

# Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

## **Determinación de la posición de dispositivos IoT en condiciones adversas mediante evaluación de calidad de las medidas**

Autora: Victoria Maldonado  
Luna  
Tutora: Eva María Arias De  
Reyna Dominguez

**Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2025





Trabajo Fin de Grado  
en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

# **Determinación de la posición de dispositivos IoT en condiciones adversas mediante evaluación de calidad de las medidas**

Autora:  
Victoria Maldonado Luna

Tutora:  
Eva María Arias De Reyna Dominguez  
Profesora titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Determinación de la posición de dispositivos IoT en condiciones adversas  
mediante evaluación de calidad de las medidas

Autora: Victoria Maldonado Luna  
Tutora: Eva María Arias De Reyna  
Dominguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

# Agradecimientos

---

Con este Trabajo de Fin de Grado cierro una etapa muy importante de mi vida, una etapa que ha requerido mucho esfuerzo, constancia y dedicación. Sin duda, el mayor aprendizaje que me llevo es haber comprendido el valor del trabajo en equipo. Por ello, quiero dar las gracias a todos los que han formado parte de mi equipo durante estos años.

En casa siempre nos hemos considerado un gran equipo, y estamos los unos para los otros.

Quiero empezar agradeciendo a mis padres, la pieza fundamental de este equipo, mis ejemplos a seguir. Han creído en mí incluso cuando yo misma dudaba, me han animado a seguir siempre adelante, me han enseñado el valor del esfuerzo y me han dado la confianza en mi misma para luchar por todo lo que me proponga. Han sido mi pilar fundamental a lo largo de toda la carrera, y sin su apoyo incondicional no estaría hoy donde estoy. Gracias, de corazón.

A mis hermanas, Mónica, Carmen y Marieta, por estar siempre ahí, por animarme, por hacerme reír cuando más lo necesitaba y por no dejarme caer. Sin vosotras, nada sería igual. Qué afortunada soy por teneros.

A mis abuelos, y a mi Yeya, gracias por confiar en mí, por vuestro cariño constante y por estar presentes en cada paso del camino.

Mi otro gran equipo son mis amigos, sin duda, lo mejor que me ha dado la universidad. Estoy convencida de que no habría llegado hasta aquí sin ellos. En los momentos difíciles, siempre supimos encontrar motivos para reírnos, disfrutar y apoyarnos mutuamente. Esos momentos, sin duda, son los que más echo de menos, y me los llevo conmigo para siempre. Gracias especialmente a Marina, María, Nuria, M<sup>a</sup> Jesús y Paula. Sois las mejores.

Mi otro equipo es del colegio, pero he tenido la suerte de que me han acompañado en esta etapa. Gracias a María y a Meme por estar siempre ahí y por crecer juntas. Vuestra amistad ha sido, y sigue siendo, un regalo.

También quiero agradecer a todos los profesores que me han acompañado durante mi paso por la Escuela. Gracias por vuestra dedicación y paciencia. En especial, gracias a mi tutora, Eva, por formarme, guiarme y apoyarme en este trabajo.

Gracias a todos.

*Victoria Maldonado Luna  
Sevilla, 2025*

# Resumen

---

La tecnología Ultra Wide-Band ha evolucionado como una de las principales soluciones para la localización en interiores debido a su alta precisión y capacidad de penetración en obstáculos. Sin embargo, la propagación en condiciones NLOS (Non-Line of Sight) introduce errores que afectan la estimación de posición.

Este trabajo compara distintos métodos basados en mínimos cuadrados mediante simulaciones en MATLAB, incluyendo Solución no lineal de mínimos cuadrados NLS, Solución no lineal de mínimos cuadrados con conocimiento de la condición de visión NLS-CCV, Solución de mínimos cuadrados lineales LLS y algoritmo LLS ponderado por cuadrado delimitador B-WLS, este último diseñado para mitigar errores NLOS mediante ponderación adaptativa. Los resultados destacan la eficacia de B-WLS en escenarios con obstáculos, resaltando la importancia de técnicas de ponderación para mejorar la precisión. Además, se plantean futuras investigaciones para evaluar estos métodos en entornos dinámicos y con distintas configuraciones de anclaje.

# Abstract

---

Ultra Wide-Band technology has evolved as one of the main solutions for indoor localization due to its high accuracy and obstacle penetration capability. However, propagation under Non-Line of Sight (NLOS) conditions introduces errors that affect position estimation.

This work compares different least squares-based methods through MATLAB simulations, including Nonlinear Least Squares NLS, Nonlinear Least Squares with knowledge of the Line-of-Sight condition NLS-CCV, Linear Least Squares LLS, and Bounding Box-Weighted Linear Least Squares B-WLS, the latter designed to mitigate NLOS errors through adaptive weighting. The results highlight the effectiveness of B-WLS in scenarios with obstacles, underscoring the importance of weighting techniques to enhance accuracy. Furthermore, future research is proposed to evaluate these methods in dynamic environments and with different anchor configurations.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vi</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Índice</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Notación</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo del estudio</i>	1
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	2
<b>2 Marco histórico</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Órigenes de las tecnologías de localización</i>	5
2.1.1 <i>Desarrollo de la localización en exteriores</i>	5
2.1.2 <i>Primeras tecnologías para localización en interiores</i>	6
2.2 <i>UWB</i>	7
<b>3 Ultra Wideband</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Características técnicas</i>	11
3.1.1 <i>Principios de funcionamiento de UWB</i>	11
3.2 <i>Funcionamiento de la tecnología UWB</i>	15
3.2.1 <i>Algunos métodos de medición de magnitudes relacionadas con la posición</i>	15
3.2.2 <i>Cálculo de la posición</i>	18
3.3 <i>Comparación de Ultra-WideBand con otras tecnologías inalámbricas</i>	19
3.3.1 <i>Ventajas</i>	19
3.3.2 <i>Desventajas</i>	19
<b>4 Algoritmos implementados</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Condiciones de propagación</i>	21
4.2 <i>Mínimos Cuadrados</i>	22
4.2.1 <i>Solución no lineal de mínimos cuadrados NLS</i>	22
4.2.2 <i>Método de mínimos cuadrados lineales LLS</i>	23
4.2.3 <i>Solución no lineal de mínimos cuadrados con conocimiento de la condición de visión NLS-CCV</i>	23
4.2.4 <i>Problema del error NLOS</i>	24
4.3 <i>Algoritmo LLS Ponderado por Cuadro Delimitador (B-WLS)</i>	25
4.3.1 <i>Bounding-Box</i>	25
4.3.2 <i>Cuadro delimitador como indicador de incertidumbre</i>	26
<b>5 Espacio de trabajo en la simulación</b>	<b>28</b>
5.1 <i>Área de simulación</i>	28
5.2 <i>Modelado del error en mediciones de distancia para simulación y evaluación de métodos de localización</i>	29
5.2.1 <i>Parámetros del Sistema</i>	30

5.3	<i>Distribución de las anclas en el entorno</i>	30
5.3.1	Root Mean Square Error (RMSE)	31
5.3.2	Métodos de Localización y representación gráfica	31
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>33</b>
6.1	<i>Análisis de los algoritmos para un área 10m x 10m</i>	33
6.1.1	Cuatro Anclas totales en un área 10m x10m	35
6.1.2	Cinco Anclas totales en un área 10m x10m	35
6.1.3	Seis Anclas totales en un área 10m x10m	36
6.1.4	Siete Anclas totales en un área 10m x10m	36
6.1.5	Ocho Anclas totales en un área 10m x10m	37
6.1.6	Doce Anclas totales en un área 10m x10m	37
6.2	<i>Análisis de los algoritmos en un área 5m x 5m</i>	38
6.2.1	Cuatro Anclas totales en un área 5m x 5m	40
6.2.2	Cinco Anclas totales en un área 5m x 5m	40
6.2.3	Seis Anclas totales en un área 5m x 5m	41
6.2.4	Siete Anclas totales en un área 5m x 5m	41
6.2.5	Ocho Anclas totales en un área 5m x 5m	42
6.2.6	Doce Anclas totales en un área 5m x 5m	42
6.3	<i>Análisis de los algoritmos en un área 15m x 15m</i>	43
6.3.1	Cuatro Anclas totales en un área 15m x 15m	44
6.3.2	Cinco Anclas totales en un área 15m x 15m	44
6.3.3	Seis Anclas totales en un área 15m x 15m	45
6.3.4	Siete Anclas totales en un área 15m x 15m	45
6.3.5	Ocho Anclas totales en un área 15m x 15m	46
6.3.6	Doce Anclas totales en un área 15m x 15m	46
6.4	<i>Ánalysis comparativo en diferentes áreas de trabajo</i>	47
6.4.1	Comparación del rendimiento de los métodos	47
6.5	<i>Ánalysis para distinto ancho de banda</i>	50
6.6	<i>Conclusión y futuras líneas de investigación</i>	53
	<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>
	<b>Anexos</b>	<b>56</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 5-1 Área de simulación 10mx10m .....	28
Tabla 6-1 Resultados Área 10m x10m .....	34
Tabla 6-2 Resultados para área 5m x5m .....	39
Tabla 6-3 Resultados para área 15m x 15m .....	43
Tabla 6-4 RMSE para un total 12 anclas y ancho de banda de 1000Mhz.....	50
Tabla 6-5 RMSE para un total 12 anclas y ancho de banda de 500Mhz.....	51

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1 <i>Comparativa de Frecuencias (5)</i> .....	8
Figura 3-1 <i>Curvas de Energía de UWB y de banda estrecha(4)</i> .....	12
Figura 3-2 <i>UWB en el espectro(10)</i> .....	13
Figura 3-3 <i>Situación Multipath(11)</i> .....	14
Figura 3-4 <i>Tranceptor banda estrecha (a) y tranceptor de banda ancha de IR (b).(12)</i> .....	15
Figura 3-5 <i>Representación del algoritmo ToA(14)</i> .....	16
Figura 3-6 <i>Representación del algoritmo TDoA(14)</i> .....	17
Figura 3-7 <i>Representación del algoritmo AoA(14)</i> .....	17
Figura 3-8 <i>Comparativa UWB (18)</i> .....	20
Figura 5-1 <i>Método de mínimos cuadrados</i> .....	32
Figura 5-2 <i>Método Bounding-Box</i> .....	32
Figura 6-1 <i>Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	35
Figura 6-2 <i>Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	35
Figura 6-3 <i>Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	36
Figura 6-4 <i>Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	36
Figura 6-5 <i>Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	37
Figura 6-6 <i>Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 10m x10m</i> .....	37
Figura 6-7 <i>Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	40
Figura 6-8 <i>Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	40
Figura 6-9 <i>Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	41
Figura 6-10 <i>Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	41
Figura 6-11 <i>Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	42
Figura 6-12 <i>Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 5m x 5m</i> .....	42
Figura 6-13 <i>Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	44
Figura 6-14 <i>Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	44
Figura 6-15 <i>Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	45
Figura 6-16 <i>Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	45
Figura 6-17 <i>Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	46
Figura 6-18 <i>Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 15m x 15m</i> .....	46
Figura 6-19 <i>Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en B-WLS</i> .....	48
Figura 6-20 <i>Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en NLS</i> .....	48
Figura 6-21 <i>Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en LLS</i> .....	49
Figura 6-22 <i>Comparativa del ancho de banda en B-WLS para un total de 12 anclas.</i> .....	51
Figura 6-23 <i>Comparativa del ancho de banda en NLS para un total de 12 anclas.</i> .....	52
Figura 6-24 <i>Comparativa del ancho de banda en LLS para un total de 12 anclas.</i> .....	52

# Notación

---

$d_i$	Distancia medida ente el nodo y el ancla $i$ ;
$N$	Denota un conjunto compuesto por $N$ elementos;
$\hat{z}$	Posición desconocida del nodo
$z$	Posición real del nodo;
$r_i$	Distancia medida con error
$z_i$	Posiciones conocidas de las anclas;
$k_i$	Norma cuadrada de la posición del ancla;
$\theta_i$	Peso asignado a la medida del ancla $i$ ;
$\ *\ $	Distancia euclidiana en dos dimensiones;
DDP	Detected Direct Path;
UDP	Undetected Direct Path;
RMSE	Raíz del Error Cuadrático Medio;
$P_3$	Vector para la linealización;
$A$	Matriz de diferencias de posiciones;
$W$	Matriz de pesos en métodos ponderados;
$f$	Ancla de referencia;
$\epsilon_{M,W}(d)$	Representa el error por dispersión multipath;
$\epsilon_{U,W}(d)$	Representa el error por condición UDP;
$\xi_W(d)$	Variable aleatoria que toma el valor 1 cuando ocurre una condición UDP y 0 en caso contrario;
$C$	Matriz de covarianza de los errores;
$d_{\text{Bounding-Box}}$	Distancia entre la posición estimada por Bounding-Box y cada ancla;
$\sigma_i$	Incertidumbre del rango



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La determinación precisa de la posición de dispositivos IoT (Internet de las cosas) es una necesidad creciente en múltiples aplicaciones modernas, como la automatización industrial, la logística, la asistencia sanitaria o la domótica. En entornos interiores, donde el acceso a sistemas tradicionales como GPS es limitado o inexistente, las tecnologías de radiofrecuencia emergen como soluciones clave para la localización. En particular, Ultra Wide-Band (UWB) se ha consolidado como una de las tecnologías más prometedoras gracias a su alta resolución temporal, su bajo consumo energético y su capacidad para realizar estimaciones de distancia con gran precisión.

Sin embargo, la fiabilidad de los sistemas de posicionamiento se ve fuertemente condicionada por el entorno en el que operan. Uno de los principales retos es la presencia de condiciones adversas de propagación, especialmente los escenarios sin línea de visión directa (NLOS) entre los dispositivos IoT y las anclas. Este tipo de propagación genera errores sesgados en las mediciones de distancia, afectando significativamente el rendimiento de los métodos clásicos de localización.(1)

En este contexto, el presente trabajo se centra en la evaluación comparativa de distintos algoritmos de localización que utilizan medidas UWB, incorporando mecanismos que permiten mitigar el impacto de las mediciones degradadas. Para ello, se analiza el comportamiento de varios métodos basados en mínimos cuadrados en escenarios simulados con distintos grados de severidad en las condiciones de visibilidad, explorando alternativas robustas para mejorar la precisión en entornos realistas.

