



UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA (UOC)  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

## TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ÁREA: TECNOLOGÍAS DE RADIOCOMUNICACIÓN

# Cálculo de la posición GNSS utilizando medidas “en crudo” de dispositivos Android

---

Autor: Fernando Javier Álvarez Franco

Tutor: José Antonio López Salcedo

Profesor: Germán Cobo Rodríguez

---

Barcelona, 14 de enero de 2019





Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada  
3.0 España de Creative Commons.





# FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Cálculo de la posición GNSS utilizando medidas “en crudo” de dispositivos Android
Nombre del autor:	Fernando Javier Álvarez Franco
Nombre del colaborador docente:	José Antonio López Salcedo
Nombre del PRA:	Germán Cobo Rodríguez
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2019
Titulación o programa:	Máster Univesitario de Tecnología de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Tecnologías de Radiocomunicación
Idioma del trabajo:	Español
Palabras clave	medidas GNSS en crudo, Dispositivos Android



# Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la continua supervisión de mi tutor, José Antonio López Salcedo, a quien me gustaría agradecer su generosa dedicación y cuidadosa revisión de contenidos.

El segundo de mis agradecimientos va dirigido a mi familia, Esther, Malena y Quique, por su infinita comprensión, y a quien prometo devolverles con intereses el tiempo robado en tardes de juego. A ellos va dedicado este trabajo.



# Abstract

This Master's Final Project presents an analysis of the positioning results obtained from the raw GPS measurements acquired with a mobile phone based on the Android operating system, with the main objective of demonstrating that it is possible to conduct in this field of knowledge research tasks of interest to the scientific community, using a commercial receiver like a mobile phone instead of expensive professional receivers. For this, data acquisitions have been carried out in three different experimental environments: one outdoors with good visibility, another outdoors with reduced visibility and a third indoors. Next, software applications have been developed to analyze the observables of the acquired signals and to compute the position of the receiver from these observables and from the GPS satellites ephemeris obtained from a NASA FTP server. The statistical characterization of the results shows that the use of a weighted linear regression method (WLS) to solve the system of positioning equations improves these results with respect to those obtained with an unweighted method (LS) in the outdoor environments, although this improvement is not significant in the indoor environment.

Regardless of these results, the realization of this work has allowed the acquisition of the necessary knowledge and the development of those software tools to carry out, from them, a research of interest in this important technological area, thus fulfilling the main objective of this work.

**Keywords:** Raw GNSS measurements, Android devices, WLS algorithm, dual band L1-L5.



# Resumen

Este Trabajo Final de Máster presenta un análisis de los resultados de posicionamiento obtenidos a partir de las señales GPS en crudo capturadas con un teléfono móvil basado en el sistema operativo Android, con el principal objetivo de demostrar que es posible llevar a cabo en este campo del conocimiento tareas de investigación de interés para la comunidad científica, utilizando un receptor comercial de este tipo en lugar de los costosos receptores profesionales. Para ello, se han llevado a cabo capturas de datos en tres entornos experimentales distintos: uno de exterior con buena visibilidad, otro de exterior con visibilidad reducida y un tercero de interior. A continuación, se han desarrollado aplicaciones software para analizar los observables de las señales capturadas y para calcular la posición del receptor a partir de estos observables y de las efemérides obtenidas de un servidor FTP de la NASA. La caracterización estadística de los resultados demuestra que el uso de un método de regresión lineal ponderado (WLS) para resolver el sistema de ecuaciones de posicionamiento mejora estos resultados respecto de los obtenidos con un método no ponderado (LS) en los entornos de exterior, aunque esta mejora no es significativa en un entorno de interior.

Independientemente de estos resultados, el desarrollo de este trabajo ha permitido la adquisición de los conocimientos y la programación de las herramientas software necesarias para llevar a cabo, a partir de ellos, una investigación de interés en esta importante área tecnológica, cumpliendo así con el objetivo principal del trabajo.

**Palabras clave:** Medidas GNSS en crudo, dispositivos Android, algoritmo WLS, banda dual L1-L5.





# Índice general

Agradecimientos	v
Abstract	vii
Resumen	ix
Índice	1
Listado de Figuras	3
Listado de Tablas	7
<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>9</b>
1.1. Fases de desarrollo	10
1.1.1. Fase 1: obtención de observables utilizando la API de localización de Android	10
1.1.2. Fase 2: cálculo de la posición de usuario utilizando los observables proporcionados por la API	10
<b>2. Fundamentos Teóricos del Trabajo</b>	<b>13</b>
2.1. Sistema global de navegación por satélite	13
2.1.1. Solución de navegación	15
2.1.2. El tiempo GNSS	17
2.2. Medidas GNSS en crudo de dispositivos Android	18
2.2.1. El receptor GNSS	18
2.2.2. Medidas en crudo	19
2.2.3. Relación entre las medidas en crudo y los parámetros GNSS	19
<b>3. Obtención de observables</b>	<b>23</b>
3.1. Construcción del entorno de desarrollo	23

3.2. Desarrollo de la aplicación . . . . .	27
3.3. Representación de resultados . . . . .	31
<b>4. Cálculo de la posición</b>	<b>35</b>
4.1. Desarrollo de la aplicación de posicionamiento . . . . .	35
4.2. Representación de resultados . . . . .	37
<b>5. Análisis estadístico de resultados.</b>	<b>43</b>
5.1. Caracterización de observables . . . . .	43
5.2. Caracterización del posicionamiento . . . . .	46
<b>6. Análisis de resultados en la banda L5</b>	<b>51</b>
6.1. Caracterización de observables . . . . .	51
6.2. Comparativa de posicionamiento . . . . .	54
<b>7. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>

# Listado de Figuras

1.1.	Cronograma de ejecución de las actividades del Trabajo Fin de Máster. . . . .	12
2.1.	Representación del proceso de trilateración (Fuente: [1]) . . . . .	14
2.2.	Diagrama de bloques de un receptor GNSS genérico. . . . .	18
3.1.	(a) Imagen del smartphone Xiaomi Mi8 con la aplicación GNSS Logger en ejecución y (b) fichero de datos generado por esta aplicación. . . . .	24
3.2.	Panel de control de la aplicación GNSS Analysis. . . . .	26
3.3.	Gráficas generadas por la aplicación GNSS Analysis. . . . .	26
3.4.	Diagrama de flujo de la función <code>mittfmf1.m</code> . . . . .	28
3.5.	Representación de pseudorangos frente al tiempo. . . . .	29
3.6.	Representación de C/N0 frente al tiempo. . . . .	30
3.7.	Representación de desplazamiento Doppler frente al tiempo. . . . .	30
3.8.	Representación de C/N0 frente al tiempo en un entorno de exterior con buena visibilidad. . . . .	32
3.9.	Representación de C/N0 frente al tiempo en un entorno de exterior con visibilidad reducida. . . . .	32
3.10.	Representación de C/N0 frente al tiempo en un entorno de interior. . . . .	33
4.1.	Diagrama de flujo de la función <code>mittfmf2.m</code> . . . . .	36
4.2.	Resultados de posicionamiento en un entorno de exterior con buena visibilidad. . . . .	38
4.3.	Resultados de posicionamiento en un entorno de exterior con visibilidad reducida. . . . .	38
4.4.	Resultados de posicionamiento en un entorno de interior. . . . .	39
4.5.	Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de exterior con buena visibilidad. . . . .	40
4.6.	Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de exterior con visibilidad reducida. . . . .	40
4.7.	Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de interior. . . . .	41

5.1. Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de exterior con buena visibilidad y skyplot de los satélites en el instante de captura (25/12/2018 a las 12:32) . . . . .	45
5.2. Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de exterior con visibilidad reducida y skyplot de los satélites en el instante de captura (21/12/2018 a las 11:10) . . . . .	45
5.3. Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de interior y skyplot de los satélites en el instante de captura (04/12/2018 a las 20:07) . . . . .	45
5.4. Analisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de exterior con buena visibilidad y CDF del error de posicionamiento. . . . .	47
5.5. Analisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de exterior con visibilidad reducida y CDF del error de posicionamiento. . . . .	47
5.6. Analisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de interior y CDF del error de posicionamiento. . . . .	48
5.7. Evolución temporal de los residuos de los pseudorangos generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de exterior con buena visibilidad. . . . .	49
5.8. Evolución temporal de los residuos de los pseudorangos generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de exterior con visibilidad reducida. . . . .	49
5.9. Evolución temporal de los residuos de los pseudorangos generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de interior. . . . .	50
6.1. Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de exterior con buena visibilidad y skyplot de los satélites en el instante de captura (25/12/2018 a las 12:32) . . . . .	52
6.2. Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de exterior con visibilidad reducida y skyplot de los satélites en el instante de captura (21/12/2018 a las 11:10) . . . . .	53
6.3. Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de interior y skyplot de los satélites en el instante de captura (04/12/2018 a las 20:07) . . . . .	53
6.4. Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de exterior con buena visibilidad. . . . .	54
6.5. Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de exterior con visibilidad reducida. . . . .	54

---

6.6. Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de interior. . . . . 55



# Listado de Tablas

2.1. Datos en crudo proporcionados por la API de localización de Android. . . . .	19
2.2. Estados de seguimiento válidos para el cálculo de los pseudorangos en los distintos sistemas. . . . .	21
2.3. Valores de identificación de la constelación proporcionados por el parámetro <i>ConstellationType</i> . . . . .	22





# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

En mayo de 2016 Google anunció la disponibilidad de medidas en crudo de señales GNSS utilizando dispositivos Android. Este hecho hace que sea posible, por primera vez, tener medidas de mensajes de navegación decodificados utilizando dispositivos comerciales tipo smartphones o tablets [2]. La disponibilidad de medidas en crudo de señales GNSS en dispositivos Android permite que una comunidad mucho más amplia de investigadores pueda trabajar en el desarrollo de técnicas de proceso de este tipo de señales, cuya captura estaba hasta hace poco reservada a receptores profesionales de elevado coste.

La versión 7 de Android (Nougat) y sus APIs de localización 23 y 24, permiten que los desarrolladores tengan acceso al reloj GNSS (tiempo del receptor y bias), a los mensajes de navegación GNSS (bits de navegación y status) y a medidas GNSS (tiempo de satélite, código y fase de portadora), para lo que es necesario disponer de un terminal compatible con estas versiones del software [3].

En este contexto, el presente trabajo plantea como principal objetivo analizar los cálculos de posición que pueden obtenerse a partir de las medidas en crudo de señales GNSS proporcionadas por un dispositivo Android en tres entornos distintos, un entorno exterior con amplia visibilidad del cielo, un entorno de exterior con visibilidad reducida y un entorno de interior.

Para cumplir este objetivo global se plantean los siguientes objetivos parciales:

- O1: familiarizarse con las herramientas software ya disponibles en el mercado para la captura y análisis de las señales GNSS en crudo [4], en concreto, la app de captura GNSSLogger y el paquete de análisis GNSS Analysis desarrollado sobre Matlab.
- O2: Desarrollar una aplicación software en Matlab capaz de proporcionar a su salida los observables de pseudorange, desplazamiento Doppler y relación portadora a ruido (C/N0) de los satélites GNSS compatibles con la API del terminal de usuario y visualizarlos de forma gráfica.

- O3: A partir de la aplicación software desarrollada en el objetivo anterior, añadir las funcionalidades necesarias para procesar los observables y calcular la posición del usuario.
- O4: Llevar a cabo un análisis experimental de la posición obtenida con la aplicación desarrollada en el objetivo anterior en los tres entornos objeto de estudio.

## 1.1. Fases de desarrollo

Para llevar a cabo los objetivos descritos en la sección anterior, se propone un esquema basado en dos fases de desarrollo:

### 1.1.1. Fase 1: obtención de observables utilizando la API de localización de Android

Objetivos relacionados: O1 y O2

Actividades a realizar:

- Construir el entorno de desarrollo, para lo cual será necesario adquirir un terminal móvil basado en Android con versión igual o superior a 7 [3], así como instalar una plataforma de programación compatible con Android, como Android Studio.
- Instalar las aplicaciones GNSS Logger en el terminal móvil y GNSS Analysis en un ordenador [4]. Esta última, desarrollada sobre Matlab, permite al usuario visualizar gráficas en el ordenador con la evolución de las diferentes medidas, y es una buena primera toma de contacto con el tipo de información que proporciona la API y la forma de visualizarla.
- Desarrollar una aplicación en Matlab que, a partir de los datos obtenidos a través de la API de localización (por ejemplo, mediante un script previo que se haya ejecutado en el terminal móvil, al estilo del GNSS logger) procese esos datos y presente los observables de pseudorango, desplazamiento Doppler y relación  $C/N_0$  de forma gráfica. Nótese que, para el caso de los pseudorangos, éstos no son proporcionados directamente por la API sino que es necesario un procesado previo, tal y como se indica en la sección 2.4.2 de [2].

### 1.1.2. Fase 2: cálculo de la posición de usuario utilizando los observables proporcionados por la API

Objetivos relacionados: O3 y O4

Actividades a realizar:

- Obtener los observables de GNSS que serán utilizados en esta segunda fase para el cálculo de la posición. Para ello se realizarán capturas de señal en tres escenarios diferentes, uno exterior con visión lo más amplia posible del cielo, otro también exterior pero en un entorno donde la visibilidad del cielo sea más limitada y un tercer entorno de interior. La idea es comparar el caso en que pueda haber del orden de 8 a 11 satélites visibles, muchos de ellos con buena calidad, con el caso en que pueda haber del orden de 4 a 7 satélites, algunos de ellos con no muy buena calidad.
- Implementar el cálculo de la posición utilizando medidas de GNSS según el método descrito en la sección 1.7.1 de [2], basado en la linealización de la ecuación de navegación y su resolución por mínimos cuadrados (LS). Calcular la posición con los datos capturados en los tres entornos y comparar los resultados.
- Utilizar las medidas de dispersión de los pseudorangos en el cálculo de la posición, de forma que se pondere cada medida con su calidad (a través del valor inverso de la dispersión del pseudorango asociado a cada satélite); es decir, resolver las ecuaciones de navegación mediante una técnica de mínimos cuadrados ponderados (WLS). Calcular la posición con los datos adquiridos en los tres entornos experimentales.
- Caracterizar estadísticamente los resultados de posición, representando el residuo de los pseudorangos al resolver las ecuaciones de navegación utilizando el método de mínimos cuadrados ponderados. Extender esta caracterización a los resultados obtenidos en la banda dual L1-L5.

La figura 1.1 muestra un cronograma con la temporización de estas actividades, donde también se ha incluido por completitud la fase final de entrega de la memoria y defensa del trabajo, así como los hitos de entrega de las distintas PEC.

	Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero		
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15
<b>FASE 1: Obtención de observables</b>		PEC1			PEC2										
Actividad 1.1 - Construcción del entorno de desarrollo															
Actividad 1.2 - Instalación y prueba de aplicaciones															
Actividad 1.3 - Desarrollo de aplicación para obtención de observables															
<b>FASE 2: Análisis de la posición del usuario</b>										PEC3					
Actividad 2.1 - Captura experimental de señales en tres escenarios															
Actividad 2.2 - Implementación del cálculo de la posición LS															
Actividad 2.3 - Implementación del cálculo de la posición WLS															
Actividad 2.4 - Caracterización estadística de resultados															
<b>FINALIZACIÓN DEL TRABAJO</b>															PEC4
Entrega de la Memoria															
Defensa del trabajo															

Figura 1.1: Cronograma de ejecución de las actividades del Trabajo Fin de Máster.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos del Trabajo

En este segundo capítulo del trabajo se presenta el concepto de medidas GNSS en crudo, así como todos los fundamentos teóricos necesarios para obtener la posición de un receptor a partir de dichas medidas. Todo el material incluido en este capítulo está basado en el contenido de las referencias [2, 5, 6].

### 2.1. Sistema global de navegación por satélite

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) son sistemas que permiten obtener la posición de un usuario en cualquier parte del globo terrestre haciendo uso de las señales emitidas por una constelación de satélites artificiales, que orbitan alrededor de la tierra en órbitas intermedias, de entre 2.000 y 35.786 km de altitud. Además de esta constelación de satélites (segmento espacial), un sistema GNSS está formado por un conjunto de estaciones terrestres de monitorización y control (segmento de control) y los receptores de señal que computan la posición (segmento de usuario). Actualmente, existen cuatro sistemas GNSS operativos: el norteamericano GPS, el europeo Galileo, el ruso GLONASS y el chino Beidou.

El cálculo de la posición es realizado por el receptor, que mide la distancia que le separa de varios satélites a partir de las señales emitidas por éstos y lleva a cabo entonces un proceso de trilateración después de decodificar del mensaje transmitido sobre estas señales tanto su posición como el tiempo de emisión, proporcionado por un reloj atómico de gran precisión. La medida de estas distancias, denominadas pseudorangos, se lleva a cabo determinando el tiempo de recepción de las señales emitidas por los satélites mediante un proceso de correlación de estas señales con un copia local del código pseudoaleatorio que se utiliza para modular los bits del mensaje, y que identifica de forma unívoca a cada satélite. Si el reloj del receptor estuviera perfectamente sincronizado con el de los satélites, la diferencia entre el tiempo de recepción medido  $t_{RX}$  y el de emisión decodificado  $t_{TX}$  sería proporcional a la distancia  $d$  que separa al

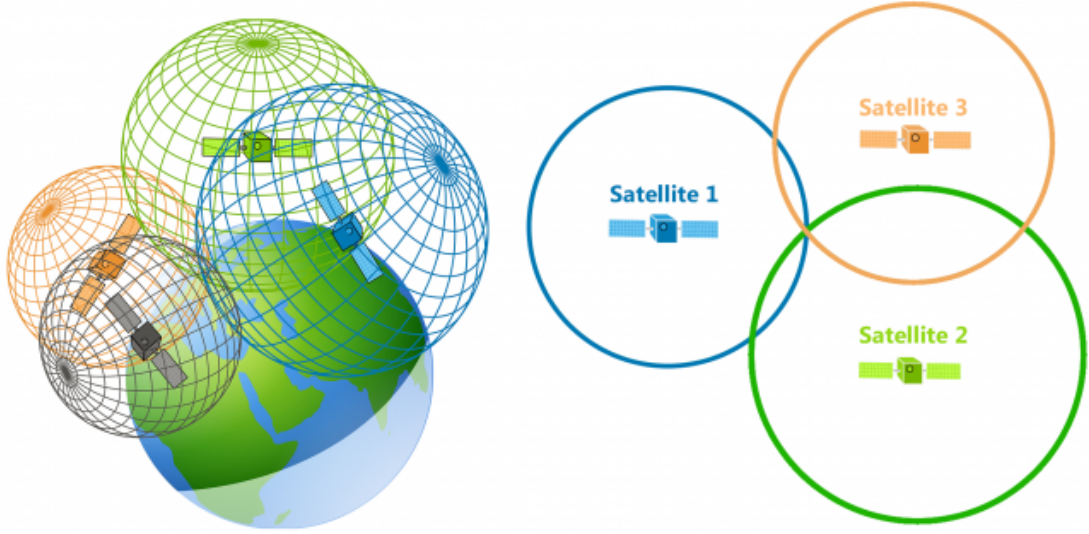


Figura 2.1: Representación del proceso de trilateración (Fuente: [1])

receptor del satélite, esto es:

$$d = c \cdot (t_{RX} - t_{TX}) \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de las señales electromagnéticas. En este caso, tres satélites serían suficientes para determinar sin ambigüedad la posición del usuario sobre la tierra, ya que esta posición estaría definida por el punto de corte de las tres esferas cuyos centros son los satélites y cuyos radios son las distancias medidas por el receptor, tal y como se representa en la Figura 2.1 (en realidad las tres esferas se cortan en dos puntos, pero solo uno de ellos está cercano a la superficie de la tierra).

