales de 1990, Rusia se comprometió a hacer que sus satélites transmitieran una misma frecuencia cuando se encontraban en lados opuestos de la tierra. Esta estrategia "antípoda" asegura que los receptores GLONASS no tengan conflicto con señales en la misma frecuencia, al mismo tiempo que se reduce el ancho de banda que se requiere para su operación (*Carlos Duarte Muñoz, 2016*)

2.4. El Sistema GALILEO

Galileo es un sistema de navegación global por satélite (GNSS) que actualmente construye la Unión Europea (UE) a través de la Agencia Espacial Europea (ESA). El proyecto se llama así en honor al astrónomo italiano Galileo Galilei.

Como todos los sistemas GNSS, el Galileo funciona bajo el principio de trilateración, el cual se basa en el conocimiento las posiciones de al menos cuatro satélites y sus distancias al receptor. Las distancias a los satélites se estiman a partir de tiempo que tardan las señales en llegar al receptor, suponiendo que se desplazan a la velocidad de la luz y las posiciones de los satélites se reciben en un mensaje de navegación.

El desarrollo del sistema Galileo se debe al interés de las naciones europeas de contar con un sistema de navegación independiente de los sistemas de posicionamiento y navegación por satélites en operación actual como el GPS de Estados Unidos y el GLONASS de Rusia, ya que éstos podrían ser desactivados en tiempos de conflictos militares.

El sistema está destinado principalmente para uso civil, a diferencia de la orientación más militar de los sistemas de Estados Unidos y Rusia. Los Estados Unidos se reservan el derecho de limitar la intensidad de la señal o la precisión del GPS, o de apagar el acceso público al GPS completamente, de modo que sólo los militares de Estados Unidos y sus aliados puedan utilizar el sistema en caso de conflicto.

Una vez completo, el Galileo constará de 30 satélites (27 en operación y 3 repuestos). Cada satélite contará con una carga útil de posicionamiento y un transpondedor de comunicaciones para operaciones de Búsqueda y Rescate. Los satélites estarán situados en órbitas inclinadas alrededor de 3 planos orbitales con una inclinación de 56° respecto al ecuador y orbitarán a una altitud de 23,222 kilómetros, con un período orbital de 14 horas 4 minutos.

Los satélites tienen una masa de 675 Kg y una vida útil mayor de 12 años. Sus dimensiones son 2.7 m × 1.2 m × 1.1 m durante el lanzamiento y una vez desplegados los paneles solares alcanzan una envergadura de 18.7 m. (*Carlos Duarte Muñoz, 2018*)

2.5. El Sistema COMPASS/BEIDOU

Beidou es un proyecto desarrollado por la República Popular de China para obtener un sistema de navegación por satélites. "Beidou" es el nombre chino para la constelación de la Osa Mayor. La primera generación, BeiDou-1, ya está operativa desde el 2000 y es un sistema de posicionamiento por satélites local dando servicio a China y a sus países vecinos. La segunda generación Beidou-2, también llamada Compass o Compass/BeiDou, es un sistema de posicionamiento global con un funcionamiento similar al GPS el cual está en construcción desde 2005.

Según informaciones oficiales ofrecerá dos tipos de servicios: el primero será abierto y podrá dar una posición con un margen de 10 metros de distancia, 0,2 metros por segundo de velocidad y 0,000005 segundos de tiempo. El segundo servicio será autorizado solo para determinados clientes y ofrecerá servicios más precisos y con mayores medidas de seguridad.

El sistema BeiDou-1 fue diseñado para operar solamente con satélites geoestacionarios con cobertura regional. La segunda versión del sistema de posicionamiento chino contempla una cobertura global alcanzada mediante 35 satélites, de los cuales 27 se encontrarán en una órbita media (MEO), cinco en órbita geoestacionaria (GEO) y tres en órbita geosincrónica inclinada (IGSO). La constelación se encontrará completa para el año 2020.

Este satélite fue construido por la Academia China de Tecnología Espacial (CAST) utilizando la plataforma DFH-3B de 3.800 kilogramos de peso y una vida útil estimada de 8 años. (*LATAM SATELITAL, 2016*)

2.6. SBAS

Los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites (SBAS por sus siglas en inglés) son sistemas que proporcionan correcciones a las señales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) para mejorar la estimación en el cálculo de la posición geográfica, además de que ofrecen mayor integridad y disponibilidad de las señales de navegación, con lo que garantizan su empleo en aplicaciones críticas como la navegación aérea, en donde no se pueden permitir interrupciones en el servicio.

Los sistemas SBAS cuentan por lo menos con dos satélites geoestacionarios y una red de estaciones de seguimiento.

Las estaciones de seguimiento reciben continuamente datos GNSS que mandan a las estaciones de control, donde se calculan correcciones a las órbitas de los satélites, a los osciladores y al efecto ionosférico.

Estas correcciones junto con la información de integridad son mandadas a los satélites geoestacionarios que modulan la información en una señal como la GNSS y la transmiten a los usuarios en Tierra.

En el mundo existen varios sistemas SBASS de aumentación basados en satélites, entre los que sobresalen los siguientes:

- WAAS de Norteamérica.
- CWAAS de Canadá
- EGNOS de la comunidad europea
- MSAS de Japón.
- SNAS de China
- GAGAN en la India el cual se está construyendo actualmente.

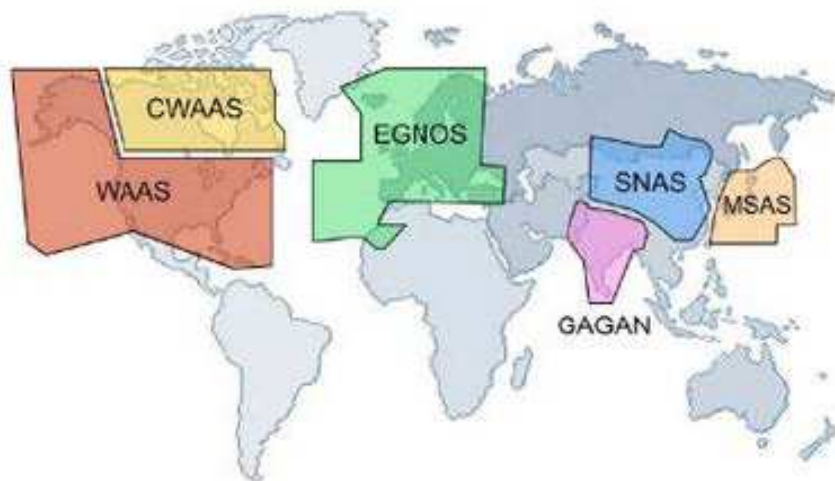


Figura 2.2: Representación de los principales sistemas SBAS

3. Posicionamiento GNSS

La determinación de coordenadas mediante un sistema GNSS se basa en la medición de la distancia entre el receptor y los satélites disponibles la cual deriva del tiempo de vuelo de la señal recibida. Este tiempo de vuelo se calcula comparando la señal recibida con una réplica interna generada por el propio receptor, esto implica el alineamiento de las escalas de tiempo de los osciladores de satélite y receptor con una escala de tiempo de referencia, por ejemplo la escala de tiempo GPS.

Todos los satélites GNSS transmiten a frecuencias derivadas de la frecuencia fundamental de 10.23 MHz, disponibles mediante relojes atómicos de a bordo.

Las señales entrantes de diferentes satélites se pueden identificar ya que las portadoras están moduladas por secuencias de ruido pseudoaleatorio diferentes para cada satélite, las cuales utilizan dos secuencias binarias para enviar los mensajes. También hay un mensaje de navegación que contiene información sobre las efemérides de los satélites, la hora del sistema (GPS, GLONASS, GALILEO, etc.), el comportamiento del reloj y los mensajes de estado de los satélites del sistema.

Para calcular la posición de un punto de la superficie terrestre es necesario conocer las coordenadas de los satélites a los que se está observando. Existen distintas maneras de obtener las coordenadas de esos satélites. Cuanto más precisas se requiere que sean las coordenadas de los satélites, más tiempo habrá que esperar.

En el caso de los satélites GPS existen distintos tipos de efemérides:

- Transmitidas: predichas por el NIMA (National Imagery and Mapping Agency) y distribuidas por el satélite. La posición del satélite se encuentra en el sistema de referencia WGS84 con una precisión aproximada de 1m.
- Precisas: calculadas a posteriori por centros de investigación (por ejemplo IGS) y distribuidas por internet con un retraso de 14 días. La posición del satélite se encuentra en el marco ITRF o IGS oficial en ese momento con una precisión aproximada de 5cm.

- Rápidas: calculadas a posteriori por centros de investigación (por ejemplo IGS) y distribuidas por internet con un retraso de 1 día. La posición del satélite se encuentra en el marco ITRF o IGS oficial en ese momento tal y como las precisas con la diferencia de que la precisión aproximada es menor, es de 10cm.

3.1. Observación de código o pseudodistancia.

En la observación GNSS el receptor después de haber identificado el satélite efectúa una correlación entre el código generado por su oscilador y el código recibido del satélite. Electrónicamente se mide el retardo de la señal recibida respecto a una réplica generada internamente. Para ello, la época de partida del código es registrada por el reloj del satélite; análogamente la época de recepción es registrada por el reloj del receptor. En ambos casos, las épocas son relativas al tiempo local y por tanto estarán afectadas por el correspondiente offset.

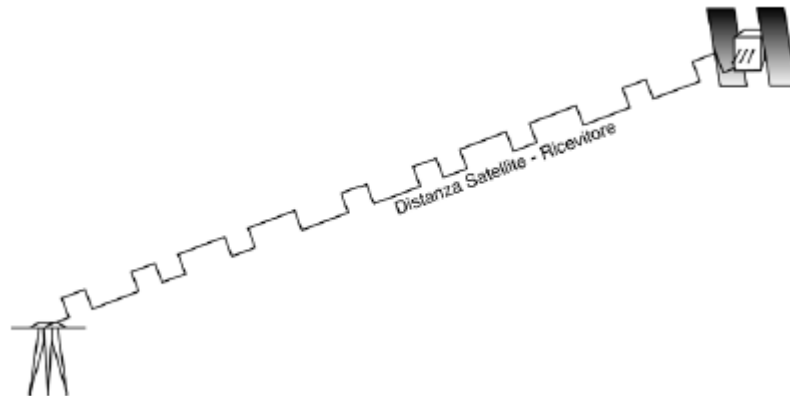


Figura 3.1: representación de la señal GPS

Las épocas de transmisión y recepción de la señal con respecto a un tiempo local se conocen, sin embargo, dado que es imposible un sincronismo perfecto entre los relojes del receptor o del satélite y la escala de tiempo GNSS, se debe tener en cuenta el desplazamiento entre cada reloj y el tiempo GNSS. Para los relojes de los

satélites y receptores el offset del reloj (por ejemplo en el caso del sistema GPS) se define como:

$$dt^S = t^S - t^{S(\text{GPS})}$$

$$dt_r = t_r - t_{r(\text{GPS})}$$

Donde t^S es el instante de tiempo registrado por el reloj del satélite según la escala de tiempo local, t_r es el instante de tiempo registrado por el oscilador del receptor, $t^{S(\text{GPS})}$ es el instante de emisión según la escala de tiempo GPS y $t_{r(\text{GPS})}$ es el instante de recepción según la escala de tiempo GPS.

Tal y como ya se ha mencionado, cada satélite transmite una secuencia de código único que se utiliza para identificar los diferentes satélites. Cuando se recibe una señal de satélite, se correlaciona con una réplica interna de la misma producida por el receptor de GPS.

De esa forma, el receptor puede identificar los satélites visibles y puede medir el retraso entre la señal real y su réplica. Siendo $\Delta t_r^s(t)$ el retraso observado en la época t entre la señal proveniente del satélite s y el receptor r , quedando la ecuación de observación como:

$$\Delta t_r^s(t) = t_r - t^S$$

Donde t_r es la época de recepción registrada por el reloj del receptor r y t^S la época de inicio registrada por el reloj del satélite s .

Quedando la ecuación de observación incluyendo esto como:

$$\Delta t_r^s(t) = t_r - t^S + dt_r - dt^S = \zeta_r^s + dt_r(t) - dt^S(t)$$

Siendo ζ_r^s el tiempo real de viaje de la señal desde el satélite hasta el receptor. Multiplicado por la velocidad de la luz y suponiendo que se disponen de valores aproximados de la posición del receptor y que el efecto troposférico e ionosférico se conocen a partir de los correspondientes modelos, la ecuación de observación de código o pseudodistancia entre el receptor r y el satélite S en la época t se define como:

$$Prs(t) = \rho_{rs}(t) + c(dt_r(t) - dt^S(t)) + I_{rs}(t) + Trs(t) + vrs(t)$$

Donde la distancia geométrica ($\rho_r^s(t)$) es una función de las posiciones de satélite y receptor en coordenadas cartesianas que se define como:

$$\rho_r^s(t) = \sqrt{(X_r(t) - X^s(t))^2 + (Y_r(t) - Y^s(t))^2 + (Z_r(t) - Z^s(t))^2}$$

Donde (X_r, Y_r, Z_r) son las coordenadas del receptor y (X^s, Y^s, Z^s) las coordenadas del satélite.

Las coordenadas de los satélites se conocen a partir de las efemérides y se modela y envía en el mensaje de navegación el desplazamiento del reloj del satélite respecto a la escala de tiempo GNSS.

3.2. Observación fase.

En las observaciones de fase, se observa la diferencia de fase en ciclos entre la portadora recibida del satélite y una réplica de la misma generada internamente de la misma frecuencia generada por un oscilador interno del receptor.

El número total de ciclos enteros es desconocido y debe estimarse, ya sea como un valor real o entero. Las soluciones reales se usan cuando no es posible obtener soluciones enteras. Cuando se obtienen soluciones enteras, se “fijan” de modo que se conocen las ambigüedades y se puede explotar todo el potencial de las mediciones de fase. Para cada par satélite-receptor se tendrá una única incógnita de ambigüedad inicial que permanecerá constante mientras que no se produzca un salto de ciclo, es decir una interrupción del contador de ambigüedad de fase inicial (“ N ”).

Un salto de ciclo puede ser producido por:

- Obstrucción en el camino recorrido por la señal (un árbol, un edificio...)
- Problemas electrónicos del receptor
- Cambio brusco de la ionosfera.

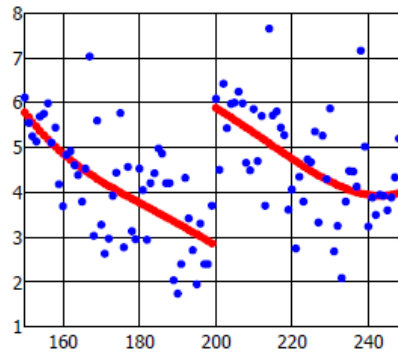


Figura 3.2: representación de salto de ciclo

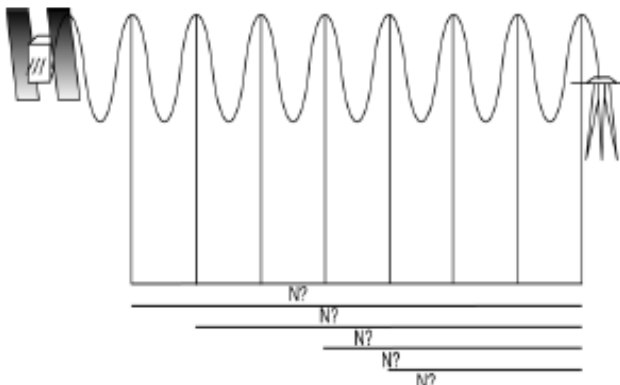
La ecuación de observación de fase puede escribirse como:

$$\Phi_r^S(t) = \Phi_r(t) - \Phi^S(r^S)(t) = \Phi_r(t) - \Phi^S(t - T)$$

Donde $\Phi_r(t)$ es la réplica generada internamente, $\Phi^S(r^S)(t)$ es la fase de la señal emitida por el satélite S que es recibida por el receptor r en la época t y T el tiempo de viaje de la señal entre el satélite y el receptor.

Aplicando un desarrollo de Taylor y teniendo en cuenta que la frecuencia $f = \frac{d\Phi}{dt}$ se obtiene:

$$\Phi^S(t - T_{r^S}) = \Phi^S(t) - \frac{d\Phi}{dt} T_{r^S} = \Phi^S(t) - f T_{r^S} - N_{r^S}$$



Donde N es la ambigüedad de fase inicial y representa un número entero de ciclos entre la fase del satélite en la época de partida de la señal y la fase del satélite en la época de observación

Una manera sencilla de entender el significado de la ambigüedad inicial y los saltos de ciclo es la siguiente:

- Supongamos un reloj digital en el que se pueden leer los minutos y los segundos pero no las cifras relativas a las horas.
- Si miramos el reloj, no sabemos que hora es pero tenemos una indicación de la fracción de hora transcurrida. Es decir tenemos una ambigüedad respecto a las horas.
- Si continuamos mirando el reloj podemos saber cuántas horas han pasado desde la primera observación. Por tanto, la ambigüedad es sólo inicial.
- Si a partir de datos externos podemos conocer la hora en el instante en que empezamos a mirar el reloj, la ambigüedad quedará eliminada.
- Si durante un intervalo de tiempo dejamos de mirar el reloj, cuando empecemos a mirarlo otra vez tendremos una nueva ambigüedad porque no podemos saber cuántas horas han pasado. Esta nueva ambigüedad sería equivalente a la presencia de un salto de ciclo en las observaciones GPS

La resolución de ambigüedades requiere múltiples observaciones en múltiples épocas.

Teniendo en cuenta que los offset de los relojes de receptor y satélite se expresan de la siguiente manera:

$$\Phi_r(t) = \Phi(t) + fdt_r(t)$$

$$\Phi^s(t) = \Phi(t) + fdt^s(t)$$

Se puede obtener la observación de fase como:

$$\Phi_r^s(t) = \Phi_r(t) - \Phi^s(t - T) = \Phi(t) + fdt_r(t) - \Phi(t) + fdt^s(t) - fT_r^s - N_r^s$$

$$\Phi_r^s(t) = fdt_r(t) + fdt^s(t) - fT_r^s - N_r^s$$

Multiplicando por la longitud de onda e introduciendo los retardos ionosféricos y troposféricos y teniendo en cuenta el ruido de medición de fase $n_r^s(t)$ se obtiene la ecuación de observación de fase en unidades métricas:

$$\lambda \Phi_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c(dt_r(t) - dt^s(t)) - I_r^s(t) + T_r^s(t) - \lambda N_r^s(t) + n_r^s(t)$$

donde $f = \frac{c}{\lambda}$.

ρ_r^s = Distancia geométrica.

c = Velocidad de la luz

N_r^s = Ambigüedad de fase inicial

dt_r = Offset del oscilador del receptor

dt^s = Offset del oscilador del satélite

I_r^s = Efecto ionosférico entre receptor y satélite

T_r^s = Efecto troposférico entre receptor y satélite

n_r^s = Ruido de la medición de fase

Se pueden usar códigos o fases de portadora para medir la distancia que hay entre el receptor y el satélite teniendo en cuenta que no obtenemos exactamente los mismos resultados ya que uno es más preciso que otro. Las medidas de código tienen un ruido más alto que las fases, es decir, aproximadamente entre 0.3m y 1m las de código mientras que las de fase el error de observación apenas es de algunos milímetros.

3.3. Posicionamiento absoluto.

Se entiende por posicionamiento absoluto de un receptor la determinación de sus coordenadas y del offset del reloj del receptor a partir de medidas a satélites. Se basa en la hipótesis de que el tiempo de viaje de la señal desde un satélite al receptor es conocido.

3.3.1. Posicionamiento absoluto con observación de código.

La ecuación de observación de códigos y pseudodistancias explicada anteriormente no es lineal con lo que tenemos que linealizarla alrededor de un valor aproximado de las coordenadas del receptor. La ecuación linealizada se puede escribir de la siguiente manera:

$$P_r^s = \frac{\tilde{X}_r - X^s}{\tilde{\rho}_r^s} (X_r - \tilde{X}_r) + \frac{\tilde{Y}_r - Y^s}{\tilde{\rho}_r^s} (Y_r - \tilde{Y}_r) + \frac{\tilde{Z}_r - Z^s}{\tilde{\rho}_r^s} (Z_r - \tilde{Z}_r) + cdt_r + (\tilde{\rho}_r^s - cd\tilde{t}^s + \tilde{I}_r^s + \tilde{T}_r^s) + v_r^s$$

Donde:

$\tilde{X}_r, \tilde{Y}_r, \tilde{Z}_r$ = Coordenadas aproximadas del receptor.

X_r, Y_r, Z_r = Coordenadas del receptor.

X^s, Y^s, Z^s = Coordenadas del satélite.

cdt_r = Offset del oscilador del receptor multiplicado por la velocidad de la luz.

cdt^s = Offset del oscilador del satélite multiplicado por la velocidad de la luz.

I_r^s = Efecto ionosférico entre el receptor y el satélite.

T_r^s = Efecto troposférico entre el receptor y el satélite.

$\tilde{\rho}_r^s$ = distancia aproximada entre el receptor y el satélite.

En esta ecuación nuestras incógnitas son (X_r, Y_r, Z_r) , dt_r por lo que serán necesarios al menos cuatro satélites para estimar la posición del receptor.

3.3.2. Posicionamiento absoluto con observaciones de fase.

A diferencia de la ecuación de observación de código, la ecuación de observación de fase tiene además un término adicional desconocido, la ambigüedad de fase inicial, el cual debe estimarse para cada pareja receptor-satélite. Esto implica que necesitemos un mínimo de épocas para poder estimar las ambigüedades. Pasado este tiempo y si no se producen saltos de ciclo, las ambigüedades permanecen constantes y tendremos que estimar las coordenadas y el offset del oscilador del receptor.

Por ejemplo, si se tiene 5 satélites en 2 épocas de observación, tenemos como incógnitas 3 coordenadas, 2 offset del reloj del receptor y 5 ambigüedades de fase inicial. Como tendríamos 10 observaciones podríamos resolver el sistema.