## 1.1 Objetivo del estudio

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar y comparar diferentes métodos de localización basados en mínimos cuadrados ponderados, con énfasis en el método Bounding-Box Weighted Least Squares (B-WLS), el cual ha sido propuesto como una alternativa robusta para mitigar los efectos negativos de los errores NLOS (Non-Line of Sight). Para ello, se implementarán y evaluarán los siguientes algoritmos de estimación de posición:

- Método de Mínimos Cuadrados No Lineales (NLS): Enfocado en minimizar los errores de distancia mediante una función de coste cuadrática.

- Método NLS con conocimiento de la condición de Visión (NLS-CCV): Variante de NLS en la que se consideran pesos diferenciales entre medidas LOS y NLOS, permitiendo mejorar la precisión en condiciones ideales.
- Método de Mínimos Cuadrados Lineales (LLS): Simplificación del NLS que permite reducir la carga computacional mediante una formulación linealizada del problema.
- Método B-WLS: Algoritmo basado en la construcción de cajas delimitadoras para cada ancla, estableciendo pesos inversamente proporcionales a la incertidumbre de cada medida, lo que permite reducir el impacto de errores NLOS.

Se busca evaluar el rendimiento relativo de cada método en diferentes condiciones, analizando el impacto de la cantidad de anclas, la presencia de medidas erróneas y la influencia del ancho de banda en la precisión final.

## 1.2 Estructura del trabajo

### **Fundamentos teóricos y algoritmos de localización:**

Se proporciona una descripción detallada de los algoritmos implementados, explicando sus fundamentos matemáticos y la forma en que procesan las mediciones de distancia para estimar la posición del nodo objetivo. Se introducen los modelos LOS y NLOS, que caracterizan las condiciones de propagación de la señal, y se presentan las estrategias utilizadas en cada método para mitigar su impacto.

### **Simulación del sistema de localización:**

Se describe el entorno de simulación desarrollado en MATLAB, incluyendo la generación de posiciones de anclas y nodos, el modelo de errores de medición, y la metodología utilizada para evaluar los distintos métodos. Se detallan las áreas de simulación consideradas ( $5 \times 5 \text{ m}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ m}^2$  y  $15 \times 15 \text{ m}^2$ ), así como los parámetros empleados en las pruebas, como la frecuencia de operación de 500 MHz y 1000 MHz.

### **Comparación y análisis de resultados:**

Se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, incluyendo gráficos comparativos de la raíz del error cuadrático medio (root mean square error, RMSE) para cada método, en función del número total de anclas y del número de anclas afectadas por NLOS. Se realiza un análisis detallado del impacto del área de trabajo y del ancho de banda en la precisión de la localización, destacando las fortalezas y limitaciones de cada método.

### **Conclusiones y perspectivas futuras**

Finalmente, se presentan las conclusiones más relevantes del estudio y se proponen posibles líneas de investigación futuras. Entre ellas, se plantea la mejora en la implementación del método B-WLS, la optimización en la distribución de las anclas para maximizar la precisión de localización y el análisis del rendimiento en diferentes configuraciones de área, permitiendo una evaluación más amplia de la robustez de los métodos en distintos entornos.

**Importancia del estudio**

El análisis detallado de los distintos métodos de localización permitirá entender cómo mejorar la precisión en entornos con errores NLOS, optimizando los sistemas actuales mediante técnicas de ponderación y bounding box. Además, este estudio servirá como referencia para futuras investigaciones en sistemas de posicionamiento en tiempo real (RTLS).

Con esta estructura, el trabajo busca proporcionar una evaluación rigurosa y comparativa de los métodos de mínimos cuadrados ponderados, permitiendo identificar cuál de ellos ofrece mejores prestaciones en distintos escenarios y condiciones de propagación.



## 2 MARCO HISTÓRICO

---

**E**N esta sección, se explorarán los orígenes de las tecnologías de localización, comenzando con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sus limitaciones en entornos cerrados. Se analizarán las primeras tecnologías de localización en interiores, con un enfoque en UWB, desde sus inicios en investigaciones militares hasta su adopción en aplicaciones civiles. También se discutirá su estandarización por el IEEE, la regulación de la FCC y su integración en dispositivos modernos, destacando su potencial para transformar las comunicaciones inalámbricas.

### 2.1. Orígenes de las tecnologías de localización

#### 2.1.1 Desarrollo de la localización en exteriores

La historia de los orígenes de localización en exteriores se remonta a la época de la Guerra Fría, cuando la Unión Soviética lanzó el Satélite Sputnik I en 1957 lo que marcó un hito en la carrera espacial, ya que los científicos estadounidenses descubrieron que podían rastrear su órbita mediante el efecto Doppler. Este principio sirvió de base para el primer sistema de posicionamiento satelital, Transit, desarrollado por la Marina de los EE. UU. en la década de 1960. Posteriormente, en la década de 1970, el Departamento de Defensa de EE. UU. diseñó el Sistema de Posicionamiento Global, compuesto por una constelación de satélites en órbita capaces de proporcionar datos de localización con alta precisión.(2)

En 1978, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos decidió expandir la tecnología de posicionamiento con el lanzamiento de una nueva red de 24 satélites, diseñados para respaldar un sistema de navegación más avanzado y preciso. Durante casi dos décadas, el acceso al GPS estuvo restringido al ámbito militar debido a un programa denominado Selective Availability, que permitía al gobierno estadounidense degradar intencionalmente la señal para evitar su uso por parte de actores no autorizados, garantizando así la seguridad nacional.

Sin embargo, en mayo del año 2000, el presidente Bill Clinton ordenó la desactivación de Selective Availability, lo que permitió el acceso libre al GPS para usuarios civiles y comerciales en todo el mundo. Esta decisión marcó un punto de inflexión en la evolución del GPS, facilitando su adopción masiva en sectores como la navegación, el transporte, la agricultura de precisión y las telecomunicaciones, sentando las bases para muchas de las aplicaciones que hoy forman parte de la vida cotidiana.

Además del GPS, existen otros sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) que proporcionan servicios de posicionamiento en exteriores. Entre ellos se encuentran Galileo, desarrollado por la Unión Europea, GLONASS, operado por Rusia, y BeiDou, el sistema de navegación de China. Estos sistemas funcionan de manera similar al GPS, ofreciendo cobertura global y mejorando la precisión del posicionamiento gracias a la combinación de señales de diferentes constelaciones de satélites.

Sin embargo, a pesar de la utilidad de estos sistemas en entornos abiertos, todos ellos presentan las mismas limitaciones cuando se trata de localización en interiores. La señal satelital se debilita o se bloquea por estructuras como edificios, túneles o estacionamientos subterráneos, lo que impide un posicionamiento preciso. Debido a estos inconvenientes, han surgido diversas tecnologías diseñadas específicamente para la localización en interiores.

### **2.1.2 Primeras tecnologías para localización en interiores**

En los últimos años, se ha dedicado un gran esfuerzo al desarrollo de soluciones que permitan que la localización en interiores alcance el mismo nivel de precisión que la disponible en exteriores. Esto supone un desafío importante, ya que no existen mapas predefinidos, las señales pueden sufrir interferencias y reflexiones debido a la presencia de estructuras físicas, y la exactitud requerida en la localización debe ser considerablemente mayor, dado que el GPS solo proporciona una precisión aproximada de 10 metros en condiciones óptimas.(3)

Para que la localización en interiores sea tan efectiva y precisa como la que se consigue en exteriores, es fundamental desarrollar tecnologías que permitan identificar la posición de personas y objetos con gran exactitud. Esto resulta especialmente útil en una amplia variedad de aplicaciones, como la gestión de activos en fábricas y almacenes, la mejora de la seguridad y eficiencia en hospitales, la optimización del flujo de clientes en centros comerciales y aeropuertos, o el guiado preciso en museos y edificios inteligentes. Además, en sectores como la automatización industrial y la robótica, una localización precisa es clave para la navegación autónoma y la coordinación eficiente de dispositivos.

A lo largo de los años, diversas tecnologías han sido adaptadas para la localización en interiores con distintos niveles de precisión y fiabilidad. El uso de RFID y Wi-Fi para posicionamiento se remonta a principios de los años 2000, cuando se comenzaron a explorar estas tecnologías para rastrear activos en entornos controlados. Bluetooth Low Energy (BLE) surgió alrededor de 2010 como una opción más eficiente en términos de consumo energético para la localización en interiores mediante balizas. La tecnología UWB comenzó a ganar popularidad en la última década, especialmente tras su adopción en dispositivos de consumo como teléfonos inteligentes, debido a su alta precisión en el posicionamiento. Otras soluciones como ZigBee y los sistemas de visión artificial también han sido incorporadas en diversas aplicaciones, con mejoras continuas para ofrecer mayor precisión y fiabilidad.

El avance de estas tecnologías ha permitido mejorar la localización en interiores de manera significativa, aunque todavía existen desafíos como la interferencia de señales, la necesidad de infraestructura adicional y el desarrollo de algoritmos más eficientes para el procesamiento de datos en tiempo real.

## 2.2 UWB

El inicio del desarrollo de la que ahora conocemos como la tecnología Ultra Wide-Band se remonta a los experimentos realizados por Johann Philipp Reis en la década de 1860. Reis, fue un inventor alemán que desarrolló un dispositivo con el cual se podía transmitir el sonido hasta una distancia de 100 metros, fue uno de los primeros inventos de transmitir voz de manera electrónica a través de alambres.

El invento de Reis utilizaba un método de transmisión basado en la generación de pulsos de señal extremadamente cortos. Estos pulsos, sentaron las bases para la investigación posterior en este campo. Otros investigadores claves que contribuyeron al desarrollo de Ultra Wideband UWB fue Nikola Tesla, quién experimentó con señales de radio de banda ancha en sus investigaciones a principios de XX, y Guglielmo Marconi, que demostró la viabilidad de la tecnología UWB en 1901 al transmitir señales de radio a través del Océano Atlántico. Pero, finalmente su uso comercial no despegó de inmediato debido a una serie de desafíos técnicos y regulatorios que produjo que esta tecnología quedase restringida para uso exclusivo militar.

Sin embargo, la verdadera revolución en el desarrollo del UWB comenzó en la década de 1960, cuando los militares estadounidenses exploraron activamente aplicaciones en diferentes campos como radar, comunicaciones, sensores y sistemas de posicionamiento entre otros. Durante las décadas siguientes, se llevaron a cabo numerosos estudios y experimentos en el campo de UWB, tanto en entornos militares como civiles. A medida que avanzaba la tecnología, surgieron aplicaciones potenciales en campos como la comunicación inalámbrica de alta velocidad, la detección de objetos y la localización en interiores.

Uno de los hitos más importantes en la historia del UWB ocurrió en 2002, cuando la FCC de los Estados Unidos emitió regulaciones que permitían el uso sin licencia de esta tecnología en ciertos rangos de frecuencia. Esto marcó un punto de inflexión significativo, ya que abrió la puerta a una amplia gama de aplicaciones comerciales y de consumo. La idea principal de la norma realizada por la FCC es definir qué tecnologías basadas en canales UWB usan una gran porción espectral y baja potencia de transmisión.

La baja potencia de transmisión autorizada por la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones) ha sido un factor limitante en el alcance efectivo de las comunicaciones utilizando la tecnología UWB. Esta limitación se ha establecido para evitar interferencias con otros dispositivos de comunicación y garantizar la coexistencia armoniosa en el espectro radioeléctrico.(4)

El rango de frecuencia en el que opera Ultra Wide Band, según las regulaciones de la FCC, generalmente abarca desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz. Este amplio rango de frecuencias permite una transmisión de datos de alta velocidad y una precisión excepcional en la localización en una variedad de aplicaciones. Estos amplios rangos de frecuencia no suelen causar interferencias con otras tecnologías de banda estrecha. En la *figura 2-1* podemos ver el ancho que ocupa UWB en relación con otras tecnologías.

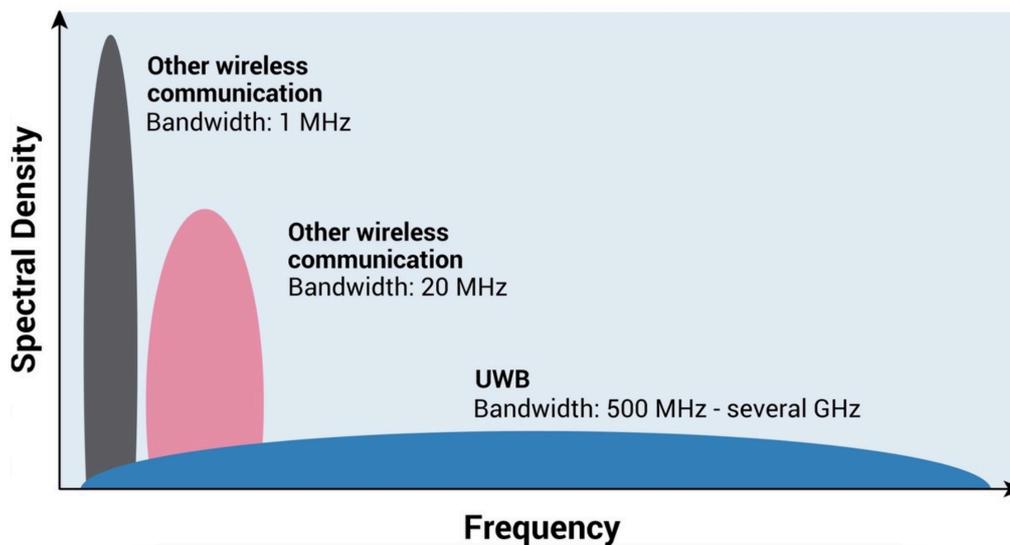


Figura 2-1 *Comparativa de Frecuencias (5)*

El IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) ha desempeñado un papel crucial en la estandarización del Ultra Wide Band (UWB) a través de su grupo de trabajo IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a). Este grupo se dedica específicamente a definir estándares para el nivel físico y el control de acceso al medio para redes de área personal inalámbricas (WPAN) de baja velocidad y potencia basadas en UWB.(6)

- IEEE 802.15.4-2003
- IEEE 802.15.4a-2006 (Revisión)
- IEEE 802.15.4a-2007 (Enmienda)

Estos estándares tienen como objetivo principal definir los requisitos para sistemas de baja complejidad, bajo coste y con baterías de larga duración, que pueden funcionar durante meses o años sin necesidad de recarga. Esto es fundamental para aplicaciones de dispositivos IoT y otros dispositivos de baja potencia que utilizan tecnología UWB para la comunicación inalámbrica. (7)

En 2020, se introdujo una extensión del estándar IEEE 802.15.4, conocida como IEEE 802.15.4z, que se centró en mejorar la seguridad y en la eficiencia espectral de UWB. La enmienda propuesta al estándar IEEE 802.15.4 busca mejorar las capacidades de UWB mediante la optimización de los aspectos físicos y de control de acceso al medio (MAC). Esto incluye la introducción de opciones de codificación adicionales y mejoras en las técnicas de modulación para aumentar la precisión de las mediciones de distancia, así como el soporte en el MAC para la coordinación de procedimientos de medición de tiempo de vuelo y el intercambio de información relacionada con la medición de distancia entre dispositivos UWB. Con un rango típico de hasta 100 metros, estas mejoras son fundamentales para aplicaciones que requieren comunicaciones precisas y eficientes en entornos UWB, como la localización en interiores y el seguimiento de activos.