En la práctica, el reloj del receptor no está sincronizado y es menos preciso que los relojes de los satélites, por lo que las distancias medidas son realmente pseudorángos  $\rho$ , que están relacionados con las distancias reales a través del sesgo del reloj del receptor  $\delta t$  como:

$$\rho = c \cdot (t_{RX} + \delta t - t_{TX}) = c \cdot (t_{RX} - t_{TX}) + c \cdot \delta t = d + c \cdot \delta t \quad (2.2)$$

En este caso, será necesaria la participación de un cuarto satélite para resolver el sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas que se plantea, a saber, las tres coordenadas del receptor  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  y el sesgo de su reloj  $\delta t$ . En la práctica, la medida de los pseudorángos puede verse afectada por otros fenómenos, tales como los retardos de propagación provocados por la Ionosfera ( $I_\rho$ ), la Troposfera ( $T_\rho$ ) y otros errores adicionales tales como ruido en la medida ( $\epsilon_\rho$ ), de modo que la expresión anterior puede escribirse en general como:

$$\rho = d + c \cdot \delta t + I_\rho + T_\rho + \epsilon_\rho \quad (2.3)$$

expresión que se denomina **ecuación fundamental para el posicionamiento con pseudor rangos** [5]. Generalmente, el receptor puede estimar el efecto de algunos de estos fenómenos calculando un pseudorango corregido  $\rho_c$  que puede expresarse como:

$$\rho_c = d + c \cdot \delta t + \epsilon_{\rho,c} \quad (2.4)$$

donde  $\epsilon_{\rho,c}$  es un término de error que incluye todos los efectos que no hayan podido ser corregidos. El pseudorango corregido es, como veremos a continuación, el observable básico para obtener la posición del receptor GNSS.

### 2.1.1. Solución de navegación

La solución de navegación o estimación PVT (posición, velocidad y tiempo), es el proceso de cálculo de la posición y sesgo temporal del receptor de un sistema GNSS a partir de los observables de las señales emitidas por este sistema. Como ya se ha comentado anteriormente, para obtener esta solución utilizando como observable el pseudorango corregido se necesitan como mínimo cuatro medidas de esta magnitud (Eq. 2.4) asociadas a varios satélites distintos, esto es:

$$\rho_c^k = d^k + c \cdot \delta t + \epsilon_{\rho,c} = |\mathbf{r}^k - \mathbf{r}| + c \cdot \delta t + \epsilon_{\rho,c} \quad (2.5)$$

con  $k \in (1, \dots, N)$  y  $N \geq 4$ , donde  $\mathbf{r}^k = (x^k, y^k, z^k)$  representa la posición del satélite k-ésimo y  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  es nuevamente la posición del receptor. El término de error que aparece en la ecuación anterior  $\epsilon_{\rho,c}$  provoca que un sistema sobredeterminado ( $N > 4$ ) no tenga solución, por lo que este sistema de ecuaciones se resuelve buscando aquella solución que minimice una determinada función de error. La forma de resolver este sistema y la definición de la función de error determinan los distintos métodos de posicionamiento.

Un método simple, y a la vez ampliamente utilizado, consiste en linealizar el rango  $d$  en torno a una posición estimada del receptor, y resolver de forma iterativa el sistema de ecuaciones linealizado minimizando la suma ponderada de los residuos. Si linealizamos el rango al k-ésimo satélite  $d^k = |\mathbf{r}^k - \mathbf{r}| = \sqrt{((x^k - x)^2 + (y^k - y)^2 + (z^k - z)^2)}$  en torno a la posición estimada  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  podemos escribir:

$$d^k = d_0^k - \frac{(\mathbf{r}^k - \mathbf{r}_0)^T}{d_0^k} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (2.6)$$

Introduciendo a continuación esta expresión en la ecuación del pseudorango corregido (Eq.

2.5), ignorando el término de error  $\epsilon_{\rho,c}$  y reordenando términos tenemos:

$$\rho_c^k - d_0^k = \frac{(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}^k)^T}{d_0^k} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) + c \cdot \delta t \quad (2.7)$$

expresión puede escribirse de forma expandida como:

$$\begin{pmatrix} \rho_c^1 - d_0^1 \\ \rho_c^2 - d_0^2 \\ \vdots \\ \rho_c^n - d_0^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_0 - x^1}{d_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{d_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{d_0^1} & 1 \\ \frac{x_0 - x^2}{d_0^2} & \frac{y_0 - y^2}{d_0^2} & \frac{z_0 - z^2}{d_0^2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{d_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{d_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{d_0^n} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ c \cdot \delta t \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Utilizando notación vectorial es posible escribir la expresión anterior de una forma más compacta como:

$$\Delta \rho_c = \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{c} \quad (2.9)$$

donde se ha definido el vector de incremento de posición y temporal como  $\Delta \mathbf{c} = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{r} \\ c \cdot \delta t \end{pmatrix}$ . Si ahora definimos la función de error a minimizar como la suma ponderada de los residuos:

$$\mathbf{f}(\Delta \mathbf{c}) = (\Delta \rho_c - \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{c})^T \cdot \mathbf{W} \quad (2.10)$$

donde  $\mathbf{W}$  es una matriz de pesos, la solución vendrá dada por la expresión:

$$\Delta \mathbf{c} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \Delta \rho_c \quad (2.11)$$

A partir de esta solución podemos actualizar la estimación de la posición como:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r} \quad (2.12)$$

El método de cálculo basado en la ejecución iterativa de las ecuaciones 2.11 y 2.12 es un proceso que converge rápidamente aunque la estimación inicial de la posición  $\mathbf{r}_0$  tenga un error de varios kilómetros, siendo habitual un número de iteraciones entre 2 y 4. La matriz de pesos  $\mathbf{W}$  que aparece en la ecuación 2.11 puede escogerse como una matriz identidad, en cuyo caso no tiene ningún efecto y éste método recibe el nombre de algoritmo LS (Least Squares). En general, esta matriz cumple una doble función:

- Reducir el peso de las ecuaciones con medidas de peor calidad.
- Acoplar las ecuaciones con medidas correladas.

Para cumplir con el primer objetivo, es habitual hacer que las componentes de la diagonal



de  $\mathbf{W}$  sean directamente proporcionales a alguna magnitud relacionada cualitativamente con la calidad de los pseudorrangos, como puede la inversa de sus desviaciones, la relación  $C/N_0$  o el ángulo de elevación de los satélites. El segundo objetivo se consigue con las componentes que están fuera de la diagonal de la matriz  $\mathbf{W}$ , aunque obtener una medida cuantitativa de la correlación entre las medidas no es fácil, por lo que la matriz suele ser diagonal. Cuando la matriz  $\mathbf{W}$  no es la matriz identidad el método iterativo recibe el nombre de algoritmo WLS (Weighted Least Squares).

### 2.1.2. El tiempo GNSS

Todos los sistemas de navegación por satélite poseen una referencia temporal muy estable, basada en el uso de relojes atómicos, cuyo sesgo respecto al tiempo atómico internacional (TAI) y al tiempo universal coordinado (UTC) puede ser fácilmente calculado. Cada GNSS posee su propia referencia temporal, que se describe brevemente a continuación.

- GPS: El tiempo del sistema GPS (GPST) es un tiempo continuo que no tiene segundos intercalares. Arranca la medianoche (0:00 UTC) del 5 al 6 de enero de 1980, cuando el TAI estaba 19 segundos por delante del UTC, por lo que esta es la diferencia constante entre las referencias temporales TAI y GPST. Este tiempo es transmitido haciendo uso de dos parámetros, el número de semana (WN), que cuenta el número de semanas que han transcurrido desde el inicio del tiempo GPST al momento actual, y el tiempo de semana (TOW) que proporciona los segundos transcurridos dentro de la semana actual. La semana comienza la medianoche del sábado.
- Galileo: El tiempo del sistema Galileo (GST) es un tiempo continuo que comienza 13 segundos antes de la medianoche entre el 21 y el 22 de agosto de 1999, definido de este modo para que la diferencia entre TAI y GST sea también de 19 segundos, y no exista por tanto ninguna diferencia entre las referencias GPST y GST.
- GLONASS: El tiempo del sistema GLONASS (GLONASST) es generado por un sistema de sincronización central, de modo que la diferencia entre el UTC de Rusia y el GLONASST no excede nunca 3 horas y 1 ms. Al igual que UTC, GLONASST implementa segundos intercalares.
- Beidou: El tiempo del sistema Beidou (BDT) es un tiempo continuo que comienza la medianoche del 1 al 2 de enero de 2006, cuando el TAI estaba 33 segundos por delante del UTC, que por tanto es la diferencia constante entre TAI y BDT.

Los receptores GNSS multiconstelación pueden monitorizar satélites de distintos sistemas, pero generalmente sólo proporcionan un reloj basado en una única referencia temporal, por

lo que necesitan hacer la conversión entre las distintas referencias descritas anteriormente. La relación entre estas cuatro referencias puede expresarse de forma simple como:

$$GPST = GST = BDT + 14s = GLONASS - 3h + leapsecond \quad (2.13)$$

donde *leapsecond* es la diferencia entre los sistemas UTC y GPST.

## 2.2. Medidas GNSS en crudo de dispositivos Android

### 2.2.1. El receptor GNSS

En todo receptor GNSS pueden distinguirse tres elementos principales, la antena, un módulo de proceso analógico y un módulo de proceso digital, tal y como se representa en la Figura 2.2. El módulo analógico está formado por un front-end de RF, encargado de amplificar, filtrar y convertir a frecuencia intermedia la señal capturada por la antena; así como por un convertidor analógico-digital que digitaliza la señal acondicionada. A continuación, el módulo digital está formado por un primer bloque de proceso banda-base que realiza la captura y seguimiento del código transmitido, y que puede hacer uso de información externa para reducir el tiempo necesario para llevar a cabo este proceso. Después de este bloque se realiza la decodificación del mensaje de navegación, y finalmente el módulo de navegación obtiene la solución PVT pudiendo para ello hacer uso de la información proporcionada por sensores externos para aumentar la precisión y la disponibilidad de medidas en entornos más hostiles.

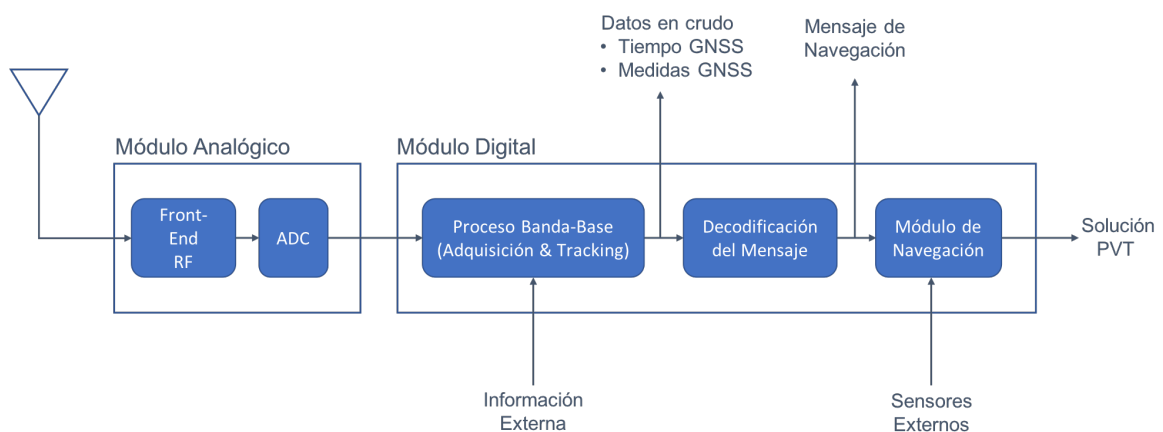


Figura 2.2: Diagrama de bloques de un receptor GNSS genérico.

En un dispositivo Android, el módulo de proceso digital que aparece a la derecha de la Figura 2.2 es una unidad de proceso basada en software que se diseña para operar en hardware de propósito general.

### 2.2.2. Medidas en crudo

Tal y como ya se ha comentado en la introducción de este trabajo, la versión 7 (Nougat) de Android introduce una nueva interfaz de programación de aplicaciones (API 24) que permite a los desarrolladores acceder a datos en crudo del receptor GNSS que como se representa en la Figura 2.2 anterior, son aquellos datos generados por el bloque de proceso digital banda-base. Tal y como muestra la Tabla 2.1 estos datos pueden ser de dos tipos: relacionados con el reloj (clase GNSSClock) o relacionados con medidas típicas GNSS (clase GNSSmeasurements). Esta tabla muestra también una breve descripción del significado de estos parámetros.

Tipo de Medida (Clase Android)	Parámetro	Descripción
GNSSClock	<i>TimeNanos</i>	Reloj interno del receptor GNSS en ns
	<i>BiasNanos</i>	Fracción del Sesgo del reloj interno del receptor GNSS respecto al tiempo GPS
	<i>FullBiasNanos</i>	Sesgo del reloj interno del receptor GNSS respecto al tiempo GPS en ns
	<i>DriftNanosPerSecond</i>	Deriva del reloj interno del receptor
	<i>HardwareClockDiscontinuityCount</i>	Número de discontinuidades hardware del reloj interno
	<i>LeapSecond</i>	Segundos intercalares asociados con el tiempo del reloj interno
GNSSMeasurement	<i>ConstellationType</i>	Tipo de constelación
	<i>Svid</i>	Identificador del satélite
	<i>State</i>	Estado actual de la máquina GNSS
	<i>ReceivedSvTimeNanos</i>	Tiempo GNSS de transmisión de la señal
	<i>ReceivedSvTimeUncertaintyNanos</i>	Incertidumbre en el tiempo GNSS de transmisión de la señal
	<i>AccumulatedDeltaRangeMeters</i>	Rango delta acumulado desde el último reset del canal
	<i>AccumulatedDeltaRangeUncertaintyMeters</i>	Incertidumbre en el rango delta acumulado
	<i>Cn0DbHz</i>	Relación portadora a a ruido (C/N0)
	<i>TimeOffsetNanos</i>	Sesgo de tiempo del momento en que se realiza la medida
	<i>CarrierCycles</i>	Número de ciclos de portadora completos entre el satélite y el receptor
	<i>CarrierFrequencyHz</i>	Frecuencia de portadora que modula códigos y mensaje
	<i>PseudorangeRateMetersperSecond</i>	Variación temporal del pseudorange
<i>PseudorangeRateUncertaintyMetersperSecond</i>	Incertidumbre en la variación temporal del pseudorange	

Tabla 2.1: Datos en crudo proporcionados por la API de localización de Android.

### 2.2.3. Relación entre las medidas en crudo y los parámetros GNSS

En esta última sección del capítulo se describe la relación que existe entre las medidas en crudo proporcionadas por la API de localización de Android y los siguientes parámetros GNSS:

## El Tiempo GPS

Android 7 no proporciona directamente el tiempo GPS, pero éste puede ser fácilmente calculado una vez que el receptor ha estimado su tiempo GNSS haciendo uso de la constelación GPS:

$$GpsTime(ns) = TimeNanos - (FullBiasNanos + BiasNanos) \quad (2.14)$$

Si el receptor utiliza una constelación distinta de la GPS para estimar su tiempo GNSS, entonces el tiempo GPS puede obtenerse como:

$$GpsTime(ns) = TimeNanos - (FullBiasNanos + BiasNanos) - InterSystemsBias \quad (2.15)$$

donde *InterSystemBias* representa el sesgo entre el tiempo del sistema GNSS utilizado por el receptor y el tiempo GPS.

## Generación de Pseudorangos

Como ya vimos en la sección 2.1 de este capítulo, el pseudorango puede obtenerse a partir de la diferencia entre el tiempo de recepción de la señal medido  $t_{RX}$  y el tiempo de emisión decodificado  $t_{TX}$  como:

$$d = c \cdot (t_{RX} - t_{TX}) * 1e - 9 \quad (2.16)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y hemos supuesto que estos tiempos están en nanosegundos. Como ya hemos visto en la Tabla 2.1, Android 7 proporciona el tiempo de emisión decodificado en ns en el parámetro *ReceivedSvTimeNanos*, aunque es importante tener en cuenta que su rango de validez depende del estado del seguimiento de la señal, esto es, de si el receptor está sincronizado a nivel de código, de bit, de subframe o ya se ha llevado a cabo la decodificación del tiempo de semana (TOW) incluido en el mensaje de navegación.

Para poder calcular el pseudorango sin ambigüedad es necesario que el rango de validez del tiempo de emisión sea mayor que el tiempo de propagación de la señal desde el satélite (alrededor de los 70 ms), lo que sucede para los estados de seguimiento que muestra la Tabla 2.2 en los distintos sistemas.