Las observaciones de fase tienen menos ruido que las de código con lo que debería proporcionar mayor precisión en las coordenadas estimadas. El posicionamiento absoluto mediante observaciones de fase no es factible usando observaciones con una sola época, a menos que se realice una primera estimación de las ambigüedades de fase.

3.4. Posicionamiento relativo.

En este posicionamiento se calculan las coordenadas de uno o más receptores con relación a otro fijo cuyas coordenadas se suponen conocidas con precisión. En este caso, los errores debidos a los estados de los relojes, efemérides y los originados por efectos atmosféricos quedan notablemente reducidos al poder correlacionar las observaciones simultáneas entre estaciones. La precisión en este método se incrementa llegando al orden centimétrico o subcentimétrico.

Para este posicionamiento, generalmente se realiza un tratamiento posterior a la recepción de los datos que ha de hacer en una computadora personal, por lo que el posicionamiento relativo de precisión se efectúa en tiempo diferido. Esta

modalidad es la que permite obtener mayores precisiones, aunque también es posible realizar posicionamiento relativo en tiempo real usando las efemérides transmitidas lo que reduce las precisiones. El posicionamiento puede realizarse en modo estático o cinemático.

Cuando se tienen varios receptores efectuando medidas al mismo satélite en una misma época se tiene lo que se conoce como una simple diferencia, la cual es la diferencia entre las observaciones efectuadas desde varios receptores. Se puede tener simples diferencias tanto en observaciones de códigos como de fases teniendo la siguiente ecuación para cada una de ellas:

- Simple diferencia con observaciones de códigos:

$$P_{AB}^s(t) = P_A^s(t) - P_B^s(t)$$

$$P_{AB}^s(t) = \rho_{AB}^s(t) + I_{AB}^s(t) + T_{AB}^s(t) + c (dt_A(t) - dt_B(t))$$

Simple diferencias con observaciones de fase:

$$L_{AB}^s(t) = L_A^s(t) - L_B^s(t)$$

$$L_{AB}^s(t) = \rho_{AB}^s(t) + \lambda N_{AB}^s(t) - I_{AB}^s(t) + T_{AB}^s(t) + c (dt_A(t) - dt_B(t))$$

En estas observaciones no aparece el término relativo al offset del oscilador del satélite.

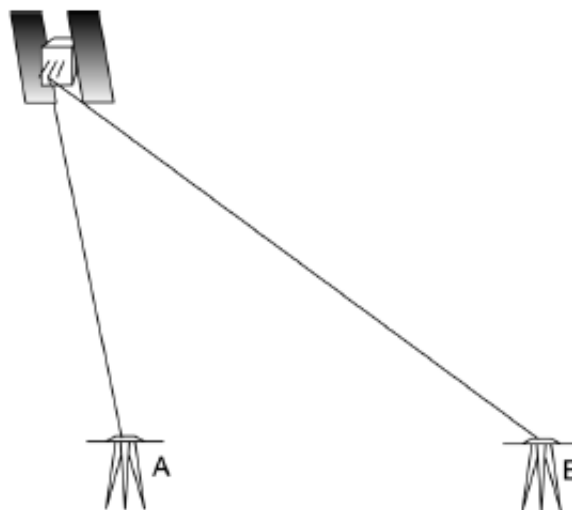


Figura 3.3: Simple diferencia

En las simples diferencias no aparecen los offset del satélite pero si los del receptor. La manera de eliminar esto es realizando las dobles diferencias, las cuales son dos receptores efectuando medidas a dos satélites diferentes en una misma época, realizando así la resta de dos simples diferencias contemporáneas.

- Diferencia doble de códigos:

$$P_{AB}^{IJ}(t) = P_{AB}^I(t) - P_{AB}^J(t)$$

$$P_{AB}^{IJ}(t) = \rho_{AB}^{IJ}(t) + I_{AB}^{IJ}(t) + T_{AB}^{IJ}(t)$$

- Diferencia doble de fases:

$$L_{AB}^{IJ}(t) = L_{AB}^I(t) - L_{AB}^J(t)$$

$$L_{AB}^{IJ}(t) = \rho_{AB}^{IJ}(t) + \lambda N_{AB}^{IJ}(t) - I_{AB}^{IJ}(t) + T_{AB}^{IJ}(t)$$

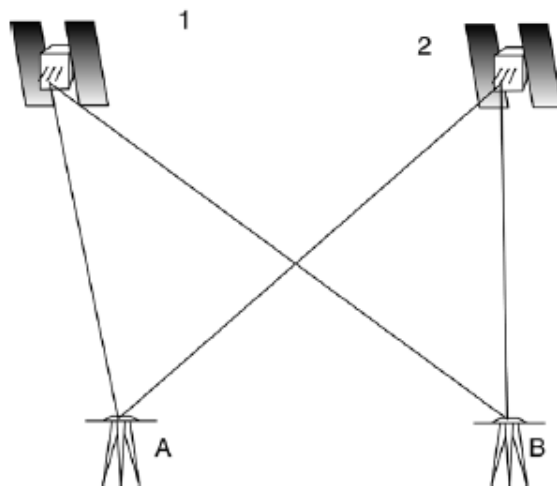


Figura 3.4: Doble diferencia

3.4.1. Método estático.

El método estático realiza mediciones de diferencias de fase o de dos o más receptores que simultáneamente rastrean varios satélites comunes, uno de los cuales reciben datos desde una posición conocida y los otros se sitúan en los puntos cuyas coordenadas se necesitan conocer. Las diferencias de mediciones de fase de las señales satelitales minimizan los errores, obteniendo estimaciones de gran precisión. El posicionamiento estático es el más fiable de todos los métodos de levantamiento, con este se puede llegar a obtener una precisión de pocos milímetros.

3.4.2. Método cinemático.

Se trata de un método muy eficiente para el cálculo de trayectorias. Este método involucra un Móvil que se desplaza y cuya posición puede ser calculada en relación con otra estación que se denomina Referencia.

Primero, el Móvil tiene que realizar el procesamiento conocido como iniciación, La Referencia y el Móvil se activan y permanecen absolutamente estáticos por varios minutos, registrando datos. Tras este periodo, el Móvil puede moverse libremente.

Sin embargo, cuando se opera en levantamientos cinemáticos debemos evitar movernos cerca de objetos que puedan bloquear las señales de los satélites, produciendo obstrucciones en el cielo, como árboles, edificios altos, etc. Ya que si en algún punto el Móvil rastrea menos de 4 satélites, hay que detenerse, desplazarse a una posición donde se registren 4 o más satélites y realizar nuevamente la iniciación antes de continuar

3.5. Posicionamiento diferencial.

El posicionamiento diferencial puede ser de dos tipos:

- Posicionamiento DGNSS: es aquel que se realiza para estimar coordenadas de receptores estáticos o cinemáticos aplicando correcciones a partir de las observaciones de código o pseudodistancia.
- Posicionamiento RTK: es aquel que se realiza para estimar coordenadas de receptores estáticos o cinemáticos aplicando correcciones a partir de las observaciones de fase.

3.5.1. Posicionamiento diferencial con observación de códigos.

El posicionamiento diferencial GNSS es una técnica en tiempo real en la que se utilizan uno o más receptores. Un receptor normalmente es estático y se utiliza como estación de referencia cuyas coordenadas son conocidas.

Los otros receptores pueden ser estáticos o cinemáticos.

Este método se basa en que los efectos o errores de observación son iguales o muy parecidos en la estación de referencia y en el receptor móvil. De este modo, la estación de referencia (muchas veces permanente) calcula correcciones a partir de las observaciones de pseudodistancia y dichas correcciones a la distancia geométrica son transmitidas al receptor cinemático en tiempo real. El receptor móvil aplica las correcciones a sus pseudodistancias observadas y realiza un posicionamiento con las pseudodistancias corregidas.

La ecuación de observación de pseudodistancias en la estación permanente en la época t_0 , despreciando ruido se puede escribir como:

$$P_{PS}^i(t_0) = \rho_{PS}^i(t_0) + \Delta\rho_{PS}^i(t_0) + \Delta\rho^i(t_0) + \Delta\rho_{PS}(t_0)$$

Siendo:

$\rho_{PS}^i(t_0)$ = La distancia geométrica entre la estación permanente y el satélite i

$\Delta\rho_{PS}^i(t_0)$ = Sesgo en distancia dependiente de la posición del satélite y del receptor (efectos orbitales y de refracción)

$\Delta\rho^i(t_0)$ = El sesgo en distancia dependiente del satélite (offset del oscilador del satélite)

$\Delta\rho_{PS}(t_0)$ = El sesgo en distancia dependiente del receptor (offset del oscilador del receptor)

La corrección de pseudodistancias para el satélite i en la época t_0 se define como:

$$PRC_{PS}^i(t_0) = \rho_{PS}^i(t_0) - P_{PS}^i(t_0) = -\Delta\rho_{PS}^i(t_0) - \Delta\rho^i(t_0) - \Delta\rho_{PS}(t_0)$$

Esta corrección puede calcularse:

La distancia geométrica es conocida a partir de la posición conocida de la estación permanente y de las efemérides transmitidas del satélite.

$P_{PS}^i(t_0)$ es la cantidad medida

La corrección $PRC_{PS}^i(t_0)$ y la variación de la corrección $RRC_{PS}^i(t_0)$ se determinan en la estación permanente referidas a la época de referencia t_0 . Tanto $PRC_{PS}^i(t_0)$ como $RRC_{PS}^i(t_0)$ se transmiten al receptor rover (B) en tiempo real, mediante la predicción.

$$PRC^i(t) = PRC^i(t_0) + RRC^i(t_0)(t - t_0)$$

Siendo $(t - t_0)$ la latencia.

Las precisiones de posicionamiento mejoran cuanto más pequeñas son las distancias entre estación de referencia y rover.

En el rover la observación de pseudodistancia puede escribirse como:

$$P_B^i(t) = \rho_B^i(t) + \Delta\rho_B^i(t) + \Delta\rho^i(t) + \Delta\rho_B(t)$$

Aplicando en B la corrección predicha a la pseudodistancia observada en B se tiene:

$$P_B^i(t)_{corr} = P_B^i(t) + PRC^i(t)$$

Para distancias moderadas entre la estación permanente y el rover los efectos específicos de satélite están fuertemente correlados. Por tanto la influencia de los errores orbitales y de los efectos atmosféricos se reducen considerablemente.

Despreciando estos efectos se puede escribir:

$$P_B^i(t)_{corr} = \rho_B^i(t) + \Delta\rho_{B,PS}(t)$$

3.5.2. Posicionamiento diferencial con observación de fase.

Una estación de referencia provee correcciones instantáneas para estaciones móviles, lo que hace que con la precisión obtenida se llegue a nivel de pocos centímetros.

De forma análoga a lo visto con observación de código, la ecuación de observación de medidas de fase en la estación permanente en la época t_0 puede escribirse como:

$$L_{PS}^i(t_0) = \rho_{PS}^i(t_0) + \Delta\rho_{PS}^i(t_0) + \Delta\rho^i(t_0) + \Delta\rho_{PS}(t_0) + \lambda N_{SP}^i$$

La corrección de fase viene dada por:

$$PRC^i(t_0) = \rho_{PS^i}(t_0) - L_{PS^i}(t_0) = -\Delta\rho_{PS^i}(t_0) - \Delta\rho^i(t_0) - \Delta\rho_{PS}(t_0) - \lambda N_{SP^i}$$

De forma análoga a como se ha razonado para códigos, se tiene que la corrección de fase predicha a la distancia de fase observada en el rover B se puede obtener como (*Hoffmann Wellenhof, 1997*):

$$L_B^i(t)_{corr} = \rho_B^i(t) + \Delta\rho_{B,PS}(t) + \lambda N_{PS,B}$$

El posicionamiento en B se realiza con la distancia de fase corregida. La única diferencia respecto al posicionamiento diferencial con observaciones de código es la presencia de la ambigüedad de fase inicial. Para efectuar un posicionamiento RTK es necesario un intervalo de tiempo inicial para la resolución de ambigüedades. Después de éste, se procede a la estimación de las coordenadas a partir de las correcciones recibidas.

Esta técnica exige la disponibilidad de por lo menos una estación de referencia, con las coordenadas conocidas y está dotada de un receptor GNSS y un módem de radiotransmisor. La estación genera y transmite las correcciones diferenciales para las estaciones, que usan los datos para determinar precisamente sus posiciones.

El formato de las correcciones diferenciales es definido por la Radio Technical Committee for Maritime Service (RTCM). Los radiotransmisores operan en las franjas de frecuencia VHF/UHF, y la observación fundamental usada en el RTK es la medida de la fase de la portadora.

En el caso del uso del módem de radio, la técnica RTK se restringe a líneas de base cortas de hasta 10km, debido al alcance limitado del UHF, y también porque la determinación de la posición con esta técnica emplea apenas la solución de la portadora L1, aunque la portadora L2 está presente para la resolución de las ambigüedades.

3.5.3. Formato de transmisión RTCM.

El formato RTCM fue propuesto por la Comisión Técnica de Radio de Servicios Marítimos (RTCM), un organismo asesor creado en 1947 para investigar asuntos relacionados con las telecomunicaciones marítimas. El Comité Especial N°104 fue establecido en 1983 para desarrollar un formato estándar para la transmisión de mensajes de correcciones diferenciales a los usuarios de GPS. De allí se genera el RTCM-104.

Desde la creación de los formatos RTCM se han desarrollado nuevas versiones con el fin de mejorar cada vez más el envío de datos y la integridad de los mismos. Estos varían en los mensajes que contienen. Hay 64 tipos de mensajes disponibles. El formato de los mensajes consiste en secuencias de palabras de 30 bits.

Las versiones más importantes son:

- RTCM 2.0: solo admite GPS diferencial. La exactitud dada por esta versión es alrededor del metro. No contiene ningún tipo de información de las fases de las portadoras de manera que no son posibles aplicaciones RTK, con mensajes tipo 1, 3 y 9.
- RTCM 2.1: fue liberado en 1993 y consiste en nuevos tipos de mensajes que muestran la transmisión de datos de las fases de las portadoras, haciendo posible las aplicaciones RTK, mensajes tipo 18, 19, 20, 21. Se pueden obtener precisiones centimétricas.
- RTCM 2.2: fue publicada en Enero de 1998, incluye soporte para el sistema de navegación satelital ruso (GLONASS). Los mensajes tipo 18 al 20 en esta versión no son completamente compatibles con la versión previa, versión 2.1.
- RTCM 2.3: fue publicada en el 2001 e incluye varios tipos de mensajes adicionales para la definición del tipo de antena, tipo 23, y la estación de referencia, tipo 24. El formato RTCM 2.3 fue diseñado para enviar datos vía UHF y los mismos están dotados de bits especiales extra, para la corrección en el aire de los errores, es decir, reponer los bits, con ciertas limitaciones, que se hubiesen perdido durante la transmisión vía UHF.

- RTCM 3.0: Reducción de ancho de banda, RTK mensajes tipo 1004, 1005 con precisiones centimétricas. La mayor eficiencia del formato RTCM 3.0 permite la reducción significativa del ancho de banda de los mensajes, es decir, reduce el tamaño de los paquetes de información, esto es especialmente importante en las redes inalámbricas y móviles, donde el ancho de banda disponible es mucho menor que la de red cableada, lo que hace posible el envío y recepción de correcciones diferenciales a través de internet utilizando telefonía móvil.
- RTCM 3.1: es el estándar aprobado por la comisión RTCM en mayo de 2006. Incorpora correcciones de Redes RTK, lo cual indica que el receptor móvil obtiene información RTK precisa sobre un área grande. Contiene información RTK GNSS.

Cada mensaje RTCM contiene una información diferente y no es necesario la recepción de todos los mensajes, sino aquellos que contengan la información que nos sea útil para nuestro trabajo.

- 1005: es un mensaje en el cual se transmiten las coordenadas de la estación de referencia, el cual lo hace imprescindible para mediciones RTK.
- 1077: referente a correcciones de observación GPS.
- 1087: referente a correcciones de observación GLONASS
- 1127: referente a correcciones de observación BEIDOU.
- 1230: son sesgos de código y fase de GLONASS.

3.6. Redes de Estaciones de Referencia Permanentes.

Desde hace ya unos años, en aplicaciones topográficas y cartográficas se están aplicando las Redes de Estaciones de Referencia GNSS.

Actualmente en nuestro país existen numerosas Estaciones de Referencia GNSS permanentes. La mayoría de éstas pertenecen a organismos públicos y por tanto, su empleo, es también público. Algunas de estas estaciones están unificadas en pequeñas redes locales o regionales, como por ejemplo la red de estaciones RAP (Red Andaluza de Posicionamiento) o del Instituto Geográfico Nacional.

Este tipo de redes se comienzan a ampliar, completando sus prestaciones para crear lo que denominamos Redes de Estaciones de Referencia GNSS activas.

El concepto de tiempo real, como hemos dicho anteriormente, consiste en la aplicación en campo al posicionamiento obtenido por un receptor GNSS, de manera instantánea, de ciertas correcciones proporcionadas por una segunda unidad que se encuentra en un punto fijo de coordenadas estimadas con precisión.

El posicionamiento RTK con una simple base de referencia está limitado por el aumento de los errores sistemáticos que se producen al aumentar la longitud de las líneas base. Esto es especialmente notable cuando coincide con un periodo de importante influencia ionosférica, y nos limita habitualmente a distancias de 10 km o menos.

Gracias al concepto de Red de Estaciones de Referencia se pueden realizar posicionamiento RTK dentro de redes de estaciones de referencia con distancias de 20 km o más desde la estación de referencia más próxima. Entre las soluciones de Red ofrecidas destacan las soluciones VRS (Virtual Reference Station) y MAC (Master-Auxiliary Concept).

3.6.1. RAP: Red Andaluza de Posicionamiento.

Un elemento clave para la explotación de cualquier sistema GNSS es resolver los errores de la señal recibida por cualquier receptor, y que son inducidos por las condiciones meteorológicas, las interferencias electromagnéticas y otros tipos de incidencias que alteran las mediciones en rangos superiores a los 10 metros. El único procedimiento existente para alcanzar precisiones de orden superior al metro se basa en realizar procesos de ajustes de cada una de las mediciones realizadas sobre el terreno, sea en tiempo real o a posteriori, con respecto a los datos adquiridos sincrónicamente por una segunda estación de coordenadas conocidas y fijadas con exactitud. Esta estación de referencia posibilita los parámetros necesarios para resolver las incertidumbres que los fenómenos antes mencionados ocasionan en la señal, procediéndose a su corrección. Este ajuste, según la calidad de los equipos y las necesidades del trabajo a realizar, puede hacerse en postproceso (se hacen las mediciones sobre el terreno, y, una vez en gabinete, se aplican las correcciones necesarias para calcular las coordenadas con alta precisión), o en tiempo real.

Disponer de una red de estaciones GNSS permanentes que cumpla este cometido se ha convertido en una condición indispensable para el aprovechamiento y explotación extensiva del potencial que ofrece el posicionamiento de precisión, y éste es precisamente el papel que, desde su entrada en funcionamiento en el año 2006, cumple la Red Andaluza de Posicionamiento. Esta red, desarrollada y gestionada por el IECA, está compuesta por un conjunto de 22 estaciones repartidas homogéneamente por la Comunidad Autónoma (ver figura 3.5), todas ellas dotadas de antenas de precisión, de sistemas de almacenamiento continuo de datos, y de tecnologías para la conexión remota, las cuales permiten, que cualquier usuario dotado de equipo profesional GNSS, pueda acceder a los datos necesarios para obtener precisiones centimétricas e incluso milimétricas en sus posicionamientos. La RAP se ha diseñado para suministrar estas correcciones tanto en tiempo real (Real Time Kinematic) o las observaciones en diferido (RINEX), mediante servicios que se prestan de forma gratuita, y a través de Internet.



Figura 3.5: Despliegue territorial de las 22 antenas de la Red Andaluza de Posicionamiento

La RAP está considerada como una infraestructura básica del Sistema Estadístico y Cartográfico de Andalucía pues proporciona el marco geodésico de referencia único, estable y coherente con el marco nacional e internacional, para toda actividad cartográfica y topográfica, constituyéndose así en la garantía y coherencia de cualquier proceso de levantamiento georreferenciado sobre el territorio andaluz.

Desde sus inicios el número de usuarios ha ido creciendo, alcanzando en 2014 la cifra de 4.515 usuarios de ficheros RINEX para correcciones postproceso, que realizaron 6.050 conexiones, y se bajaron en torno a 200.000 ficheros. Por lo que respecta a usuarios en tiempo real, el número total a finales de ese año ascendió a 1.191, que realizaron un total de 57.046 conexiones.

El análisis de las estadísticas de uso de conexiones en tiempo real muestra que son los usuarios del sector privado, que totalizan el 80,3 % de estas conexiones, quienes hacen un uso más intensivo de los servicios de la RAP, frente al 12,3% del sector público, y el 7,5 % de particulares. La caracterización temática de estas conexiones muestra que las aplicaciones principales son para trabajos topográficos y cartográficos, (46%), seguida de redes de apoyo a obra civil e infraestructuras (29%). Aunque con una participación menor (8,7%), es de destacar el elevado número de conexiones para proyectos de Investigación en muchas temáticas, reflejando la importancia de esta infraestructura en el desarrollo de una parcela de creciente interés en el escenario del I+D+i de la Comunidad Autónoma, al que habría

que unir su soporte a actividades docentes en disciplinas universitarias relacionadas con la agronomía, ciencias forestales y ambientales. *(Publicado el 4 Febrero.2015 por IECA)*

El día 15 de marzo de 2018 se procedió a estimar las coordenadas de las estaciones de la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) en ETRF2000. Hay que reseñar que este cambio se llevó a cabo en todas las estaciones de todas las redes activas del Estado y Comunidades Autónomas.

El objetivo del cambio es homogeneizar las distintas estaciones permanentes GNSS de las Redes Activas de las distintas Administraciones Públicas y seguir las recomendaciones europeas provenientes de la Subcomisión de la Asociación Internacional de Geodesia para el marco de referencia europeo (EUREF) relativas a la utilización de la realización ETRF2000.