También surge la *UWB Alliance*, es una organización importante creada para promover y avanzar en el uso de la banda Ultra Wide Band. Con una membresía diversa que incluye empresas líderes en diversas industrias, como Kia Motors, Decawave, Hyundai e iRobot, la UWB Alliance trabaja para impulsar la adopción y la implementación de la tecnología UWB en una amplia gama de aplicaciones y mercados. Su objetivo principal es fomentar la innovación, la colaboración y el desarrollo de estándares para aprovechar al máximo el potencial de UWB en áreas como la

localización precisa, la conectividad de dispositivos IoT, la automatización del hogar, la movilidad inteligente entre otras.

En la actualidad, UWB está presente en algunos modelos recientes de teléfonos inteligentes, como los de la serie iPhone de Apple, en los que se ha incluido un chip U1 de banda ultraancho. Este chip utiliza la tecnología UWB para permitir funciones como el AirDrop direccional, que permite compartir archivos de manera más precisa apuntando hacia otro dispositivo cercano.

A medida que UWB continúa evolucionando y se integra en una variedad de dispositivos, es posible que compita directamente con Bluetooth en ciertas áreas, y podría desbancar a Bluetooth en aplicaciones donde se necesitan mayores velocidades de datos, precisión de localización y confiabilidad en entornos congestionados.

Sin duda, es crucial destacar que Ultra Wide Band está experimentando una evolución notable, con mejoras continuas en sus capacidades y aplicaciones. Además, se espera que en los próximos años esta tecnología experimente un crecimiento significativo y se expanda a muchos más ámbitos.



# 3 ULTRA WIDEBAND

---

**E**n este capítulo, se profundizará en las características técnicas de la tecnología Ultra-Wideband, explorando sus principios fundamentales de funcionamiento y cómo se distingue de otras tecnologías inalámbricas. Se abordarán aspectos clave como el ancho de banda extendido, la transmisión por pulsos, y su capacidad para operar a baja potencia, lo que le otorga ventajas en velocidad, precisión y eficiencia energética. Además, se comparará UWB con tecnologías como Wi-Fi y Bluetooth, destacando sus fortalezas y limitaciones en diversos contextos de aplicación.

## 3.1 Características técnicas

Tras haber introducido la evolución histórica de la tecnología UWB, es esencial profundizar en sus características técnicas. Actualmente, las tecnologías inalámbricas de área local (WLAN) más comunes, como Wi-Fi y Bluetooth, se crearon con la finalidad de conectar de forma inalámbrica diversos dispositivos en distancias cortas y a velocidades moderadas. No obstante, estas tecnologías aún enfrentan importantes desafíos, como la necesidad de mejorar la velocidad de transmisión, extender la autonomía de los dispositivos y reforzar la seguridad en las comunicaciones.(8)

Ultra-Wideband, se caracteriza por cualquier transmisión de radio que ocupe un ancho de banda superior al 25% de su frecuencia central o que su ancho de banda exceda los 500 MHz. Aunque esta definición pueda parecer poco precisa al principio, permite distinguir claramente a UWB de los sistemas tradicionales de banda estrecha y de los modernos sistemas celulares de banda ancha. Las diferencias clave entre UWB y estos sistemas radican en dos aspectos fundamentales. Primero, UWB emplea un ancho de banda significativamente mayor que el de cualquier tecnología de radio celular actual. Segundo, a diferencia de los sistemas convencionales que utilizan señales sinusoidales, UWB transmite mediante pulsos en la modalidad IR.(9)

Cabe destacar que la tecnología UWB admite distintas modalidades de operación. En este trabajo, todas las referencias a UWB se centran exclusivamente en la modalidad Impulse Radio (IR-UWB), utilizada habitualmente en sistemas de localización y caracterizada por su baja tasa de transmisión, alta resolución temporal y resistencia a interferencias.

### 3.1.1 Principios de funcionamiento de UWB

#### 3.1.1.1 Baja potencia de transmisión

Una de las características más destacadas de la tecnología Ultra-Wideband es su capacidad para operar a baja potencia de transmisión sin comprometer el rendimiento en la velocidad de datos ni en la precisión de la comunicación. Esto se debe, en gran parte, al amplio ancho de banda que

utiliza UWB, que puede llegar hasta 7,5 GHz (en el rango de 3,1 a 10,6 GHz), lo que permite compensar la baja potencia con una mayor capacidad de canal.

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

*Teorema de la capacidad de Shannon*

Según la fórmula de la capacidad del canal de Shannon, la capacidad de transmisión de datos no depende únicamente de la potencia de la señal, sino también del ancho de banda disponible. En el caso de UWB, incluso si la potencia de transmisión es muy baja y la relación señal-ruido (SNR) es muy reducida, es posible alcanzar velocidades teóricas de hasta 1 Gbit/s en distancias cortas. Por ejemplo, utilizando un ancho de banda de 7 GHz, se pueden obtener velocidades de transmisión elevadas con una potencia mínima.(4)

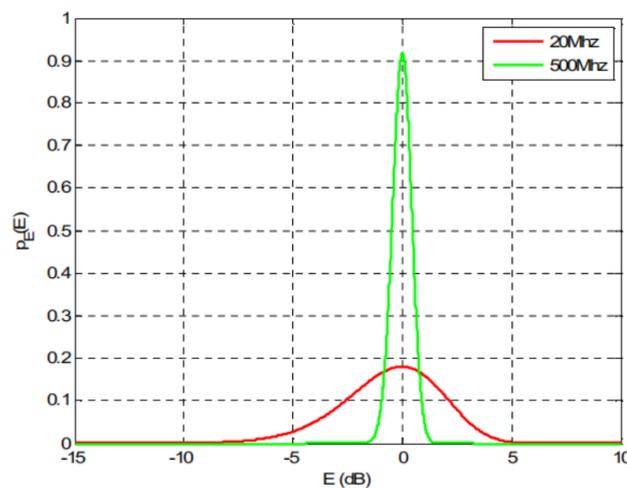


Figura 3-1 Curvas de Energía de UWB y de banda estrecha(4)

La Figura 3-1 muestra la densidad de probabilidad de energía  $p(E)$  de señales UWB 500 MHz y de banda estrecha 20 MHz en función de la relación de energía  $E$  en dB. La curva verde UWB tiene una distribución de energía más extendida, lo que indica que la señal ocupa un rango de frecuencias más amplio y es más eficiente. En cambio, la curva roja banda estrecha muestra una distribución más concentrada, lo que refleja una señal limitada a un menor rango de frecuencias y más susceptible a interferencias. Esto significa que UWB puede transmitir datos a mayores distancias utilizando menos energía, lo que no solo reduce el consumo de batería en dispositivos móviles, sino que también minimiza la interferencia con otros sistemas de comunicación, como el GPS o las redes celulares.

### 3.1.1.2 Transmisión por pulsos

Las transmisiones en *Ultra Wideband* en la modalidad IR consisten en una serie de impulsos de energía modulados con una duración extremadamente corta, del orden de los picosegundos. Aunque la frecuencia de repetición de los pulsos no es alta, la corta duración temporal de cada pulso genera un ancho de banda muy amplio en el dominio de la frecuencia, alcanzando varios GHz. Esto es lo que le otorga a UWB su capacidad de ocupar un espectro de frecuencias amplio.

La modulación o codificación de la información en estos impulsos se logra variando su amplitud, polarización, fase o temporización. Debido a estas características, se considera que UWB es una transmisión en modo banda base sin portadora, es decir, una transmisión no sinusoidal. Los

impulsos pueden alimentar directamente a la antena para su transmisión, sin la necesidad de una portadora continua, lo que permite una comunicación eficiente y de alta precisión.(8)

Estos trenes de pulsos de corta duración no solo permiten la transmisión de datos, sino que también son ideales para la localización precisa de objetos o personas. El tiempo exacto de llegada de los pulsos se mide con una precisión de nanosegundos, lo que posibilita determinar la posición de manera extremadamente precisa, con una resolución en centímetros.

### 3.1.1.3 Ancho de banda extendido

Las señales UWB se caracterizan por tener un ancho de banda extremadamente amplio, generalmente superior a 500 MHz, lo que permite que la energía de la señal se distribuya a lo largo de una gran porción del espectro de frecuencias. Como resultado, la densidad espectral de potencia de UWB se mantiene por debajo del nivel de ruido, lo que hace que sea menos probable que interfiera con otros servicios ya establecidos que operan en bandas más estrechas.

Este comportamiento es una de las principales ventajas de la tecnología UWB. Al estar por debajo del nivel de ruido, las señales UWB pueden coexistir sin causar interferencias significativas a otros sistemas, como las comunicaciones de banda estrecha, Wi-Fi o Bluetooth. De hecho, este bajo nivel de potencia permite la reutilización eficiente del espectro, lo que favorece un uso más efectivo de las frecuencias disponibles sin comprometer el rendimiento de las demás tecnologías.

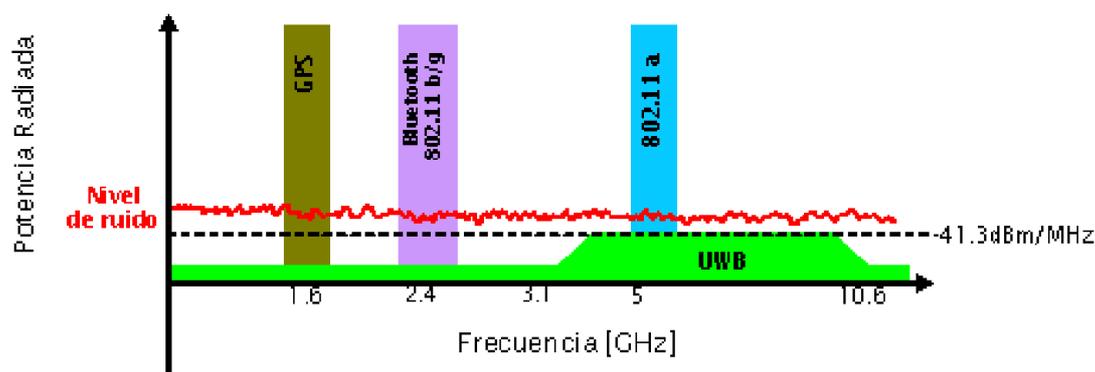


Figura 3-2 UWB en el espectro(10)

La figura 3-2 muestra cómo la tecnología UWB utiliza un ancho de banda muy amplio, que va desde aproximadamente 3.1 GHz hasta 10.6 GHz, distribuyendo su energía de manera uniforme y manteniéndose por debajo del nivel de ruido. Esto permite que UWB funcione sin interferir con otras tecnologías inalámbricas como GPS, Bluetooth y Wi-Fi, que operan en bandas más estrechas con mayor potencia. Gracias a esta característica, UWB puede coexistir eficientemente con otros sistemas en el mismo espectro de frecuencias, garantizando un uso optimizado del espacio radioeléctrico.

### 3.1.1.4 Alto rendimiento en condiciones Multi-path

Uno de los grandes desafíos en las comunicaciones inalámbricas es el fenómeno conocido como multipath o desvanecimiento por multipath, que ocurre cuando las señales transmitidas se reflejan en superficies como paredes, edificios o incluso en objetos móviles, creando múltiples trayectorias de señal que llegan al receptor con diferentes retrasos de tiempo. Esto puede causar interferencias, pérdida de señal o distorsión, afectando la calidad de la transmisión.

Este fenómeno es particularmente problemático en sistemas de comunicaciones tradicionales, que pueden experimentar una degradación significativa de la señal debido a las trayectorias reflejadas. Sin embargo, los sistemas UWB son especialmente resilientes frente a los efectos de multipath gracias a sus características técnicas únicas.

### ¿Cómo UWB maneja los efectos de multi-path?

La clave de esta resiliencia radica en la extremadamente corta duración de los pulsos que utiliza UWB, los cuales suelen ser del orden de nanosegundos. Esta corta duración permite que los sistemas UWB distingan con precisión entre la señal directa y las señales reflejadas que llegan con diferentes retrasos, incluso si estos retrasos son pequeños. La amplia resolución temporal de UWB asegura que las diferentes trayectorias puedan ser separadas y analizadas de forma eficiente sin que se produzca interferencia significativa.