Sistema	Estados de seguimiento válidos (rango de validez de $t_{TX}$ )
GPS	<i>Subframe sync</i> (6s) y <i>TOW</i> (1 semana)
GALILEO	<i>E1C 2nd code</i> (100 ms), <i>E1B page</i> (2s) y <i>TOW</i> (1 semana)
GLONASS	<i>String</i> (2s) y <i>Time of Day</i> (1 día)
BEIDOU	<i>Subframe sync</i> (6s) y <i>TOW</i> (1 semana)

Tabla 2.2: Estados de seguimiento válidos para el cálculo de los pseudorangos en los distintos sistemas.

De acuerdo con la expresión del tiempo GPS obtenida anteriormente (2.14), el tiempo GNSS de recepción de la señal  $t_{RX_{GNSS}}$  puede obtenerse como:

$$t_{RX_{GNSS}} = TimeNanos + TimeOffsetNanos - (FullBiasNanos[1] + BiasNanos[1]) \quad (2.17)$$

donde el parámetro *TimeOffsetNanos* es el offset temporal del instante de medida. Para poder calcular el pseudorango según muestra la expresión 2.16, es necesario referir este tiempo al mismo sistema temporal GNSS y rango de validez que el tiempo de emisión  $t_{TX}$ . Así por ejemplo, en el estado de seguimiento *TOW decoded* el tiempo de recepción medido en los sistema GPS y Galileo puede calcularse como:

$$t_{RX} = mod(t_{RX_{GNSS}}, NumberNanoSecondsWeek) \quad (2.18)$$

donde *mod* representa el operador módulo y el parámetro *NumberNanoSecondsWeek* =  $604800 \cdot 10^9$  es el número de nanosegundos en una semana. En caso de que el estado de seguimiento del sistema Galileo sea *E1C 2nd code* (rango de validez de  $t_{TX}$  de 100 ms), el tiempo de recepción medido se calcularía como:

$$t_{RX} = mod(t_{RX_{GNSS}}, NumberNanoSeconds100Milli) \quad (2.19)$$

donde *NumberNanoSeconds100Milli* =  $10^8$  es el número de nanosegundos que hay en 100 milisegundos.

### Desplazamiento Doppler

El desplazamiento Doppler provocado en la señal por el movimiento del satélite  $\Delta f_D$  puede derivarse directamente del parámetro *PseudorangeRateMetersPerSecond* de la clase *GNSSMea-*

*surement*, que proporciona la tasa de variación del pseudorango en el instante de medida, tal y como indica la expresión 2.20.

$$\Delta f_D = -PseudorangeRateMetersPerSecond * \frac{f}{c} \quad (2.20)$$

donde  $c$  representa nuevamente la velocidad de propagación de la onda electromagnética y  $f$  es la frecuencia central de la señal (1.57542 GHz para la banda L1 y 1.17645 GHz para la banda L5). Tal y como se deduce de la expresión anterior, un valor positivo del parámetro *PseudorangeRateMetersPerSecond* indica que el satélite se aleja del receptor.

### Identificación del satélite

La identificación del satélite se realiza a través del parámetro *Svid* de la clase *GNSSMeasurement*. Los posibles valores de este parámetro para las distintas constelaciones son:

- GPS: 1 – 32
- Galileo: 1 – 36
- Beidou: 1 – 37
- GLONASS: puede proporcionarse el OSN (1 – 24) o el canal de frecuencia + 100 (93 – 106)

### Identificación de la Constelacion

El identificador de la constelación es proporcionado directamente por Android 7 a través del parámetro *ConstellationType* de la clase *GNSSMeasurement*, que puede tomar los valores que muestra la Tabla 2.3.

Valor	Status
1	CONSTELLATION_GPS
3	CONSTELLATION_GLOASS
5	CONSTELLATION_BEIDOU
6	CONSTELLATION_GALILEO
9	CONSTELLATION_UNKNOWN

Tabla 2.3: Valores de identificación de la constelación proporcionados por el parámetro *ConstellationType*.

# Capítulo 3

## Obtención de observables

En este tercer capítulo se describen todas las tareas asociadas a la primera fase de desarrollo del presente trabajo, encaminada a la obtención de los observables GNSS mediante el uso de la API de localización de Android 7.

### 3.1. Construcción del entorno de desarrollo

El entorno de desarrollo de este trabajo está formado por dos elementos, un dispositivo Android que proporcione medidas GNSS en crudo y con una aplicación instalada que registre y permita en envío de estas medidas; y un ordenador para procesar estas medidas obteniendo en primer lugar los observables y, a partir de ellos, la posición del usuario, con un software de computación numérica instalado que permita la programación de estos algoritmos de proceso.

En la referencia [3] puede consultarse un listado de los dispositivos Android que soportan actualmente medidas GNSS en crudo. Este listado proporciona además información sobre la versión Android instalada; la posibilidad de obtener mensajes de navegación, rango delta acumulado e información sobre el reloj interno; las constelaciones con las que puede trabajar el dispositivo; y las bandas de frecuencia GNSS con las que opera.

Para llevar a cabo este trabajo se ha adquirido un smartphone Xiaomi Mi8, equipado con un chip Broadcom BCM47755, y lanzado al mercado el pasado 31 de mayo de 2018. Este teléfono incorpora una versión 8.1 de Android y su API de localización le permite proporcionar mensajes de navegación, rango delta acumulado e información sobre el reloj interno. Es capaz de trabajar con los cuatro sistemas GNSS operativos actualmente y además, es el primer teléfono móvil capaz de operar con las bandas de frecuencia L1/E1 y L5/E5, motivo que ha decidido en último término su adquisición.

Para registrar las medidas GNSS en crudo se va a hacer uso de la aplicación GNSS Logger que forma parte del proyecto GPS Measurement Tools [7]. Esta aplicación permite registrar las

medidas GNSS en crudo en un fichero de texto y enviar este fichero por mail o a una cuenta de Google Drive. La figura 3.1 muestra, a la izquierda, una imagen del Xiaomi Mi8 con la aplicación GNSS Logger en ejecución y, a la derecha, un ejemplo del tipo de fichero de datos generado por esta aplicación.

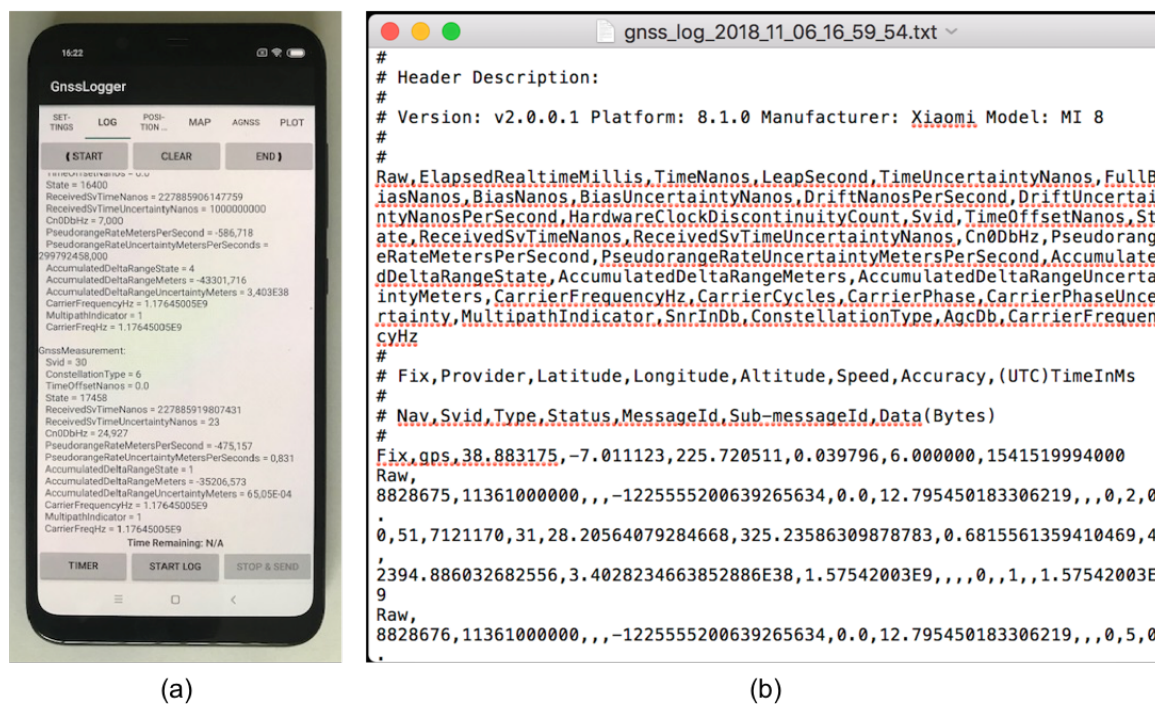


Figura 3.1: (a) Imagen del smartphone Xiaomi Mi8 con la aplicación GNSS Logger en ejecución y (b) fichero de datos generado por esta aplicación.

Como puede verse a la derecha de la figura, este fichero tiene una cabecera que informa en primer lugar sobre el modelo de telefono utilizado y la version de Android instalada (8.1 en este caso). Esta cabecera tambien indica el formato de los tres tipos de datos que pueden encontrarse en el fichero:

- Medidas en crudo, que aparecen precedidas de la palabra clave *Raw*, y que se corresponden con todos los parámetros definidos en la Tabla 2.1 del capítulo anterior.
- Medidas de localización, que aparecen precedidas de la palabra clave *Fix*, y que muestran los valores obtenidos por la API de localización para las coordenadas geográficas y velocidad del receptor, la precisión de estas medidas y el tiempo UTC.
- Mensajes de navegación, precedidos de la palabra clave *Nav*, y que muestran el identificador de satélite y los bytes del mensaje de navegación.



Una vez finalizada la cabecera, el fichero contiene una colección de los tres tipos de datos anteriores como filas de valores separados por comas (CSV), habiendo sido el tipo de datos mostrado previamente seleccionado por el usuario al iniciar la captura.

El segundo elemento del entorno de desarrollo es, como ya se ha indicado anteriormente, un ordenador personal con un software de computación numérica instalado que permita la programación de los algoritmos de proceso de las medidas GNSS en crudo. En este trabajo el ordenador utilizado es un portátil DELL con procesador Intel i7-7700HQ y 16 GB de memoria RAM, y el software de computación instalado es MATLAB. Existen algunas aplicaciones ya desarrolladas, como la GNSS Analysis app [3], que permiten leer los datos registrados por el GNSS Logger y analizar así el comportamiento del receptor. Esta aplicación está desarrollada en MATLAB, aunque no es necesario tener este software instalado para poder hacer uso de ella, ya que está compilada en un fichero ejecutable que instala en el ordenador una copia del Runtime de MATLAB.

Dentro de esta fase de construcción del entorno de desarrollo, y con el objetivo de comenzar a familiarizarse con el tipo de información proporcionada por la API de localización de Android a través del GNSS Logger, se ha llevado a cabo la instalación de esta herramienta en el ordenador anteriormente mencionado. La figura 3.2 muestra una captura de pantalla del panel de control de esta aplicación, que permite gestionar aspectos tales como:

- Seleccionar que constelación de satélites es visualizada.
- Controlar qué solución PVT se utiliza para calcular los errores de medida.
- Generar informes de análisis.
- Definir una ventana de análisis entre un tiempo inicial y un tiempo final.

Con ayuda de esta aplicación se han visualizado los datos adquiridos durante 2 minutos en el Campus Universitario de la ciudad de Badajoz a las 17:00 h del día 6 de noviembre de 2018, en buenas condiciones de visibilidad del cielo. La figura 3.3 muestra una captura de pantalla de las gráficas generadas por la aplicación durante el análisis de estos datos. Tal y como puede verse en esta figura, la aplicación genera 9 gráficas organizadas en tres columnas: RF (izquierda), Reloj (central) y Medidas (derecha).

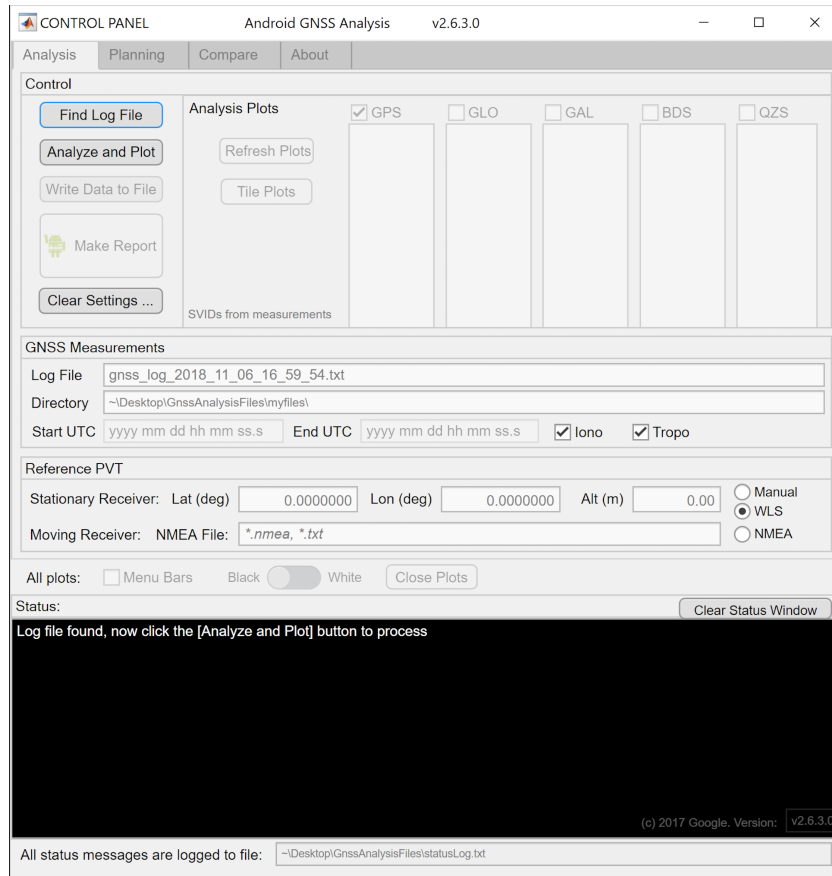


Figura 3.2: Panel de control de la aplicación GNSS Analysis.

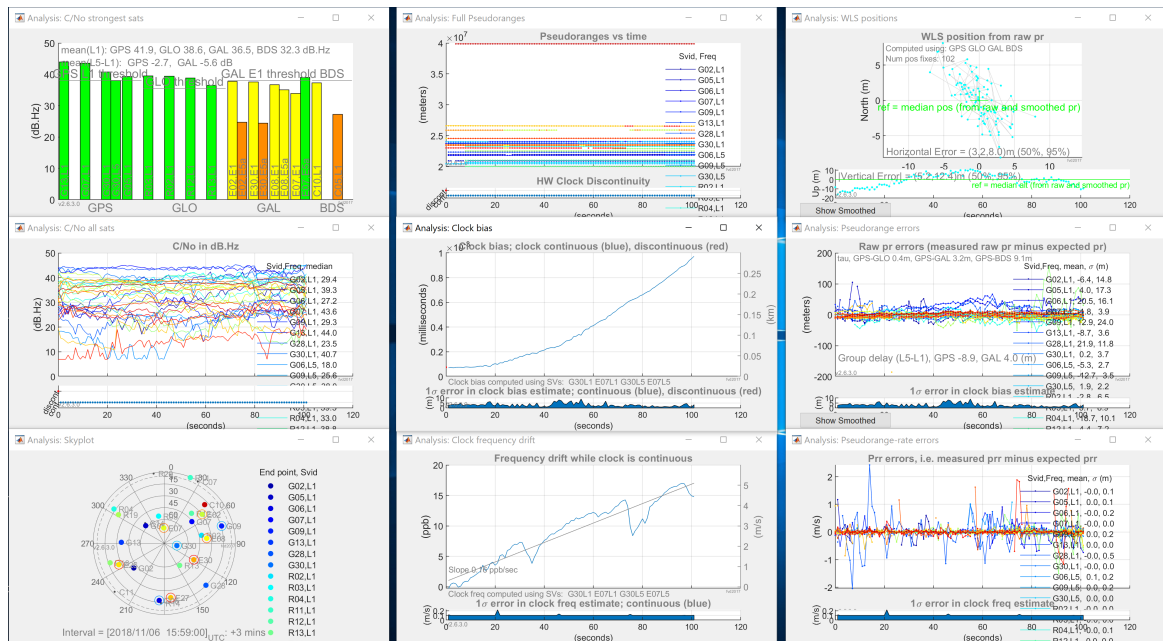


Figura 3.3: Gráficas generadas por la aplicación GNSS Analysis.

La columna RF muestra:

- Para cada constelación, los cuatro satélites con señales más potentes.
- Para cada satélite, la evolución temporal de la relación portadora a ruido.
- Un mapa del cielo con la posición de los satélites.

Por otro lado, la columna de reloj muestra:

- La evolución temporal de los pseudorángos.
- El offset de frecuencia del reloj del receptor.
- El offset del reloj de standby que mantiene la referencia temporal cuando el receptor resetea el oscilador primario.

Finalmente, la columna de medidas muestra:

- Los resultados de posicionamiento obtenidos a partir de los pseudorángos mediante un algoritmo de mínimos cuadrados ponderado (WLS).
- Los errores de cada pseudorango para cada medida.
- Los errores de variación de pseudorango para cada medida.

Finalmente, cabe señalar que la aplicación GNSS Analysis puede generar un informe de test que evalúa la implementación de la API, la señal recibida, el comportamiento del reloj y la precisión de la medición. Para cada caso, la aplicación informa si el receptor aprobó o suspendió la prueba en función del rendimiento medido en comparación con los puntos de referencia conocidos. El informe de prueba es útil para los fabricantes de dispositivos, que pueden usarlo a medida que trabajan sobre el diseño y la implementación de nuevos dispositivos [3].