Con este fin, en la reunión de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico del Consejo Superior Geográfico celebrada en 2014, se decidió abordar los siguientes puntos:

El cálculo de un marco homogéneo ETRF00 para todas las estaciones GNSS del territorio nacional (excepto Canarias, ya que su sistema geodésico de referencia es distinto).

Establecer posteriormente un cálculo continuo de coordenadas así como criterios para nuevas estaciones o cambios.

Como consecuencia del punto primero, se creó el Subgrupo de Cálculo ETRF2000, integrado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC), Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL) e Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA).

El objetivo de este Subgrupo ha sido calcular la totalidad de las coordenadas y velocidades de las estaciones GNSS de las CCAA.

Este cambio ha supuesto una diferencia de aproximadamente 2-3 centímetros en las coordenadas planimétricas, de manera que no afecta de forma significativa a los usuarios de la red salvo para los trabajos de alta precisión (milimétrica).

4. Receptores GNSS.

Desde finales de los años 90 y hasta ahora, el uso del GPS entre los profesionales en geodesia, ingeniería o topografía entre otros ha ido creciendo gracias a las mejoras realizadas en los receptores que se utilizan cada vez más. Aunque mantienen un alto costo, permiten conseguir las altas precisiones indispensables para algunos trabajos.



Figura 4.1: Ejemplo de un Receptor GNSS geodésico

Un equipo GNSS doble frecuencia como observamos en la figura 4.1 cuesta unos 24.000€ pero a pesar de este costo es el más utilizado ya que es uno de los más punteros en el mercado.

En la última década se están trabajando tal y como se ha mencionado con anterioridad en los receptores GPS de bajo coste en los que las precisiones son menos exigentes, son una magnífica opción a elegir. El coste de estos equipos oscila alrededor de unos pocos cientos de euros.

Este tipo de receptores de bajo costo han llegado fuertemente al mercado debido a su precio y a que al ser tan pequeños se pueden integrar en distintos dispositivos, como por ejemplo en equipos de navegación, tabletas, etc.

4.1. Receptores GNSS geodésicos.

En este capítulo se va a hablar sobre el receptor de alta precisión GS10 ya que será el utilizado para el trabajo realizado. Este receptor combina todas las características para ofrecer el máximo rendimiento incluso en las circunstancias más exigentes. La fiabilidad de posicionamiento del Leica Viva GS10 garantiza la recepción de los resultados más precisos.

El receptor Leica Viva va acompañado del software *Leica Captivate*, que convierte datos complejos en modelos 3D realistas y manejables. Con aplicaciones fáciles de utilizar y la familiar tecnología táctil, es posible ver los datos de medición y de diseño en todas las formas y dimensiones. Captivate permite cambiar entre distintos sectores y aplicaciones independientemente de si trabaja con GNSS, estaciones totales o ambos.

Mientras que Leica Captivate captura y modela los datos sobre el terreno, el software Leica Infinity procesa la información en oficina. La agilizada transferencia de datos garantiza que el proyecto vaya a buen ritmo. Leica Captivate y Leica Infinity trabajan de forma conjunta para integrar los datos y editar los proyectos de una manera más rápida y eficiente.



Figura 4.2: Receptor GS10

4.1.1. Antena.

La antena que mejor combina con este receptor geodésico es la antena AS10, la cual es una antena geodésica compacta y ligera.



Figura 4.3: Antena GNSS Leica Viva AS10

Para estaciones de referencia individuales, redes RTK y de auscultación, la antena Leica AS10 ofrece un rendimiento estable. Esta antena compacta con plano de tierra integrado es compatible con señales GPS, GLONASS, Galileo, Compass y SBAS para un amplio rango de tareas de precisión. (*Leica Geosystems*)

4.1.2. Software para post-proceso (Infinity)

Leica Infinity es un software desarrollado para el tratamiento de datos provenientes de distintos equipos y formatos. Está diseñado con la mentalidad de trabajo por proyectos en los cuales podemos ir actualizando los datos con datos provenientes de distintas fuentes o distintas campañas, tratarlos, calcular y obtener resultados finales como por ejemplo coordenadas de ciertos puntos.

Estos puntos se procesan tras realizar las respectivas campañas geodésicas con este programa obteniendo así sus coordenadas finales.

Leica Infinity está diseñado de tal forma que todos sus menús y opciones sean fácilmente identificables, se pueden encontrar o acceder a los mismos de distintas formas y se han creado asistentes para facilitar las tareas.

El interface general es el que mostramos a continuación:

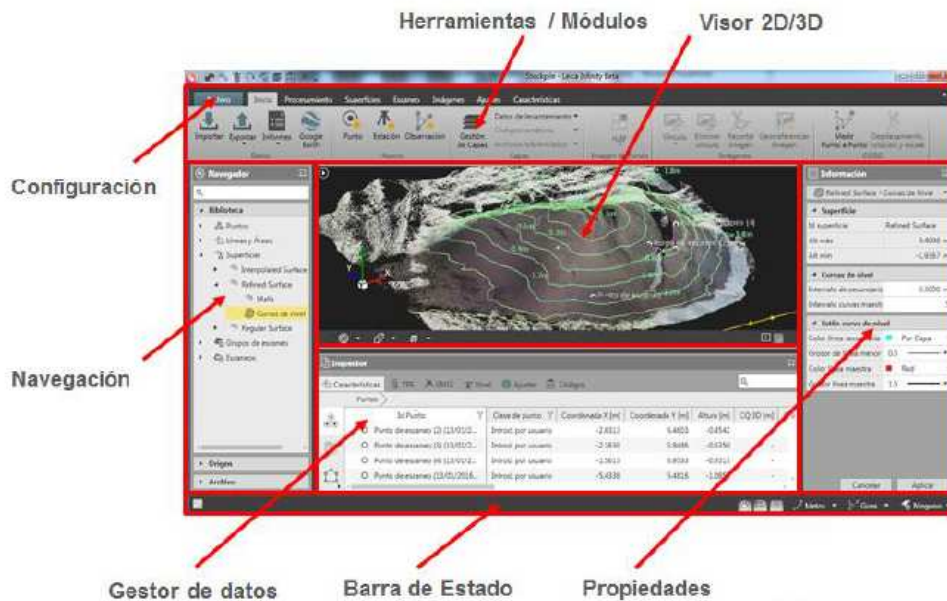


Figura 4.4: Interface general del Leica Infinity

La versión utilizada del programa es 2.3.2 de 64bits.

Para realizar el procesamiento de los datos y obtener así sus coordenadas precisas se necesitan varios datos para poder realizar el procesamiento:

1) Datos GNSS. Estos son los registros desde nuestro equipo GNSS de Leica en formato DBX.

2) Lo segundo que vamos a necesitar es el fichero de calibración absoluta de antena, el cual nuestro fichero es el LEIAS10, que es la antena de LEICA, aunque normalmente las correcciones de antena deben ser las del IGS.

3) Por último necesitamos las efemérides.

Otra manera es usando el menú de descarga que incorpora Leica Infinity desde la versión 2.1, donde podemos descargar datos RINEX y efemérides precisas de antenas de distintas redes como las estaciones de referencia EUREF o la RAP como es el caso de nuestra estación utilizada como referencia UJAE.

4.2. Receptores GNSS de bajo coste.

En este capítulo va a tratar de definir los conceptos básicos de las arquitecturas del receptor GPS de bajo coste uBlox C94-M8P usado en este trabajo, ya que requiere una implementación de hardware no estándar para acceder y procesar los datos brutos de GPS. Las implementaciones estándares directamente generan datos ya procesados, es decir, archivos de coordenadas (posiciones) y con este tipo de instrumentaciones debemos realizar algunos procedimientos antes de lograr esto.

También es importante definir todo el procedimiento necesario en este equipo en concreto ya que los procesadores modernos producen cambios constantemente y muy rápidamente, así que hoy en día cada instrumentación debe tener adjunta una guía a seguir para poder trabajar con ella.

El paquete utilizado de uBlox C94-M8P consta de dos equipos receptores, para poder trabajar en relativo, lo que mejora enormemente la precisión gracias a los mensajes de correcciones RTCM, los cuales se transmiten mediante radio UHF.



Figura 4.5: Receptores uBlox C94-M8P

Este tipo de receptores también permiten trabajar en absoluto sin necesidad de utilizar la pareja de receptores. Al trabajar con un receptor aislado en absoluto, este consigue precisiones de 1m aproximadamente tras resolver ambigüedades lo que podría valer para trabajos que requieran poca precisión.

Cada receptor consta de las siguientes partes fundamentalmente:

- Antena UHF
- Antena GPS
- Cable USB para conexión con un PC
- Placa base con circuito integrado que incluye:
 - o Un motor de adquisición/seguimiento
 - o Un procesador integrado
 - o Una pequeña memoria para almacenar configuraciones
 - o Módulos de comunicación (UART, SPI...)



Figura 4.6: Placa base uBlox C94-M8P

En la figura 4.6 podemos observar la placa base con todas las conexiones básicas realizadas y una luz led azul indicadora de que el equipo esta encendido.

Este indicador led tiene varios colores e intermitencias los cuales indican diferentes estados.

- El led azul indica que está encendido. Este equipo no tiene interruptor para encendido y apagado, sino que se enciende automáticamente cuando le llega corriente ya sea por el cable USB desde un ordenador o por conexión con una batería.
- El led verde parpadeando indica que se ha realizado una conexión RTK con un equipo de referencia, se enciende automáticamente cuando comienzan a llegar los mensajes de corrección RTCM y la solución es flotante, lo que indica que está resolviendo ambigüedades y la posición es prácticamente buena pero aun no se ha quedado fija. Las precisiones aun oscilan entre 3 a 5 cm.
- El led verde fijo indica que esta posición pasa de ser flotante a fija, ya que ha resuelto todas las ambigüedades. La posición queda fija, al igual que la precisión.

El mayor inconveniente de este tipo de equipos es la carencia de fuente de alimentación y de controladora del módulo, por lo que es necesario trabajar con instrumental que cumpla estas funciones, en este caso se ha utilizado un ordenador portátil, tal y como se observa en la figura 4.7.



Figura 4.7: uBlox C94-M8P con PC

4.2.1. Antenas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, tenemos dos tipos de antenas en estos equipos, tanto la antena GPS como la antena UHF teniendo cada de ellas unas funcionalidades totalmente distintas:

4.2.1.1. Antena GPS.

El propósito de la antena es recibir las señales de GNSS entrantes para pasarlas al procesador del receptor. Las antenas de GNSS vienen en varios tamaños y formas en función de las funcionalidades, las precisiones y el espacio disponible requerido. Esta antena en concreto es cuadrada con una zona plana con imán para facilitar la sujeción con superficies planas metálicas.

El techo de un coche puede servir como un excelente plano de tierra cuando la antena se coloca en el medio del techo, convirtiéndose el techo del coche entero como receptor de la antena GNSS.

Trabajar en entornos difíciles y/o sin planos de tierra hará que los tiempos de convergencia sean largos.

4.2.1.2. Antena UHF.

El propósito de esta antena es la de comunicación entre Rover y Base transmitiendo este último los mensajes RTCM al Rover para poder trabajar en modo relativo en tiempo real.

Este tipo de comunicaciones es bastante limitado por varios motivos, los dos principales es el horizonte despejado, ya que no recibirá comunicación alguna si encuentra algún objeto entre Rover y Base como puede ser un edificio, árbol, o cualquier otra obstrucción. El otro gran inconveniente de este tipo de conexiones es la distancia a la que pueden comunicarse.

Si se encontraran más lejos Rover y Base, la señal de radio no llegaría y no se puede trabajar en modo diferencial en tiempo real. La única medición posible sería en absoluto, lo que empeoraría considerablemente las precisiones obtenidas,

teniendo en cuenta que el fabricante indica que se obtienen precisiones en absoluto en las mejores condiciones de 1m y trabajando en relativo se pueden conseguir precisiones de 1cm o incluso menores en los mejores casos.

4.2.2. Receptores.

Los equipos que actúan como Base y Rover son exactamente iguales, tanto el receptor Rover como el receptor Base, la única diferencia entre estos es la configuración que se realiza desde el ordenador a través de su programa llamado “u-Center”. Los principales puntos a tener en cuenta son:

- Los mensajes de corrección. Se pueden configurar multitud de mensajes que queremos enviar y recibir desde los receptores los cuales debemos activarlos en ambos receptores, tanto en el Rover como en la Base. Los mensajes RTCM que se han activado en este trabajo son los siguientes:
 - o 1005: es un mensaje en el cual se transmiten las coordenadas de la estación de referencia.
 - o 1077: referente a correcciones de observaciones GPS.
 - o 1087: referente a correcciones de observaciones GLONASS
 - o 1230: son sesgos de código y fase de GLONASS

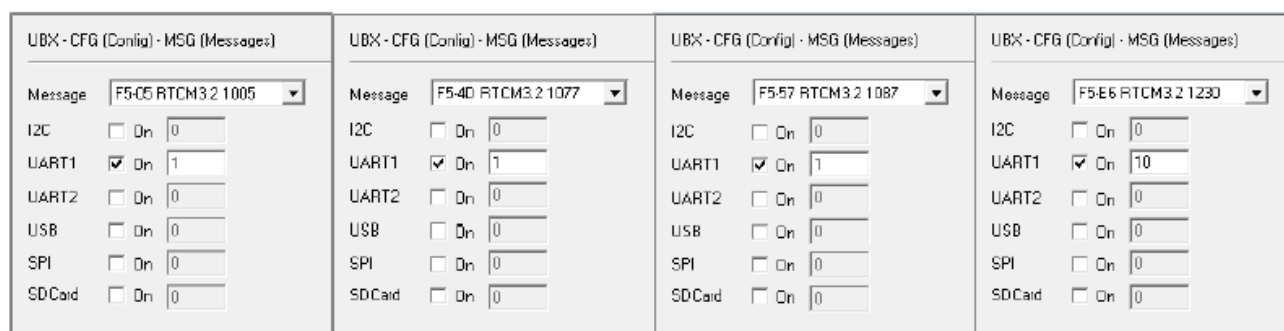
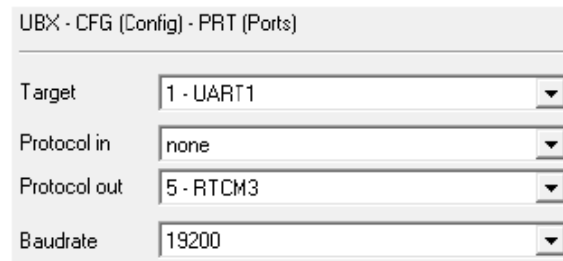


Figura 4.8: Mensajes RTCM

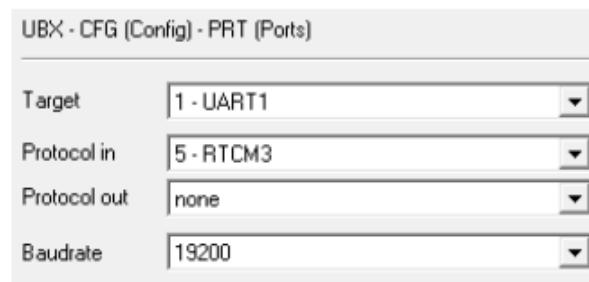
Tal y como se observa en la figura 4.8 se ha puesto que los mensajes que transmite la estación base al rover se reciben todos cada segundo por el puerto UART1 menos los sesgos (mensaje 1230) que lo hemos fijado cada 10 segundos.

- También se tiene que configurar el puerto del receptor. Esto se configura de forma distinta en Rover y en Base ya que en la Base los mensajes de corrección debemos ponerlos que sean de SALIDA y en el Rover que los mensajes sean de entrada.



UBX - CFG (Config) - PRT (Ports)	
Target	1 - UART1
Protocol in	none
Protocol out	5 - RTCM3
Baudrate	19200

Figura 4.9: Configuración puerto de Base



UBX - CFG (Config) - PRT (Ports)	
Target	1 - UART1
Protocol in	5 - RTCM3
Protocol out	none
Baudrate	19200

Figura 4.10: Configuración puerto de Rover

Como podemos observar en ambas figuras (4.9 y 4.10), los mensajes RTCM3 entran (“Protocol in”) en el Rover y salen del receptor de referencia (“Protocolo out”). Teniendo esto configurado de esta forma, el receptor de referencia que está estacionado en una posición de coordenadas conocidas, emite las correcciones al Rover consiguiendo de esta manera conseguir precisiones mucho más elevadas.

- Como último se tiene que configurar la localización de la Base. Para esto el programa nos permite configurar un receptor de referencia de tres formas distintas:
 - o Deshabilitado
 - o Auto-encuesta
 - o Coordenadas fijas

Para la Base se elige poner coordenadas fijas, y asignarle las coordenadas que previamente se han estimado con receptores geodésicos y largos periodos de observación.

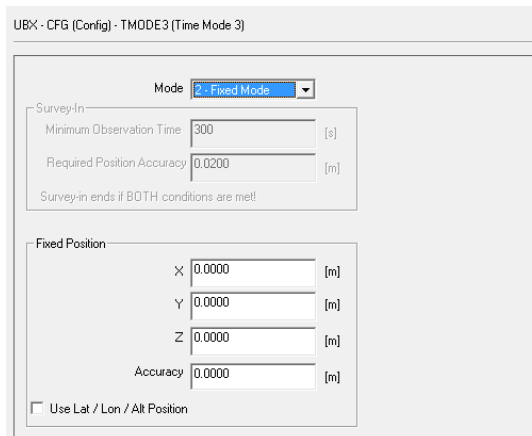


Figura 4.11: Configuración TMODE3 de Base

Y para el Rover se elige la precisión que se quiere que tenga, definida para este trabajo en 2cm. Tras un periodo de observación inicial y una vez resueltas las ambigüedades, como es de esperar la precisión va mejorando, y el momento que llega a la que le marcamos es el instante en el que pasa de las coordenadas flotantes a fijas. El led verde pasa de estar parpadeando a ser una luz verde fija.

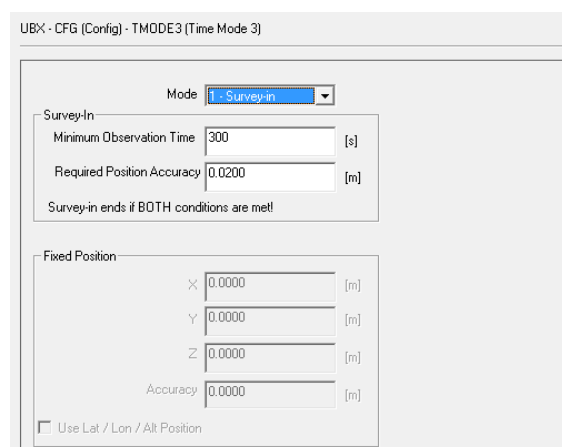


Figura 4.12: Configuración TMODE3 de Rover

Estas son las únicas diferencias que existen en la configuración entre Base y Rover, la demás configuración que viene por defecto es exactamente igual en ambos receptores.

4.2.3. Módulo de adquisición y seguimiento.

El procesador interno se ocupa de analizar los datos brutos y obtener la posición del receptor. Los receptores de bajo coste de hoy día cuentan con algoritmos que dan salida directamente a la posición del receptor y algunos otros datos, generalmente en formato NMEA.

Para poder calcular la posición del receptor, debe conocerse la hora actual y las efemérides de satélite. Cuando un receptor se enciende por primera vez, se lo obliga a recorrer todos los posibles códigos de satélite hasta que recibe una señal de satélite con suficiente SNR (Signal Noise Ratio) para obtener los parámetros de todos los satélites GNSS que pueden usarse para calcular su posición aproximada de órbita, efemérides y hora actual. Este procedimiento se le conoce como arranque en frío y puede tardar sobre 1 minuto.

Para evitar el arranque en frío, los receptores modernos de bajo costo almacenan los datos necesarios en la memoria interna, de modo que pueden reutilizarlos si se han apagado por un período corto. Si cuando reinicias el receptor siguen siendo válidos los parámetros de todos los satélites GNSS que pueden usarse, el receptor puede evitar circular por todos los satélites antes de obtener el tiempo y las efemérides, lo que se conoce como inicio cálido, el cual es un tiempo cercano a 30 segundos. Si también el tiempo y las efemérides siguen siendo válidas, el receptor puede calcular directamente una posición cuando se enciende, este inicio se conoce como inicio en caliente y el tiempo máximo para ello puede oscilar entre 4 a 6 segundos para poder realizarlo.

4.2.4. Software (u-Center).

Como ya se ha mencionado con anterioridad, estos receptores de bajo costo no tienen memoria para almacenar datos ni tampoco controlador, así que funciona conectado vía USB a un ordenador portátil. En este, es el programa u-center_v8.27 el que funciona como interfaz y controlador del receptor. Una vez instalado y ejecutado, podemos modificar la configuración interna del receptor, tanto del Rover como de la Base.