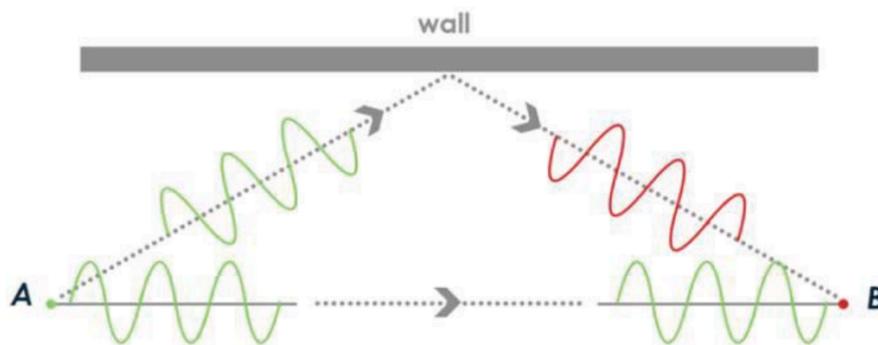


Figura 3-3 Situación Multipath(11)

La línea directa sin obstruir entre transmisor y receptor se conoce como LOS (Line of Sight), mientras que las señales provenientes de reflexiones sobre otras superficies o de atravesar objetos en la línea directa se conocen como NLOS. En la imagen, estas señales reflejadas se representan mediante las ondas que rebotan en la pared antes de llegar al receptor. Estas trayectorias NLOS suelen llegar con retardos de tiempo y pueden estar atenuadas ó distorsionadas, lo que en tecnologías convencionales podría causar interferencias o pérdida de calidad en la transmisión.

A diferencia de los sistemas de comunicaciones de banda estrecha, que pueden ver afectada su calidad debido a las múltiples trayectorias y los desvanecimientos, UWB logra recuperar la señal original incluso en entornos con fuertes reflexiones y desvanecimientos por multipath. Esto hace que UWB sea una tecnología ideal para aplicaciones en áreas complejas, como entornos urbanos densos o interiores de edificios, donde las señales reflejadas y dispersadas son comunes.

#### 3.1.1.5 Arquitectura del Transceptor

La arquitectura del transceptor UWB se caracteriza por su simplicidad, gracias a la ausencia de una portadora en la transmisión. Al no necesitar generar ni sincronizar una onda portadora, como ocurre en las tecnologías de banda estrecha, se reduce considerablemente la cantidad de componentes de radiofrecuencia requeridos. Esto no solo simplifica el diseño del transceptor, sino que también lo hace más económico y eficiente en términos de consumo de energía, comparado con los sistemas de comunicación tradicionales. (12)

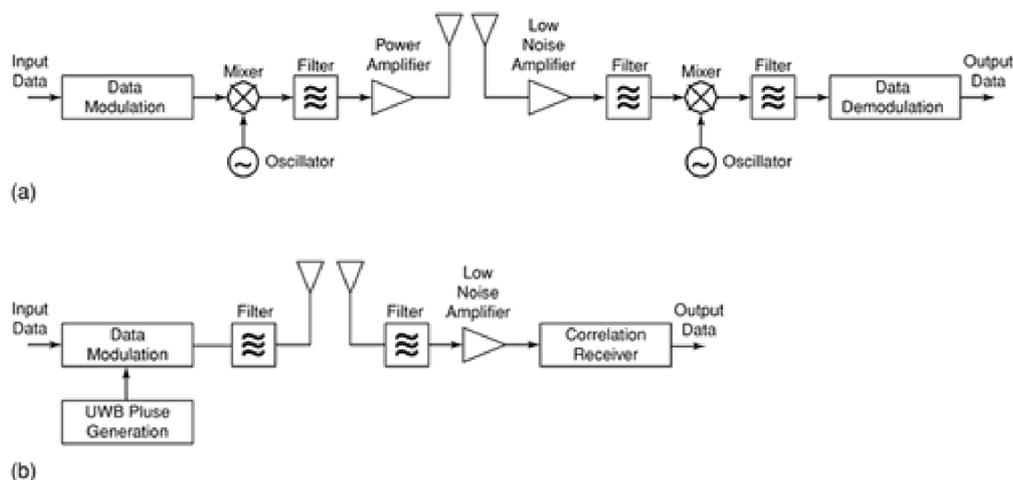


Figura 3-4 *Tranceptor banda estrecha (a) y tranceptor de banda ancha de IR (b).*(12)

En la *figura 3-4*, el tranceptor de banda estrecha (a), se observa una estructura más compleja que incluye osciladores y mezcladores para la generación y recuperación de la portadora, además de múltiples filtros y amplificadores. Esta complejidad se traduce en un mayor coste y consumo de energía.

Por otro lado, el tranceptor UWB (b) elimina la necesidad de portadora, sustituyéndola por la generación de pulsos UWB directos. Esto simplifica significativamente el diseño, ya que no requiere osciladores ni mezcladores. El receptor UWB utiliza un correlador para la detección de datos, lo que reduce aún más la cantidad de componentes, haciendo el sistema más eficiente y económico.

## 3.2 Funcionamiento de la tecnología UWB

El sistema UWB utiliza un conjunto de dispositivos conocidos como anclas (fijos en posiciones conocidas dentro de un área) y tags o etiquetas móviles (objetos o personas cuya ubicación se desea rastrear). A través de la medición precisa del tiempo que tarda una señal en viajar entre el tag y las anclas, UWB determina la distancia y, con múltiples anclas, calcula la posición exacta

### 3.2.1 Algunos métodos de medición de magnitudes relacionadas con la posición

La estimación de posición en sistemas de localización en interiores se basa en la medición de diferentes parámetros de las señales transmitidas entre los nodos de referencia y el objetivo a localizar. Estos métodos incluyen:

- **Tiempo de Llegada (ToA)**  
El Tiempo de Llegada es una técnica que mide el tiempo de propagación de una señal entre el transmisor y el receptor para calcular la distancia desde un transmisor específico. Para que este método sea efectivo, es necesario que todos los nodos estén sincronizados con una referencia temporal común o bien usar un protocolo de tipo Two Way Ranging (TWR), que consiste en el intercambio de más de un mensaje para calcular el TOA a partir de medidas de tiempo de un solo nodo. Sin embargo, esta sincronización puede ser compleja o incluso imposible en dispositivos simples con capacidades de procesamiento limitadas. En el proceso, los nodos con ubicación conocida transmiten señales en un momento específico registrado por una marca de tiempo. Al recibir la señal, se asigna una segunda

marca de tiempo, y la diferencia entre ambas se usa para calcular el tiempo de recorrido y, por ende, la distancia. Esta información puede combinarse con datos de otros transmisores mediante técnicas de trilateración para determinar la posición del receptor.

El principal inconveniente del ToA si no se usa TWR, radica en la necesidad de relojes altamente sincronizados y de alta resolución. Además, todas las técnicas basadas en el tiempo están sujetas a errores debido a efectos de multipath, situaciones NLOS y desfases en el procesamiento. Estos factores pueden provocar una sobreestimación del tiempo de viaje de la señal y, en consecuencia, de la distancia. Por ejemplo, un error de 1 milisegundo puede traducirse en un error de 300 metros en la estimación de la distancia. Por ello, lo habitual es plantear protocolos TWR o similares.(13)

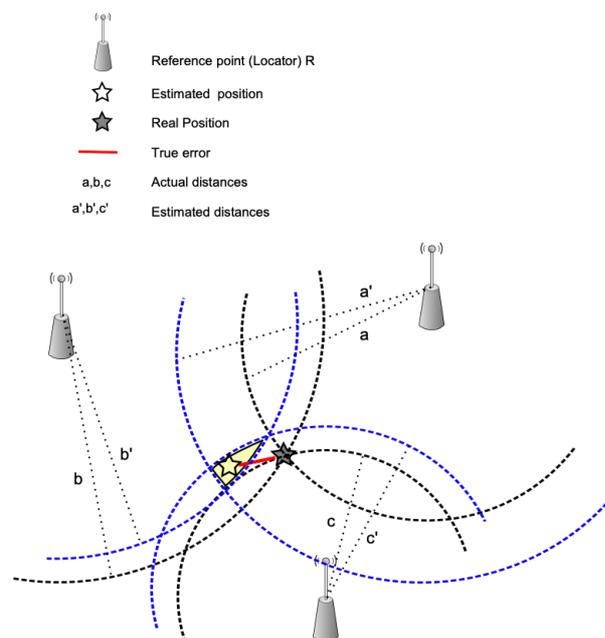


Figura 3-5 Representación del algoritmo ToA(14)

- Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA - Time Difference of Arrival)
 

Para reducir la necesidad de sincronización estricta entre todos los nodos como alternativa al TWR, se puede utilizar la técnica de Diferencia de Tiempo de Llegada, que solo requiere la sincronización de los transmisores. Existen dos enfoques principales para implementar el TDoA:

  - 1) Medición con receptores múltiples:
 

Se mide la llegada de la misma señal en dos receptores diferentes, y luego se calcula la diferencia en los tiempos de recepción. Este método disminuye la dependencia de una sincronización precisa entre transmisores y receptores.
  - 2) Uso de señales con diferentes velocidades de propagación:
 

Un único transmisor emite dos señales simultáneamente, pero las dos señales con distinta naturaleza (por ejemplo, una señal de radiofrecuencia y otra de sonido). De este modo, se elimina la necesidad de sincronización entre sensores, aunque se requiere hardware adicional para manejar las diferentes señales.

Aunque el TDoA reduce algunos desafíos de sincronización, la complejidad de los algoritmos necesarios para detectar condiciones NLOS puede aumentar la latencia y disminuir la eficacia en dispositivos simples con capacidades limitadas de procesamiento.(13)

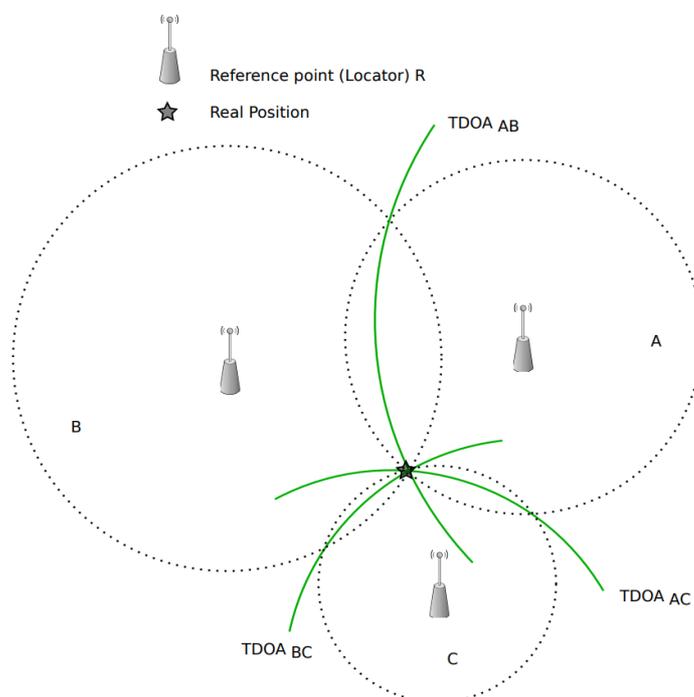


Figura 3-6 Representación del algoritmo TDoA(14)

- Ángulo de llegada (AOA)

Es una técnica utilizada en sistemas de localización y comunicaciones inalámbricas para determinar la dirección desde la cual una señal ha llegado a un receptor. En lugar de medir la distancia como en otras técnicas, AoA se enfoca en calcular el ángulo exacto de llegada de la señal utilizando antenas direccionales o arrays de antenas.

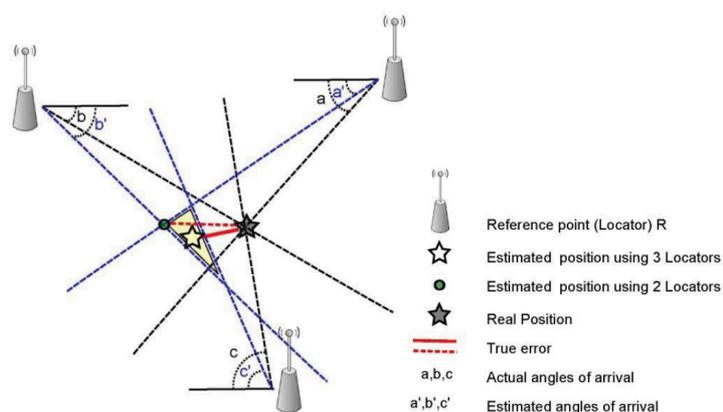
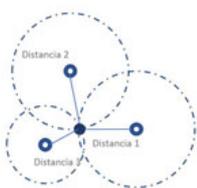


Figura 3-7 Representación del algoritmo AoA(14)

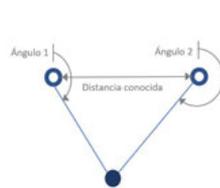
### 3.2.2 Cálculo de la posición

Una vez que se han estimado las distancias o ángulos, se pueden utilizar diferentes algoritmos para calcular la posición exacta del objeto o persona:

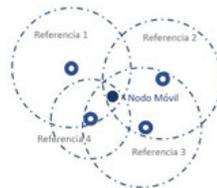
- Trilateración**  
 La trilateración es el método que se empleará en este trabajo para la determinación precisa de la posición. Este enfoque se basa en la medición de distancias desde al menos tres puntos de referencia conocidos, también denominados anclas. A partir de estas distancias, se construyen circunferencias en un plano, y el punto donde estas se intersectan determina la ubicación exacta del objeto en un entorno 2D, que puede extenderse a 3D si hay al menos 4 anclas. (15)
- Triangulación**  
 Similar a la trilateración, pero este método utiliza ángulos y distancias. Se requieren al menos dos ángulos y una distancia para determinar la posición en un plano 2D. Este enfoque es común en sistemas que pueden medir el AoA con precisión.(15)
- Multilateración**  
 Se basa en TDoA de las señales en múltiples receptores. A partir de estas diferencias, se puede calcular la posición con precisión. Es muy utilizado en sistemas que requieren una alta exactitud sin necesidad de sincronización perfecta entre todos los dispositivos.(15)
- Análisis de la Escena**  
 Consiste en utilizar sensores o cámaras para capturar y analizar una escena en tiempo real. A partir de las diferencias en la escena, se pueden detectar y localizar objetos o personas. Este método es más complejo, pero muy útil en aplicaciones que requieren reconocimiento visual o análisis detallado del entorno.(15)
- Proximidad**  
 Este método detecta cuando un objeto o persona se encuentra cerca de un punto de referencia conocido, utilizando sensores de contacto, capacitancia, etiquetas (tags) o tecnologías como NFC. Es un enfoque más simple y se usa en aplicaciones donde la precisión no es crítica, pero es importante saber si algo o alguien está dentro de una zona específica.(15)



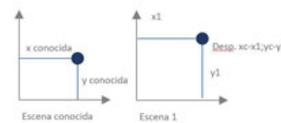
TRILATERACIÓN



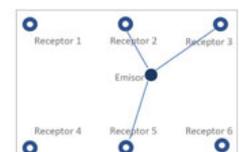
TRIANGULACIÓN



MULTILATERACIÓN



ANÁLISIS DE LA ESCENA



PROXIMIDAD

### 3.3 Comparación de Ultra-WideBand con otras tecnologías inalámbricas

A continuación, se presentarán los principales beneficios y limitaciones de UWB, seguidos de una comparación detallada con Wi-Fi y Bluetooth en términos de velocidad, consumo energético, seguridad, costes y penetración en el mercado. Esta comparación nos permitirá entender mejor en qué contextos UWB puede ser la tecnología más adecuada y dónde otras soluciones podrían ser más efectivas.