## 3.2. Desarrollo de la aplicación

En esta sección se describe la función desarrollada sobre Matlab para procesar los datos generados con el GNSS Logger y obtener, a partir de ellos, los observables de relación portadora a ruido, desplazamiento Doppler y pseudorángos de la constelación GPS. La estructura interna de esta función, denominada `mittfmf1.m` puede describirse con ayuda del diagrama de flujo que muestra la figura 3.4. Tal y como muestra este diagrama, el primer paso realizado por la función es definir, dentro de una variable estructura, todas las constantes necesarias para

el cálculo de los observables, que son la velocidad de propagación de la luz, las frecuencias de portadora L1 y L5 de la constelación GPS y el número de nanosegundos de una semana. A continuación se lee el fichero de datos generado por la aplicación GNSS Logger durante una adquisición real, cuyo nombre es proporcionado como único argumento de entrada de la función, creando una nueva variable de tipo estructura donde se almacenan todos los parámetros proporcionados por la API de localización de Android que muestra la Tabla 2.1. Una vez leído el fichero, se lleva a cabo la selección de datos GPS válidos (Tipo constelación = 1, estado = TOW decoded y Frecuencia de portadora = L1) para, a continuación, realizar el cálculo del tiempo GPS ( $GpsTime$ ) y del tiempo de recepción de la señal ( $t_{RX}$ ) a través de las ecuaciones (2.14) y (2.17-2.18) respectivamente del capítulo anterior. Una vez obtenidos estos tiempos, se calculan los observables de relación portadora a ruido (directo de los datos raw), desplazamiento Doppler (a partir de la ecuación (2.20)) y pseudorangos (a partir de la ecuación (2.16)), que se proporcionan como argumentos de salida dentro de una nueva variable estructura.

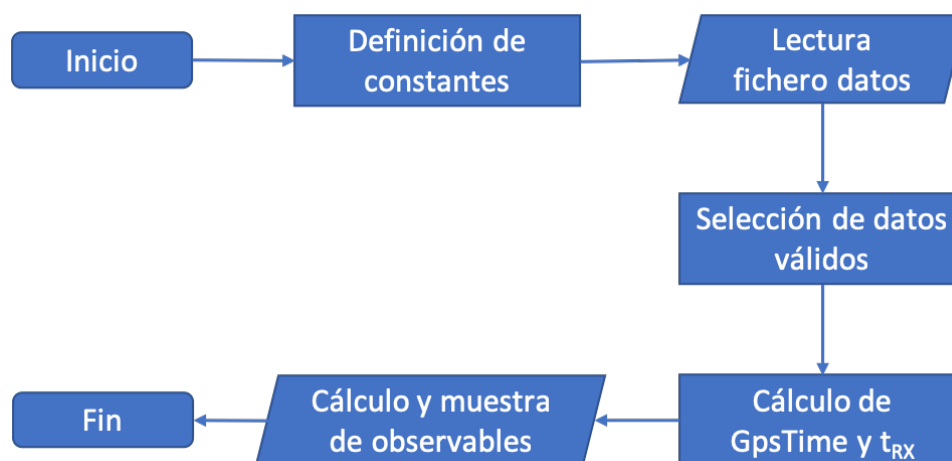


Figura 3.4: Diagrama de flujo de la función `mit_tfmf1.m`.

A modo de ejemplo, las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 muestran la evolución temporal de los pseudorangos, las relaciones portadora a ruido y los desplazamientos Doppler de portadora de los ocho satélites GPS en estado TOW decoded registrados durante la misma captura de dos minutos de duración que se mostraba en la Figura 3.3. Puede comprobarse cómo las figuras 3.5 y 3.6 están de acuerdo con los datos mostrados en la gráficas (1,2) y (2,1) respectivamente de la Figura 3.3. También puede comprobarse cómo aquellos satélites cuyo pseudorango aumenta con el tiempo en la Figura 3.5 (6,7,9 y 30), son aquellos satélites que aparecen con un desplazamiento Doppler negativo (reducción de la frecuencia de portadora) en la Figura 3.6, mientras que los satélites

con un desplazamiento Doppler positivo (5,13,28) son aquellos cuyo pseudorango disminuye con el tiempo o, lo que es lo mismo, los que se acercan al receptor durante la captura. El satélite 2, con un desplazamiento Doppler muy próximo a cero durante los dos minutos de captura, muestra un valor de pseudorango prácticamente constante durante este periodo.

Finalmente, la figura 3.6 muestra una gran variabilidad en la relación portadora a ruido de la señales emitidas por todos los satélites. Esta variabilidad podría deberse a la dificultad del receptor para estimar este parámetro, especialmente en aquellas señales recibidas con menor potencia, ya que la velocidad del movimiento de los satélites (dos vueltas a la tierra cada día), no es lo suficientemente alta como para justificar la rapidez de estas variaciones por un cambio en el patrón de interferencias provocado por las señales reflejadas.

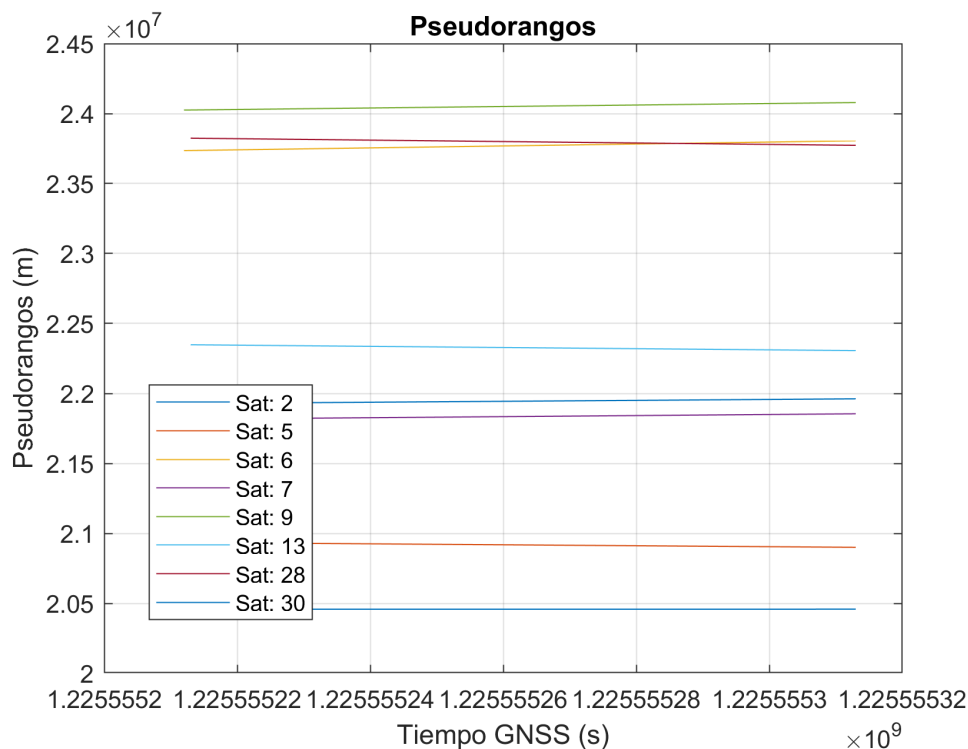


Figura 3.5: Representación de pseudorangos frente al tiempo.

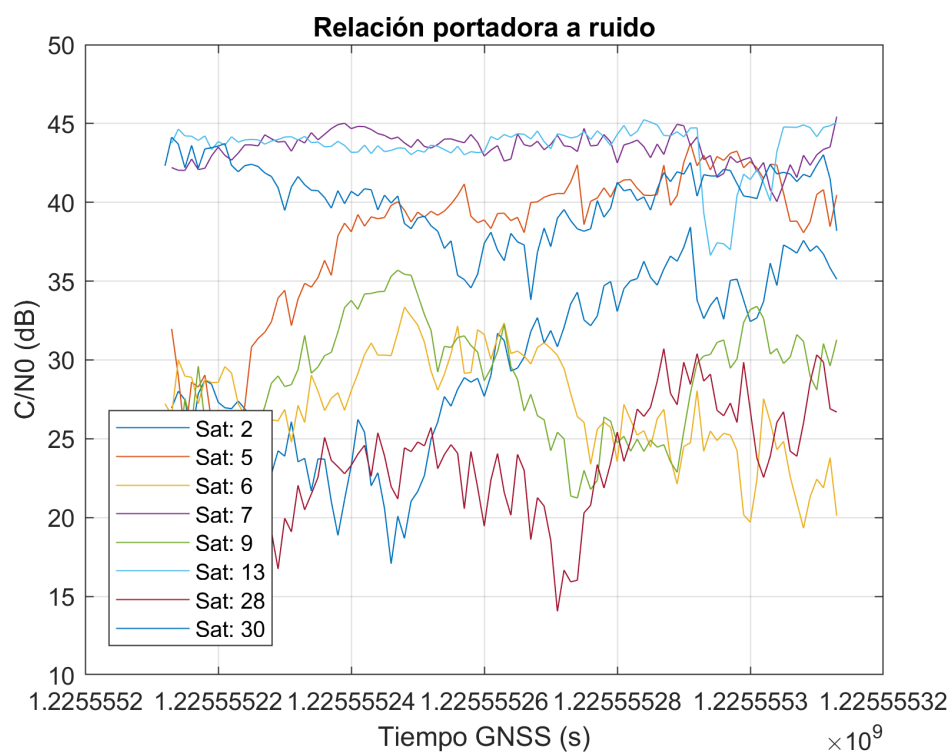


Figura 3.6: Representación de C/N0 frente al tiempo.

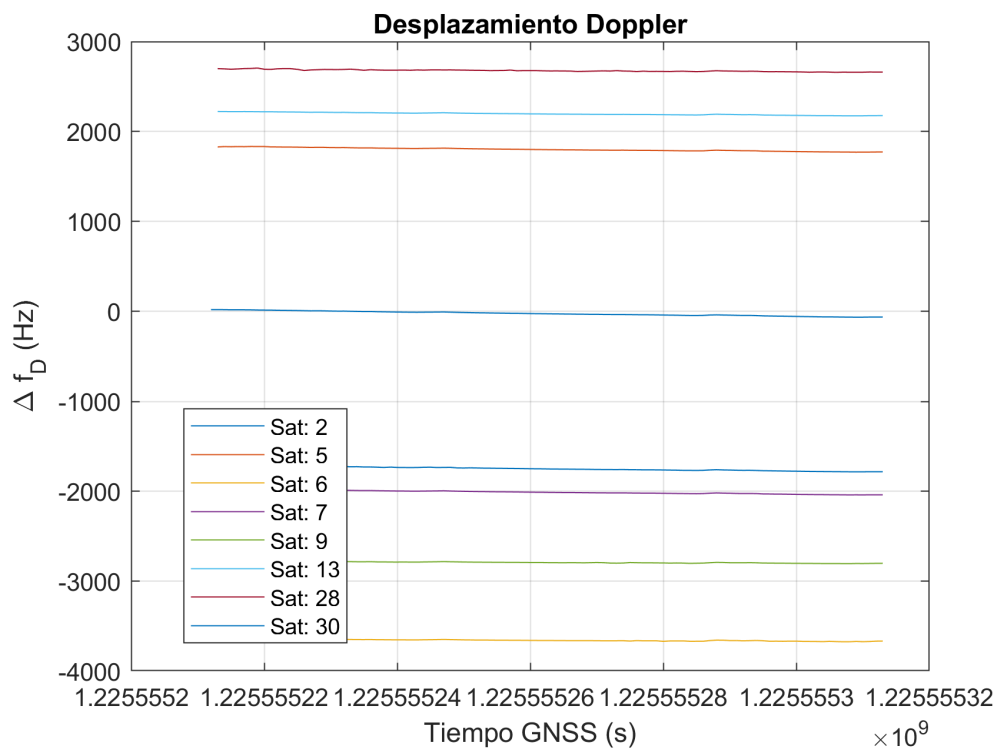


Figura 3.7: Representación de desplazamiento Doppler frente al tiempo.

### 3.3. Representación de resultados

En esta última sección del capítulo se muestran de forma gráfica los valores del observable relación portadora a ruido obtenidos con la aplicación descrita en la sección anterior, en los tres entornos experimentales considerados en este trabajo:

- E1: entorno de exterior con buena visibilidad. Se trata de un cruce de caminos rurales situado en las cercanías de la población de Almendralejo, provincia de Badajoz, de coordenadas geográficas  $\text{Lat} = 38.696312^\circ$ ,  $\text{Long} = -6.432455^\circ$  y  $\text{Alt} = 337$  m.
- E2: entorno de exterior con visibilidad reducida. Jardín situado entre los edificios de Física y Matemáticas de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura, en el Campus Universitario de la ciudad de Badajoz, de coordenadas geográficas  $\text{Lat} = 38.883159^\circ$ ,  $\text{Lon} = -7.011180^\circ$  y  $\text{Alt} = 192$  m.
- E3: entorno de interiores. Laboratorio de Electrónica situado en la primera planta del edificio de Física del Campus Universitario de Badajoz, de coordenadas geográficas  $\text{Lat} = 38.883085^\circ$ ,  $\text{Lon} = -7.011334^\circ$  y  $\text{Alt} = 200$  m. La captura de datos se ha realizado a un metro de distancia de una ventana que da al entorno E2, orientada al Noreste.

Es importante señalar que las coordenadas geográficas anteriores son aproximadas, y han sido determinadas con la ayuda de Google Maps. Las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 muestran las relaciones portadora a ruido obtenidas durante una captura de 5 minutos de duración en los tres entornos señalados anteriormente. Como puede verse en la primera de estas figuras, en un entorno exterior con buena visibilidad el número de satélites GPS en estado válido durante la captura es de 10, y además todos ellos permanecen visibles a lo largo de toda la captura. Ocho de estos diez satélites mantienen un nivel de  $C/N_0$  por encima de los 30 dBHz durante la captura. En la figura 3.9 podemos ver que en el entorno de exterior con visibilidad reducida también son 10 los satélites GPS en estado válido, pero a diferencia del caso anterior, estos satélites no permanecen visibles durante toda la captura, y pueden distinguirse con claridad tramos en los que desaparecen las señales de distintos satélites (líneas continuas sin puntos) En este caso, sólo tres de los diez satélites mantienen un nivel de  $C/N_0$  por encima de los 30 dBHz durante toda la captura de señales. Finalmente, la figura 3.10 muestra cómo en el entorno de interior el número de satélites en estado válido se reduce hasta 7, y de ellos sólo 5 permanecen visibles durante toda la captura. En este caso, no hay ningún satélite que mantenga un nivel de  $C/N_0$  por encima de los 30 dB a lo largo de toda la captura. En el capítulo siguiente analizaremos qué efecto tienen estos resultados sobre el posicionamiento del receptor.

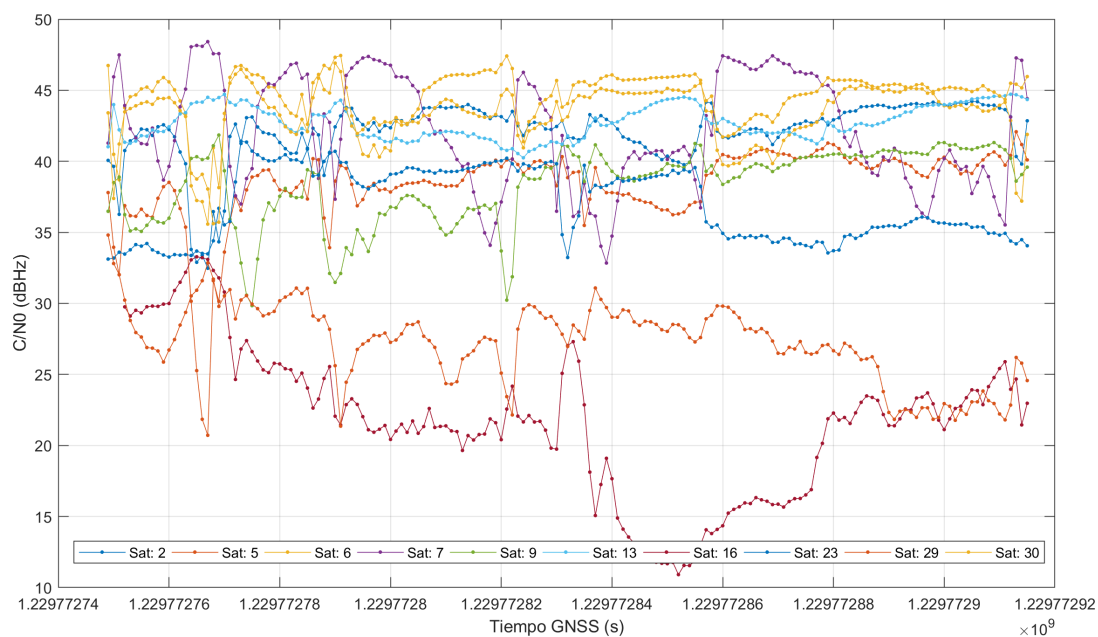


Figura 3.8: Representación de C/N<sub>0</sub> frente al tiempo en un entorno de exterior con buena visibilidad.

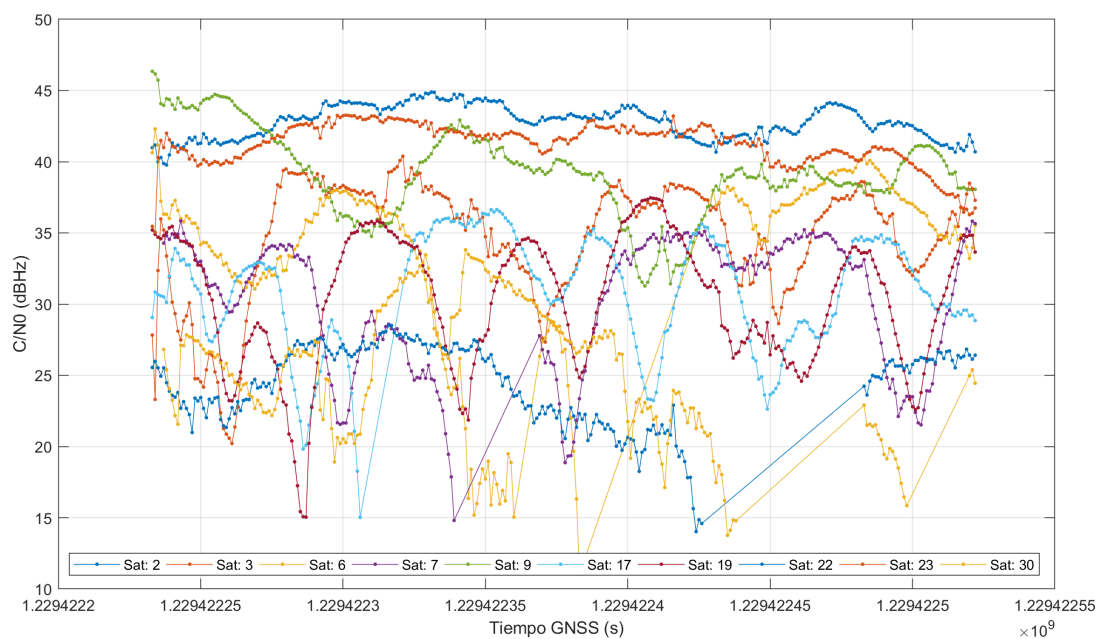


Figura 3.9: Representación de C/N<sub>0</sub> frente al tiempo en un entorno de exterior con visibilidad reducida.