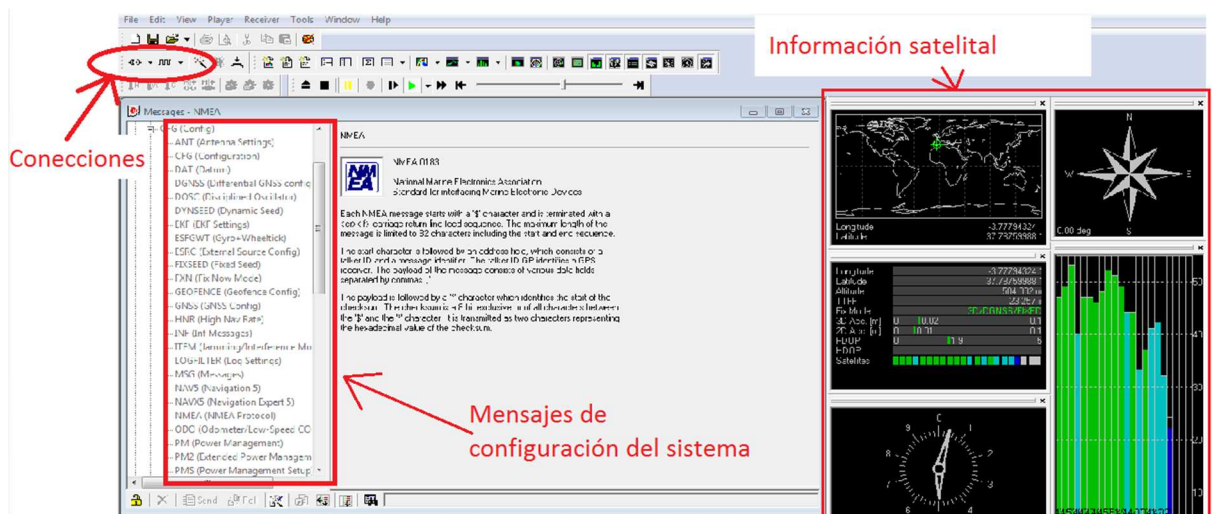


Figura 4.13: Espacio de trabajo u-center

Podemos observar el espacio de trabajo principal del u-center en la figura 4.13. Para comenzar a trabajar con él se deberá ubicar la barra de herramientas de comunicación (figura 4.14) y hacer clic en la flecha al lado del icono. Esto mostrará una lista con todos los puertos COM disponibles (figura 4.15). Seleccionar a continuación el puerto COM correspondiente donde el receptor está conectado. Si se puede establecer un enlace, el icono se pondrá verde y el texto en la barra de estado cambia de **No port open** a **COM6 9600** (en el ejemplo, u-center está conectado a COM6). Esto no significa que la comunicación funcione, sino que el puerto podría abrirse.



Figura 4.14: Barra de herramientas de comunicación



Figura 4.15: Lista de puertos COM disponibles

Una vez realizada la conexión podemos visualizar todos los datos de los satélites disponibles:

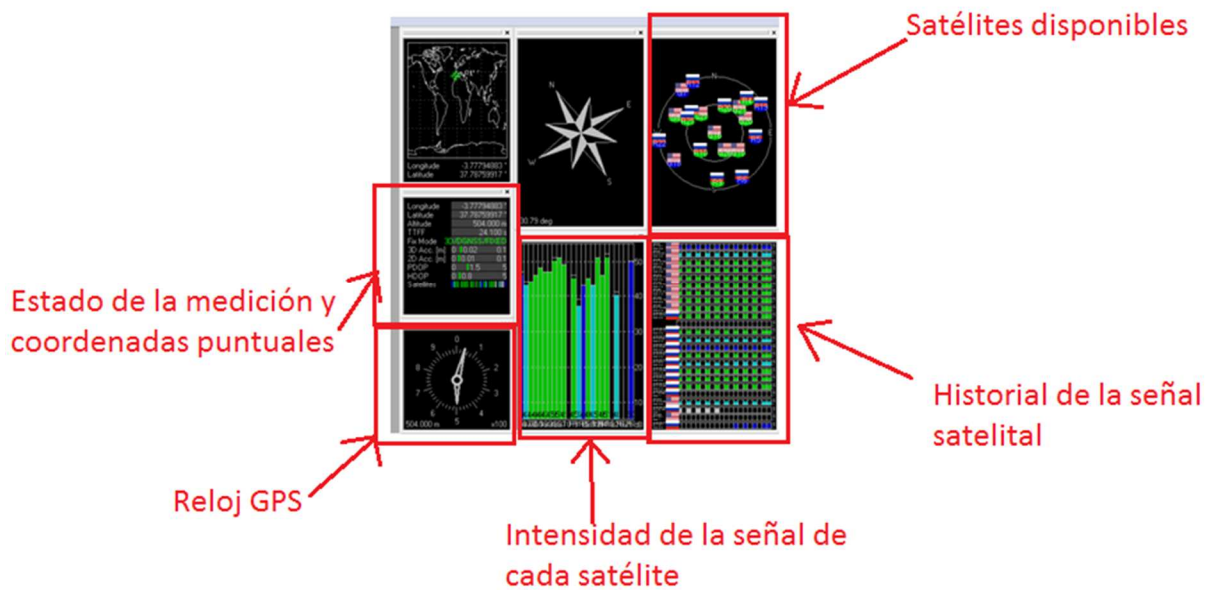


Figura 4.16: Información satelital

En la figura 4.16 de ejemplo podemos observar los satélites disponibles en un momento determinado. No solo podemos ver los satélites, sino también el nivel de los satélites, la posición de estos, el reloj GPS, entre otros datos.

Una vez se está recibiendo perfectamente toda la información de los satélites, para que reciba datos brutos en formato UBX debemos desactivar el formato NMEA y activar el formato UBX tal y como se observa en la figura 4.17. Esta configuración tendrá validez para una única sesión, al reiniciar el programa los parámetros vuelven a los valores por defecto (protocolo NMEA).

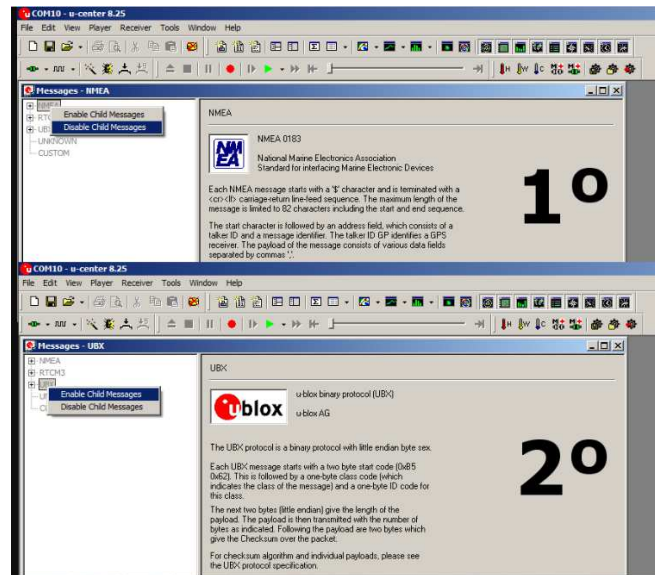


Figura 4.17: Formato de trabajo

Ya podemos configurar el receptor de Base y el Rover teniendo las consideraciones vistas en el apartado 4.2. Tal y como se ha visto con anterioridad, estos receptores no tienen baterías, se mantienen encendidos mediante la conexión USB del ordenador, pero una vez que configuremos el receptor Base, este no tiene por qué estar conectado al ordenador, ya que no tenemos que visualizar nada en este, solo funciona de referencia para que envíe los mensajes de corrección RTCM.

Para que este se mantenga encendido y emitiendo estos mensajes al Rover, se puede conectar una pequeña pila de petaca como batería con varios cables pequeños, tal y como se puede observar en la figura 4.18. Este tipo de baterías pueden llegar a durar en medición continua alrededor de 24 horas. Si por algún descuido se desconectara esta batería, se perdería la configuración de las coordenadas, y habría que comenzar desde el principio.



Figura 4.18: uBlox Base con batería externa

5. Metodología para la evaluación del posicionamiento GNSS con receptores de bajo coste.

Usualmente, en la mayoría de las aplicaciones geomáticas y topográficas se emplean receptores GNSS bifrecuencia. Sin embargo, los receptores de bajo coste, usualmente relegados a aplicaciones de navegación, se están proponiendo actualmente como alternativa en numerosos campos y aplicaciones como medioambientales, aplicaciones topográficas o en agricultura de precisión, debido a la capacidad de trabajar en tiempo real y a las competitivas precisiones que pueden alcanzar.

Como en todo equipo de medida, es recomendable aplicar procedimientos estandarizados a la hora de determinar la incertidumbre de este sistema de medida así como métodos estadísticos de calidad que den fiabilidad a los datos obtenidos en las medidas realizadas. Es decir, además de analizar la calidad del equipo de medida será necesario estudiar la calidad del posicionamiento RTK obtenido con dicho equipo. Este último se analizará mediante ciertos parámetros como son la precisión y la exactitud de las posiciones obtenidas en tiempo real en una selección de puntos de control.

La norma ISO 17123 especifica los procedimientos de campo que se adoptarán al determinar y evaluar la precisión de los instrumentos geodésicos y sus equipos auxiliares cuando se utilizan en la construcción y mediciones de puntos aislados. Principalmente, estas pruebas están destinadas a ser verificaciones de campo de que el instrumento funciona correctamente y para satisfacer los requisitos de otros estándares.

La ISO 17123 puede considerarse como uno de los primeros pasos en el proceso de evaluación de la incertidumbre de una medida (más específicamente un mensurando). La incertidumbre del resultado de una medición depende de un número de factores. Estos incluyen, entre otros, repetibilidad, reproducibilidad (repetibilidad entre días) y una evaluación exhaustiva de todas las posibles fuentes

de error, según lo prescrito por la Guía ISO para la expresión de la incertidumbre en medida (GUM).

Estos procedimientos de campo han sido desarrollados específicamente para aplicaciones in situ sin la necesidad de equipos auxiliares y están diseñados a propósito para minimizar las influencias atmosféricas.

ISO 17123-8 surge como una necesidad para paliar la deficiencia de estándares que existía en la calibración o prueba de receptores GNSS en el ámbito de la geodesia y cartografía, ya que a partir del año 2002 en que se implementaron las normativas ISO existentes para instrumentos ópticos y mecánicos, no se habían mostrado, o eran muy escasos los trabajos relativos a un estándar para medición o prueba de calidad de los receptores GPS, y ni siquiera había una comisión en la FIG que evaluara estas nuevas herramientas cartográficas que estaban apareciendo, dotadas en su mayoría de receptores GNSS. Debemos destacar que la norma anterior al ISO fue la DIN 18753 y tampoco se hizo mención de los receptores GPS.

En el ISO 17123 las partes desde la 1 hasta la 7 se refieren a Teoría, Niveles, Teodolitos, Distanciómetros, Estaciones Totales, Laser Rotativo y Plomadas Ópticas, lo que creaba un vacío para los equipos del día a día en topografía, geodesia y cartografía; los GNSS (receptores GPS, GLONASS, GALILEO, etc.) hasta que apareció la Parte 8 del estándar. En la implementación del mismo, justo al principio, encontramos notas, que recomiendan tener en lo posible las mejores condiciones durante la prueba, en cuanto a multireflexión se refiere, y las menores obstrucciones posibles, tanto en la base como en el Rover. También, el estándar recomienda que las condiciones Ionosférica y Troposférica deban ser óptimas al momento de las observaciones en la evaluación.

5.1. Calidad del equipo de medida. Norma ISO 17123-8.

Esta ISO tiene como propósito presentar una metodología eficiente e ilustrada, que permite a todos los usuarios que utilicen los equipos GNSS, realizar la evaluación y poder tener una visión clara de la calidad de los mismos receptores. Se puede realizar antes o después de una campaña o bien realizar un chequeo rutinario temporal del mantenimiento de los aparatos y así ver su precisión. Esta ISO amplía las posibilidades para el control de calidad, sin necesidad de mandarlos a una empresa específica que controle la precisión del instrumento.

El ISO 17123-8 especifica que dentro de la operabilidad de las mediciones a realizar, la precisión de los equipos auxiliares, como plomadas, trípodes, bastones, cintas etc., deberán ser de $\pm 1\text{mm}$ de precisión para la excentricidad máxima, y $\pm 1\text{mm}$ de error máximo en las mediciones de las alturas, por lo que en la evaluación, se procedió a habilitar dos trípodes, que con sus bases nivelantes y plomadas ópticas, quedaron fijos en el sitio, sobre los puntos de prueba, y cuya distancia y diferencia de altura fue calibrada con una nivelación de alta precisión mediante un nivel digital y mira invar. La ISO 17123-8 recomienda la reducción de las observaciones verticales al sistema elipsoidal. Para las coordenadas planimétricas ya que con el receptor uBlox lo que se obtiene son coordenadas geodésicas, geográficas o cartesianas, se calcularán a posteriori las UTM Huso 30.

La ISO establece que para la realización del test se debe de partir de 3 puntos, 1 considerado como base y dos puntos de rover. La separación de los dos puntos rover será de un mínimo de 2m y no excederá los 20m. Las posiciones de los puntos rover se pueden seleccionar a conveniencia en el campo.

La distancia horizontal y la diferencia de altura entre los puntos usados de rover se determinarán por métodos con una precisión superior a 3mm distinta a RTK. Estos valores se consideran valores nominales y se usan en el primer paso de ambos procedimientos de prueba. Las distancias horizontales y las diferencias de altura calculadas a partir de las coordenadas medidas en cada una de las mediciones establecidas se compararán con estos valores para garantizar que las mediciones están libres de cualquier valor atípico. Sin embargo, los valores nominales no se usan en las pruebas estadísticas.

Cada conjunto de mediciones consiste en mediciones sucesivas en los puntos rover "a" y "b".

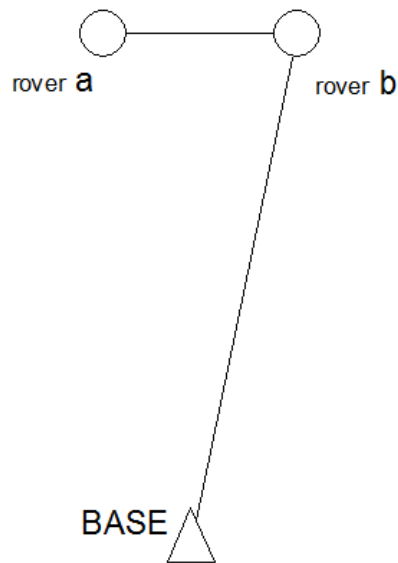


Figura 5.1: Representación puntos ISO

El intervalo de tiempo entre series sucesivas será de aproximadamente 5 minutos. Este requisito hace que la duración de una serie de mediciones sea de aproximadamente 25 minutos y que cinco conjuntos de mediciones en ambos puntos móviles se distribuyan uniformemente en este tramo. Debido al hecho de que el ciclo de variación de una influencia multipath típica es de aproximadamente 20 minutos, el procedimiento de medición cubrirá principalmente el periodo de este factor de influencia.

La hora de inicio para cada serie sucesiva debe estar separada por al menos 90 minutos. Por lo tanto, múltiples series de mediciones tienden a reflejar influencias tales como cambios en la configuración del satélite y variaciones en las condiciones ionosféricas y troposféricas.

El procedimiento del método simplificado contiene solo una serie de mediciones y, por lo tanto, solo trata de la detección de valores atípicos y sin evaluación estadística. Por el contrario, el procedimiento del método completo consta de tres series y, además, permite la estimación de las desviaciones estándar y la prueba estadística.

- El procedimiento del método simplificado consiste en una única serie de mediciones y proporciona una estimación de si la precisión del uso del equipo está dentro de una desviación permisible especificada y se basa en un número limitado de mediciones. Por lo tanto, no se puede obtener una desviación estándar significativa y no se aplican las pruebas estadísticas. Si se requiere una evaluación más precisa del equipo, se recomienda adoptar el procedimiento del método completo.
- Se adoptará el procedimiento del método completo para determinar la mejor medida de precisión posible del equipo en uso.

El procedimiento del método completo consiste en tres series de mediciones y está destinado a determinar la desviación estándar experimental para una sola medición de posición y altura.

Además, este procedimiento se puede usar para determinar lo siguiente:

- La medida de la precisión del equipo en determinadas condiciones (incluidas las influencias típicas a corto y largo plazo).
- La medida de la precisión de los equipos utilizados en diferentes períodos de tiempo o bajo diferentes condiciones.
- La medida de la capacidad de comparación entre diferentes precisiones de los equipos alcanzables en condiciones similares.

Se aplicará una prueba estadística para determinar si la muestra del experimento pertenece a la misma población que la que arroja la desviación estándar teórica y para determinar si dos muestras de diferentes experimentos pertenecen a la misma población. *(ISO 17123-8, 2015)*

5.1.1. Método simplificado

Para el procedimiento del método simplificado, se tomará una serie de mediciones, en las que el observador obtendrá cinco conjuntos de mediciones en dos puntos de rover. La secuencia de las mediciones se muestra en la tabla 5.1 en las que las distintas columnas indican explícitamente la secuencia de la medición.

Identificador	Serie	Conjunto	Rover	Medida		
				x	y	h
1	1	1	1	$x_{1,1,1}$	$y_{1,1,1}$	$h_{1,1,1}$
2	1	1	2	$x_{1,1,2}$	$y_{1,1,2}$	$h_{1,1,2}$
3	1	2	1	$x_{1,2,1}$	$y_{1,2,1}$	$h_{1,2,1}$
4	1	2	2	$x_{1,2,2}$	$y_{1,2,2}$	$h_{1,2,2}$
5	1	3	1	$x_{1,3,1}$	$y_{1,3,1}$	$h_{1,3,1}$
6	1	3	2	$x_{1,3,2}$	$y_{1,3,2}$	$h_{1,3,2}$
7	1	4	1	$x_{1,4,1}$	$y_{1,4,1}$	$h_{1,4,1}$
8	1	4	2	$x_{1,4,2}$	$y_{1,4,2}$	$h_{1,4,2}$
9	1	5	1	$x_{1,5,1}$	$y_{1,5,1}$	$h_{1,5,1}$
10	1	5	2	$x_{1,5,2}$	$y_{1,5,2}$	$h_{1,5,2}$

Tabla 5.1: Resumen secuencia de mediciones.

Un conjunto específico de medidas se expresa como $x_{i,j,k}$, $y_{i,j,k}$ y $h_{i,j,k}$ donde x, y y h representan las coordenadas del punto considerado en un sistema local. El índice i representa el número de serie, el índice j representa el número del conjunto y el índice k representa el rover que se ha utilizado.

5.1.1.1. Cálculo.

Las medidas individuales se comparan directamente con los valores nominales disponibles para detectar errores groseros.

Para cada conjunto en una serie se calcula la distancia horizontal y la diferencia de altura entre dos puntos rover. Posteriormente, se calcula sus desviaciones de los valores nominales.

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_{i,j,2} - x_{i,j,1})^2 + (y_{i,j,2} - y_{i,j,1})^2}$$

$$\Delta h_{i,j} = h_{i,j,2} - h_{i,j,1}$$

$$\varepsilon_{D_{i,j}} = D_{i,j} - D^*$$

$$\varepsilon_{h_{i,j}} = h_{i,j} - h^*$$

$$i = 1; j = 1, \dots, 5$$

Donde:

$x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, h_{i,j,k}$:Son medidas x, y y h respectivamente en el conjunto j, el punto rover k y serie i.

$D_{i,j}, \Delta h_{i,j}$:Son la distancia horizontal y diferencia de altura calculadas en el conjunto j y serie i

D^*, h^* :Son los valores nominales de la distancia horizontal y la diferencia de altura.

$\varepsilon_{D_{i,j}}, \varepsilon_{h_{i,j}}$:Son las desviaciones en la distancia horizontal y la diferencia de altura.

Todas las desviaciones deben satisfacer las dos condiciones establecidas por la norma ya que si no las superan se sospecha que hay un valor atípico y se tiene que repetir las mediciones (*u-blox AG, 2017*).

Condiciones de la norma:

$$|\varepsilon_{D_{i,j}}| \leq 2.5 \times \sqrt{2} \times s_{xy}$$

$$|\varepsilon_{h_{i,j}}| \leq 2.5 \times \sqrt{2} \times s_h$$

Donde:

s_{xy} y s_h :Son las desviaciones estándar predeterminadas por el fabricante.

Aceptamos, que un receptor GNSS RTK estándar de uso de ingeniería o de topografía, arroje precisiones en el horizontal de +- 10mm +1ppm, es decir un milímetro adicional por kilómetro de separación de la base, al 99% de confianza del sistema, que nos daría en X, Y un sigma de +-11mm, y en altimetría las precisiones se aceptan con 15mm +2ppm (A.Márquez, MECINCA. MSEE Columbia University). Pero hay que tener en cuenta que nuestro estudio se basa en la precisión no de un receptor genérico, sino que estudiamos la ISO para el receptor de bajo coste uBlox C94-M8p el cual especifica el fabricante que tiene una precisión de 25mm + 1ppm en ambas componentes, tanto en altimetría como en planimetría. Esto arrojaría 26mm de precisión (*u-blox AG, 2017*).

$$s_{xy} = s_h = 26\text{mm}$$

5.1.2. Método completo

Para el procedimiento del método completo, se tomarán tres series de mediciones. La secuencia de las medidas en cada serie es idéntica al caso del método simplificado. La hora de inicio de las series consecutivas debe estar espaciada al menos 90 minutos.

El mismo procedimiento descrito anteriormente en el método simplificado se aplicará a todas las mediciones en las tres series.

5.1.2.1. *Cálculo de los valores estadísticos.*

En primer lugar, agrupamos las observaciones en columnas x, y, h, en R1 las filas pares y en R2 las filas impares, con 15 elementos por columna, de las cuales obtenemos los promedios de cada una teniendo:

Prom x1, Prom x2, Prom y1, Prom y2, Prom h1, Prom h2.

Una vez calculados los promedios, restamos de los mismos las observaciones originales para obtener los residuos, por lo cual tendremos un residuo en x, y, h por cada observación realizada quedando como:

$$r_{x\ i,j,k} = \bar{x}_k - x_{i,j,k}$$

$$r_{y\ i,j,k} = \bar{y}_k - y_{i,j,k}$$

$$r_{h\ i,j,k} = h_k - h_{i,j,k}$$

$$k = 1,2, j = 1,\dots,5, i = 1,2,3$$

Los residuos anteriores se cuadran y se suman, incluidas las medidas para todos los índices de puntos k=1 y k=2 para x,y y h por separado:

$$\sum r_x^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 r_{x\ i,j,k}$$

$$\sum r_y^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 r_{y\ i,j,k}$$

$$\sum r_h^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 r_{h\ i,j,k}$$

Los grados de libertad para x, y y h son idénticos. Estos se calculan como:

$$v_x = v_y = v_h = (m \cdot n - 1) \cdot p = (3 \times 5 - 1) \times 2 = 28$$

Donde:

m = es el número de series (3)

n = es el número de conjuntos en una serie (5)

p = es el número de rover (2)

Finalmente, las desviaciones estándar experimentales de una sola medida de x , y y h se calculan como:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum r_x^2}{v_x}} = \sqrt{\frac{\sum r_x^2}{28}}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum r_y^2}{v_y}} = \sqrt{\frac{\sum r_y^2}{28}}$$

$$s_h = \sqrt{\frac{\sum h}{v_h}} = \sqrt{\frac{\sum r_h^2}{28}}$$

Y por lo tanto la desviación estándar experimental de una sola posición (x , y) es:

$$s_{xy} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

Con esto, podemos establecer las incertidumbres estándar de una sola posición (x , y):

$$u_{ISO-GNSS RTK_{xy}} = s_{xy}$$

Y una simple altura (h):

$$u_{ISO-GNSS RTK_h} = s_h$$

5.1.2.2. *Test estadísticos.*

Tras el cálculo de los valores estadísticos propuestos por el estándar, se procede a realizar una serie de cuestiones las cuales son solo viables para el método completo. Para la interpretación de los resultados, las pruebas estadísticas se llevarán a cabo utilizando las desviaciones estándar experimentales s_{xy} y s_h obtenidas de las mediciones y sus respectivos grados de libertad para responder a las siguientes preguntas:

a) ¿Es el valor obtenido de la ISO 17123-8 en X, Y, menor o igual que el que prescribe el fabricante?