#### 3.3.1 Ventajas

- Alta velocidad de transmisión:

UWB permite velocidades de transmisión de varios Gbps, superando ampliamente los 22 Mbps de Wi-Fi y el 1 Mbps de Bluetooth. La tecnología UWB puede alcanzar velocidades de transmisión de hasta 100 Mbps – 500Mbps, incluso con una baja densidad espectral de potencia. (4,16)

- Bajo consumo energético:

Los dispositivos UWB consumen menos energía debido a sus niveles de potencia radiada extremadamente bajos (menos de 0,5 mW), en comparación con los cientos de mW que consumen Wi-Fi y Bluetooth. Esto se traduce en mayor autonomía de la batería, una característica muy valorada en dispositivos móviles.

- Alta seguridad:

UWB ofrece una seguridad intrínseca gracias a la dificultad para interceptar la señal sin conocer la secuencia exacta de transmisión. Además, la relación señal/ruido es tan baja que las transmisiones pueden confundirse con el ruido ambiental. También permite cifrado sin restricciones y la exclusión de dispositivos más allá de una distancia específica.(16)

- Simplicidad y bajo coste:

La ausencia de portadora reduce la necesidad de componentes de radiofrecuencia complejos, lo que simplifica la arquitectura del transceptor. No requieren componentes costosos como mezcladores, filtros, amplificadores y osciladores locales.(16)

#### 3.3.2 Desventajas

- Alcance limitado:

La capacidad de alcance de la señal UWB es limitada. Para aumentar el alcance, es necesario reducir la velocidad de transmisión, ya que existen límites en los niveles máximos de potencia permitidos, lo que puede afectar la eficiencia del sistema. (17)

- Sensibilidad a los obstáculos:

El posicionamiento UWB en interiores puede verse afectado por obstáculos que bloqueen la transmisión de la señal. Aunque obstáculos pequeños no afecten mucho debido a la difracción,

si la señal se bloquea por completo, la estación base no recibirá la señal, lo que generará imprecisiones en la localización.(4)

- Coste elevado de implementación:

A pesar de la simplicidad de su arquitectura, el despliegue global de soluciones basadas en UWB sigue siendo más costoso en comparación con tecnologías más establecidas, lo que limita su expansión en ciertos mercados.

Ultra Wideband se destaca frente a tecnologías como Wi-Fi y BLE por su alta precisión en la medición de distancias y localización. Mientras que Wi-Fi tiene una precisión de aproximadamente 5-15 metros y BLE 4.0 alcanza los 8 metros (mejorando a menos de 1 metro en BLE 5.1 con línea de vista), UWB logra una precisión inferior a 30 cm. Esta capacidad lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren posicionamiento exacto. Además, a pesar de operar en un rango similar al de Wi-Fi (hasta 150 metros), su menor interferencia y alta resolución espacial lo hacen superior en entornos congestionados.(8)

En cuanto a eficiencia energética, UWB consume considerablemente menos potencia que Wi-Fi, lo que lo hace ideal para dispositivos móviles y aplicaciones IoT. Aunque BLE es conocido por su bajo consumo de energía, su precisión de localización es inferior a la de UWB, especialmente en entornos complejos. Sin embargo, UWB presenta la desventaja de ser una tecnología menos extendida y con un coste de implementación más alto en comparación con Wi-Fi y BLE, que ya cuentan con una gran infraestructura y compatibilidad con múltiples dispositivos.

Technology	Accuracy	Range	Suitable for
Wi-Fi	 < 15 m	 < 150 m	 area detection
BLE	4.0  < 8 m	 < 75 m	 area detection
	5.1  < 1 m with line-of-sight		
UWB	 < 30 cm	 < 150 m	 area detection

Figura 3-8 Comparativa UWB (18)

## 4 ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

---

En esta sección, se presentan los algoritmos utilizados para la estimación de la posición en el escenario de simulación. Uno de los métodos clave que se ha considerado es el algoritmo ponderado de mínimos cuadrados basado en Bounding Box, B-WLS, propuesto por Yang, el cual introduce mejoras en la precisión al asignar diferentes pesos a las mediciones según su calidad. Además, se han implementado y comparado otros métodos de estimación, como; NLS (Nonlinear Least Squares), NLS con conocimiento de la condición de visión (Variante del NLS que incorpora información adicional basada en visión para mejorar la precisión en ciertos entornos) y LLS (Linear Least Squares).

El objetivo principal de esta comparación es evaluar el rendimiento de cada método en función de diferentes configuraciones de anclas, analizando su impacto en la estimación de posición. En las siguientes secciones, se detallará el funcionamiento de cada uno de estos algoritmos, junto con sus fundamentos matemáticos

### 4.1 Condiciones de propagación

En los sistemas de localización basados en distancia, la precisión de la estimación depende en gran medida de si la señal entre el nodo y el ancla se transmite sin obstrucciones o si ha sido afectada por interferencias en el entorno. Por esta razón, las mediciones pueden clasificarse en dos categorías principales:

- Mediciones LOS (Visión Directa): Ocurren cuando la señal de comunicación entre el nodo y el ancla no encuentra obstáculos en su trayectoria. Estas mediciones son generalmente precisas, ya que la distancia estimada corresponde a la distancia real entre los dispositivos.
- Mediciones NLOS (Sin Visión Directa): Se presentan cuando existen objetos en el entorno que bloquean o reflejan la señal antes de llegar al nodo. Esto provoca que la distancia medida sea mayor a la real debido a la propagación a través de un medio a velocidad diferente de la velocidad en el aire o a los efectos de refracción, difracción y reflexión de la señal, lo que introduce errores en la localización.

Para mitigar este problema, se considera una clasificación de las anclas basada en la calidad de la medición de distancia:

- Anclas DDP: Corresponden a aquellas anclas con visión directa LOS o bien NLOS de forma que llega a detectarse el rayo directo, cuyas mediciones son confiables y tienen un bajo error asociado; también incluye las NLOS en el que se ha podido detectar el trayecto directo y se obtiene una estimación precisa de la distancia.
- Anclas UDP: Son anclas cuya medición está afectada por obstrucciones NLOS que bloquean totalmente el rayo directo generando errores significativos.

Dado que las anclas UDP pueden inducir sesgos importantes en la estimación de posición, su contribución en los algoritmos de localización debe ponderarse de manera diferente como veremos a continuación en detalle con los métodos implementados.

## 4.2 Mínimos Cuadrados

### 4.2.1 Solución no lineal de mínimos cuadrados NLS

El método NLS es una técnica de estimación basada en la minimización de la suma de los residuos cuadrados (SSR, Sum of Squared Residuals). Este método se utiliza ampliamente en problemas de localización debido a su capacidad para manejar relaciones no lineales entre las variables de interés y las mediciones disponibles.

En el contexto de localización, la posición de un nodo desconocido se representa mediante el vector  $\mathbf{z} = (x, y)$ . Esta posición se estima minimizando la diferencia entre las distancias medidas  $r_i$  y las distancias teóricas calculadas con respecto a un conjunto de anclas con posiciones conocidas.

Dado un conjunto de  $N_{anc}$  anclas, donde  $N_{anc}$  representa el número total de anclas, con posiciones conocidas  $\mathbf{z}_i = (x_i, y_i)$ , las mediciones de distancia  $r_i$  entre el nodo desconocido y cada ancla se obtienen mediante técnicas como ToA (Time of Arrival) siendo  $d_i$  la distancia real. Estas mediciones se modelan como: (17)

$$r_i = d_i + \epsilon_i = \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\| + \epsilon_i$$

El calculo de los residuos lo podremos expresar como:

$$Res_i(\mathbf{z}) = r_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|$$

El objetivo de NLS es encontrar la posición  $\hat{\mathbf{z}}$  que minimice la suma de los cuadrados de estos residuos:

$$\hat{\mathbf{z}}_{NLS} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_{anc}} Res_i^2(\mathbf{z}) \right\}$$

Dado que la ecuación a minimizar es de naturaleza no lineal, no puede resolverse directamente mediante una expresión analítica cerrada. Por ello, es necesario emplear métodos numéricos iterativos, como el método de Gauss-Newton, para aproximar la solución.

Sin embargo, la aplicación del método de Gauss-Newton conlleva un alto coste computacional, ya que requiere la evaluación repetida de derivadas y la resolución de sistemas de ecuaciones en cada iteración. Esto puede volverse especialmente costoso cuando se trabaja con un gran número de anclas o cuando se requiere alta precisión en la estimación.

Para abordar esta dificultad, en la implementación realizada se ha optado por un enfoque basado en la comparación de los errores residuales en una malla de búsqueda (grid). En este método, se evalúa la función de error en distintas posiciones del espacio y se selecciona la que minimiza dicho error. Aunque esta estrategia puede ser menos eficiente en términos de resolución de precisión fina, permite evitar la complejidad computacional de los métodos iterativos avanzados.

#### 4.2.2 Método de mínimos cuadrados lineales LLS

El método Linear Least Squares es una aproximación lineal al problema de localización basado en el método de Nonlinear Least Squares. Su principal ventaja es que reduce la complejidad computacional al convertir el problema en un sistema de ecuaciones lineales, evitando la necesidad de métodos iterativos como Gauss-Newton.

La formulación de LLS se obtiene reescribiendo las ecuaciones de distancia y restando la ecuación de un ancla de referencia de las ecuaciones de las demás anclas. Esto permite expresar la estimación de la posición en términos de una ecuación lineal que se puede resolver directamente.(17)

El problema de localización se basa en la siguiente ecuación de distancia entre el nodo desconocido  $\mathbf{z} = (x,y)$  y un ancla  $\mathbf{z}_i = (x_i, y_i)$ :

$$d_i = \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

Dado que esta ecuación es no lineal, el método LLS linealiza el problema restando la ecuación de un ancla de referencia  $r$  a todas las demás ecuaciones, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:(19)

$$\hat{\mathbf{z}}_{LLS} = \frac{1}{2} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{p}_3$$

Donde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (x_1 - y_r) & (y_1 - y_r) \\ \vdots & \vdots \\ (x_{N_{anc}} - x_r) & (y_{N_{anc}} - y_r) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} \hat{r}_r^2 - \hat{r}_1^2 - k_{r,1} \\ \vdots \\ \hat{r}_r^2 - \hat{r}_{N_{anc}}^2 - k_{r,N_{anc}} \end{bmatrix},$$

Donde  $k_{r,i} = k_r - k_i$ , siendo  $r$  el ancla de referencia y  $k_i = x_i^2 + y_i^2$ .

#### 4.2.3 Solución no lineal de mínimos cuadrados con conocimiento de la condición de visión NLS-CCV

En este método, la estimación de la posición se obtiene minimizando la suma de los residuos cuadrados, al igual que en el método NLS estándar. Sin embargo, se introduce un factor de ponderación que diferencia entre las mediciones provenientes de anclas DDP y anclas UDP.

Dado que las ecuaciones involucradas siguen siendo no lineales, no pueden resolverse de manera analítica y requieren el uso de métodos numéricos como Gauss-Newton. Sin embargo, como este método puede ser computacionalmente exigente, se ha implementado una alternativa basada en búsqueda en malla (grid search) para encontrar la mejor estimación de posición mediante la evaluación de errores en distintas ubicaciones candidatas.

La ecuación de este método se define como:

$$Res_i(\mathbf{z}) = r_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{z}_i\|$$

$$\hat{\mathbf{z}}_{NLS-CCV} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^N \theta_i (Res_i^2(\mathbf{z})) \right\}$$

En este método, los pesos juegan un papel fundamental en la minimización de los errores cuadráticos. Al asignar  $\theta_i = 1$  a las mediciones en condición DDP, se otorga la máxima confianza a estas medidas, ya que se consideran más precisas. Por otro lado, las mediciones en condiciones UDP presentan un mayor sesgo e incertidumbre, por lo que se les asigna un peso menor  $\theta_i = 0.005$ , reduciendo su influencia en la estimación de la posición. (17)

La elección de un valor distinto de cero para  $\theta_i$  en el caso de UDP se debe a que, aunque estas mediciones contienen un error significativo, siguen proporcionando información útil. Si se estableciera  $\theta_i = 0$  para todas las mediciones UDP, el sistema descartaría completamente estos datos, lo que podría resultar en una pérdida de información valiosa y en un incremento del error final. En este sentido, la asignación de un peso reducido, pero no nulo permite aprovechar parcialmente la información de las anclas UDP sin introducir un impacto excesivo en la estimación de la posición.