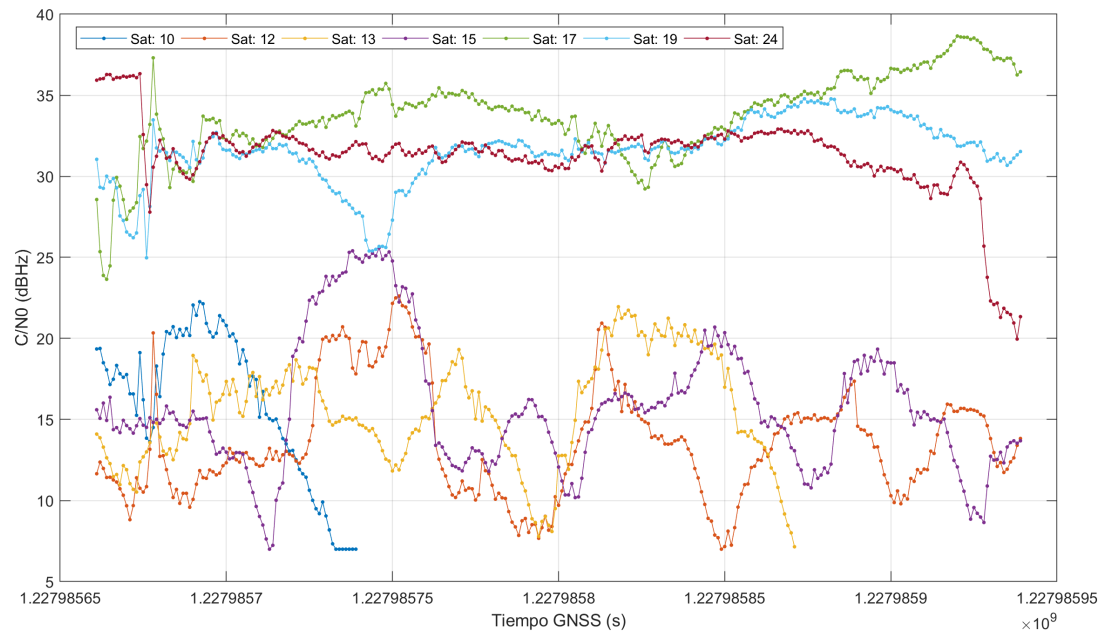


Figura 3.10: Representación de C/N0 frente al tiempo en un entorno de interior.



# Capítulo 4

## Cálculo de la posición

En este capítulo se describen las primeras tareas asociadas a la segunda fase de desarrollo del trabajo, cuyo principal objetivo es calcular la posición del usuario a partir de los observables obtenidos en el capítulo anterior. Para ello, se ha desarrollado una nueva función en Matlab formada por varios módulos, que serán descritos en detalle en la primera sección del capítulo. A continuación, se mostrarán gráficamente los resultados de posicionamiento obtenidos con el algoritmo WLS en los tres entornos experimentales considerados en este trabajo. Finalmente se mostrarán, también gráficamente, las mejoras que introduce este algoritmo frente al algoritmo LS.

### 4.1. Desarrollo de la aplicación de posicionamiento

La estructura de la nueva función de Matlab, denominada `mittfmf2.m`, desarrollada para obtener la posición del receptor a partir de los observables de pseudorango, puede describirse con ayuda del diagrama de flujo que muestra la figura 4.1. Tal y como muestra esta figura, la nueva función posee dos argumentos de entrada, la posición real del receptor expresada en coordenadas geográficas de Latitud ( $^{\circ}$ ), Longitud( $^{\circ}$ ) y Altitud (m), y el nombre del fichero de texto generado por el GNSS Logger durante una determinada captura de datos con el terminal móvil. Hay que señalar que todos los ficheros de datos experimentales son almacenados en un directorio específico cuya ruta es definida en el cuerpo de esta función. El segundo módulo es el encargado de calcular los observables de pseudorango de todos los satélites válidos de la constelación GPS, y está basado en la función `mittfmf11.m` desarrollada anteriormente y descrita en el capítulo anterior. A continuación, se lleva a cabo el cálculo del tiempo UTC del fichero de captura de datos a partir del tiempo GPS calculado en el módulo previo, teniendo en cuenta los segundos intercalares transcurridos desde el inicio del tiempo GPS, tal y como se describió en la sección 2.1.2. Para ello, se almacenan en una tabla todas las fechas posteriores al

06/01/1980 en la que se han producido segundos intercalares, tabla que requiere actualización y que actualmente acumula un total de 18 segundos. La aparición de un nuevo segundo intercalar es notificada por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (IERS) [8] con seis meses de antelación en su boletín C, produciéndose siempre esta inserción con fecha de 30 de junio o 31 de diciembre. Esta Organización acaba de publicar que no habrá inserción de un nuevo segundo intercalar el próximo 30 de Junio de 2019 [9].

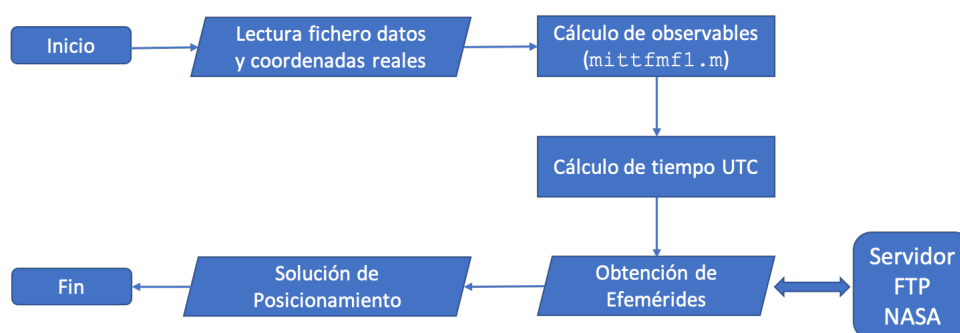


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la función `mittfmf2.m`.

Una vez obtenido el tiempo UTC, el siguiente módulo obtiene las efemérides de los satélites conectándose al archivo de datos de geodesia espacial de la NASA, donde el servidor FTP <ftp://cddis.nasa.gov> almacena mensajes de navegación de los satélites que son actualizados diariamente para las constelaciones GPS y GLONASS o cada hora sólo para la constelación GPS. El directorio donde se almacenan las efemérides GPS en base horaria es `.../gnss/data/hourly/YYYY/DDD`, donde el código YYYY representa los cuatro dígitos del año y DDD los tres dígitos del día del año. Dentro de este directorio, el fichero de datos tiene el nombre `hourDDD0.YYn.Z`, donde DDD representa nuevamente los tres dígitos del día y YY representa los dos últimos dígitos del año. Este fichero comprimido en UNIX es un fichero de datos de navegación en formato RINEX 2.10, que es almacenado y descomprimido en el mismo directorio donde son almacenados los ficheros generados por el GNSS Logger. Finalmente, el fichero es leído y los datos almacenados en una variable estructura que contiene tanto las efemérides como datos sobre la ionosfera.

A partir de las efemérides obtenidas por el módulo anterior y de los observables calculados por la función `mittfmf1.m`, el último módulo de la función lleva a cabo el posicionamiento implementando el algoritmo WLS descrito en la sección para dos posibles valores de la matriz de pesos  $W$ :

- La matriz identidad, lo que es equivalente a una solución no ponderada o algoritmo LS.
- Una matriz diagonal cuyos elementos no nulos se obtienen como la inversa de la desviación de los pseudorangos. Esta desviación se obtendrá a partir del parámetro *ReceivedSvTimeUncertaintyNanos* también proporcionado como un dato en crudo, y que muestra la incertidumbre en el tiempo GNSS de transmisión de la señal.

Como argumentos de salida de esta función se proporcionan, para cada nuevo registro de datos del fichero GNSS Logger, la posición geográfica calculada por el algoritmo WLS y los residuos de los pseudorangos que genera este algoritmo. Estos son los parámetros que serán utilizados para el análisis estadístico de los datos de posicionamiento que se presenta en el siguiente capítulo.

## 4.2. Representación de resultados

En esta segunda sección del capítulo se muestran de forma gráfica los resultados de posicionamiento obtenidos con la aplicación descrita en la sección anterior en los tres entornos experimentales considerados en este trabajo.

Para llevar a cabo esta representación se ha desarrollado una nueva función de Matlab denominada `genPosPlot.m`, que dibuja con un punto rojo las coordenadas geográficas reales del receptor y con cruces amarillas las coordenadas estimadas por el algoritmo de posicionamiento. A partir de estas estimaciones, la función representa también la elipse de error con un nivel de confianza del 95 %, que da una idea de la precisión de las estimaciones. Para hacer más realista esta representación, la nueva función hace finalmente uso del código desarrollado por Zohar Bar-Yehuda para dibujar sobre el fondo de una figura un mapa de Google estático de tipo satelital que se adapta al tamaño de los ejes de la figura, asumiendo que las coordenadas están en formato WGS84 [10]. Es importante señalar que este código hace uso de la API de Google Maps, por lo que ha sido necesario registrarse como usuario de esta API y generar una API Key propia [11].

Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran los resultados de posicionamiento obtenidos en los tres entornos señalados anteriormente, utilizando en todos los casos la matriz de pesos  $W$  basada en la desviación de los pseudorango (algoritmo WLS).

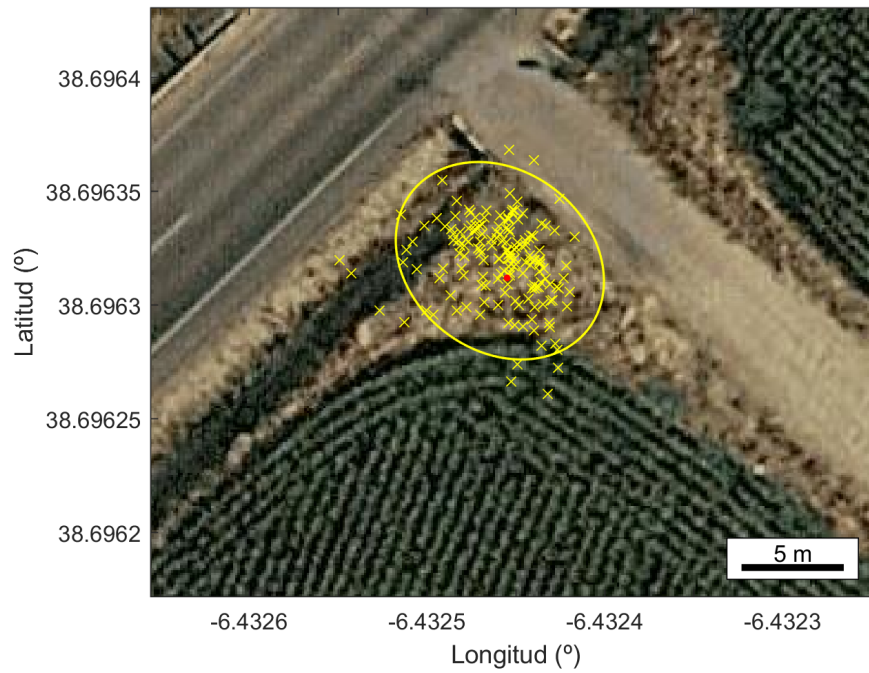


Figura 4.2: Resultados de posicionamiento en un entorno de exterior con buena visibilidad.

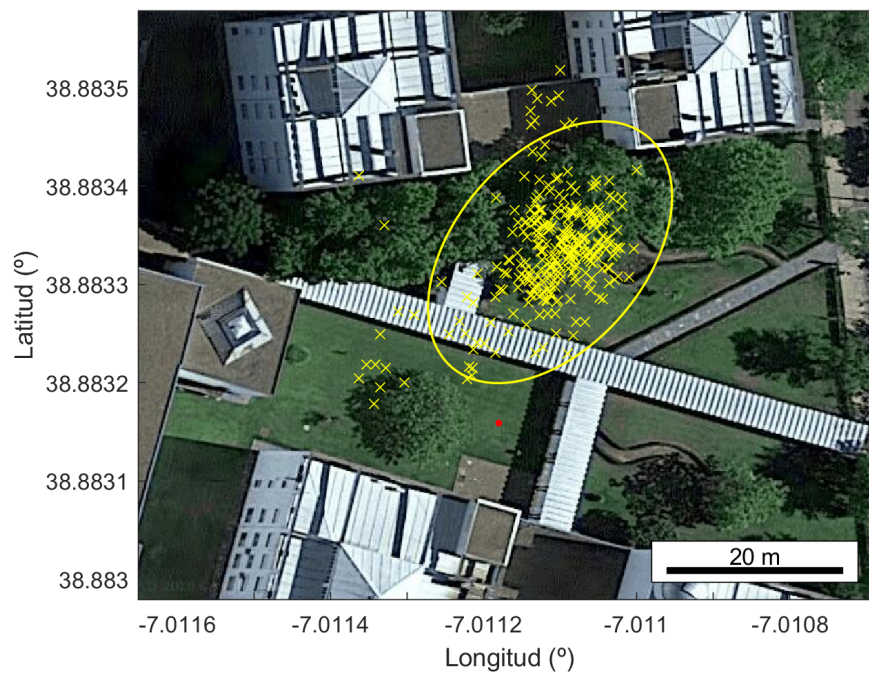


Figura 4.3: Resultados de posicionamiento en un entorno de exterior con visibilidad reducida.



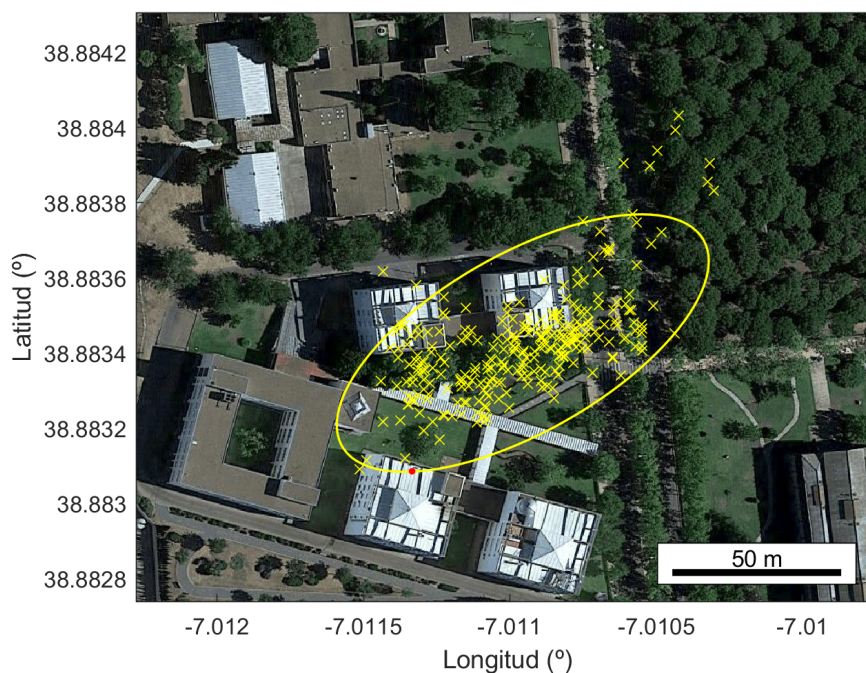


Figura 4.4: Resultados de posicionamiento en un entorno de interior.

Tal y como puede verse en la figura 4.2, en un entorno de exteriores con buena visibilidad los errores de posicionamiento son de unos pocos metros y las posiciones estimadas se distribuyen alrededor de la posición real del receptor móvil, con una elipse de error de baja excentricidad. Estos resultados cambian de forma significativa en el entorno de exterior con visibilidad reducida que muestra la figura 4.3. En este caso los errores de posicionamiento son de varias decenas de metros y, lo que es incluso más interesante, todas las estimaciones muestran un claro sesgo que podría estar provocado por la propagación multicamino de la señal, dada la cercanía del edificio. Finalmente, la figura 4.4 muestra los resultados obtenidos al situar el receptor en el interior del laboratorio de Electrónica, a un metro de distancia de la ventana. En este caso los errores de posicionamiento puede superar la centena de metros, con una elipse de error de elevada excentricidad y estimaciones de posición de nuevo claramente sesgadas. Todos estos resultados serán caracterizados estadísticamente en el siguiente capítulo.

Finalmente, con el objetivo de evaluar el efecto que tiene la matriz de ponderación en el algoritmo de posicionamiento WLS, las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran los resultados de posicionamiento obtenidos en los tres entornos con una matriz de pesos basada en las desviaciones de los pseudorángos (amarillo) y con una matriz de pesos identidad (rojo), que representa la solución no ponderada o algoritmo LS. En estas figuras la posición real del receptor se ha representado con un punto azul.

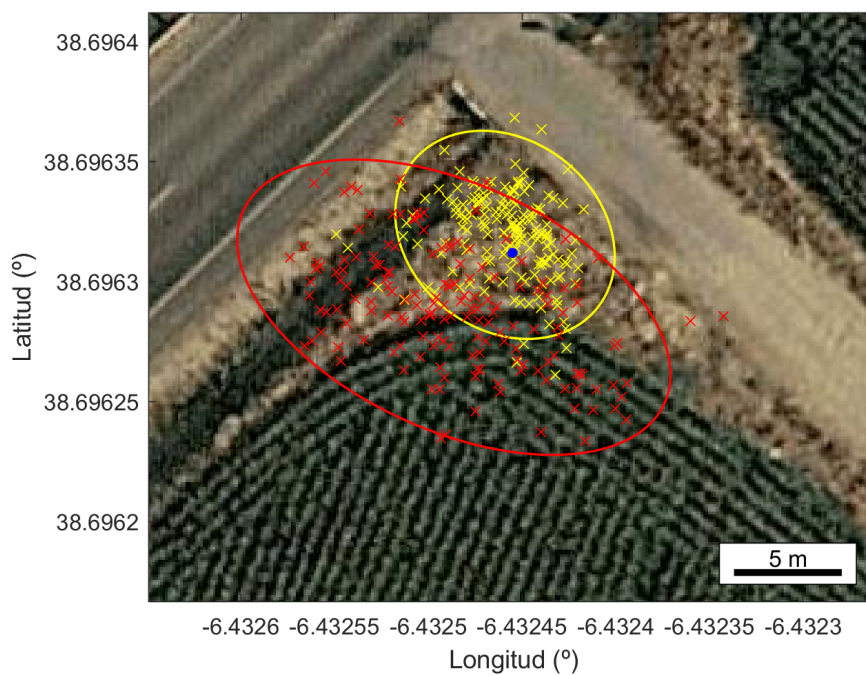


Figura 4.5: Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de exterior con buena visibilidad.