La hipótesis nula establece que la desviación estándar experimental, s_{xy} , de una posición única, x, y, es menor o igual a un valor teórico o predeterminado, σ_{xy} , no se rechaza si se cumple la siguiente condición (*ISO 17123-8, 2015*):

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8xy}} \leq \sigma_{XY} \times \sqrt{\frac{\chi^2_{0.95}(V_x+V_y)}{(V_x+V_y)}}$$

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8xy}} \leq \sigma_{XY} \times \sqrt{\frac{\chi^2_{0.95}(56)}{56}}$$

Donde:

$$\sigma_{XY} = 25\text{mm}$$

$$\chi^2_{0.95}(56) = 74.47$$

b) ¿Es el cálculo obtenido del ISO 17123-8 en h menor o igual que el prescrito por el fabricante?

La hipótesis nula establece que la desviación estándar experimental, s_h , de una altura única, h, es menor o igual a un valor teórico o predeterminado, σ_h , no se rechaza si se cumple la siguiente condición, (*ISO 17123-8, 2015*):

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8h}} \leq \sigma_h \times \sqrt{\frac{\chi^2_{0.95}(V_h)}{V_h}}$$

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8h}} \leq \sigma_h \times \sqrt{\frac{\chi^2_{0.95}(28)}{28}}$$

Donde:

$$\Sigma h = 25\text{mm}$$

$$\chi^2_{0.95}(28) = 41.34$$

c) ¿Dos muestras de ISO 17123-8 X, Y, medidas de forma independiente, pertenecen a la misma población?

En el caso de dos muestras diferentes, la prueba indica si las desviaciones estándar experimentales, s_{xy} y \bar{x}_{xy} , de una simple posición (x, y) pertenecen a la misma población. La hipótesis nula correspondiente, $\sigma_{XY(A)} = \sigma_{XY(B)}$ no se rechaza si se cumple la siguiente condición, (ISO 17123-8, 2015):

$$\frac{1}{F_{0.975}(V_{x(A)}+V_{y(A)}, V_{x(B)}+V_{y(B)})} \leq \frac{S2_{\text{ISO_RTKxy}}}{\tilde{S}2_{\text{ISO_RTKxy}}} \leq F_{0.975}(V_{x(A)}+V_{y(A)}, V_{x(B)}+V_{y(B)})$$

$$\frac{1}{F_{0.975}(56,56)} \leq \frac{S2_{\text{ISO_RTKxy}}}{\tilde{S}2_{\text{ISO_RTKxy}}} \leq F_{0.975}(56,56)$$

Por consiguiente tenemos que el entorno de nuestra varianza está entre 0.59 y 1.70.

$$0.59 \leq \frac{S2_{\text{ISO_RTKxy}}}{\tilde{S}2_{\text{ISO_RTKxy}}} \leq 1.70$$

d) ¿Dos muestras de ISO 17123-8 h, tomadas de forma independiente, pertenecen a la misma población?

La hipótesis de que las dos desviaciones estándar experimentales, s_h y \bar{x}_h , de una altura única, h, pertenecen a la misma población, no se rechaza si se cumple la siguiente condición, (ISO 17123-8, 2015):

$$\frac{1}{F_{0.975}(V_{h(A)}, V_{h(B)})} \leq \frac{S2_{\text{ISO_RTK}_h}}{\tilde{S}2_{\text{ISO_RTK}_h}} \leq F_{0.975}(V_{h(A)}, V_{h(B)})$$

$$\frac{1}{F_{0.975}(28,28)} \leq \frac{S2_ISO_RTK_h}{\tilde{S}2_ISO_RTK_h} \leq F_{0.975}(28,28)$$

Por lo tanto los valores extremos entre los que debemos comparar la varianza para que cumpla la hipótesis son 0.47 y 2.13.

$$0.47 \leq \frac{S2_ISO_RTK_h}{\tilde{S}2_ISO_RTK_h} \leq 2.13$$

5.1.2.3. Evaluación de la incertidumbre estándar combinada.

La incertidumbre combinada en el sistema de coordenadas horizontal se describe como:

$$u_{xy} = \sqrt{u_{ISO-GNSS-xy}^2 + [h_a \tan u_{bub}]^2 + 2u_{disp}^2 + u_c^2 + u_{dx}^2 + u_{dy}^2 + u_{tr}^2}$$

Donde:

h_a = altura de la antena.

La incertidumbre combinada en el sistema de coordenadas vertical se describe como:

$$u_h = \sqrt{u_{ISO-GNSS-h}^2 + u_{disp}^2 + u_{ha}^2 + u_{hs}^2 + u_{dh}^2 + u_{dH}^2}$$

Con incertidumbre expandida:

Con factor de cobertura $k = 2$

$$U_{xy} = 2 \cdot u_{xy}$$

$$U_h = 2 \cdot u_h$$

5.2. Calidad del posicionamiento RTK

5.2.1. Parámetros de calidad del posicionamiento RTK

Todos los procesos de medición están influenciados por errores aleatorios y sistemáticos. La evaluación de la precisión y exactitud de un sistema de medición, incluido el levantamiento GNSS, para lograr resultados que cumplan con las especificaciones de calidad de un proyecto determinado es una tarea crítica, por lo que se deben evaluar en toda medición.

Ambos términos a menudo son empleados para describir la “calidad” de las soluciones obtenidas con un posicionamiento en tiempo real, sin embargo, ambos términos son técnicamente diferentes.

Mientras que la precisión se refiere a la dispersión de los resultados respecto al valor medio (1), la exactitud hace referencia a la cercanía al valor verdadero. Dado que este es desconocido, se empleará como valor de referencia la solución estimada en post-proceso a partir de la observación realizada con el receptor GNSS geodésico (2). Para describir la precisión y la exactitud se empleará respectivamente la desviación estándar y el error Medio Cuadrático (RMSE). (*Ref. GNO et al, 2018*)

(1) Precisión:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}$$

$$\sigma_{Up} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Up_i - \overline{Up})^2}$$

Representando σ_N , σ_E y σ_{Up} las desviaciones estándar en las componentes Norte, Este y altitud respectivamente.

(2) Exactitud:

$$E_{Horizontal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{N_i^2 + E_i^2}$$

$$E_{Vertical} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Up_i|$$

Siendo n el tamaño de la muestra, que en cada sesión es la misma (30).

5.2.2. Definición de puntos de control.

5.2.2.1. Preselección y prueba de alcance de la radio.

Para la evaluación de la calidad del posicionamiento RTK en estático primeramente se seleccionaron unos puntos de control situados a distintas distancias entre los receptores que actúan como referencia y como rover de los cuales se conocen sus coordenadas precisas y que son vértices geodésicos de la red REGENTE y ROI.

Todos los puntos son cercanos a la ciudad de Jaén y se han estimado sus coordenadas mediante campañas GNSS con equipos geodésicos.

Tras la elección de todos estos puntos para la realización del trabajo, se colocó un receptor de bajo coste uBlox en la terraza del edificio de Ciencia y Tecnología en el Campus de la Universidad de Jaén (Jaén) que actuaba como referencia y se colocó otro receptor de bajo coste uBlox en los puntos elegidos para la realización del trabajo observando tras el desplazamiento a estos que no recibían correcciones RTCM debido a que la distancia entre receptores era muy grande.

Tras descartar esta forma de trabajo se realizó una serie de pruebas para la estimación de distancia máxima de trabajo y poder definir así el nuevo entorno de trabajo.

La primera prueba a la que se debe someter los receptores uBlox es la comprobación de alcance como ya se ha mencionado, para poder saber a qué distancia se puede trabajar y limitar nuestra futura prueba.

Se plantea la estrategia inversa, es decir, ir aumentando progresivamente la distancia entre el receptor Referencia y el receptor que actúa como Rover para obtener esa distancia máxima de trabajo.

Las pruebas se resumen en la tabla 5.2 con las distancias aproximadas entre los receptores base y rover a las que se situaron para comprobación de la radio.

Nombre punto	Distancia aproximada	Recepción mensajes RTCM
Universidad	200m	Si – Todos correctos
Deposito	2500m	Si – Todos correctos
Castillo	3000m	Si – Fallidos
Puente Tablas	4000m	No

Tabla 5.2: Resumen pruebas para alcance de radio

Observamos que los mensajes de corrección RTCM llegan correctamente por debajo de los 3Km, pero al llegar a los 3Km, a pesar de que si llegan estos mensajes, entran como fallidos. Esto es debido a que la distancia es demasiado grande entre los receptores. Tal y como podemos observar en la figura 5.2 estos mensajes llegan, pero en ocasiones son fallidos, con lo que podemos deducir que estamos en el umbral de la lejanía máxima.

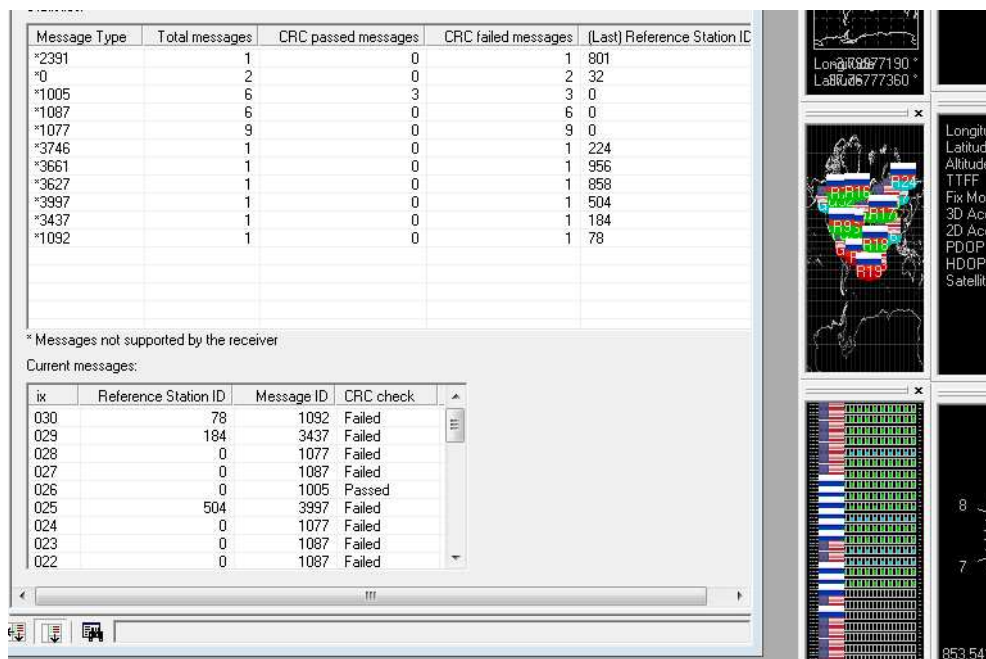


Figura 5.2: Mensajes RTCM recibidos en punto Castillo

Tras la prueba realizada se establece la distancia límite entre receptores de Referencia y Rover en 2.5km.

5.2.2.2. Selección de puntos de control (líneas base corta y media)

Para el análisis del posicionamiento RTK se deben comparar las medidas realizadas con el receptor de bajo coste con un valor de posición que se considera como “verdadero”.

Los puntos elegidos para el trabajo son tres, dos pilares de la Universidad de Jaén (P1 y P2) y un punto denominado “Depósito” el cual se encuentra a 2.5Km aproximadamente de la Universidad de Jaén.

Las coordenadas de estas posiciones se obtendrán en post-proceso tras realizar la medición de las líneas base entre el vértice UJAE (RAP) y los puntos mencionados mediante campañas GNSS con un receptor Leica Viva con 24 horas de observación en cada punto.

Para los puntos P1 y P2 se utilizaron dos pilares de la Universidad de Jaén ya construidos con anterioridad para otros trabajos, pero el punto “Deposito” se buscó la localización perfecta para la campaña. Tras una pequeña prueba dentro de los 2.5Km de lejanía que admite la antena UHF (tal y como se estableció en el apartado anterior) y comprobar que efectivamente llegaban los mensajes de corrección entre receptor de Referencia y Rover, se eligió una zona cercana a un depósito de agua y se instaló un tornillo en unas grandes zonas rocosas para la localización exacta del trabajo. Este punto ya que permanece en una zona poco transitada, es un buen punto de apoyo para futuros trabajos topográficos de la zona.

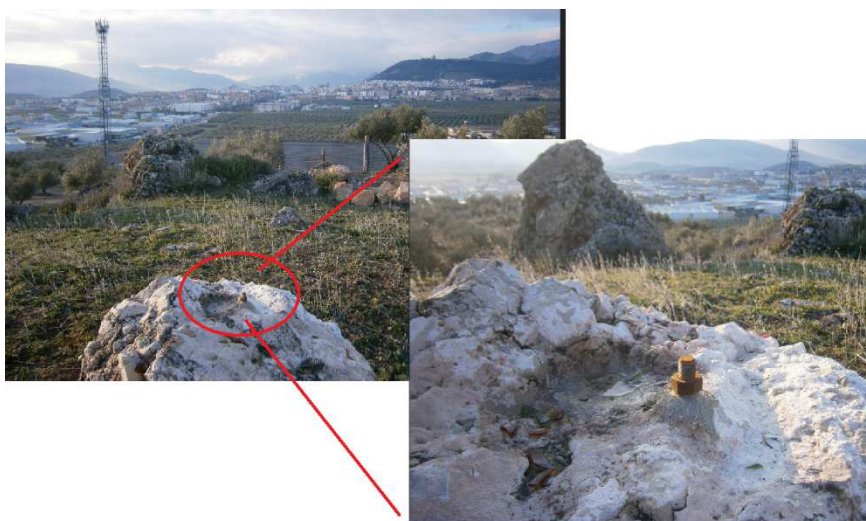


Figura 5.3: Punto Depósito

La distribución de estos puntos se puede observar en la figura 5.4.



Figura 5.4: Representación de puntos P1, P2, Depósito y Vértice UJAE de la RAP

Tras las respectivas campañas GNSS se realizó el procesado de los datos con el Software Leica Infinity (versión 2.3.2) pasados 14 días desde la campaña, para que estuviesen disponibles las efemérides precisas usando las siguientes opciones de procesado:

- Máscara de elevación: 10°
- Tipo de efemérides: Precisas
- Calibración de antena: Leica Absoluta
- Tipo de solución: Fijo (Fase) con frecuencia L1 y L2
- Modelo troposférico: VMF con modelo GPT2
- Modelo ionosférico: Automático

Las coordenadas estimadas de P1, P2 y Depósito aparecen la tabla 5.3:

Coordenadas ETRS89 (ETRF2000)				
Denominación del Punto:		P1	P2	Deposito
Coord. Geodésicas	Latitud:	37° 47' 15.36" N	37° 47' 15.79" N	37° 48' 04.59" N
	Longitud:	3° 46' 40.62" O	3° 46' 40.19" O	3° 47' 46.77" O
	Alt. Elips:	504.021m	503.999m	545.095m
Coord. Cartesianas	X:	5036339.291m	5036331.886m	5035336.438m
	Y:	-332566.475m	-332555.622m	-334122.162m
	Z:	3887158.335m	3887158.753m	3888373.170m

Tabla 5.3: Coordenadas estimadas de P1, P2 y Depósito

6. Resultados del posicionamiento GNSS RTK con receptores de bajo coste.

Este capítulo presenta los resultados tras la evaluación de la calidad del equipo uBlox C94-M8P según la norma ISO 17123-8. Así mismo se presentan los resultados del posicionamiento RTK tras la medida de una línea base corta y otra media para ver la influencia en la calidad del posicionamiento del aumento de la distancia entre los receptores que actúan como referencia y rover.

6.1. Calidad del equipo de medida.

En este estudio, se aplica el estándar ISO 17123-8 para evaluar el rendimiento RTK de dos receptores GNSS, el Leica GS10 de doble frecuencia geodésico con antena AS10 considerando la solución RTK basada en red, y el u-Blox C94-M8P de frecuencia única de bajo costo.

La norma ISO 17123-8 (ISO, 2007) especifica los procedimientos de campo que se deben adoptar al determinar y evaluar la precisión (repetibilidad) de los sistemas de medición de campo GNSS (de cualquier constelación) en cinemática relativa (GNSS RTK). Para la realización de la ISO se evalúan dos métodos diferentes, un método simplificado y otra evaluación completa. Si bien los procedimientos de medición son muy similares, las filosofías u objetivos a perseguir con cada uno de ellos son de índole diferente. En el método simple, tal y como se ha mencionado con anterioridad, se realiza una medición relativamente simple con los receptores GNSS, y se chequea que las desviaciones resultantes de las medidas de un cierto vector, no difieran o sean mayores que las especificadas por el fabricante y podamos verificar que el sistema GNSS mantiene al menos sus especificaciones básicas originales.

El método completo requiere de muchas más mediciones y el producto final es un análisis estadístico de los parámetros de precisión del equipo GNSS, los cuales también se comparan con los especificados por el fabricante.

Para todo el estudio los puntos seleccionados son tres, uno utilizado para la localización del receptor de referencia, y los otros dos para usarlos de localización en el receptor rover siendo la separación entre estos dos como mínimo de 2 metros y no debe exceder los 20 metros tal y como define la norma.

En nuestro caso los puntos rover “a” y “b” están ubicados en la terraza del edificio de Ciencia y Tecnología en el Campus de la Universidad de Jaén (Jaén), los cuales se seleccionaron debido a la buena disposición de estos con un horizonte totalmente despejado y libre de obstáculos entre ellos y el punto seleccionado como referencia.

La distancia nominal (D) y la diferencia de altura (Δh) se conoce gracias a datos de campañas anteriores facilitadas por la Universidad de Jaén en las que se utilizó para la planimetría el receptor GNSS TCA 2003 y para la altimetría se realizó una nivelación de alta precisión mediante el nivel DNA 03 con mira imbar siendo estos valores los siguientes:

$$D = 16.102\text{m}$$

$$\Delta h = 0.015\text{m}$$

Para la localización del punto de la estación de referencia, se ha utilizado un tornillo instalado en el Colegio Mayor (Jaén) con el que el nombre que le definimos para el trabajo será UJAC (Universidad de Jaén Colegio Mayor). Este punto será usado en la solución RTK de base única, calculando el móvil (rover) su posición relativa a la ubicación de esta estación de referencia UJAC. Para obtener una precisión de posicionamiento óptima, previamente se realizaron 3 horas de medición GNSS estática en UJAC usando el receptor Leica GS10 de doble frecuencia y antena AS10 con posterior procesamiento para obtener sus coordenadas en el mismo sistema de referencia y marco que el Red RAP (ETRS89-ETRF2005)

La estación de referencia permanente RAP UJAE está ubicada en la terraza del Colegio Mayor Domingo Savio, campus de las Lagunillas (Jaén). La estación consta de un receptor GPS: Leica GR25 con antena Leiat504 Leis, siendo las coordenadas de la estación en ETRF2000 época 2017.0 las siguientes:

- Coordenadas Cartesianas:

X: 5036325.101m

Y: -332899.154m

Z: 3887177.045m

- Coordenadas Geodésicas:

Latitud: 37°47'15.93838"N

Longitud: 3°46'54.21994"O

Altura Elipsoidal: 527.754m

- Coordenadas UTM:

Huso 30

x: 431168.522m

y: 4182554.777m



Figura 6.1: Antena de la RAP UJAE



En la figura 6.2 podemos observar el procedimiento de observación de las coordenadas del punto usado como referencia UJAC el cual se sitúa en el Colegio Mayor (Jaén) como ya se ha mencionado.

Una vez se tiene terminada la medición del UJAC procedemos al post-procesado para obtener la línea base desde UJAC hasta UJAE con el Leica Infinity.

Figura 6.2 Punto UJAC

Usando las siguientes opciones de procesado:

- Máscara de elevación: 15°
- Tipo de efemérides: Transmitidas
- Tipo GNSS: GPS
- Tipo de solución: Fijo (Fase) con frecuencia L1 y L2
- Modelo troposférico: Hopfield
- Modelo ionosférico: Automático

Tras terminar el procesado de la línea base las coordenadas ETRS89 (ETRF2005) del UJAC son las siguientes:

$$X = 5036327,758\text{m}$$

$$Y = -332869,359\text{m}$$

$$Z = 3887171.119\text{m}$$

Una vez se conocen las coordenadas del punto de referencia, se coloca el Receptor de Referencia uBlox C94-M8P tal y como observamos en la figura 6.3

introduciéndole las coordenadas para que queden fijas y estudiar la calidad del instrumento uBlox, a partir del estudio de las líneas base entre UJAC y los puntos del Rover “a” y “b” obtenidos a partir de soluciones RTK siguiendo los estándares establecidos en la norma ISO 17123-8 explicados en el capítulo 5.1.



Figura 6.3: Punto UJAC con uBlox C94-M8P

6.1.1. Método simplificado.

Tal y como se mencionó en el capítulo 5.2.1, con este método sólo se realiza una serie que consta de 10 mediciones, 5 en el punto “a” y otras 5 en el punto “b” midiendo alternativamente en los puntos. La medición total consta de unos 30 minutos aproximadamente ya que hay que desmontar el instrumento tras cada medición y colocarlo en el siguiente punto.