El método NLS-CCV debería proporcionar resultados más precisos en comparación con los demás métodos, dado que incorpora información sobre la condición de visión de las mediciones. Sin embargo, cuando el número de anclas en condición de visión UDP es elevado, los errores pueden incrementarse significativamente, ya que la estimación de la posición se basará en un número reducido de mediciones con pesos relevantes. Además, en el caso particular en el que no haya anclas UDP (es decir, cuando todas las anclas tienen visión directa), el RMSE del método NLS y el del NLS-CCV deberían ser idénticos, ya que ambos estarían trabajando con las mismas mediciones sin necesidad de aplicar ponderaciones diferenciadas.(17)

#### 4.2.4 Problema del error NLOS

Los métodos basados en Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), como NLS y LLS, tratan todas las mediciones de distancia de manera uniforme, sin considerar la presencia de errores sesgados en los datos. Esto significa que errores grandes en la medición, como los provocados por entornos NLOS con UDP, afectan significativamente la minimización de la suma de los residuos cuadrados, lo que conduce a una estimación de posición menos precisa.

En condiciones reales, los errores de medición de distancia no siguen una distribución normal, sino que presentan un sesgo positivo y una cola derecha pesada en su distribución estadística. Este sesgo positivo es consecuencia de los efectos de multipath, donde las señales se reflejan en distintos obstáculos antes de llegar al receptor, lo que provoca mediciones de distancia más largas de lo real.

Para mitigar estos errores y mejorar la estimación de la posición en entornos NLOS en las que no se ha podido detectar el trayecto directo, se han propuesto diversas mejoras basadas en Weighted Least Squares, donde se asignan pesos diferenciados a cada medición de distancia en función de

su fiabilidad. Métodos como el WLS clásico ofrecen mejores resultados que OLS, pero requieren información adicional sobre los errores, como:

- Modelos de error para predecir su comportamiento.
- Varianza del error, que puede cambiar dinámicamente en el tiempo.
- Escala del error, que depende de las condiciones del entorno y el número de anclas disponibles.

Sin embargo, obtener esta información en tiempo real es un desafío, ya que muchas métricas de ponderación dependen de un conocimiento previo del entorno o requieren un elevado coste computacional. Por ello, el problema fundamental de WLS radica en cómo establecer pesos que sean tanto factibles de calcular como eficientes en la corrección del error NLOS. (20)

### 4.3 Algoritmo LLS Ponderado por Cuadro Delimitador (B-WLS)

Para abordar estas limitaciones, *Yuan Yang, Yubin Zhao, Marcel Kyas*; propusieron el método B-WLS, que introduce una estrategia de ponderación basada en un modelo robusto del error NLOS. A diferencia de WLS convencional, B-WLS estima pesos dinámicos utilizando información geométrica del entorno, reduciendo así la influencia de mediciones erróneas sin requerir información adicional sobre la distribución del error.

El método B-WLS se basa en tres observaciones clave sobre los errores en entornos NLOS y la forma en que algoritmos previos han abordado el problema:

1. Las métricas de error tradicionales pueden no ser un buen indicador del error NLOS. Parámetros como la varianza del error, la suma residual o los valores de ponderación clásicos no siempre reflejan con precisión la magnitud del error introducido por condiciones de NLOS. Esto se debe a que los errores de rango en NLOS son altamente variables y no siguen una distribución normal, lo que dificulta su modelado con métodos convencionales.(20)
2. Descartar mediciones NLOS puede resultar en pérdida de información. Aunque identificar correctamente una medida de distancia NLOS y descartarlo puede reducir errores, esto conlleva una reducción en la cantidad de datos disponibles, lo que se vuelve crítico cuando hay pocos anclajes en el entorno.(20)
3. Resolver LS con múltiples combinaciones de rangos conlleva una alta complejidad computacional. La inclusión de todas las combinaciones posibles de rangos para mejorar la estimación de la posición mediante LS incrementa drásticamente la carga computacional, lo que hace que el método no sea eficiente en tiempo real.(20)

#### 4.3.1 Bounding-Box

El método Bounding Box es una técnica de localización que se basa en la construcción de cajas delimitadoras alrededor de cada una de las anclas con posiciones conocidas. Su objetivo es acotar el área en la que puede encontrarse el nodo desconocido, utilizando las estimaciones de distancia obtenidas a partir del sistema de comunicación.

Para cada ancla  $z_i$  con coordenadas conocidas  $(x_i, y_i)$  se genera una caja delimitadora centrada en esa posición. El tamaño de la caja se determina a partir de la distancia estimada  $r_i$ , de modo que

los lados de la caja miden el doble de esta distancia. Es decir, las esquinas de la caja se definen como:(17)

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \text{ y } (x_i + d_i, y_i + d_i)$$

Esto significa que la caja tiene un ancho y un alto de  $2d_i$  aproximando todas las posibles ubicaciones del nodo en función de la incertidumbre en la medición de distancia.

Dado que múltiples anclas participan en la localización, se generan varias Bounding Boxes, una por cada ancla. La estimación final de la posición del nodo se obtiene considerando la intersección de estas cajas, ya que el nodo debe encontrarse en la región común a todas ellas. En caso de que no haya solapamiento, se obtendría la posición final con simetría.

El método Bounding-Box es simple y eficiente computacionalmente, ya que no requiere resolver ecuaciones complejas ni realizar optimización numérica. Sin embargo, su precisión depende en gran medida de la calidad de las mediciones de distancia. Para mantener la simplicidad del diseño, este método utiliza cuadrados en lugar de circunferencias para acotar las regiones posibles, lo que introduce un error geométrico inevitable. Aun así, ha demostrado ser especialmente útil para identificar y reducir el impacto de medidas NLOS, lo que lo convierte en una herramienta práctica en entornos reales con condiciones de propagación adversas.

#### 4.3.2 Cuadro delimitador como indicador de incertidumbre

Para superar estas limitaciones de los algoritmos existentes, B-WLS introduce un esquema de ponderación basado en el Cuadro Delimitador. En lugar de utilizar métricas estadísticas convencionales para asignar pesos, este método emplea la posición estimada por Bounding-Box (BB) como un indicador de incertidumbre en las mediciones de distancia.

De esta manera, la distancia entre la posición estimada por Bounding-Box y cada ancla, denominada  $d_{\text{Bounding-box-}a_i}$ , se utiliza para definir la incertidumbre de cada rango. Cuanto mayor sea la diferencia entre la distancia medida  $r_i$  y  $d_{\text{Bounding-box-}a_i}$ , mayor será la incertidumbre en la medición.

$$\hat{\mathbf{z}}_{\text{B-WLS}} = \frac{1}{2} (A^T W A)^{-1} A^T W p_3,$$

Donde:

$$W = C^{-1},$$

$$C = 4r_f^2 \sigma_f^2 + 2\sigma_f^4 + \text{diag}\{4\sigma_1^2 d_1^2 + 2\sigma_1^4, \dots, 4\sigma_i^2 d_i^2 + 2\sigma_i^4, \dots, 4\sigma_{Nanc}^2 d_{Nanc}^2 + 2\sigma_{Nanc}^4\},$$

Donde C es la matriz de covarianza de los errores, y cada término en C se calcula en función de la incertidumbre del rango medida como:

$$\sigma_i = r_i - d_{\text{Bounding-box-}a_i}$$

$$d_{\text{Bounding-box-}a_i} = \|\hat{\mathbf{z}}_{\text{Bounding-box}} - \mathbf{z}_i\|$$

El método B-WLS mejora la estimación de posición en entornos NLOS al combinar la eficiencia computacional de LLS con un esquema de ponderación basado en Bounding-Box, que asigna pesos en función de la incertidumbre de cada medición. Una de las principales ventajas de este

enfoque es su alta robustez frente a errores NLOS, ya que el método Bounding-Box permite identificar y atenuar el impacto de mediciones sesgadas sin requerir información previa sobre la distribución estadística de los errores. Esta característica lo convierte en una solución práctica y eficaz para escenarios reales, donde las condiciones de propagación pueden ser altamente variables e impredecibles.

# 5 ESPACIO DE TRABAJO EN LA SIMULACIÓN

**E**n este capítulo se describe el entorno en el que se han realizado las simulaciones, incluyendo la definición del área de trabajo, la distribución de las anclas, el modelo de propagación de señal, las condiciones de visión directa e indirecta, y el método de B-WLS utilizado en la localización del nodo.

## 5.1 Área de simulación

La simulación se ha desarrollado en un entorno bidimensional de 5m x 5m, 10m x 10m y 15m x 15m; representando un escenario típico de localización en interiores o exteriores.

Para realizar las estimaciones de posición, el área se ha discretizado en una malla de resolución 0.5m, generando una cuadrícula que permite evaluar distintas posiciones del nodo en métodos como NLS y NLS con conocimiento de condición de visión.

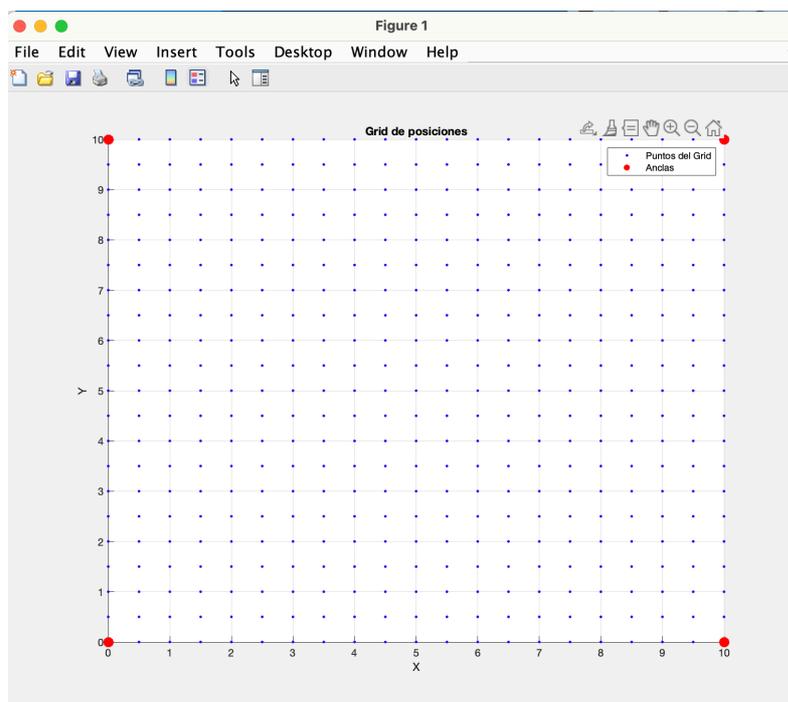


Tabla 5-1 Área de simulación 10mx10m

## 5.2 Modelado del error en mediciones de distancia para simulación y evaluación de métodos de localización

El error en la medición de distancias mediante TOA en entornos interiores se debe principalmente a dos factores:

- Errores por dispersión multipath, que afectan a cualquier señal reflejada en el entorno.
- Errores causados por la condición de camino directo no detectado (Undetected Direct Path - UDP), donde la señal directa no es identificada correctamente.

En este trabajo, se ha seguido el modelo propuesto por Alavi y Pahlavan en *Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements* para caracterizar estos errores y simular su impacto en el método B-WLS. (21)

La medición de distancia se modela como la suma de la distancia real y un error asociado:

$$r_i = d_i + \epsilon_W(d_i)$$

El error total en la estimación de distancia se modela como:

$$\epsilon_W(d_i) = \epsilon_{M,W}(d_i) + \xi_W(d_i)\epsilon_{U,W}(d_i)$$

Donde:

- $\epsilon_{M,W}(d)$  representa el error por dispersión multipath.
- $\epsilon_{U,W}(d)$  representa el error por condición UDP.
- $\xi_W(d)$  es una variable aleatoria que toma el valor 1 cuando ocurre una condición UDP y 0 en caso contrario

El término  $\epsilon_{M,W}(d)$  se modela como una variable aleatoria Gaussiana escalada en función de la distancia:

$$\epsilon_{M,W}(d) = G(m_{M,W}, \sigma_{M,W}) \log(1 + d)$$

Mientras que  $\epsilon_{U,W}(d)$  se modela también con una distribución gaussiana, pero con media positiva del valor más significativo para reflejar el sesgo en la estimación.

$$\epsilon_{U,W}(d) = G(m_{U,W}, \sigma_{U,W})$$

Este modelo se ha implementado en el proceso de simulación para generar mediciones de distancia más realistas en escenarios interiores con condiciones de NLOS. Esto permite poner a prueba todos los métodos de localización considerados, evaluando su desempeño en condiciones realistas que incluyen errores de medición significativos, como los provocados por entornos NLOS.(21)

### 5.2.1 Parámetros del Sistema

- Ancho de Banda: La simulación se basa en un sistema de Ultra-Wideband con un ancho de banda de  $W=500$  MHz.  
Los parámetros empleados para modelar el error de medición tanto para condiciones DDP como para UDP son:
  - **Error DDP:**
    - Media:  $m_{M,W} = 0.21$  m.
    - Desviación estándar:  $\sigma_{M,W} = 26.9 / 100$  m.
  - **Error UDP:**
    - Media:  $m_{U,W} = 1.62$  m.
    - Desviación estándar:  $\sigma_{U,W} = 80.9 / 100$  m.
- Modelo de Propagación: Se considera un modelo basado en mediciones empíricas, siguiendo el modelo de Alavi para los errores NLOS y LOS.
- Precisión de la medida de distancia: Depende del tipo de ancla (DDP o UDP), con un error típico del orden de decenas de centímetros en condiciones DDP y varios metros en condiciones UDP.