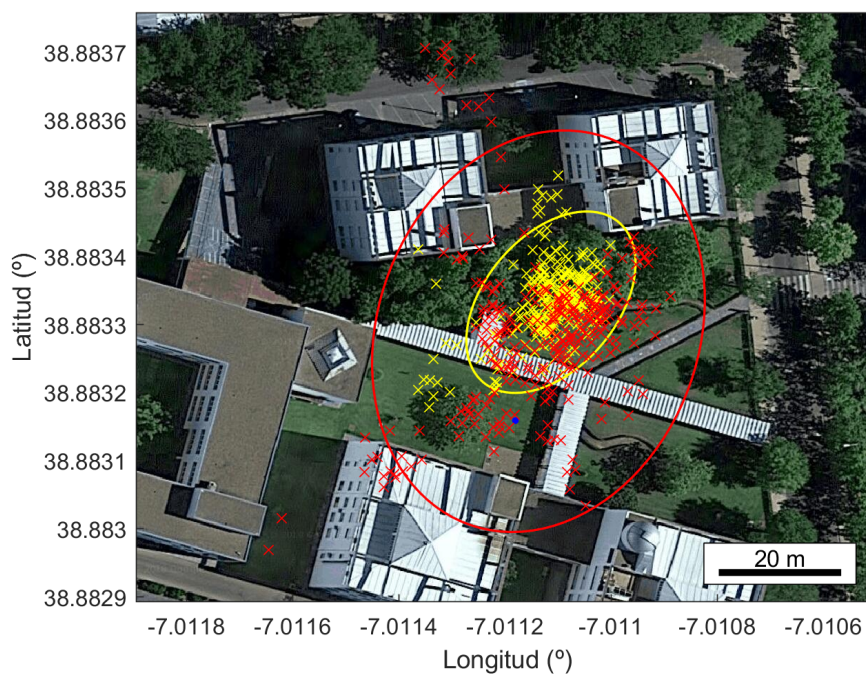


Figura 4.6: Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de exterior con visibilidad reducida.



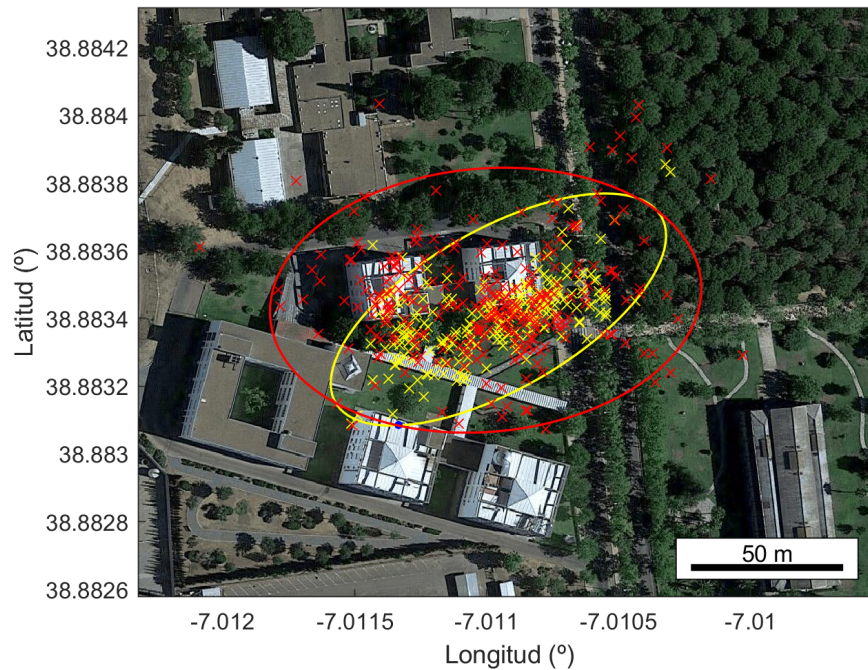


Figura 4.7: Comparativa de resultados de posicionamiento obtenidos por los algoritmos LS (en rojo) y WLS (en amarillo) en el entorno de interior.

Parece claro de estas figuras que la ponderación mejora la precisión de los resultados de posicionamiento en todos los casos, y especialmente en el entorno de exteriores con visibilidad reducida, donde el algoritmo WLS está limitando la contribución de las señales afectadas por multicamino.



# Capítulo 5

## Análisis estadístico de resultados.

En este capítulo se lleva a cabo un análisis más riguroso de los resultados obtenidos en los dos capítulos anteriores, realizando para ello una caracterización estadística tanto de los observables obtenidos en la fase 1 como de los datos de posicionamiento obtenidos en la fase 2, para todas las capturas de cinco minutos de duración realizadas en los tres entornos experimentales.

### 5.1. Caracterización de observables

En esta sección se caracterizan estadísticamente los observables obtenidos con la aplicación `mittfmf1.m` en los tres entornos experimentales descritos en la sección 3.3. Esta caracterización se lleva a cabo en base al valor medio y desviación típica de la relación portadora a ruido de cada uno de los satélites observados así como a la desviación de los pseudorángos medidos. Las figuras 5.1 a 5.3 muestran estos datos para los tres entornos considerados junto con un skyplot que representa la distribución de los satélites visibles en el instante de la captura de datos. Este skyplot se ha obtenido con ayuda de la aplicación web GNSS-Radar [12], donde también puede visualizarse un mapa del lugar de captura y la evolución temporal de los parámetros de Dilución de la Precisión. Para facilitar la interpretación de los datos que se muestran en estas figuras, se han resaltado en color azul y rojo aquellos satélites con una CN0 media por encima de 40 dBHz y por debajo de 30 dBHz respectivamente.

Como puede verse en la figura 5.1, en el entorno exterior con buena visibilidad se capturaron señales de diez satélites GPS válidos, la mitad de las cuales presenta una relación CN0 por encima de 40 dBHz. La desviación estándar de estos valores está siempre entre 1 y 4 dBHz, y la correspondiente desviación de los pseudorángos medidos a partir de estas señales presenta valores entre los 3 y los 4 metros. En el skyplot a la derecha de esta figura se muestra que, con la única excepción del satélite 13, todos estos satélites tenían una gran elevación en el momento de la captura de datos. Otros tres satélites, el 5, 9 y 23, aparecen en la tabla de la

izquierda en negro con una relación CN0 entre 30 y 40 dBHz y una desviación de este valor entre 2.5 y 3 dBHz. En los tres casos, la desviación de los pseudorángos medidos está entre 4 y 5 m. Nótese cómo estos satélites aparecen con una elevación media (5 y 9) o baja (23) en el skyplot de la derecha. Finalmente la tabla de la izquierda muestra dos satélites (16 y 29) con una relación CN0 por debajo de 30 dBHz que ni siquiera aparecen en el skyplot proporcionado por la herramienta GNSS-Radar. En uno de estos dos casos la desviación de los pseudorángos asciende hasta los 10.37 m y en el otro este parámetro crece seis órdenes de magnitud, un valor que indica la presencia de errores en su determinación.

En el entorno de exterior con visibilidad reducida que representa la figura 5.2, también son diez los satélites GPS con señales válidas, aunque en este caso el número de señales con relación CN0 por encima de 40 dBHz se reduce a dos, que presentan una desviación de este valor por debajo de 2 dBHz y mantienen como en el entorno anterior una desviación de los pseudorángos entre 3 y 4 m. En el skyplot de la derecha puede verse que uno de estos dos satélites (el 2) presentaba baja elevación en el momento de la captura, pero hay que señalar que, tal y como puede verse en las figuras 4.3 y 4.6 del capítulo anterior, en la dirección Noroeste en la que aparece este satélite no existen edificios que dificulten la visión del cielo desde la posición del receptor. El número de satélites con relación CN0 por debajo de 40 dBHz asciende en este caso a seis, y sólo uno de ellos (el 9) presenta un valor por encima de 35 dBHz que puede explicar su posición prácticamente cenital en el momento de la captura. Este satélite es además el único de este grupo que presenta una desviación de los pseudorángos entre 4 y 5 m como en el entorno anterior. Nuevamente, existen dos satélites con una relación CNO por debajo de 30 dBHz que no aparecen en el skyplot de la derecha, aunque la desviación de sus pseudorángos permanece en el orden de magnitud de la decena de metros.

Por último, la figura 5.3 muestra cómo en un entorno de interior el número de satélites GPS con señales válidas se reduce a 7, de los cuales sólo 3 presentan una relación CN0 ligeramente por encima de los 30 dBHz, y ninguno por encima de los 40 dBHz. Estos tres satélites presentan una desviación de los pseudorángos entre 6 y 8 m y su orientación en el cielo es la Noreste, que coincide con la orientación de la ventana del laboratorio cerca de la cual se situó el receptor. Los cuatro satélites con relación CN0 por debajo de 30 dBHz (en realidad por debajo de 16 dBHz) no tienen ninguna línea de visión directa con el receptor, y en todos los casos presentan desviaciones de los pseudorángos medidos del orden de las decenas de miles de kms.

Sat ID	CNO media (dBHz)	CNO std (dBHz)	PR std (m)
2	42.11	2.11	3.63
5	38.31	2.91	4.25
6	43.94	2.38	3.15
7	42.18	3.88	3.46
9	38.31	2.58	4.18
13	42.74	1.16	3.48
16	21.73	5.22	4e6
23	36.97	2.52	4.65
29	27.32	2.70	10.37
30	43.91	1.80	3.15

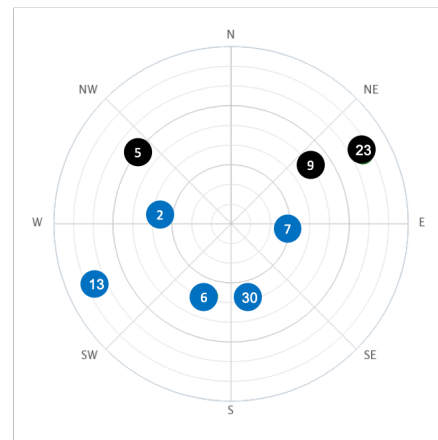


Figura 5.1: Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de exterior con buena visibilidad y skyplot de los satélites en el instante de captura (25/12/2018 a las 12:32)

Sat ID	CNO media (dBHz)	CNO std (dBHz)	PR std (m)
2	42.77	1.15	3.42
3	34.62	4.14	5e6
6	33.43	6.31	6e6
7	30.20	4.60	6e6
9	39.20	3.03	4.20
17	30.89	3.96	7.98
19	30.29	4.53	7e6
22	24.33	2.81	13.26
23	41.25	1.44	3.74
30	25.54	4.48	12.51

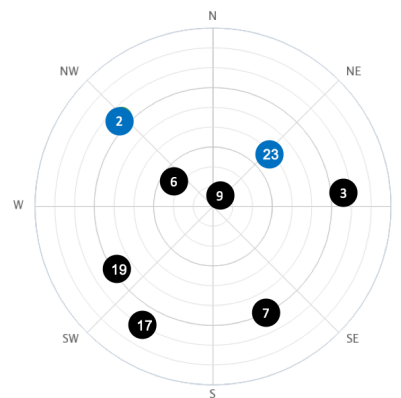


Figura 5.2: Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de exterior con visibilidad reducida y skyplot de los satélites en el instante de captura (21/12/2018 a las 11:10)

Sat ID	CNO media (dBHz)	CNO std (dBHz)	PR std (m)
10	15.90	4.62	83e6
12	13.56	3.46	88e6
13	15.51	3.32	37e6
15	15.78	3.99	46e6
17	33.73	2.53	6.10
19	31.53	1.98	7.26
24	31.28	2.41	7.48

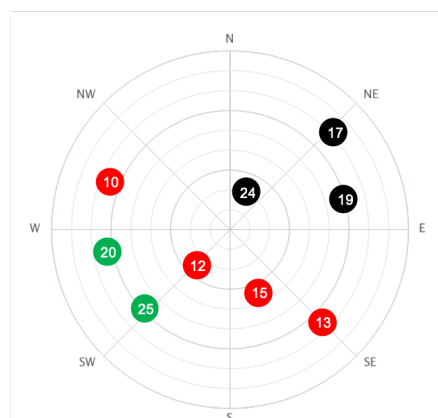


Figura 5.3: Analisis estadístico de los observables obtenidos en un entorno de interior y skyplot de los satélites en el instante de captura (04/12/2018 a las 20:07)

## 5.2. Caracterización del posicionamiento

En esta sección se presenta la caracterización estadística de los resultados de posicionamiento obtenidos con la aplicación `mittfmf2.m` descrita en el capítulo anterior. Esta caracterización se lleva a cabo en base al valor medio y la desviación típica de los errores de longitud, latitud y posicionamiento horizontal, expresados todos ellos en metros. Para ello, ha sido necesario transformar las coordenadas geográficas de longitud, latitud y altura en coordenadas ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) [13], que son coordenadas cartesianas con origen en el centro de masas de la Tierra. Una vez obtenidas las coordenadas ECEF de las posiciones estimadas  $(x_e, y_e, z_e)$  y de la posición real del receptor  $(x_r, y_r, z_r)$ , los errores anteriores se definen como:

$$err_X = x_e - x_r \quad (5.1)$$

$$err_Y = y_e - y_r \quad (5.2)$$

$$err_{POS} = \sqrt{(x_e - x_r)^2 + (y_e - y_r)^2} \quad (5.3)$$

Las figuras 5.4 a 5.6 muestran los valores medios y desviaciones típicas de estos errores para los dos algoritmos de posicionamiento utilizados (LS y WLS) y en los tres entornos considerados respectivamente. Junto al valor de estos estadísticos se muestra la función de distribución acumulada (CDF) de los errores de posicionamiento horizontal, que indica con qué probabilidad estos errores son inferiores al valor representado en el eje de abscisas.

Como muestra la figura 5.4, el error medio de posicionamiento en un entorno de exterior con buena visibilidad es de 5.74 m al utilizar el algoritmo LS y se reduce a 2.63 m con el algoritmo WLS. En este segundo caso, los errores medios de latitud y longitud son cercanos a cero, lo que indica el buen comportamiento del algoritmo de posicionamiento. Nótese además que el algoritmo WLS reduce todas las desviaciones típicas, lo que indica que este algoritmo aumenta la precisión del posicionamiento al reducir la dispersión de las estimaciones, algo que ya se veía claramente en la figura 4.5 Este resultado es confirmado por la CDF que aparece a la derecha de la figura, donde se muestra que la probabilidad de que el error de posicionamiento esté por debajo de un determinado valor es siempre mayor con el algoritmo WLS.

Una situación distinta es la que muestra la figura 5.5 que representa los resultados obtenidos en un entorno de exterior con visibilidad reducida. En este caso en el que los errores medios de latitud y longitud están lejos del valor nulo deseado, el algoritmo WLS no mejora el error medio de posicionamiento, aunque sí que vuelve a mejorar todas las desviaciones típicas como en el caso anterior, haciendo al sistema más preciso pero no más exacto. La CDF de la derecha

muestra que con el algoritmo LS es mayor la probabilidad de tener errores por debajo de un valor pequeño, pero esta situación se invierte para valores grandes, lo que confirma la mayor dispersión de los resultados proporcionados por el algoritmo LS.

Finalmente, la figura 5.6 muestra que en el entorno de interior el algoritmo WLS no mejora significativamente los malos resultados proporcionados por el algoritmo LS, con errores medios de posicionamiento por encima de los 50 m en ambos casos. Es éste el único caso en el que el algoritmo WLS no mejora todas las desviaciones típicas y la CDF confirma la similitud de los resultados obtenidos con ambos algoritmos.

	$(\overline{err} \pm \sigma)_X$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_Y$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_{POS}$ (m)
<b>LS</b>	$-2.73 \pm 4.11$	$-2.51 \pm 2.79$	$5.74 \pm 2.32$
<b>WLS</b>	$-0.35 \pm 2.08$	$0.84 \pm 1.97$	$2.63 \pm 1.44$

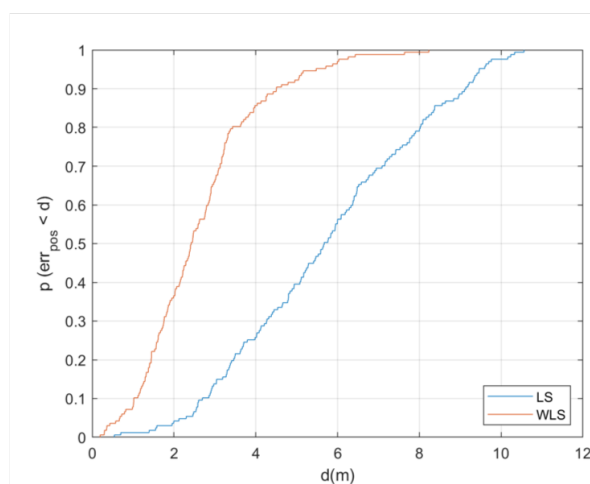


Figura 5.4: Análisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de exterior con buena visibilidad y CDF del error de posicionamiento.