Figura 6.4: Punto P1 con uBlox Rover

Las mediciones se realizaron el día 20 de febrero del 2018 y todos los datos recopilados están remitidos a la proyección ETRS89 – UTM (Zona 30) (x,y) y altura elipsoidal (h).

Dist Hori = 16.102m	Δh = -0.015m
---------------------	--------------

	$x_{UTM}(m)$	$y_{UTM}(m)$	h (m) (tornillo)	Dist Horiz (m)	Δh (m)	$\epsilon_{D_{ij}}$ (m)	$\epsilon_{h_{ij}}$ (m)
1	431501.606	4182534.145	502.814				
2	431511.648	4182546.718	502.793	16.091	-0.021	-0.0119	-0.0057
3	431501.604	4182534.149	502.794				
4	431511.643	4182546.728	502.789	16.094	-0.005	-0.0088	0.0103
5	431501.603	4182534.144	502.815				
6	431511.644	4182546.723	502.789	16.095	-0.026	-0.0072	-0.0107
7	431501.602	4182534.144	502.810				
8	431511.648	4182546.723	502.800	16.098	-0.010	-0.0045	0.0053
9	431501.605	4182534.150	502.799				
10	431511.649	4182546.726	502.800	16.094	0.001	-0.0082	0.0163

Tabla 6.1: Mediciones método simplificado.

Teniendo en cuenta que la norma indica:

$$|\epsilon_{D_{ij}}| \leq 2.5 \cdot \sqrt{2} \cdot s_{xy}$$

$$|\epsilon_{h_{ij}}| \leq 2.5 \cdot \sqrt{2} \cdot s_h$$

Siendo:

$$s_{xy} = s_h = 26\text{mm}$$

$$|\varepsilon_{D_{i,j}}| \leq \pm 91.923\text{mm}$$

$$|\varepsilon_{h_{i,j}}| \leq \pm 91.923\text{mm}$$

Observamos que las desviaciones de nuestras mediciones son menores a las permitidas por el estándar, por lo que concluimos que no existen errores groseros (outliers) y que el equipo se puede utilizar para un proyecto que requiera las especificaciones usadas en esta prueba, que son las recomendadas por el fabricante del receptor, también concluimos que si la prueba se realiza posteriormente a un mantenimiento preventivo, o después de una nueva carga de firmware, el receptor GNSS debería funcionar satisfactoriamente.

6.1.2. Método completo.

Para este método es necesario tomar 3 series de mediciones con una separación de al menos 90 minutos entre cada serie. Este tiempo entre series se considera suficiente para que la geometría de los satélites cambie, y también cambien las condiciones de Ionosfera, Troposfera y multipath local. Sumando los tiempos de medición más los tiempos de espera, la Evaluación Completa toma al menos 5 horas de trabajo de campo, más la instalación del equipo.

Este método se ha realizado en los días 21 de febrero y 7 de marzo de 2018 para tener dos muestras totalmente independientes.

Las mediciones se hacen alternativamente entre puntos, con lo que primeramente se medirá en el punto 1 siendo esta la medición 1-1-1, a continuación se medirá en el punto 2 siendo esta la medición 1-1-2. Después de este par de medidas se vuelve al punto 1 siendo esta medición la 1-2-1, y así hasta completar cada sesión obteniendo las siguientes medidas:

Muestra A: día 21/02/2018, Hora inicio: 10:37 y Hora fin: 15:25

Altura Ant: 1.175m

Altura Ant: 1.180m

Núm	Punto a	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
111	Lon: -3.77794	X : 5036339.271
	Lat: 37.78760	Y : -332565.977
	Alt: 504.008m	Z : 3887148.382
121	Lon: -3.77794	X : 5036339.268
	Lat: 37.78760	Y : -332565.975
	Alt: 504.000m	Z : 3887148.375
131	Lon: -3.77794	X : 5036339.271
	Lat: 37.78760	Y : -332565.980
	Alt: 504.003m	Z : 3887148.374
141	Lon: -3.77794	X : 5036339.248
	Lat: 37.78760	Y : -332565.975
	Alt: 503.979m	Z : 3887148.365
151	Lon: -3.77794	X : 5036339.266
	Lat: 37.78760	Y : -332565.972
	Alt: 503.997m	Z : 3887148.373

Núm	Punto b	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
112	Lon: -3.77783	X : 5036332.167
	Lat: 37.78771	Y : -332555.546
	Alt: 503.984m	Z : 3887158.372
122	Lon: -3.77783	X : 5036332.144
	Lat: 37.78771	Y : -332555.550
	Alt: 503.959m	Z : 3887158.362
132	Lon: -3.77783	X : 5036332.140
	Lat: 37.78771	Y : -332555.548
	Alt: 503.954m	Z : 3887158.358
142	Lon: -3.77783	X : 5036332.142
	Lat: 37.78771	Y : -332555.545
	Alt: 503.956m	Z : 3887158.360
152	Lon: -3.77783	X : 5036332.164
	Lat: 37.78771	Y : -332555.545
	Alt: 503.983m	Z : 3887158.374

Núm	Punto a	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
211	Lon: -3.77794	X : 5036339.261
	Lat: 37.78760	Y : -332565.980
	Alt: 503.993m	Z : 3887148.371
221	Lon: -3.77794	X : 5036339.270
	Lat: 37.78760	Y : -332565.979
	Alt: 504.008m	Z : 3887148.383
231	Lon: -3.77794	X : 5036339.261
	Lat: 37.78760	Y : -332565.976
	Alt: 503.997m	Z : 3887148.378
241	Lon: -3.77794	X : 5036339.262
	Lat: 37.78760	Y : -332565.974
	Alt: 503.997m	Z : 3887148.375
251	Lon: -3.77794	X : 5036339.252
	Lat: 37.78760	Y : -332565.972
	Alt: 503.986m	Z : 3887148.371

Núm	Punto b	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
212	Lon: -3.77783	X : 5036332.151
	Lat: 37.78771	Y : -332555.546
	Alt: 503.967m	Z : 3887158.366
222	Lon: -3.77783	X : 5036332.155
	Lat: 37.78771	Y : -332555.546
	Alt: 503.971m	Z : 3887158.366
232	Lon: -3.77783	X : 5036332.166
	Lat: 37.78771	Y : -332555.548
	Alt: 503.985m	Z : 3887158.376
242	Lon: -3.77783	X : 5036332.147
	Lat: 37.78771	Y : -332555.555
	Alt: 503.964m	Z : 3887158.365
252	Lon: -3.77783	X : 5036332.140
	Lat: 37.78771	Y : -332555.544
	Alt: 503.962m	Z : 3887158.371

		Punto a				Punto b	
Núm		Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)	Núm		Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
311	Lon:	-3.77794	X : 5036339.253	312	Lon:	-3.77783	X : 5036332.158
	Lat:	37.78760	Y : -332565.977		Lat:	37.78771	Y : -332555.547
	Alt:	503.988m	Z : 3887148.374		Alt:	503.976m	Z : 3887158.371
321	Lon:	-3.77794	X : 5036339.268	322	Lon:	-3.77783	X : 5036332.154
	Lat:	37.78760	Y : -332565.979		Lat:	37.78771	Y : -332555.545
	Alt:	504.003m	Z : 3887148.379		Alt:	503.972m	Z : 3887158.369
331	Lon:	-3.77794	X : 5036339.249	332	Lon:	-3.77783	X : 5036332.151
	Lat:	37.78760	Y : -332565.983		Lat:	37.78771	Y : -332555.547
	Alt:	503.980m	Z : 3887148.365		Alt:	503.967m	Z : 3887158.366
341	Lon:	-3.77794	X : 5036339.265	342	Lon:	-3.77783	X : 5036332.163
	Lat:	37.78760	Y : -332565.984		Lat:	37.78771	Y : -332555.542
	Alt:	504.000m	Z : 3887148.376		Alt:	503.983m	Z : 3887158.377
351	Lon:	-3.77794	X : 5036339.258	352	Lon:	-3.77783	X : 5036332.157
	Lat:	37.78760	Y : -332565.977		Lat:	37.78771	Y : -332555.543
	Alt:	503.991m	Z : 3887148.371		Alt:	503.974m	Z : 3887158.369

Tabla 6.2: Mediciones método completo muestra A

Muestra B: día 07/03/2018, Hora inicio: 12:44 y Hora fin: 17:49

		Punto a				Punto b	
Núm		Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)	Núm		Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
		Altura Ant: 1.199				Altura Ant: 1.253	
111	Lon:	-3.77794	X : 5036339.255	112	Lon:	-3.77783	X : 5036332.209
	Lat:	37.78760	Y : -332565.977		Lat:	37.78771	Y : -332555.565
	Alt:	503.998m	Z : 3887148.387		Alt:	504.041m	Z : 3887158.409
121	Lon:	-3.77794	X : 5036339.267	122	Lon:	-3.77783	X : 5036332.203
	Lat:	37.78760	Y : -332565.974		Lat:	37.78771	Y : -332555.565
	Alt:	504.007m	Z : 3887148.388		Alt:	504.033m	Z : 3887158.405
131	Lon:	-3.77794	X : 5036339.267	132	Lon:	-3.77783	X : 5036332.213
	Lat:	37.78760	Y : -332565.974		Lat:	37.78771	Y : -332555.564
	Alt:	504.003m	Z : 3887148.381		Alt:	504.045m	Z : 3887158.412
141	Lon:	-3.77794	X : 5036339.260	142	Lon:	-3.77783	X : 5036332.229
	Lat:	37.78760	Y : -332565.979		Lat:	37.78771	Y : -332555.574
	Alt:	504.005m	Z : 3887148.392		Alt:	504.069m	Z : 3887158.429
151	Lon:	-3.77794	X : 5036339.261	152	Lon:	-3.77783	X : 5036332.198
	Lat:	37.78760	Y : -332565.978		Lat:	37.78771	Y : -332555.573
	Alt:	504.004m	Z : 3887148.390		Alt:	504.035m	Z : 3887158.414

Núm	Punto a	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
211	Lon: -3.77794	X: 5036339.268
	Lat: 37.78760	Y: -332565.982
	Alt: 504.012m	Z: 3887148.393
221	Lon: -3.77794	X: 5036339.257
	Lat: 37.78760	Y: -332565.977
	Alt: 503.996m	Z: 3887148.382
231	Lon: -3.77794	X: 5036339.258
	Lat: 37.78760	Y: -332565.978
	Alt: 504.001m	Z: 3887148.388
241	Lon: -3.77794	X: 5036339.250
	Lat: 37.78760	Y: -332565.974
	Alt: 503.989m	Z: 3887148.380
251	Lon: -3.77794	X: 5036339.258
	Lat: 37.78760	Y: -332565.973
	Alt: 504.001m	Z: 3887148.389

Núm	Punto b	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
212	Lon: -3.77783	X: 5036332.210
	Lat: 37.78771	Y: -332555.565
	Alt: 504.036m	Z: 3887158.402
222	Lon: -3.77783	X: 5036332.204
	Lat: 37.78771	Y: -332555.568
	Alt: 504.038m	Z: 3887158.411
232	Lon: -3.77783	X: 5036332.197
	Lat: 37.78771	Y: -332555.567
	Alt: 504.034m	Z: 3887158.414
242	Lon: -3.77783	X: 5036332.214
	Lat: 37.78771	Y: -332555.573
	Alt: 504.052m	Z: 3887158.420
252	Lon: -3.77783	X: 5036332.220
	Lat: 37.78771	Y: -332555.571
	Alt: 504.058m	Z: 3887158.424

Núm	Punto a	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
311	Lon: -3.77794	X: 5036339.255
	Lat: 37.78760	Y: -332565.971
	Alt: 503.993m	Z: 3887148.381
321	Lon: -3.77794	X: 5036339.273
	Lat: 37.78760	Y: -332565.976
	Alt: 504.018m	Z: 3887148.396
331	Lon: -3.77794	X: 5036339.275
	Lat: 37.78760	Y: -332565.974
	Alt: 504.022m	Z: 3887148.400
341	Lon: -3.77794	X: 5036339.264
	Lat: 37.78760	Y: -332565.970
	Alt: 504.008m	Z: 3887148.392
351	Lon: -3.77794	X: 5036339.262
	Lat: 37.78760	Y: -332565.975
	Alt: 504.005m	Z: 3887148.388

Núm	Punto b	
	Coord. Geográficas (°)	Coord. Cartesianas (m)
312	Lon: -3.77783	X: 5036332.212
	Lat: 37.78771	Y: -332555.569
	Alt: 504.050m	Z: 3887158.421
322	Lon: -3.77783	X: 5036332.208
	Lat: 37.78771	Y: -332555.569
	Alt: 504.041m	Z: 3887158.411
332	Lon: -3.77783	X: 5036332.216
	Lat: 37.78771	Y: -332555.567
	Alt: 504.054m	Z: 3887158.422
342	Lon: -3.77783	X: 5036332.208
	Lat: 37.78771	Y: -332555.574
	Alt: 504.043m	Z: 3887158.414
352	Lon: -3.77783	X: 5036332.209
	Lat: 37.78771	Y: -332555.573
	Alt: 504.044m	Z: 3887158.414

Tabla 6.3: Mediciones método completo muestra B

Una vez obtenidas las coordenadas de todas las sesiones se pasan estas coordenadas a UTM (Huso 30) y se refiere su altitud elipsoidal medida al tornillo al igual que en el método anterior para comparar con las medidas de referencia.

Muestra A: día 21/02/2018

Dist Hori = 16.1024m

$\Delta h = -0.0153m$

	$x_{UTM}(m)$	$y_{UTM}(m)$	h (m) (tornillo)	Residuos x-a(m)	Residuos x-b(m)	Residuos y-a(m)	Residuos y-b(m)	Residuos h-a(m)	Residuos h-b (m)
111	431501.609	4182534.148	502.833	-0.0019		-0.0004		-0.0127	
112	431511.649	4182546.719	502.804		-0.0012		0.0057		-0.0135
121	431501.610	4182534.144	502.825	-0.0036		0.0029		-0.0047	
122	431511.643	4182546.726	502.779		0.0040		-0.0010		0.0115
131	431501.605	4182534.141	502.828	0.0017		0.0062		-0.0077	
132	431511.644	4182546.724	502.774		0.0031		0.0001		0.0165
141	431501.609	4182534.149	502.804	-0.0019		-0.0015		0.0163	
142	431511.648	4182546.726	502.776		-0.0004		-0.0010		0.0145
151	431501.613	4182534.144	502.822	-0.0063		0.0029		-0.0017	
152	431511.650	4182546.722	502.803		-0.0022		0.0024		-0.0125
211	431501.604	4182534.145	502.818	0.0025		0.0018		0.0023	
212	431511.648	4182546.724	502.787		-0.0004		0.0002		0.0035
221	431501.605	4182534.149	502.833	0.0016		-0.0016		-0.0127	
222	431511.648	4182546.722	502.791		-0.0004		0.0024		-0.0005
231	431501.608	4182534.151	502.822	-0.0010		-0.0038		-0.0017	
232	431511.647	4182546.723	502.805		0.0005		0.0013		-0.0145
241	431501.610	4182534.148	502.822	-0.0036		-0.0004		-0.0017	
242	431511.638	4182546.726	502.784		0.0093		-0.0010		0.0065
251	431501.612	4182534.151	502.811	-0.0054		-0.0037		0.0093	
252	431511.650	4182546.736	502.782		-0.0023		-0.0109		0.0085
311	431501.602	4182534.150	502.813	0.0043		-0.0027		0.0073	
312	431511.648	4182546.723	502.796		-0.0004		0.0013		-0.0055
321	431501.605	4182534.148	502.828	0.0016		-0.0005		-0.0077	
322	431511.649	4182546.724	502.792		-0.0013		0.0002		-0.0015
331	431501.601	4182534.148	502.805	0.0060		-0.0005		0.0153	
332	431511.647	4182546.724	502.787		0.0005		0.0001		0.0035
341	431501.601	4182534.147	502.825	0.0061		0.0006		-0.0047	
342	431511.652	4182546.726	502.803		-0.0048		-0.0009		-0.0125
351	431501.607	4182534.147	502.816	-0.0001		0.0007		0.0043	
352	431511.651	4182546.723	502.794		-0.0039		0.0013		-0.0035

Cuadrados de Residuos: 0.0002 0.0002 0.0001 0.0002 0.0012 0.0015

Tabla 6.4: Resolución método completo muestra A

Prom X1: 431501.607 Prom X2: 431511.647 Prom Y1: 4182534.1 Prom Y2: 4182546.7 Prom h1: 502.82 Prom h2: 502.79

Muestra B: día 07/03/2018

Dist Hori = 16.1024m

$\Delta h = -0.0153m$

	$x_{UTM}(m)$	$y_{UTM}(m)$	h(m) (tornillo)	Residuos x-a(m)	Residuos x-b(m)	Residuos y-a(m)	Residuos y-b(m)	Residuos h-a(m)	Residuos h-b(m)
111	431501.607	4182534.162	502.879	0.0019		-0.0032		0.0061	
112	431511.633	4182546.722	502.788		-0.0043		0.0034		0.0039
121	431501.610	4182534.155	502.888	-0.0016		0.0035		-0.0029	
122	431511.632	4182546.722	502.780		-0.0034		0.0034		0.0119
131	431501.610	4182534.150	502.884	-0.0016		0.0090		0.0011	
132	431511.634	4182546.721	502.792		-0.0052		0.0046		-0.0001
141	431501.605	4182534.162	502.886	0.0036		-0.0032		-0.0009	
142	431511.625	4182546.726	502.816		0.0036		0.0000		-0.0241
151	431501.606	4182534.161	502.885	0.0027		-0.0021		0.0001	
152	431511.623	4182546.732	502.782		0.0053		-0.0066		0.0099
211	431501.602	4182534.159	502.893	0.0063		0.0001		-0.0079	
212	431511.633	4182546.716	502.783		-0.0043		0.0101		0.0089
221	431501.607	4182534.157	502.877	0.0019		0.0024		0.0081	
222	431511.629	4182546.727	502.785		-0.0008		-0.0010		0.0069
231	431501.606	4182534.161	502.882	0.0027		-0.0021		0.0031	
232	431511.629	4182546.733	502.781		-0.0009		-0.0077		0.0109
241	431501.609	4182534.160	502.870	-0.0008		-0.0010		0.0151	
242	431511.625	4182546.727	502.799		0.0036		-0.0011		-0.0071
251	431501.611	4182534.162	502.882	-0.0026		-0.0032		0.0031	
252	431511.628	4182546.727	502.805		0.0009		-0.0010		-0.0131
311	431501.613	4182534.158	502.874	-0.0043		0.0013		0.0111	
312	431511.629	4182546.729	502.797		-0.0008		-0.0032		-0.0051
321	431501.609	4182534.158	502.899	0.0001		0.0013		-0.0139	
322	431511.628	4182546.725	502.788		0.0001		0.0012		0.0039
331	431501.611	4182534.160	502.903	-0.0025		-0.0009		-0.0179	
332	431511.631	4182546.728	502.801		-0.0026		-0.0021		-0.0091
341	431501.614	4182534.161	502.889	-0.0052		-0.0020		-0.0039	
342	431511.624	4182546.726	502.790		0.0045		0.0000		0.0019
351	431501.609	4182534.159	502.886	-0.0008		0.0002		-0.0009	
352	431511.624	4182546.726	502.791		0.0045		0.0000		0.0009

Cuadrados de Residuos: 0.0001 0.0002 0.0001 0.0003 0.0011 0.0014

Tabla 6.5: Resolución método completo muestra B

Prom X1: 431501.609 Prom X2: 431511.629 Prom Y1: 4182534.2 Prom Y2: 4182547 Prom h1: 502.885 Prom h1: 502.792

Concluyendo con el cálculo del ISO 17123-8 de la siguiente manera:

Para la muestra A:

Desviación estándar de x = 0.004m

Desviación estándar de y = 0.003m

Desviación estándar de h = 0.010m

Las desviaciones estándar experimentales serían:

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8(xy)}} = 0.005\text{m}$$

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8(h)}} = 0.010\text{m}$$

Para la muestra B:

Desviación estándar de x = 0.003m

Desviación estándar de y = 0.004m

Desviación estándar de h = 0.009m

Las desviaciones estándar experimentales serían:

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8(xy)}} = 0.005\text{m}$$

$$S_{\text{ISO_RTK_17123-8(h)}} = 0.009\text{m}$$

Los resultados de los tests estadísticos del método completo a nivel de confianza del 95% para las muestras A y B son los siguientes (Las unidades están en mm).