### 5.3 Distribución de las anclas en el entorno

Para evaluar el rendimiento de los distintos algoritmos de localización, se han realizado simulaciones en áreas de 5m x 5m, 10m x 10m y 15m x 15m. Sin embargo, el análisis principal se centra en el área de 10m x 10m, donde se explicará en detalle la disposición de las anclas utilizadas. Las anclas son dispositivos de referencia con posiciones fijas y conocidas, utilizadas para estimar la ubicación del nodo móvil en función de las mediciones de distancia. Se han considerado diferentes configuraciones de anclas para evaluar su impacto en la precisión de los algoritmos:

- Cuatro anclas: Se ubican en los vértices del área, es decir:  
 $(0,0); (10,0); (0,10); (10,10);$
- Cinco anclas: Se añade un ancla adicional en el centro de un borde, por ejemplo:  
 $(0, 0); (10, 0); (0, 10); (10, 10); (5, 0);$
- Seis anclas: Se agregan anclas en el centro de los lados del área, ubicándolas en:  
 $(0, 0); (10, 0); (0, 10); (10, 10); (5, 0); (5, 10);$
- Siete anclas: Se incorporan anclas en posiciones intermedias, las anclas quedan distribuidas de la siguiente forma:  
 $(0, 0); (10, 0); (0, 10); (10, 10); (5, 0); (5, 10); (10,5);$
- Ocho anclas: Se incorporan anclas en posiciones intermedias dentro del área para mejorar la cobertura.  
 $(0, 0); (10, 0); (0, 10); (10, 10); (5, 0); (5, 10); (10,5); (0,5);$
- Doce anclas, las posiciones quedarían de la siguiente forma:

(0, 0); (10, 0); (0, 10); (10, 10); (5, 0); (5, 10); (10,5); (0,5); (2.5,0); (7.5,0); (2.5,10);  
(7.5,10);

Para evaluar el rendimiento de los algoritmos de localización NLS, NLS-CCV, LLS y B-WLS, se han realizado 300 iteraciones en cada configuración específica de simulación. En cada una de estas iteraciones, se mantiene constante tanto el número total de anclas como el número de anclas con condición de visión UDP.

Sin embargo, dentro de estas 300 iteraciones, las anclas que se asignan como UDP cambian aleatoriamente en cada iteración. Esto permite analizar el impacto del error NLOS considerando múltiples distribuciones de anclas UDP dentro del área de simulación.

En cada iteración, se genera una posición aleatoria del nodo, lo que da lugar a un conjunto distinto de mediciones de distancia nodo-ancla. A partir de estas mediciones, se evalúan todos los métodos de localización considerados. De este modo, se realizan un total de 300 iteraciones, cada una con una posición diferente del nodo, lo que permite analizar el rendimiento promedio de los métodos bajo distintas configuraciones espaciales y condiciones de propagación.

Para cada iteración, se generan mediciones de distancia afectadas por el error y se entregan a todos los métodos de localización bajo las mismas condiciones. Posteriormente, se calcula el error cuadrático medio, que mide la diferencia entre la posición estimada y la posición real del nodo.

Finalmente, el RMSE se obtiene a partir de los errores acumulados en las 300 iteraciones, proporcionando una medida global del desempeño de cada método para una configuración específica de número total de anclas y número de anclas UDP. Esto permite evaluar de manera clara el impacto del error NLOS en la precisión de la localización.

### 5.3.1 Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE es una métrica utilizada para evaluar la precisión de la estimación de posición en los algoritmos de localización. Representa la raíz cuadrada del promedio de los errores cuadráticos entre la posición estimada  $\hat{z}$  y la posición real del nodo  $z$ .

Se puede expresar matemáticamente como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\hat{z}_i - z_i\|^2}$$

Siendo  $N$  el número de realizaciones.

El RMSE proporciona una medida agregada del error de estimación, permitiendo comparar el desempeño de distintos métodos de localización. Un valor más bajo de RMSE indica una mayor precisión en la estimación de la posición del nodo.

### 5.3.2 Métodos de Localización y representación gráfica

Para evaluar los algoritmos de localización, se han considerado diferentes variantes del enfoque de mínimos cuadrados, incluyendo versiones ponderadas. En particular, el método principal, B-WLS, incorpora el uso del método Bounding Box. En la *Figura 5-1* se ilustra el principio del

método de mínimos cuadrados en un caso ideal sin error en las mediciones. Se muestran las posiciones reales del nodo y de las anclas, así como las circunferencias centradas en cada ancla, cuyo radio corresponde a la distancia real al nodo. En ausencia de errores, todas las circunferencias intersectan en la posición real del nodo, lo que representaría el caso ideal.

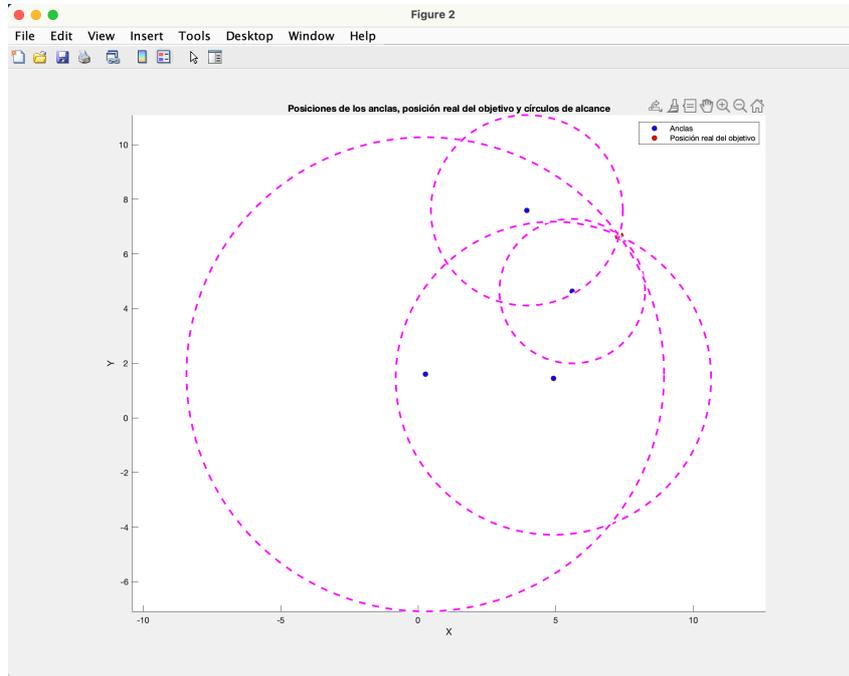


Figura 5-1 Método de mínimos cuadrados

Por otro lado, la Figura 5-2 muestra el método Bounding Box, en el cual se generan regiones rectangulares delimitadas a partir de las mediciones de distancia. La intersección de estas regiones permite acotar la ubicación del nodo de manera más robusta frente a errores NLOS en las mediciones.

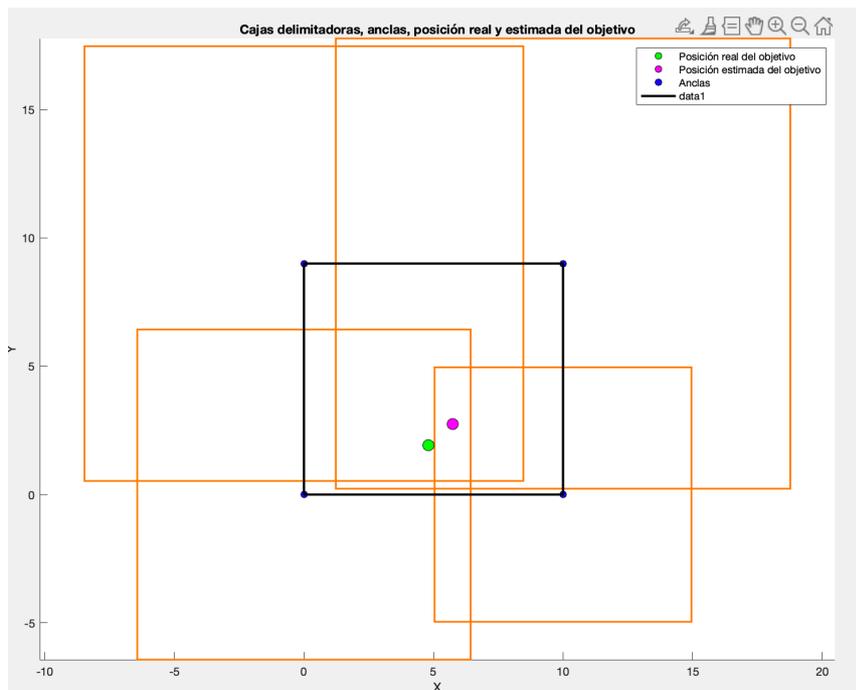


Figura 5-2 Método Bounding-Box

Ambos métodos presentan ventajas y desventajas dependiendo del nivel de error en las mediciones y de la presencia de condiciones de no visión directa.

## 6 RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones realizadas en MATLAB. El objetivo principal es evaluar el rendimiento del método B-WLS y compararlo con otros algoritmos de localización, como NLS, NLS-CCV y LLS, bajo diferentes configuraciones de anclas y condiciones de propagación.

Para cada experimento, se han generado 300 posiciones aleatorias del nodo dentro de un área específica de 5mx5m, 10mx10m y 15mx15m. Se han llevado a cabo simulaciones con distintos números de anclas y variaciones en las condiciones de propagación.

En cada simulación con N anclas, una parte de ellas se consideran anclas DDP, mientras que otra parte son anclas UDP, generadas mediante una variable aleatoria. Para garantizar que el problema de localización sea resoluble en 2D, siempre se ha asegurado que haya al menos 3 anclas DDP, ya que con menos de tres medidas confiables no sería posible obtener una solución razonable.

### 6.1 Análisis de los algoritmos para un área 10m x 10m

TotalAnclas	NumAnclasUDP	RMSE_NLS (m)	RMSE_NLS_CCV (m)	RMSE_LLS (m)	RMSE_BWLS (m)
4	0	0,355458972	0,355458972	0,313303023	0,306037601
4	1	0,990980651	0,441638009	1,223144851	0,812091894
5	0	0,334854341	0,334854341	0,318026637	0,314541446
5	1	0,869854982	0,389893957	1,013192293	0,605652985
5	2	1,153700879	0,461894709	1,404263142	0,896164424
6	0	0,321236865	0,321236865	0,291164879	0,2600551
6	1	0,726591805	0,36586391	0,859625684	0,4485714
6	2	0,949568754	0,372602056	1,169943052	0,598512883
6	3	1,15192088	0,510051143	1,463656823	0,890627891
7	0	0,315327264	0,315327264	0,299163462	0,278505957
7	1	0,661910518	0,344394306	0,747936628	0,393694094
7	2	0,859378121	0,35844899	1,119706378	0,582483042
7	3	1,01689894	0,402054814	1,301211142	0,736903509
7	4	1,174920081	0,464978193	1,521820621	0,880694523

<b>8</b>	0	0,320031097	0,320031097	0,284175786	0,236868036
<b>8</b>	1	0,552372852	0,310133293	0,679357543	0,294675908
<b>8</b>	2	0,743432747	0,354632373	0,977323618	0,379724295
<b>8</b>	3	0,925705899	0,34980467	1,204559725	0,462450908
<b>8</b>	4	1,089182881	0,414512347	1,323592609	0,636050441
<b>8</b>	5	1,162619043	0,459708429	1,470839528	0,776369875
<b>12</b>	0	0,303179291	0,303179291	0,265419817	0,218768918
<b>12</b>	1	0,463311108	0,296437266	0,516606027	0,242134523
<b>12</b>	2	0,618466877	0,317079883	0,748527145	0,292892317
<b>12</b>	3	0,711331203	0,322489605	0,834309945	0,287953265
<b>12</b>	4	0,824914577	0,339822546	1,01200575	0,32280524
<b>12</b>	5	0,891172404	0,326408168	1,174511497	0,388391689
<b>12</b>	6	1,028427554	0,359085713	1,298369512	0,455015051
<b>12</b>	7	1,107727317	0,37511701	1,434974611	0,558491448
<b>12</b>	8	1,183189975	0,417406281	1,454161637	0,60392501
<b>12</b>	9	1,34281293	0,488028965	1,664824032	0,74260927

Tabla 6-1 Resultados Área 10m x10m

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones permiten analizar el desempeño del método B-WLS en comparación con otros algoritmos de localización, considerando diferentes configuraciones de anclas y condiciones de propagación.

En términos generales, se observa que el error cuadrático medio aumenta a medida que el número de anclas UDP incrementa. Sin embargo, el método B-WLS logra mantener un rendimiento más estable en comparación con los otros métodos analizados NLS y LLS.

Para ver más en detalle del RMSE para cada método, vamos a analizar las gráficas correspondientes a cada configuración de número total de anclas.