	$(\overline{err} \pm \sigma)_X$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_Y$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_{POS}$ (m)
<b>LS</b>	$3.77 \pm 11.12$	$14.57 \pm 13.37$	$20.00 \pm 11.32$
<b>WLS</b>	$5.81 \pm 5.65$	$19.30 \pm 6.04$	$21.01 \pm 5.74$

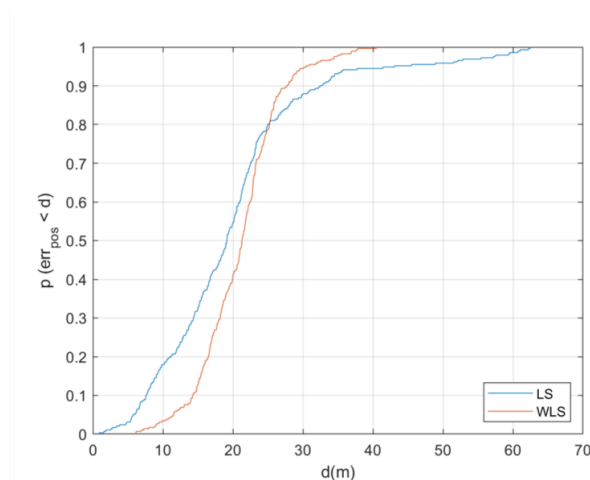


Figura 5.5: Análisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de exterior con visibilidad reducida y CDF del error de posicionamiento.

	$(\overline{err} \pm \sigma)_x$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_y$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_{POS}$ (m)
<b>LS</b>	$28.64 \pm 28.99$	$40.95 \pm 17.75$	$56.38 \pm 21.69$
<b>WLS</b>	$32.82 \pm 22.53$	$37.87 \pm 15.55$	$52.36 \pm 22.76$

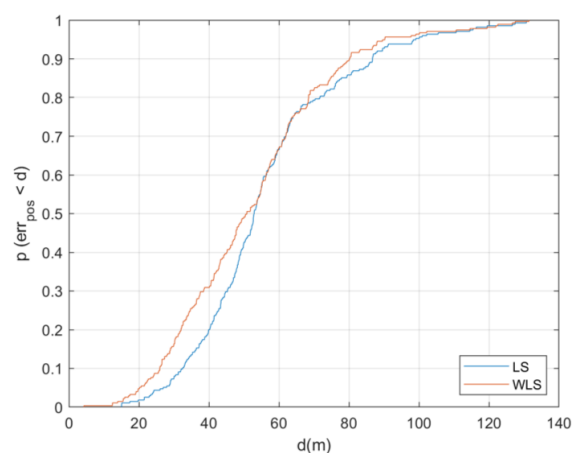


Figura 5.6: Analisis estadístico de los resultados de posicionamiento obtenidos en un entorno de interior y CDF del error de posicionamiento.

Finalmente, y con el objetivo de analizar con algo más de detalle el comportamiento del algoritmo WLS que proporciona los resultados de posicionamiento más precisos según lo visto anteriormente, es interesante visualizar el comportamiento de los residuos de los pseudorangs que genera este algoritmo. Las figuras 5.7 a 5.9 muestran los valores de estos residuos en los tres entornos considerados y para aquellos instantes en los que se dispone de señales válidas de todos los satélites visibles. En estas figuras también se muestra mediante una línea negra continua el valor medio de estos residuos a lo largo de los 5 minutos que duran estas capturas.

La figura 5.7 muestra, en primer lugar, que en el entorno de exterior con buena visibilidad se dispone de señales válidas de diez satélites la mayor parte del tiempo. Como puede verse, ocho de los residuos representados toman siempre valores cercanos a 0, sólo los residuos asociados a los pseudorangs de los satélites 16 y 29 toman valores significativamente mayores. Nótese que estos dos satélites son los que aparecen con un valor medio de relación CN0 más bajo en la tabla de la figura 5.1, que no aparecían además en el skyplot de la derecha de esta figura, lo que indica que su elevación es muy baja. En la figura 5.7 puede verse que en el entorno de exterior con visibilidad reducida existen periodos en los que no se dispone de señales válidas de todos los satélites, algo que ya mostraba la figura 3.9. Como era de esperar, los residuos obtenidos en este caso son mayores que en el caso anterior (nótese la diferencia de escalas verticales en ambas figuras). En este entorno, los residuos de mayor valor están asociados a los pseudorangs de los satélites 3,7,17,19,22 y 30. Tal y como muestra el skyplot a la derecha de la figura 5.2, los cuatro primeros son los que tienen una menor altitud (de nuevo con la excepción del satélite 2) y los dos últimos ni siquiera aparecen en este gráfico, con valores medios de relación CN0 por debajo de 30 tal y como muestra la tabla a la izquierda de dicha figura. Por último, la figura 5.7 muestra que los instantes de disponibilidad de señales válidas de todos los satélites



visibles en un entorno de interior son aún menores que en el caso anterior y los residuos de los pseudorangs generados por el algoritmo WLS aumentan de valor (nótese el nuevo cambio de escala de la figura). En este entorno, y como era de esperar, los residuos de mayor valor están asociados a los pseudorangs de los satélites que presentan un valor medio de relación CN0 más bajo según lo mostrado en la tabla de la figura 5.3.

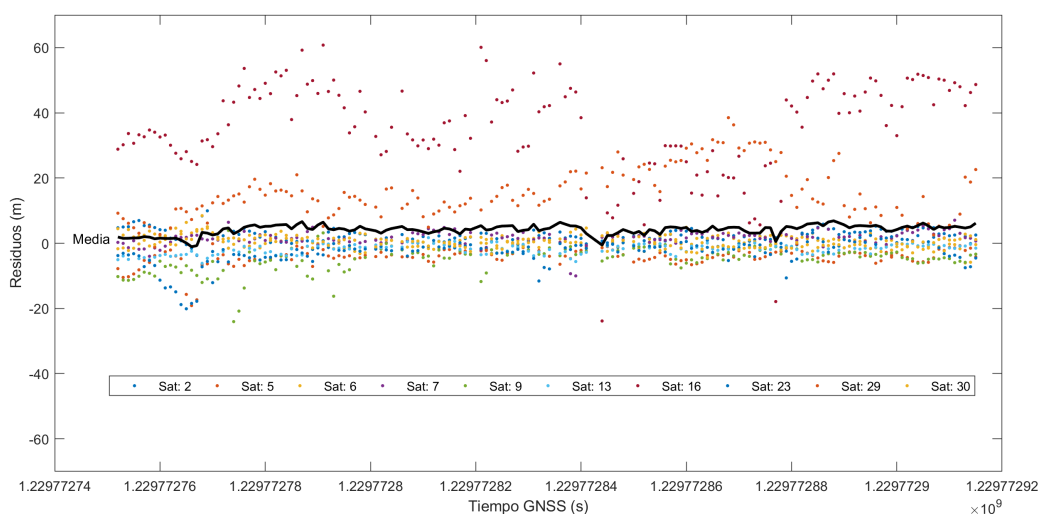


Figura 5.7: Evolución temporal de los residuos de los pseudorangs generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de exterior con buena visibilidad.

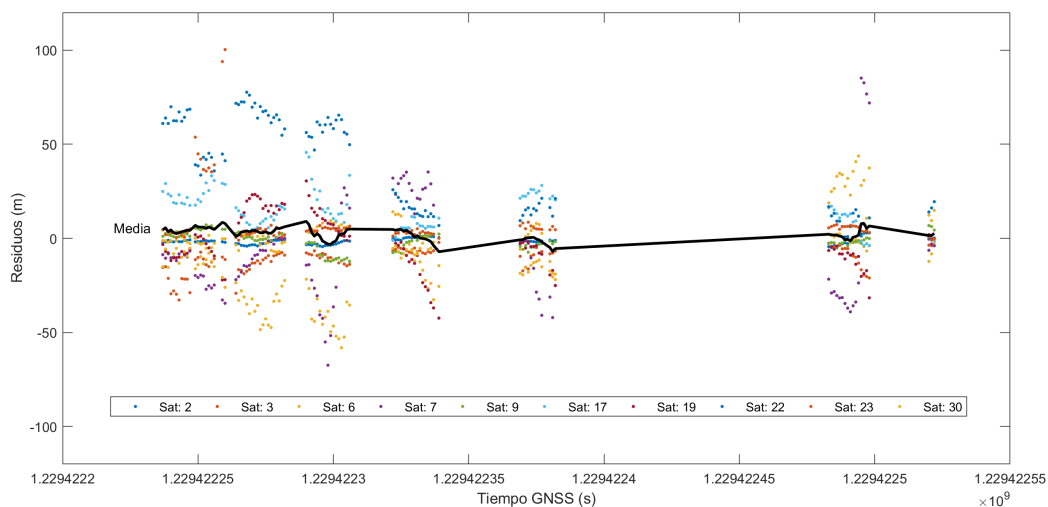


Figura 5.8: Evolución temporal de los residuos de los pseudorangs generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de exterior con visibilidad reducida.

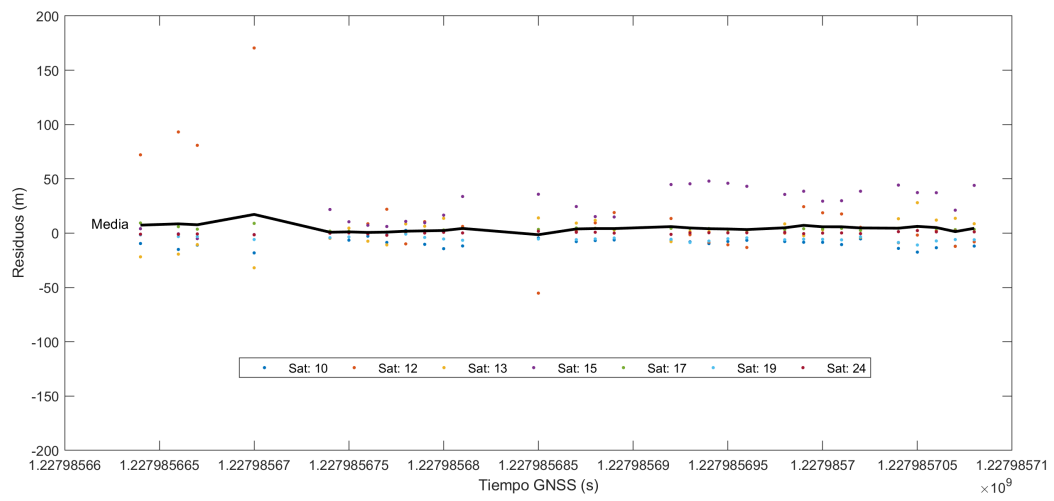


Figura 5.9: Evolución temporal de los residuos de los pseudorangs generados por el algoritmo WLS para la captura de datos en un entorno de interior.

# Capítulo 6

## Análisis de resultados en la banda L5

En este último capítulo del trabajo antes de las conclusiones, se presentan los resultados asociados al último de los objetivos de la segunda fase de desarrollo, relacionada con el análisis de las señales emitidas en la banda L5 de la constelación GPS. Esta nueva banda con frecuencia central de 1.17645 GHz posee un ancho de banda 10 veces superior a la banda L1 que resulta en una detección más precisa de los códigos emitidos, y que en teoría debe permitir aumentar la precisión de las medidas por debajo del metro, además de hacer a las señales emitidas en esta banda mucho más robustas al efecto del multicamino [14]. Como ya se adelantó en la primera sección del Capítulo 3, esta posibilidad de analizar las señales GPS emitidas en la banda L5 ha sido la principal motivación para utilizar el teléfono móvil Xiaomi M18 como receptor en este trabajo.

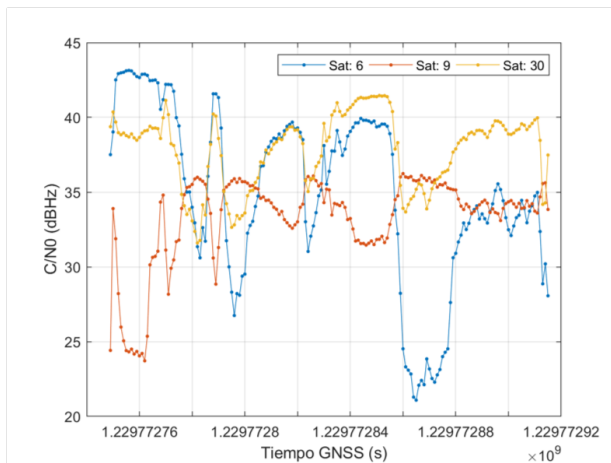
La primera sección de este capítulo muestra el análisis de los observables relación portadora a ruido y desviación de los pseudorángos, obtenidos a partir de las señales GPS emitidas en la banda L5 en los tres entornos experimentales considerados anteriormente. A continuación, en la segunda sección se comparan los resultados de posicionamiento obtenidos en el capítulo anterior, donde sólo se consideraban las señales de la banda L1, con los resultados obtenidos combinando las señales de las bandas L1 y L5.

### 6.1. Caracterización de observables

Las figuras 6.1 a 6.3 muestran la evolución temporal de la relación  $C/N_0$ , el análisis estadístico de este parámetro y el skyplot de los satélites visibles en el momento de la captura para las señales GPS emitidas en la banda L5 en los tres entornos considerados, respectivamente. En este skyplot se han resaltado, en diferentes colores, los satélites que emiten señales en esta nueva banda.

La figura 6.1 muestra que en el entorno de exterior con buena visibilidad son 3 los satélites

registrados con emisión en la banda L5 (6, 9 y 30), con un valor medio de C/N0 entre 30 y 40 dBHz, y con una incertidumbre en los pseudorngos entre 2 y 4 metros. Nótese que esta incertidumbre es menor que la de las señales L1 con potencia similar analizadas en la Tabla de la figura 5.1, aunque no en la magnitud esperada. En el entorno de exterior con visibilidad reducida se registraron un total de 4 satélites emitiendo señales en la banda L5 (3, 6, 9 y 30), tres de ellos con valores medios de C/N0 entre 30 y 40 dBHz y uno con un valor menor cercano a los 20 dBHz que no aparece en el skyplot a la derecha de la figura 6.2, lo que indica que se trata de un satélite con muy baja elevación. Finalmente, la figura 6.3 muestra que en el entorno de interior también se han registrado cuatro satélites en la banda L5, todos ellos con valores medios de C/N0 por debajo de 25 dBHz. Como puede verse, el único satélite con C/N0 media por encima de los 20 dBHz es el que tiene una orientación Norte-Noreste, que lo hace visible a través de la ventana del laboratorio. Llama la atención el hecho de que el satélite con el segundo valor más alto de C/N0 medio registrado (el 32) no aparece en el skyplot de la derecha, lo que parece indicar que se trata de un satélite con muy baja elevación pero con buena orientación.



Sat ID	CNO media (dBHz)	CNO std (dBHz)	PR std (m)
6	34.94	5.79	3.83
9	33.33	2.96	3.21
30	37.83	2.46	2.75

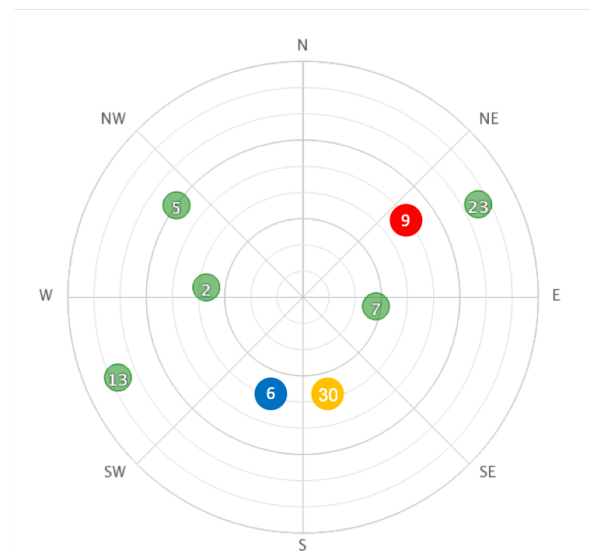


Figura 6.1: Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de exterior con buena visibilidad y skyplot de los satélites en el instante de captura (25/12/2018 a las 12:32)

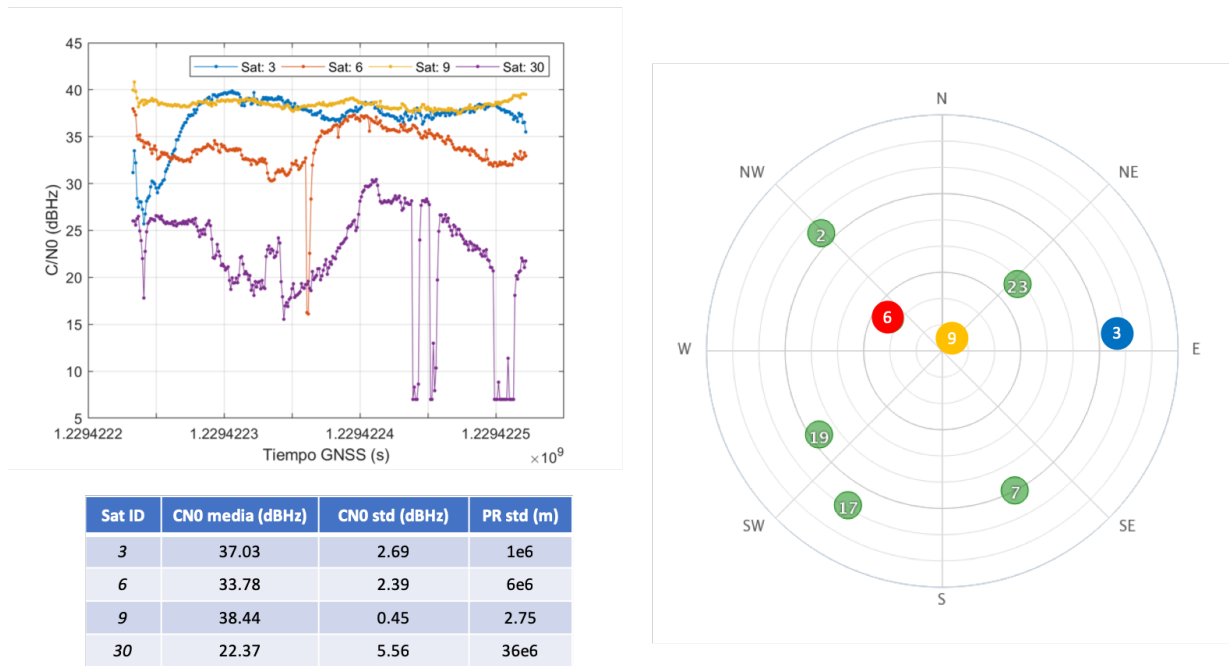


Figura 6.2: Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de exterior con visibilidad reducida y skyplot de los satélites en el instante de captura (21/12/2018 a las 11:10)