	Hipótesis	Muestra A		Muestra B	
TEST:	H ₀	Test	¿Se acepta?	Test	¿Se acepta?
a	$s_{xy} \leq \sigma_{xy}$	$5 \leq 28$	Si	$5 \leq 28$	Si
b	$s_h \leq \sigma_h$	$10 \leq 30$	Si	$9 \leq 30$	Si
c	$s_{xy(A)} = s_{xy(B)}$	$0.59 \leq 1 \leq 1.7$	Si	$0.59 \leq 1 \leq 1.7$	Si
d	$s_{h(A)} = s_{h(B)}$	$0.47 \leq 1 \leq 2.13$	Si	$0.47 \leq 1 \leq 2.13$	Si

Tabla 6.6: Resultados test estadísticos

Y como incertidumbre estándar combinada:

$$u_{xy} = \sqrt{u_{ISO-GNSS-xy}^2 + [h_a \tan u_{bub}]^2 + 2u_{disp}^2 + u_c^2 + u_{dx}^2 + u_{dy}^2 + u_{tr}^2}$$

$$u_h = \sqrt{u_{ISO-GNSS-h}^2 + u_{disp}^2 + u_{ha}^2 + u_{hs}^2 + u_{dh}^2 + u_{dH}^2}$$

Incertidumbre	Simbolo	Caso A	Caso B
Combinada horizontal	u_{xy}	5.31	5.31
Combinada vertical	u_h	10.25	9.27
Expandida horizontal	$2u_{xy}$	10.62	10.62
Expandida vertical	$2u_h$	20.50	18.54

Tabla 6.7: Resultados incertidumbres

Siendo:

$$u_{ISO-GNSS-xy} \text{ (Caso A)} = 5\text{mm}$$

$$u_{ISO-GNSS-xy} \text{ (Caso B)} = 5\text{mm}$$

$$u_{ISO-GNSS-h} \text{ (Caso A)} = 10\text{mm}$$

$$u_{ISO-GNSS-h} \text{ (Caso B)} = 9\text{mm}$$

$$h_a = 1\text{mm}$$

$$u_{bub} = 0$$

$$u_{disp}^2 = 0.09\text{mm}$$

$$u_c^2 = 1\text{mm}$$

$$u_{dx}^2 = 1\text{mm}$$

$$u_{dy}^2 = 1\text{mm}$$

$$u_{tr}^2 = 0$$

$$u_{ha}^2 = 1\text{mm}$$

$$u_{hs}^2 = 0$$

$$u_{dh}^2 = 4\text{mm}$$

$$u_{dH}^2 = 0$$

El ISO 17123-8 nos permite realizar un diagnóstico fiel y preciso de las condiciones en que se encuentra un Receptor GNSS RTK, asumiendo que en la prueba, las condiciones ambientales sean favorables. Asimismo el ISO integra cualquier modalidad RTK disponible al momento, bien sea de Red Geodésica RTK, NTRIP, Virtual o FSK, o simplemente como es este caso por conexión UHF, con tal de que el receptor pueda medir en Tiempo Real. El receptor GNSS lo tratamos aquí como un conjunto, pero a veces un simple cable, el conector ruidoso de la antena o que el horizonte no esté totalmente despejado, puedan ser los responsables de que ese conjunto no funcione en absoluto.

6.2. Calidad del posicionamiento RTK.

6.2.1. Soluciones estáticas sin resolución independiente de ambigüedades.

Para el estudio del comportamiento y la calidad de los datos recibidos por el receptor uBlox sin interferencias causadas por el movimiento del rover o por su distancia desde la estación maestra, se realizó una prueba inicial dejando el receptor de referencia estacionado en el Pilar 2 (figura 6.5) y el receptor Rover en el Pilar 1 durante un periodo de una hora aproximadamente para ver el comportamiento y los residuos de los satélites en ese periodo de tiempo.



Figura 6.5: Pilar 2, uBlox de referencia

Una vez terminada la medición y procesar los datos el mismo programa u-center del receptor uBlox nos permite una representación gráfica de las soluciones a lo largo de toda la medición, esta representación la realiza por componentes para poder realizar un análisis estadístico de las soluciones y ver sus errores.

Realizando la representación de cualquier componente (Por ejemplo la coordenada X cartesiana en ETRS89-ETRF2000) observamos que mientras el receptor tenga estado FIXED no implica que la coordenada sea fija, sino que se han fijado las ambigüedades. Las coordenadas que va midiendo están dentro de un rango aceptable para la medición, el cual se le define. En el caso de ejemplo se ha definido 2cm.

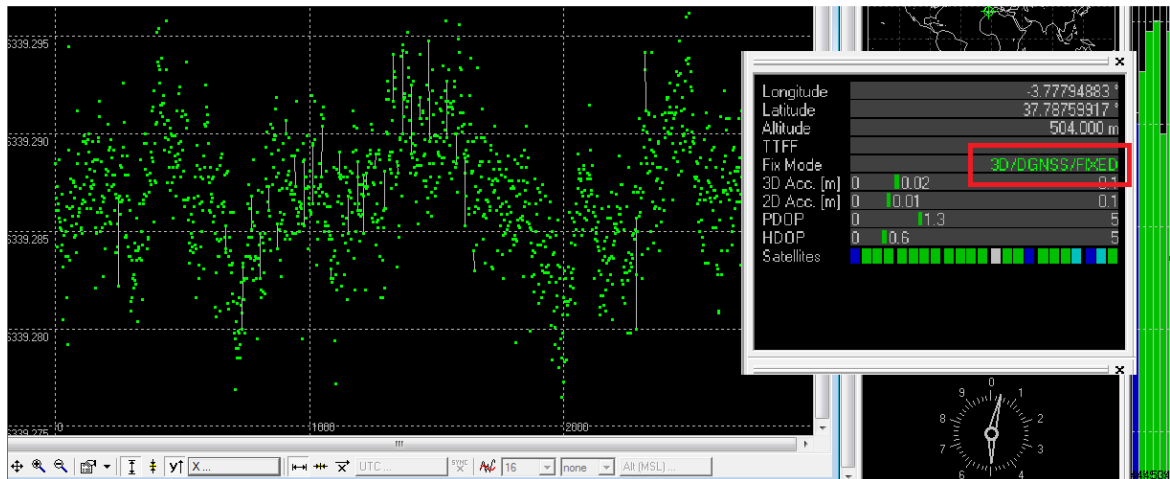


Figura 6.6: Representación de valores de X estado FIXED

En el momento que cambia el estado de la medición y deja de ser FIXED, podemos observar en la figura 6.7 como las coordenadas dejan de oscilar y se mantienen fijas.

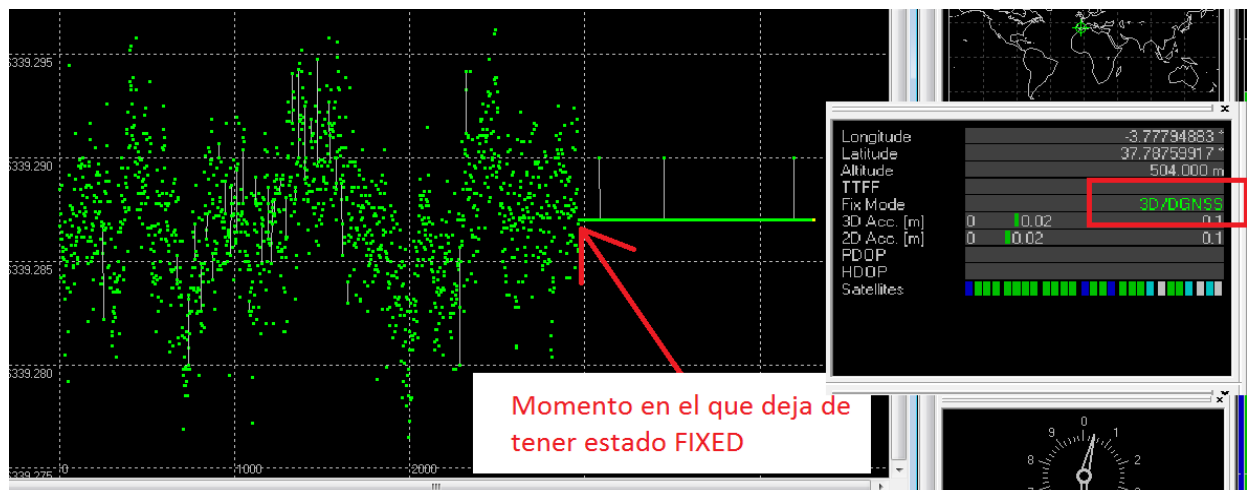


Figura 6.7: Representación de valores de X sin estado FIXED

6.2.2. Soluciones estáticas con resolución independiente de ambigüedades.

Para el análisis del posicionamiento RTK se realizan dos Líneas Base como ya se ha mencionado, una Línea Base corta y una media y se comparan las mediciones con las coordenadas ya obtenidas en postproceso tras 24 horas de observación.

En ambas Líneas Base se realizan 3 series de 30 registros puntuales espaciados temporalmente cada serie unos 90 minutos cada una.



Figura 6.8: Campaña deposito, uBlox.

Ya que se conocen las coordenadas de los puntos se puede hacer una comparativa de los datos obtenidos con esas coordenadas y ver la discrepancia de los puntos en diferentes franjas horarias para su comparativa.

Las coordenadas cartesianas en ETRS89 (ETRF2000) y las coordenadas en el sistema local (E, N y Up) de estas mediciones son las siguientes:

6.2.2.1. Línea base corta

Con receptor de Referencia en P2 y receptor Rover en P1:

Primera sesión 22/05/2018, hora inicio: 16:19h y hora fin aproximada: 16:49h

Medida	X	Y	Z	N	E	Up
1	5036339.295	-332566.472	3887148.332	-0.004	0.003	0.001
2	5036339.298	-332566.473	3887148.336	-0.003	0.003	0.006
3	5036339.296	-332566.472	3887148.335	-0.002	0.003	0.004
4	5036339.296	-332566.472	3887148.335	-0.002	0.003	0.004
5	5036339.292	-332566.476	3887148.333	-0.002	-0.001	-0.001
6	5036339.290	-332566.474	3887148.334	0.000	0.001	-0.002
7	5036339.291	-332566.476	3887148.332	-0.002	-0.001	-0.002
8	5036339.290	-332566.474	3887148.327	-0.005	0.001	-0.006
9	5036339.287	-332566.470	3887148.327	-0.003	0.005	-0.008
10	5036339.288	-332566.474	3887148.328	-0.003	0.001	-0.007
11	5036339.295	-332566.475	3887148.331	-0.005	0.000	0.001
12	5036339.289	-332566.470	3887148.333	0.000	0.005	-0.003
13	5036339.293	-332566.471	3887148.336	0.000	0.004	0.002
14	5036339.297	-332566.476	3887148.335	-0.003	0.000	0.005
15	5036339.296	-332566.472	3887148.336	-0.002	0.003	0.004
16	5036339.300	-332566.472	3887148.333	-0.006	0.004	0.006
17	5036339.295	-332566.475	3887148.327	-0.008	0.000	-0.002
18	5036339.292	-332566.472	3887148.334	-0.001	0.003	0.000
19	5036339.290	-332566.474	3887148.330	-0.003	0.001	-0.004
20	5036339.286	-332566.476	3887148.330	0.000	-0.001	-0.007
21	5036339.282	-332566.472	3887148.329	0.002	0.003	-0.011
22	5036339.293	-332566.471	3887148.334	-0.001	0.004	0.001
23	5036339.292	-332566.472	3887148.329	-0.005	0.003	-0.003
24	5036339.296	-332566.471	3887148.333	-0.004	0.004	0.002
25	5036339.296	-332566.471	3887148.335	-0.002	0.004	0.004
26	5036339.301	-332566.470	3887148.334	-0.006	0.006	0.007
27	5036339.296	-332566.471	3887148.333	-0.004	0.004	0.002
28	5036339.297	-332566.472	3887148.333	-0.004	0.004	0.003
29	5036339.296	-332566.474	3887148.338	0.000	0.001	0.006
30	5036339.300	-332566.474	3887148.337	-0.003	0.002	0.008

Tabla 6.8: Medición primera sesión línea corta

Segunda sesión 22/05/2018, hora inicio: 18:27h y hora fin aproximada: 18:58h

Medida	X	Y	Z	N	E	Up
31	5036339.293	-332566.474	3887148.335	-0.001	0.001	0.001
32	5036339.283	-332566.476	3887148.329	0.001	-0.001	-0.010
33	5036339.286	-332566.477	3887148.329	-0.001	-0.002	-0.008
34	5036339.287	-332566.475	3887148.329	-0.002	0.000	-0.007
35	5036339.286	-332566.473	3887148.332	0.001	0.002	-0.006
36	5036339.296	-332566.475	3887148.337	-0.001	0.000	0.005
37	5036339.290	-332566.474	3887148.333	0.000	0.001	-0.002
38	5036339.288	-332566.473	3887148.331	-0.001	0.002	-0.005
39	5036339.283	-332566.473	3887148.327	-0.001	0.002	-0.011
40	5036339.296	-332566.473	3887148.340	0.002	0.002	0.007
41	5036339.294	-332566.473	3887148.336	0.000	0.002	0.003
42	5036339.296	-332566.473	3887148.340	0.002	0.002	0.007
43	5036339.300	-332566.472	3887148.340	-0.001	0.004	0.010
44	5036339.295	-332566.472	3887148.340	0.002	0.003	0.006
45	5036339.293	-332566.472	3887148.340	0.003	0.003	0.004
46	5036339.298	-332566.470	3887148.345	0.004	0.006	0.011
47	5036339.293	-332566.474	3887148.341	0.004	0.001	0.005
48	5036339.297	-332566.475	3887148.342	0.002	0.001	0.009
49	5036339.296	-332566.469	3887148.341	0.003	0.006	0.007
50	5036339.293	-332566.474	3887148.341	0.004	0.001	0.005
51	5036339.294	-332566.474	3887148.335	-0.001	0.001	0.002
52	5036339.295	-332566.475	3887148.336	-0.001	0.000	0.004
53	5036339.288	-332566.474	3887148.329	-0.002	0.001	-0.006
54	5036339.299	-332566.474	3887148.335	-0.004	0.002	0.006
55	5036339.293	-332566.476	3887148.339	0.003	-0.001	0.004
56	5036339.303	-332566.473	3887148.339	-0.003	0.003	0.012
57	5036339.292	-332566.475	3887148.339	0.003	0.000	0.003
58	5036339.292	-332566.472	3887148.336	0.001	0.003	0.001
59	5036339.292	-332566.473	3887148.335	0.000	0.002	0.001
60	5036339.289	-332566.473	3887148.336	0.003	0.002	-0.001

Tabla 6.9: Medición segunda sesión línea corta

Tercera sesión 22/05/2018, hora inicio: 20:35h y hora fin aproximada: 21:03h

Medida	X	Y	Z	N	E	Up
61	5036339.290	-332566.476	3887148.332	-0.001	-0.001	-0.003
62	5036339.291	-332566.475	3887148.337	0.002	0.000	0.001
63	5036339.301	-332566.475	3887148.339	-0.002	0.001	0.010
64	5036339.295	-332566.475	3887148.334	-0.003	0.000	0.002
65	5036339.293	-332566.478	3887148.334	-0.002	-0.003	0.001
66	5036339.289	-332566.476	3887148.332	-0.001	-0.001	-0.004
67	5036339.296	-332566.477	3887148.332	-0.005	-0.001	0.002
68	5036339.293	-332566.476	3887148.337	0.001	-0.001	0.003
69	5036339.291	-332566.477	3887148.332	-0.002	-0.002	-0.002
70	5036339.295	-332566.477	3887148.335	-0.002	-0.002	0.003
71	5036339.299	-332566.476	3887148.336	-0.004	0.000	0.007
72	5036339.295	-332566.479	3887148.339	0.001	-0.004	0.006
73	5036339.294	-332566.477	3887148.338	0.001	-0.002	0.004
74	5036339.296	-332566.477	3887148.337	-0.001	-0.001	0.005
75	5036339.292	-332566.476	3887148.338	0.002	-0.001	0.003
76	5036339.294	-332566.478	3887148.339	0.002	-0.003	0.005
77	5036339.297	-332566.477	3887148.337	-0.002	-0.001	0.006
78	5036339.290	-332566.476	3887148.332	-0.001	-0.001	-0.003
79	5036339.297	-332566.477	3887148.335	-0.003	-0.001	0.005
80	5036339.297	-332566.478	3887148.340	0.001	-0.002	0.008
81	5036339.292	-332566.477	3887148.334	-0.001	-0.002	0.000
82	5036339.287	-332566.475	3887148.329	-0.002	0.000	-0.007
83	5036339.292	-332566.477	3887148.336	0.001	-0.002	0.001
84	5036339.289	-332566.476	3887148.336	0.003	-0.001	-0.001
85	5036339.288	-332566.476	3887148.334	0.002	-0.001	-0.003
86	5036339.294	-332566.476	3887148.339	0.002	-0.001	0.005
87	5036339.295	-332566.475	3887148.337	0.000	0.000	0.004
88	5036339.293	-332566.473	3887148.339	0.003	0.002	0.004
89	5036339.297	-332566.476	3887148.342	0.002	0.000	0.009
90	5036339.292	-332566.477	3887148.339	0.003	-0.002	0.003

Tabla 6.10: Medición tercera sesión línea corta

Y comparándola con la medida de referencia podemos realizar una representación de los datos obtenidos observándose en la siguiente figura:

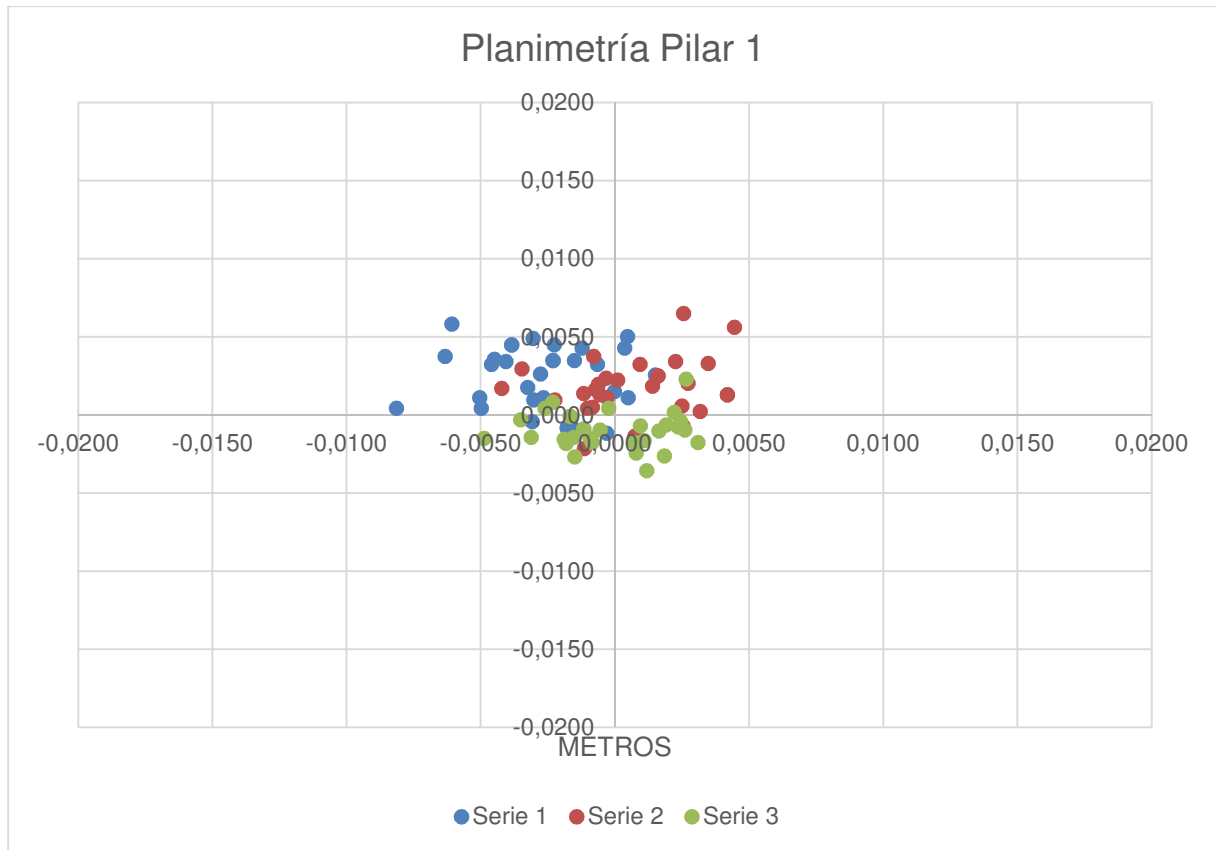


Figura 6.9: Diferencias en planimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)

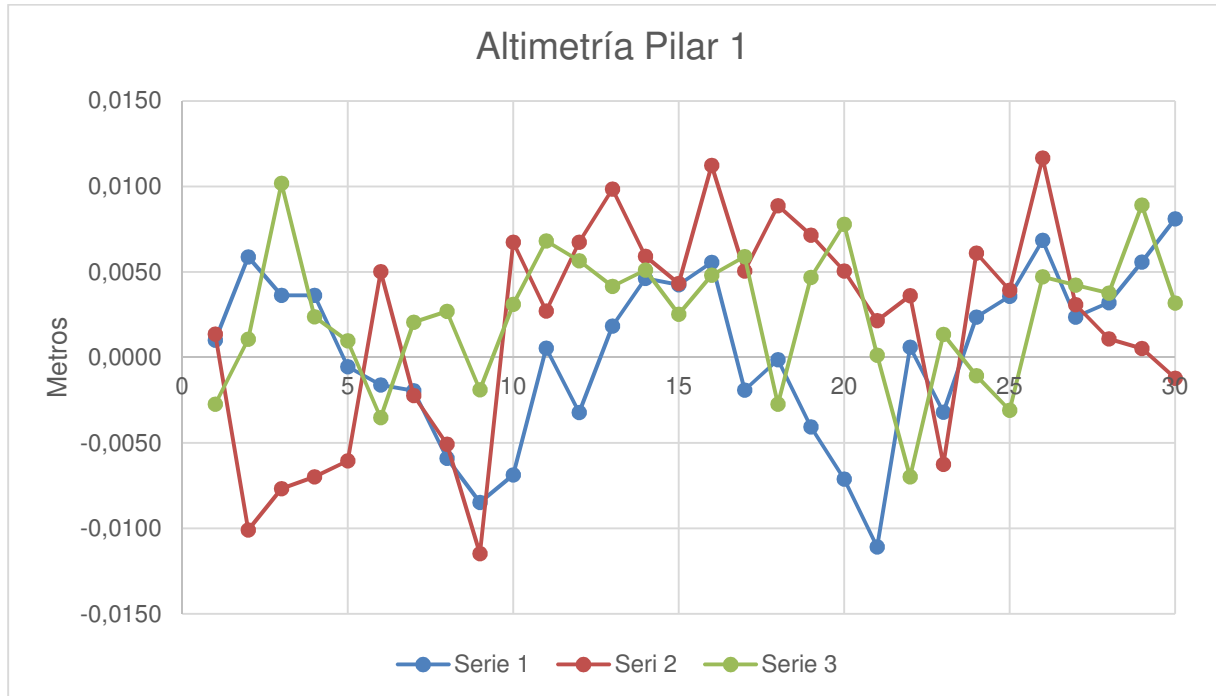


Figura 6.10: Diferencias en altimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)

Tal y como se describió en el capítulo 5.2.1, a estos datos deben ir acompañados de unos parámetros de calidad los cuales son la precisión y la exactitud:

- Primera sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0023\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0020\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0049\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0043\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0040\text{m}$$

- Segunda sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0023\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0018\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0063\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0030\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0056\text{m}$$

- Tercera sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0021\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0012\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0040\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0024\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0039\text{m}$$

6.2.2.2. Línea base media.

Con receptor de Referencia en P2 y receptor Rover en Depósito:

Primera sesión 24/05/2018, hora inicio: 17:10h y hora fin aproximada: 17:50h

Núm	X	Y	Z	N	E	Up
1	5035336.394	-334122.162	3888373.126	-0.007	-0.004	-0.062
2	5035336.441	-334122.157	3888373.129	-0.034	0.004	-0.023
3	5035336.422	-334122.159	3888373.139	-0.014	0.001	-0.032
4	5035336.373	-334122.157	3888373.132	0.010	0.000	-0.075
5	5035336.368	-334122.162	3888373.121	0.005	-0.006	-0.085
6	5035336.393	-334122.153	3888373.140	0.005	0.005	-0.055
7	5035336.405	-334122.165	3888373.132	-0.010	-0.006	-0.049
8	5035336.400	-334122.158	3888373.139	-0.001	0.001	-0.049
9	5035336.423	-334122.169	3888373.146	-0.010	-0.009	-0.026
10	5035336.404	-334122.167	3888373.144	0.000	-0.008	-0.043
11	5035336.398	-334122.160	3888373.129	-0.007	-0.002	-0.057
12	5035336.413	-334122.173	3888373.130	-0.016	-0.014	-0.044
13	5035336.403	-334122.169	3888373.127	-0.012	-0.010	-0.054
14	5035336.394	-334122.162	3888373.126	-0.007	-0.004	-0.062
15	5035336.396	-334122.163	3888373.125	-0.009	-0.005	-0.061
16	5035336.401	-334122.158	3888373.125	-0.012	0.001	-0.057
17	5035336.393	-334122.156	3888373.121	-0.011	0.002	-0.066
18	5035336.441	-334122.157	3888373.129	-0.034	0.004	-0.023
19	5035336.415	-334122.159	3888373.131	-0.016	0.001	-0.042
20	5035336.415	-334122.158	3888373.133	-0.015	0.002	-0.041
21	5035336.409	-334122.166	3888373.137	-0.008	-0.007	-0.043
22	5035336.422	-334122.164	3888373.150	-0.006	-0.004	-0.025
23	5035336.450	-334122.175	3888373.144	-0.028	-0.013	-0.006
24	5035336.471	-334122.194	3888373.151	-0.036	-0.031	0.016
25	5035336.403	-334122.155	3888373.140	-0.002	0.004	-0.047
26	5035336.492	-334122.218	3888373.178	-0.029	-0.053	0.050
27	5035336.394	-334122.162	3888373.134	-0.001	-0.004	-0.057
28	5035336.445	-334122.169	3888373.134	-0.033	-0.007	-0.016
29	5035336.422	-334122.159	3888373.139	-0.014	0.001	-0.032
30	5035336.405	-334122.165	3888373.132	-0.010	-0.006	-0.049

Tabla 6.11: Medición primera sesión línea media

Segunda sesión 24/05/2018, hora inicio: 18:40h y hora fin aproximada: 19:03h

Núm	X	Y	Z	N	E	Up
31	5035336.405	-334122.160	3888373.142	-0.001	-0.001	-0.044
32	5035336.373	-334122.157	3888373.132	0.010	0.000	-0.075
33	5035336.391	-334122.156	3888373.131	-0.001	0.002	-0.061
34	5035336.378	-334122.152	3888373.137	0.011	0.005	-0.068
35	5035336.379	-334122.155	3888373.124	0.000	0.002	-0.075
36	5035336.386	-334122.153	3888373.131	0.002	0.005	-0.066
37	5035336.388	-334122.154	3888373.129	-0.001	0.004	-0.065
38	5035336.386	-334122.155	3888373.125	-0.003	0.003	-0.069
39	5035336.393	-334122.156	3888373.134	0.000	0.002	-0.058
40	5035336.389	-334122.159	3888373.134	0.002	-0.001	-0.061
41	5035336.384	-334122.160	3888373.129	0.001	-0.003	-0.068
42	5035336.391	-334122.161	3888373.140	0.006	-0.003	-0.056
43	5035336.390	-334122.157	3888373.140	0.006	0.001	-0.057
44	5035336.396	-334122.156	3888373.141	0.003	0.002	-0.051
45	5035336.393	-334122.156	3888373.137	0.002	0.002	-0.056
46	5035336.397	-334122.157	3888373.138	0.000	0.001	-0.052
47	5035336.391	-334122.152	3888373.140	0.006	0.006	-0.056
48	5035336.391	-334122.155	3888373.140	0.006	0.003	-0.056
49	5035336.391	-334122.165	3888373.141	0.006	-0.007	-0.055
50	5035336.386	-334122.162	3888373.136	0.005	-0.004	-0.062
51	5035336.395	-334122.163	3888373.138	0.001	-0.005	-0.054
52	5035336.395	-334122.160	3888373.144	0.006	-0.002	-0.050
53	5035336.395	-334122.157	3888373.141	0.004	0.001	-0.052
54	5035336.406	-334122.159	3888373.157	0.010	0.000	-0.034
55	5035336.394	-334122.156	3888373.136	0.001	0.002	-0.056
56	5035336.392	-334122.152	3888373.143	0.008	0.006	-0.054
57	5035336.398	-334122.158	3888373.137	-0.001	0.000	-0.052
58	5035336.393	-334122.153	3888373.140	0.005	0.005	-0.055
59	5035336.384	-334122.155	3888373.140	0.010	0.002	-0.062
60	5035336.395	-334122.158	3888373.143	0.006	0.000	-0.051

Tabla 6.12: Medición segunda sesión línea media

Tercera sesión 24/05/2018, hora inicio: 19:47h y hora fin aproximada: 20:08h

Núm	X	Y	Z	N	E	Up
61	5035336.387	-334122.153	3888373.134	0.004	0.005	-0.063
62	5035336.389	-334122.152	3888373.134	0.002	0.006	-0.061
63	5035336.396	-334122.153	3888373.135	-0.001	0.005	-0.055
64	5035336.391	-334122.153	3888373.131	-0.001	0.005	-0.062
65	5035336.390	-334122.149	3888373.132	0.000	0.009	-0.062
66	5035336.387	-334122.153	3888373.129	0.000	0.005	-0.066
67	5035336.391	-334122.158	3888373.130	-0.002	0.000	-0.062
68	5035336.385	-334122.158	3888373.129	0.001	0.000	-0.067
69	5035336.392	-334122.155	3888373.131	-0.002	0.003	-0.061
70	5035336.385	-334122.156	3888373.132	0.003	0.002	-0.066
71	5035336.386	-334122.158	3888373.135	0.005	0.000	-0.063
72	5035336.388	-334122.156	3888373.132	0.001	0.002	-0.063
73	5035336.389	-334122.157	3888373.137	0.005	0.001	-0.059
74	5035336.387	-334122.158	3888373.133	0.003	0.000	-0.063
75	5035336.379	-334122.157	3888373.128	0.004	0.000	-0.073
76	5035336.389	-334122.158	3888373.130	-0.001	0.000	-0.064
77	5035336.386	-334122.161	3888373.130	0.001	-0.003	-0.066
78	5035336.373	-334122.159	3888373.129	0.008	-0.002	-0.077
79	5035336.380	-334122.157	3888373.132	0.006	0.000	-0.070
80	5035336.375	-334122.159	3888373.127	0.005	-0.002	-0.076
81	5035336.375	-334122.162	3888373.126	0.004	-0.005	-0.077
82	5035336.374	-334122.160	3888373.130	0.008	-0.003	-0.075
83	5035336.376	-334122.162	3888373.132	0.008	-0.005	-0.072
84	5035336.370	-334122.159	3888373.128	0.009	-0.002	-0.080
85	5035336.368	-334122.162	3888373.121	0.005	-0.006	-0.085
86	5035336.367	-334122.160	3888373.125	0.008	-0.004	-0.084
87	5035336.381	-334122.167	3888373.133	0.006	-0.010	-0.068
88	5035336.379	-334122.156	3888373.132	0.007	0.001	-0.070
89	5035336.392	-334122.160	3888373.135	0.001	-0.002	-0.058
90	5035336.386	-334122.160	3888373.129	0.000	-0.002	-0.066

Tabla 6.13: Medición tercera sesión línea media

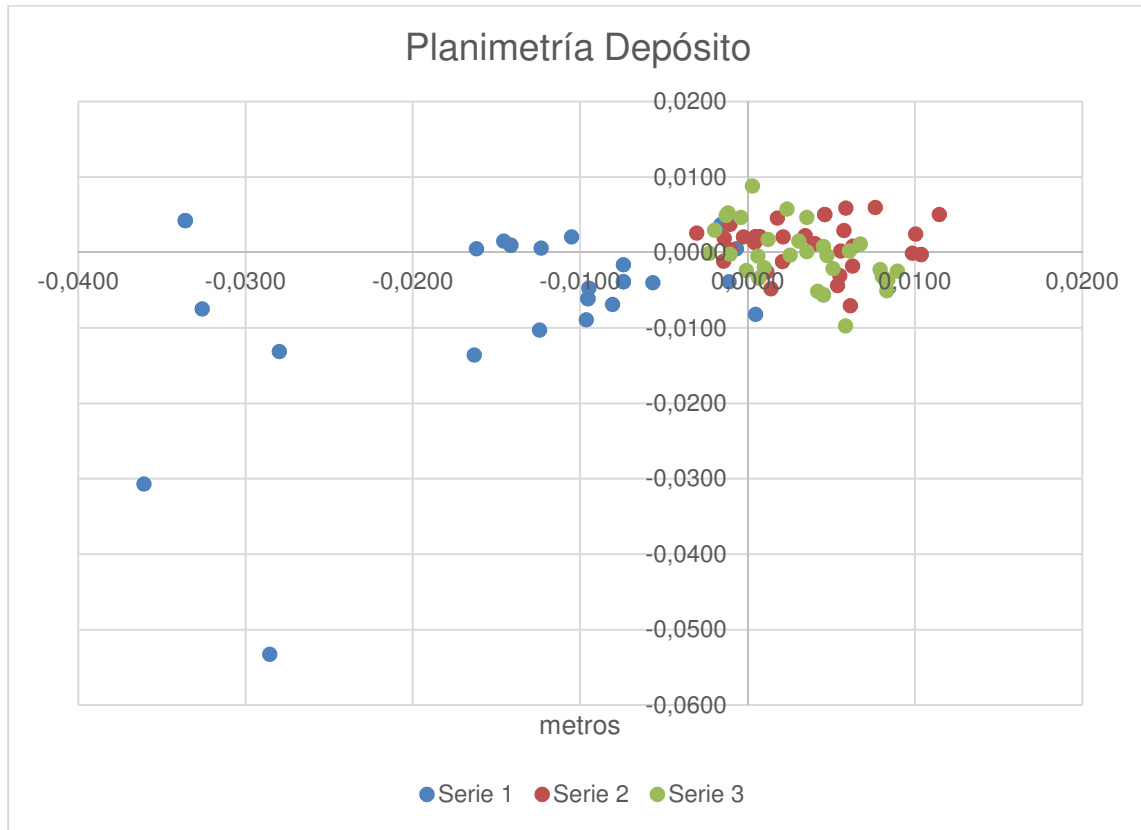


Figura 6.11: Diferencias en planimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)

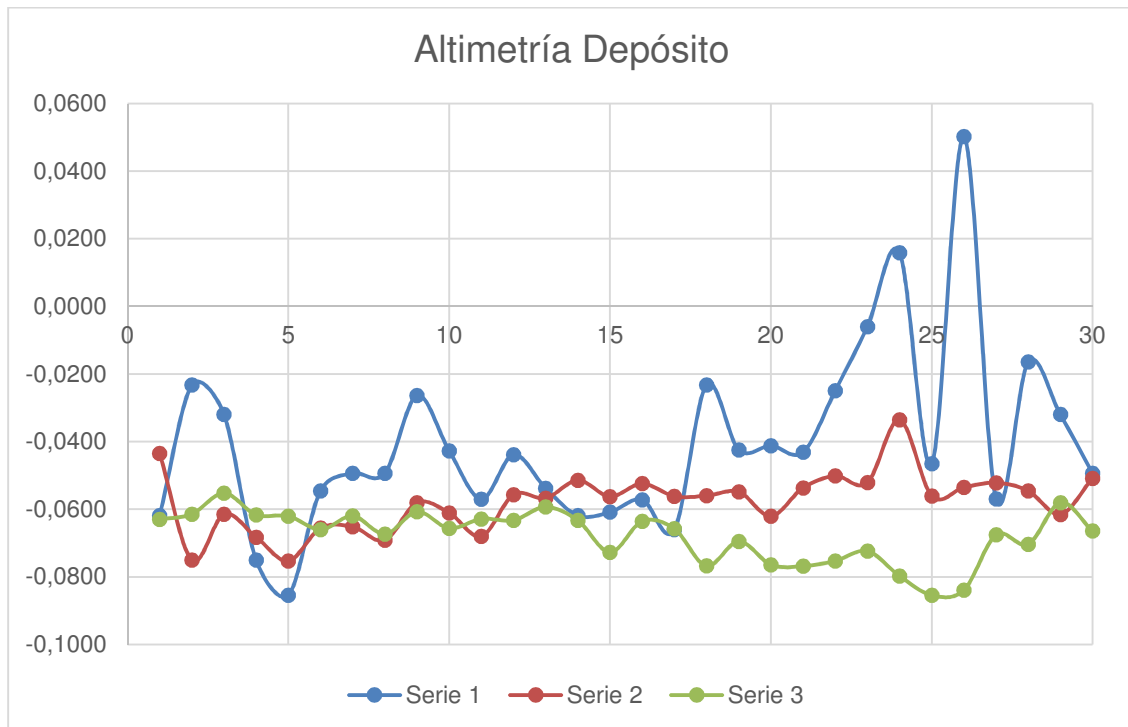


Figura 6.12: Diferencias en altimetría con respecto al valor de control (Solución Post-Proceso)

- Primera sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0121\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0115\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0269\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0163\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0450\text{m}$$

- Segunda sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0039\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0032\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0087\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0054\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0577\text{m}$$

- Tercera sesión:

o Precisión:

$$\sigma_N = 0.0034\text{m}$$

$$\sigma_E = 0.0040\text{m}$$

$$\sigma_{Up} = 0.0077\text{m}$$

o Exactitud:

$$E_{\text{Horizontal}} = 0.0054\text{m}$$

$$E_{\text{Vertical}} = 0.0678\text{m}$$

7. Conclusiones

Desde la aparición de los receptores GNSS, los de doble frecuencia se vienen utilizando sobre todo para aplicaciones geomáticas y topográficas y los receptores de frecuencia única y bajo coste principalmente para aplicaciones de navegación. Sin embargo, sus principales ventajas (tamaño reducido, facilidad de uso, posicionamiento con altas precisiones en tiempo real y principalmente su reducido precio) hacen que este tipo de receptores sean apropiados para muchas más aplicaciones, como pueden ser la topografía, la agricultura de precisión, la investigación, etc.

En este trabajo se ha evaluado el rendimiento del posicionamiento en tiempo real del receptor de bajo coste uBlox C94-M8P aplicando la norma ISO 17123-8 para sistemas de medición de campo GNSS en RTK. Se han realizado y aplicado una serie de pruebas y test estadísticos muy completos los cuales proporcionan unos resultados muy concretos sobre la precisión y exactitud que aporta el aparato.

Gracias a estas pruebas realizadas se ha comprobado que la incertidumbre estándar horizontal de estos equipos es de 5mm y que la incertidumbre estándar vertical alcanza los 10mm. Tal y como se esperaba, el receptor cumple con las especificaciones de precisión subcentrítrica horizontal y vertical establecidos para aplicaciones de alta precisión siempre y cuando se cumplan una serie de requisitos a la hora de utilizar este instrumento.

Estos requisitos se basan principalmente en tener un horizonte despejado entre los receptores que actúan como referencia y rover y que la distancia entre estos no supere los 2.5Km de distancia, tal y como se demuestra en las pruebas de análisis del alcance de la radio realizadas en este trabajo. Este límite de distancia es debido a que la comunicación entre ambos para transmitir las correcciones RTCM es mediante antena UHF y el reducido alcance de ésta no admite mayor distancia entre los receptores.

Teniendo en cuenta las diferentes fuentes de incertidumbre descritas, el receptor de bajo coste C94-M8P tiene una incertidumbre combinada $\pm 5\text{mm}$ para planimetría y de $\pm 10\text{mm}$ para altimetría. Estos resultados muestran que es posible trabajar con errores en torno a 1cm, lo que hace que estos receptores sean competentes para ciertos trabajos de ingeniería y topografía.

Se ha constatado también en las pruebas realizadas que, aumentando la distancia entre referencia y rover, disminuye la precisión y exactitud del posicionamiento RTK, tanto en planimetría como en altimetría. Observado una línea de base corta, de 13 metros aproximadamente, se obtuvieron unos valores medios de exactitud planimétrica de 3.2mm y de 4.5mm en altimetría. Si aumentamos la distancia entre receptores, considerando la línea de base media, con 2218 metros aproximadamente, los valores ascienden a 9mm en la componente planimétrica y 56mm en la componente altimétrica.

Este es un primer estudio del comportamiento de los receptores GNSS de frecuencia única de bajo coste, en el cual se ha centrado en la calidad del equipo, realizando numerosas pruebas y test estadísticos y en la calidad del posicionamiento RTK, con el fin de comprobar la precisión y exactitud del posicionamiento alcanzado con estos equipos. Estas pruebas se deberían ampliar en un futuro considerando nuevas variables, como por ejemplo, el desnivel entre el receptor de referencia y el móvil así como realizar un estudio en profundidad del comportamiento cinemático de estos receptores, ya que en este trabajo fin de grado solo se han realizado pruebas en modo estático.

Como conclusión final decir que se ha demostrado que el receptor GNSS de bajo coste puede lograr un desempeño de posicionamiento competitivo, pudiendo incluso sustituir en algunos casos a los receptores de doble frecuencia de grado topográfico en el posicionamiento en tiempo real, ya que, aunque disminuye ligeramente la precisión, los costes son mucho menores y pueden provocar un fuerte ahorro en cualquier empresa o particular que los utilice.

8. Bibliografía

- Aponte, J., Meng, X., Till, C., Moore, T., Burbidge M. and Dodson A. (2009) Quality assessment of a network-based RTK GPS service in the UK. *Journal of Applied Geodesy*, 3, 25–34.
- Benkler, Y. (2012). *El Pingüino y el Leviatán:* "Por qué la cooperación es nuestra arma más valiosa para mejorar el bienestar de la sociedad". ISBN: 9788423412679
- Casper JEPSEN and Marianne KNUDSEN, Denmark. FIG Working week. (2008). "Good Norm for RTK-Services and GNSS Survey Practice in Denmark".
- Dow, J. M., Neilan, R. E. and Rizos, C. (2009) "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems", *J. Geod.*, vol. 83, pp.191–198, doi: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Eugenio Realini, Ph.D.thesis (2009) *goGPS "free and constrained relative kinematic positioning with low cost receivers"*.
- Euler, H. -J., Keenan, C. R., Zebhauser, B. E. and Wübbena, G. (2001) "Study of a simplified approach of utilizing information from permanent reference station arrays", *Proc. 14th Int. Tech. Meeting Satellite Div.* U.S. Inst. Navig., Salt Lake City, Utah, Sep., pp. 379–391.
- Ghilani, C.D. and Wolf, P.R. (2010) "*Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*"; John Wiley & Sons: New Jersey.
- Gumus, K., Selbesoglu, M. O., Celik, C.T. (2016) "Accuracy investigation of height obtained from Classical and Network RTK with ANOVA test", *Meas.*, vol. 90, pp. 135-143.
- Hans HEISTER, Germany. FIG Working week (2008). "The new ISO standard 17123-8 for checking GNSS field measuring systems".
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., (2008) "*GNSS global navigation satellite systems - GPS, GLONASS, Galileo, and more*". Springer, Vienna.
- Hugo Castillo (marzo, 2018): "*GPS diferencial*". Universidad de Cuenca
- ISO (2015) ISO 17123-8:2015 – Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK), ISO, Geneva, Switzerland.
- Janssen, V. (2009) A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2009, Qld, Australia, Dec, 1 – 3.
- Leica Geosystems (2014) Leica Viva Series Technical Reference Manual. 934 pp
- MundoGEO (2000): "Posicionamiento en tiempo real con GPS RTK"

Páez, R., Torrecillas, C., Barbero, I., Berrocoso, M. (2017) "Regional positioning services as economic and construction activity indicators: the case study of Andalusian Positioning Network (Southern Spain)". *Geocarto Int.*, vol. 32, no. 1, pp. 44-58.

RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service (2004), Version 3.0, RTCM Paper 30-2004/SC104-STD.

Takac, F. and Zelzer, O. (2008) The relationship between network RTK solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX. Proceedings of ION GNSS 2008, Savannah, GA, pp. 348-355.

Taylor B. N. and Kuyatt, C. E. (1994) "Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results", *NIST Tech. Note 1297*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Xu, G. (2007) "*GPS. Theory, Algorithms and Applications*". 2nd edition. Springer.

Webs consultadas:

Aspectos prácticos de la ISO 17123-8: http://www.mecinca.net/papers/ISO17123_8.pdf
(Fecha: 19 marzo, 2017)

Mensajes RTCM: ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS-RT/03_Hoyer_GNSS_en_Tiempo_Real.pdf

Portal de Posicionamiento de Andalucía: <http://ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento/rap> (Fecha último acceso: Agosto de 2018).

Trasteando con uBlox: <https://atlasenxeneria.wordpress.com/2017/09/03/trasteando-con-un-gps-u-blox-i-procesamiento-en-estatico/>

U-blox: <https://www.u-blox.com/en> (Fecha último acceso: Agosto de 2018).