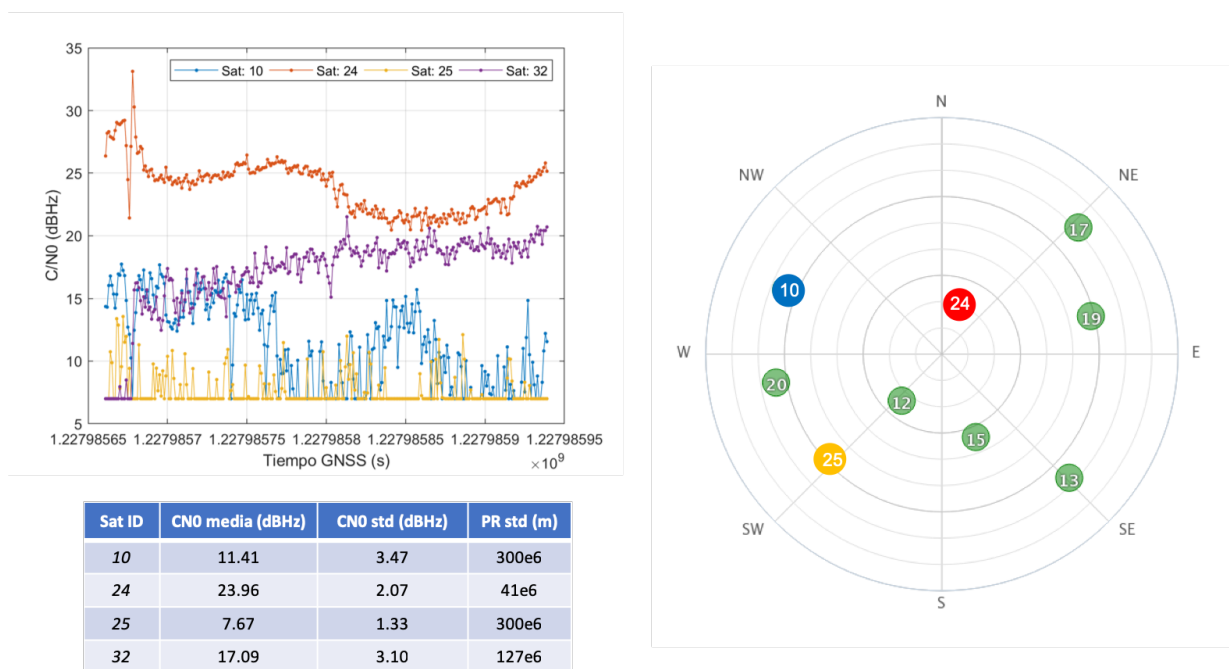
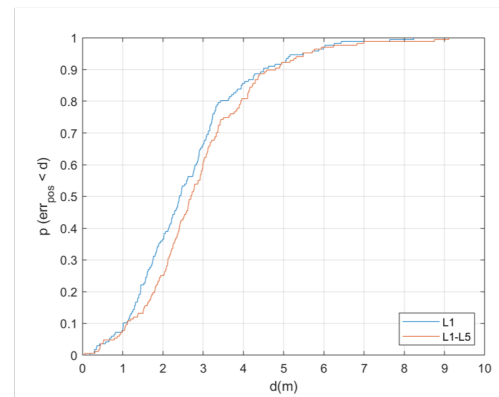
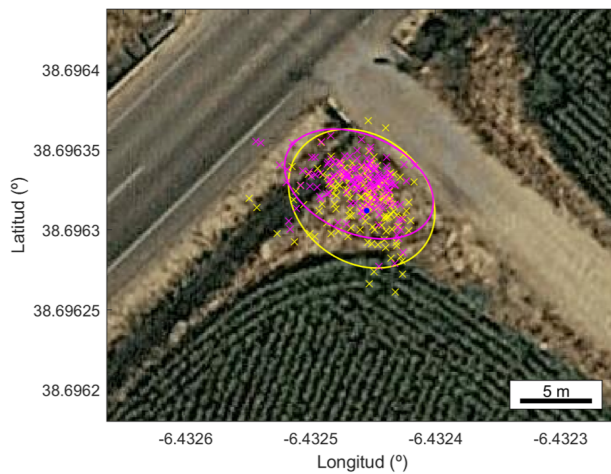


Figura 6.3: Analisis estadístico de los observables obtenidos en la banda L5 en un entorno de interior y skyplot de los satélites en el instante de captura (04/12/2018 a las 20:07)

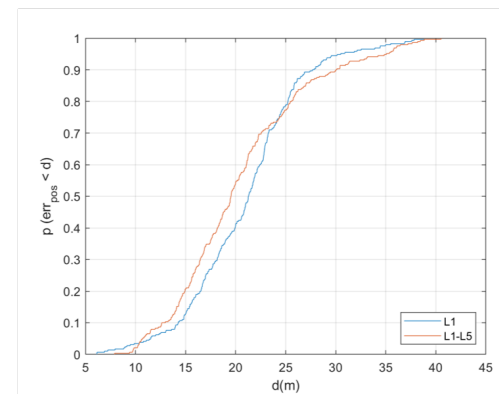
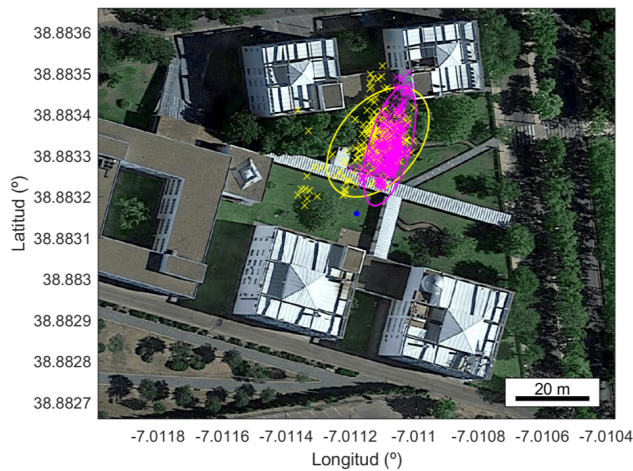
## 6.2. Comparativa de posicionamiento

Las figuras 6.4 a 6.6 muestran una comparativa de los resultados de posicionamiento obtenidos utilizando exclusivamente las señales GPS de la banda L1 (en amarillo en los mapas y en azul en las CDF), con los resultados obtenidos utilizando la banda dual L1-L5 (en magenta en los mapas y en rojo en las CDF)



	$(\overline{err} \pm \sigma)_X$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_Y$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_{POS}$ (m)
<b>L1</b>	$-0.35 \pm 2.08$	$0.84 \pm 1.97$	$2.63 \pm 1.44$
<b>L1-L5</b>	$-0.54 \pm 2.11$	$1.85 \pm 1.56$	$2.89 \pm 1.84$

Figura 6.4: Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de exterior con buena visibilidad.



	$(\overline{err} \pm \sigma)_X$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_Y$ (m)	$(\overline{err} \pm \sigma)_{POS}$ (m)
<b>L1</b>	$5.81 \pm 5.65$	$19.30 \pm 6.04$	$21.01 \pm 5.74$
<b>L1-L5</b>	$8.99 \pm 2.89$	$18.20 \pm 6.56$	$20.48 \pm 6.63$

Figura 6.5: Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de exterior con visibilidad reducida.

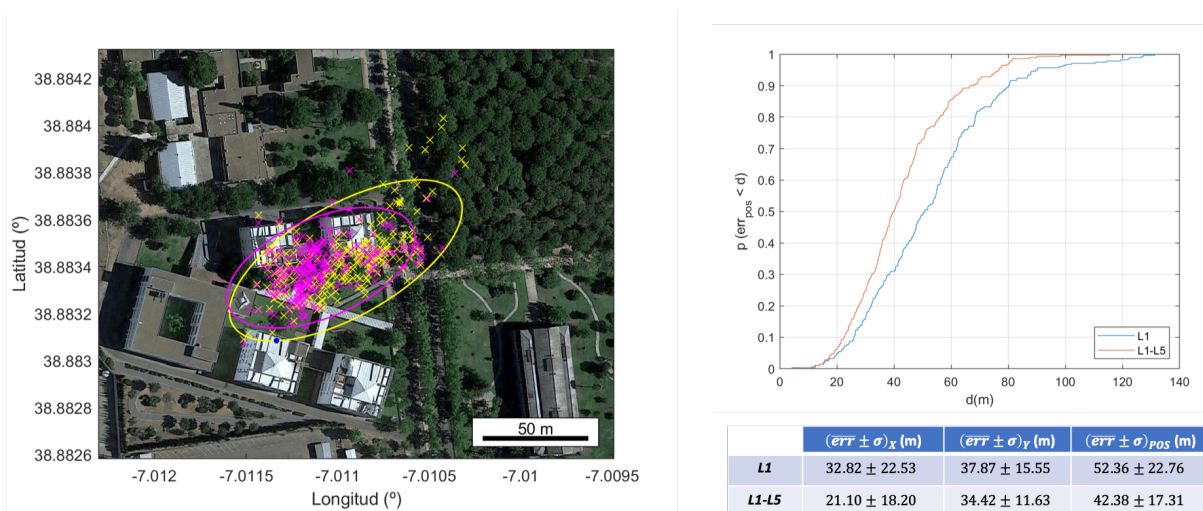


Figura 6.6: Analisis comparativo de los resultados de posicionamiento obtenidos en las bandas L1 (en amarillo en el mapa y en azul en la CDF) y dual L1-L5 (en magenta en el mapa y en rojo en la CDF) en un entorno de interior.

Estas figuras muestran que sólo en el entorno de interior se produce una mejora significativa de los resultados de posicionamiento al utilizar la banda dual L1-L5, con un aumento tanto de la exactitud como de la precisión del sistema, y esto a pesar de que en este entorno sólo se registra un satélite que emite en la banda L5 con valor medio de  $C/N_0$  por encima de 20 dBHz, como ya vimos en la figura 6.3. En los dos entornos de exterior, no se produce una mejora de resultados destacable, como muestran claramente las CDF a la derecha de las figuras 6.4 y 6.5. Es posible atribuir este resultado inesperado al hecho de que en todos los casos el número de satélites registrados en la banda L5 ha sido muy reducido y con distribuciones no óptimas. Otra explicación complementaria es la forma en que se estima la desviación de los pseudorangs que se utiliza en la matriz de pesos del algoritmo WLS a partir del dato en crudo *ReceivedSvTimeUncertaintyNanos*, que podría no ser la más adecuada para formar los elementos de esta matriz a raíz de los resultados que muestran las Tablas de las figuras 6.1 a 6.3. Todas estas reflexiones motivan parte de los trabajos futuros que se detallan en el último capítulo del trabajo.





# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio de señales GNSS reales utilizando como receptor un teléfono móvil comercial basado en el sistema operativo Android. A partir de las medidas en crudo proporcionadas por la nueva API de localización asociada a la versión 7 (Nougat) y posteriores de este sistema operativo, se han extraído los observables de pseudorange, desplazamiento Doppler y relación C/N0 de las señales de la constelación GPS obtenidas en tres entornos experimentales distintos. A continuación, se ha desarrollado una aplicación para calcular la posición del receptor a partir de los pseudoranges calculados previamente y de las efemérides de los satélites obtenidas de un servidor FTP de la NASA. Esta aplicación hace uso de los métodos de regresión lineal LS y WLS para resolver el sistema de ecuaciones de posicionamiento linealizado, utilizando en el segundo caso una matriz de pesos diagonal basada en la inversa de las desviaciones de los pseudoranges. Los resultados de posicionamiento horizontal se han presentado como diagramas de dispersión con elipse de confianza sobre mapas de Google satelitales, haciendo para ello uso de la API de Google Maps. Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de la relación C/N0, la desviación de los pseudoranges y los resultados de posicionamiento en los tres entornos experimentales considerados: un entorno de exterior con buena visibilidad del cielo, un entorno de exterior con visibilidad reducida y un entorno de interior. Este análisis estadístico se ha acompañado de skyplots que muestran la distribución de los satélites GPS en el momento de la captura y de funciones de distribución acumulada que caracterizan la bondad de los resultados de posicionamiento obtenidos con ambos métodos de regresión.

La principal conclusión que puede extraerse de este trabajo es que, tal y como sugiere el libro blanco de la agencia GNSS europea [2], es posible utilizar un dispositivo comercial tipo smartphone para capturar señales GNSS reales y llevar a cabo tareas de investigación sobre este tipo de señales, lo que hace atractiva esta línea de investigación a una comunidad mucho más amplia de usuarios. Por otro lado, y a partir de los resultados obtenidos en este trabajo,

pueden extraerse las siguientes conclusiones de carácter particular:

- En un entorno de exterior con buena visibilidad la mayoría de las señales GPS recibidas presentan altos valores de relación  $C/N_0$ , con valores medios entre 35 y 45 dBHz, lo que permite obtener un error medio de posicionamiento que está en torno a los seis metros al utilizar el algoritmo LS y en torno a los 3 metros con WLS.
- En un entorno de exterior con visibilidad reducida los valores de relación  $C/N_0$  se reducen, estando la mayoría de los valores medios capturados entre 25 y 35 dBHz, lo que incrementa los errores de posicionamiento a unos 20 metros con ambos algoritmos. Además, en este caso los errores medios de longitud y latitud están lejos del cero, lo que provoca un sesgo en las estimaciones de posición que empeora la exactitud del sistema.
- En un entorno de interior es posible utilizar señales GPS para llevar a cabo el posicionamiento, aunque en este caso se reduce el número de satélites visibles y la relación  $C/N_0$  de las señales adquiridas, lo que resulta en errores medios de posicionamiento de más de 50 metros con ambos algoritmos. Es importante señalar en este punto que la captura de señales en este entorno se realizó a una distancia de un metro de una ventana exterior. Capturas de prueba realizadas a distancias mayores, cuyos resultados no se han mostrado en este trabajo, no generaron resultados válidos de posicionamiento.
- El algoritmo WLS mejora la precisión de los resultados de posicionamiento obtenidos con el algoritmo LS en los dos entornos de exterior considerados, reduciendo así la dispersión de las estimaciones, aunque esta mejora no es significativa en el entorno de interior. Como ya se ha comentado, el algoritmo WLS también mejora la exactitud de los resultados en el entorno de exterior con buena visibilidad, aunque no en los otros dos entornos.
- La captura y proceso de señales en la banda dual L1-L5 no ha arrojado los resultados esperados, obteniéndose una discreta mejora del posicionamiento obtenido en la banda L1 sólo en el entorno de interior.

Si bien es cierto que ninguna de las conclusiones anteriores puede considerarse particularmente novedosa desde un punto de vista puramente investigador, también lo es el hecho de que este trabajo ha permitido al autor adquirir los conocimientos y desarrollar las herramientas necesarias para dar ese salto. Son varias las líneas de trabajo futuras que surgen a raíz de los resultados presentados en esta memoria y que se pretende desarrollar de forma inmediata:

- Realizar pruebas en punto georeferenciados para poder analizar los resultados de posicionamiento con mayor exactitud y tener además en cuenta la coordenada de altitud.

- Analizar los resultados de posicionamiento que proporciona el algoritmo WLS considerando distintas alternativas para la matriz de pesos  $W$ , en la línea del trabajo publicado en [15].
- Utilizar técnicas de monitorización de integridad (RAIM) para detectar si las señales recibidas están degradadas por algún efecto de propagación, con idea de repondendar la contribución de estas señales e intentar mejorar aún más los resultados proporcionados por el algoritmo WLS.
- Introducir medidas multi-constelación, particularmente de la constelación Galileo, comparando las prestaciones que se obtienen con estas medidas respecto de las obtenidas utilizando únicamente la constelación GPS.
- Capturar más señales en entornos donde haya una mayor visibilidad de satélites emitiendo en la banda L5 y analizar en detalle si se producen mejoras significativas en los resultados de posicionamiento al utilizar diferentes alternativas para la matriz de pesos  $W$ .



# Bibliografía

- [1] Trilateration vs triangulation - how GPS receivers work. <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>. Accedido por última vez el 25-10-2018.
- [2] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *Using GNSS Raw Measurements on Android Devices, White Paper*. Luxembourg Publications Office of the European Union, 2017.
- [3] Android devices that support raw GNSS measurements. <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>. Accedido por última vez el 19-10-2018.
- [4] Frank Van Diggelen and Mohammed Khider. GNSS analysis tools from google. <http://insidegnss.com/gnss-analysis-tools-from-google/>. Accedido por última vez el 19-10-2018.
- [5] José A. López Salcedo, José López Vicario, and Gonzalo Seco Granados. *El Sistema GPS. Módulo 4 de la asignatura Sistemas de Radionavegación. Máster en Ingeniería de Telecomunicación de la UOC*, 2016.
- [6] Gaetano Galuzzo, Moisés Gómez Navarro, and Martin Sunkevic. Tutorial on using GNSS raw measurements on Android devices. In *9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2018)*, Nantes, Francia, Septiembre 2018.
- [7] GPS measurement tools. <https://github.com/google/gps-measurement-tools>. Accedido por última vez el 02-01-2019.
- [8] International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) website. [https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home\\_node.html](https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html). Accedido por última vez el 12-01-2019.

- 
- [9] Boletín número C-57 del IERS. [https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/16\\_BULLETIN\\_C16.txt](https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/16_BULLETIN_C16.txt). Publicado el 07-01-2019.
- [10] Zohar Bar-Yehuda. `plotgooglemap` function, version 2.0.0.1. [https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27627-zoharby-plot-google\\_map](https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27627-zoharby-plot-google_map). Accedido por última vez el 12-01-2019.
- [11] Google Maps Platform: Get API Key. <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/get-api-key>. Accedido por última vez el 12-01-2019.
- [12] GNSS-radar tool. <http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>. Accedido por última vez el 7-01-2019.
- [13] Michael Kleder. `LLA2ECEF` function, version 1.0.0.0. <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7942-covert-lat-lon-alt-to-ecef-cartesian>. Accedido por última vez el 12-01-2019.
- [14] GPS gov. GPS New Civil Signals. <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>. Accedido por última vez el 13-01-2019.
- [15] N. Rahemi, M. R. Mosavi, A. A. Abedi, and S. Mirzakuchaki. Accurate solution of navigation equations in GPS receivers for very high velocities using pseudorange measurements. *Advances in Aerospace Engineering*, pages 1–8, 2014.