### 6.1.1 Cuatro Anclas totales en un área 10m x10m

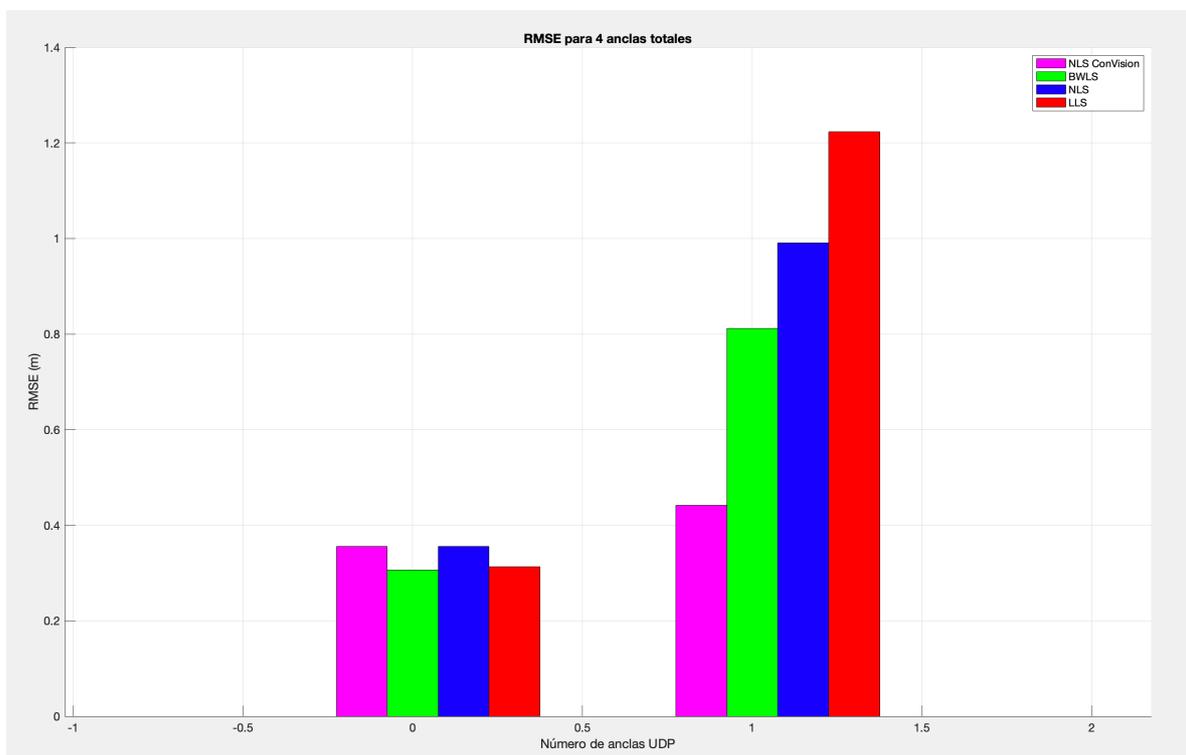


Figura 6-1 Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 10m x10m

### 6.1.2 Cinco Anclas totales en un área 10m x10m

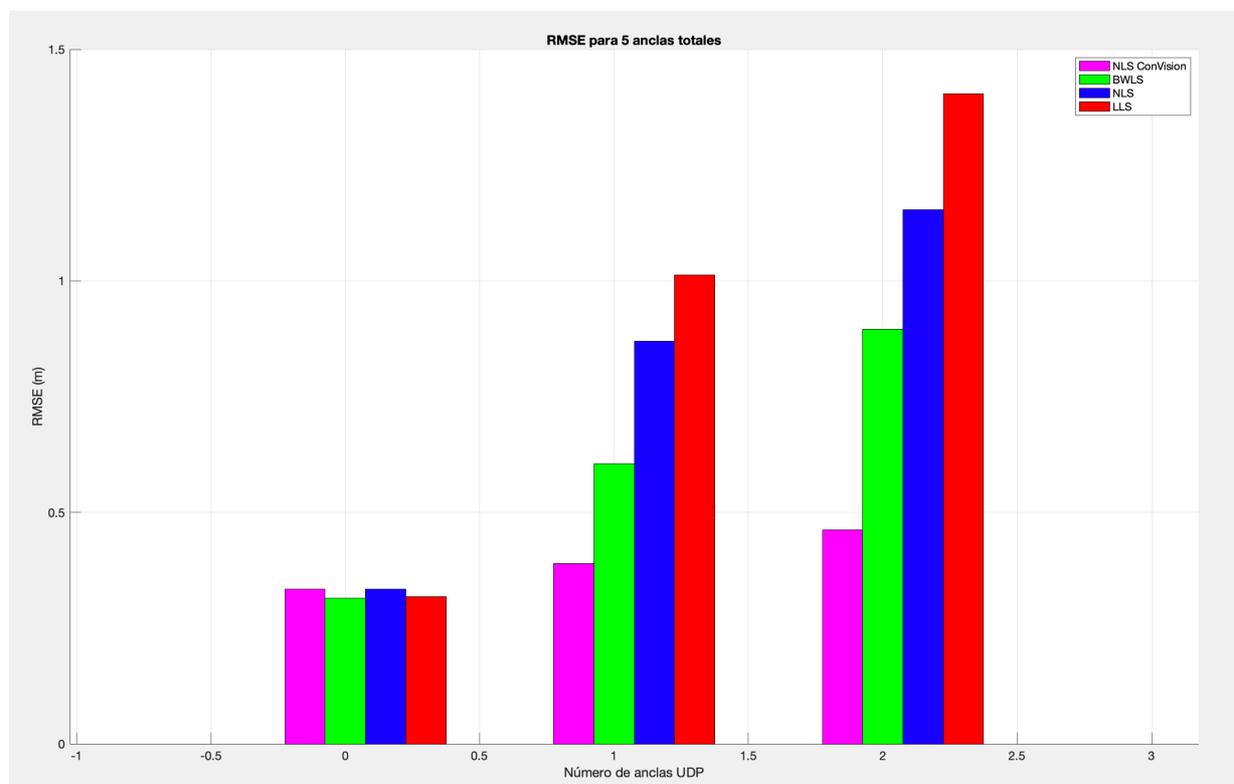


Figura 6-2 Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 10m x10m

### 6.1.3 Seis Anclas totales en un área 10m x10m

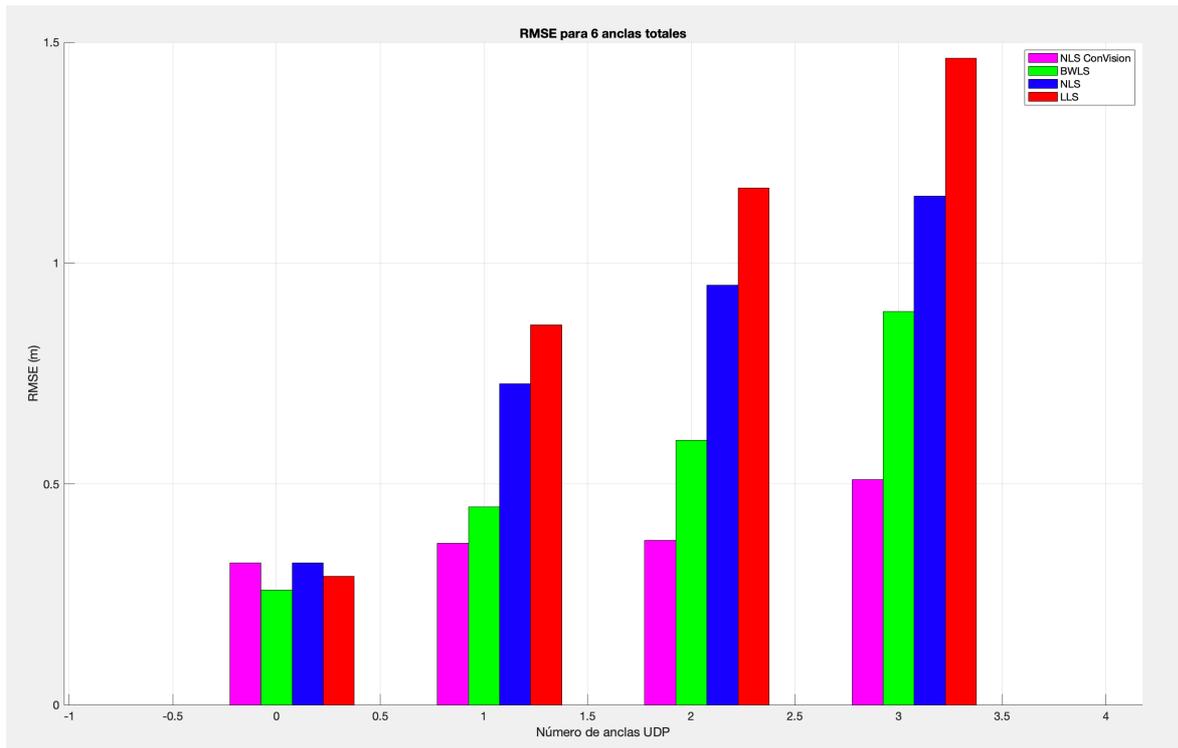


Figura 6-3 Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 10m x10m

### 6.1.4 Siete Anclas totales en un área 10m x10m

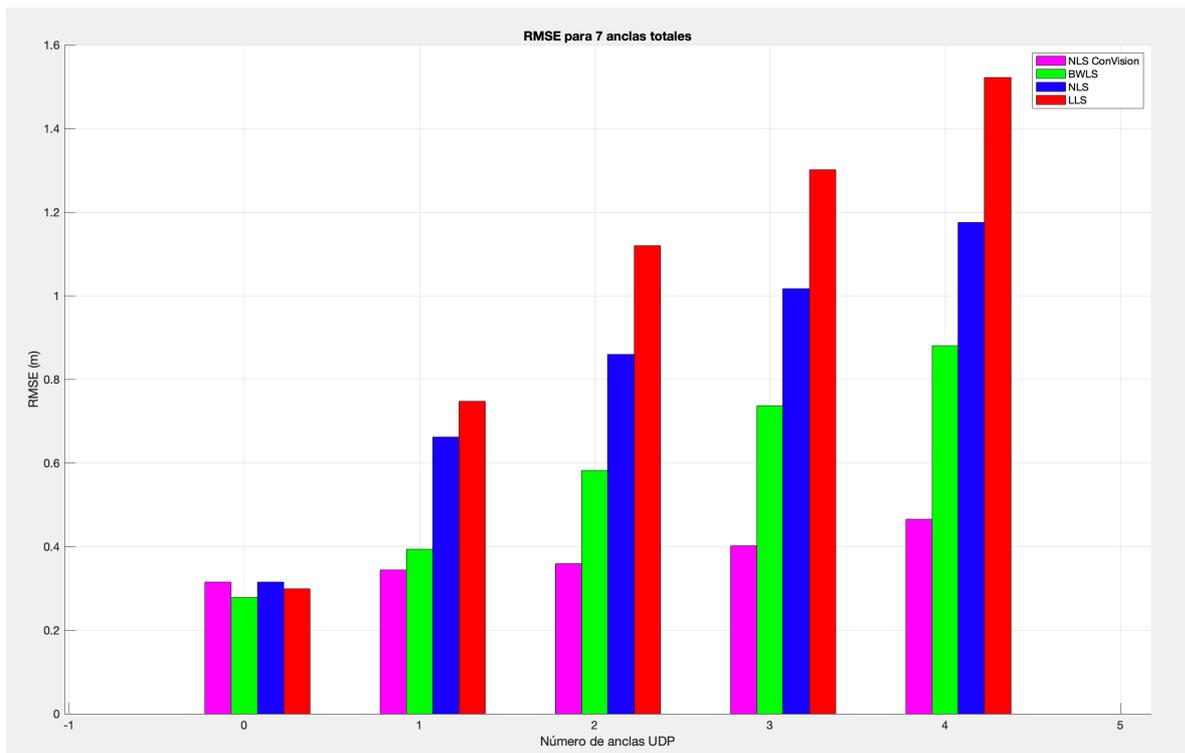


Figura 6-4 Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 10m x10m

### 6.1.5 Ocho Anclas totales en un área 10m x10m

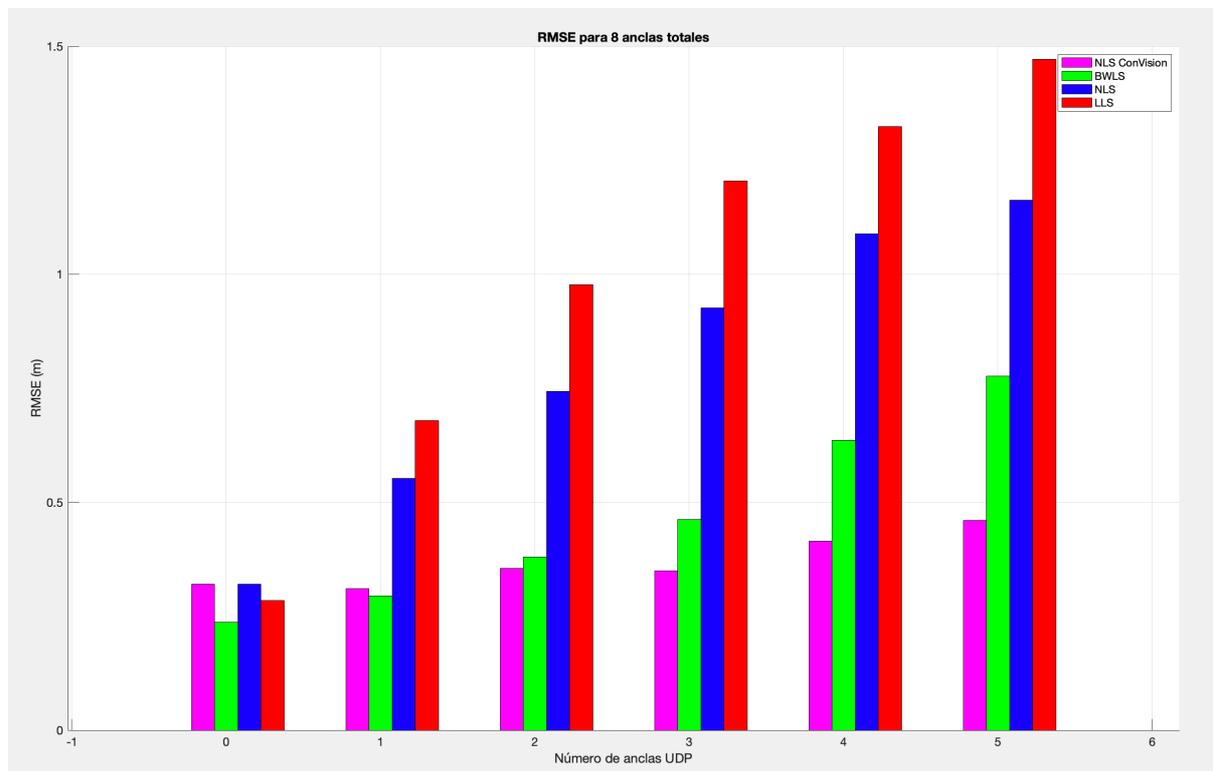


Figura 6-5 Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 10m x10m

### 6.1.6 Doce Anclas totales en un área 10m x10m

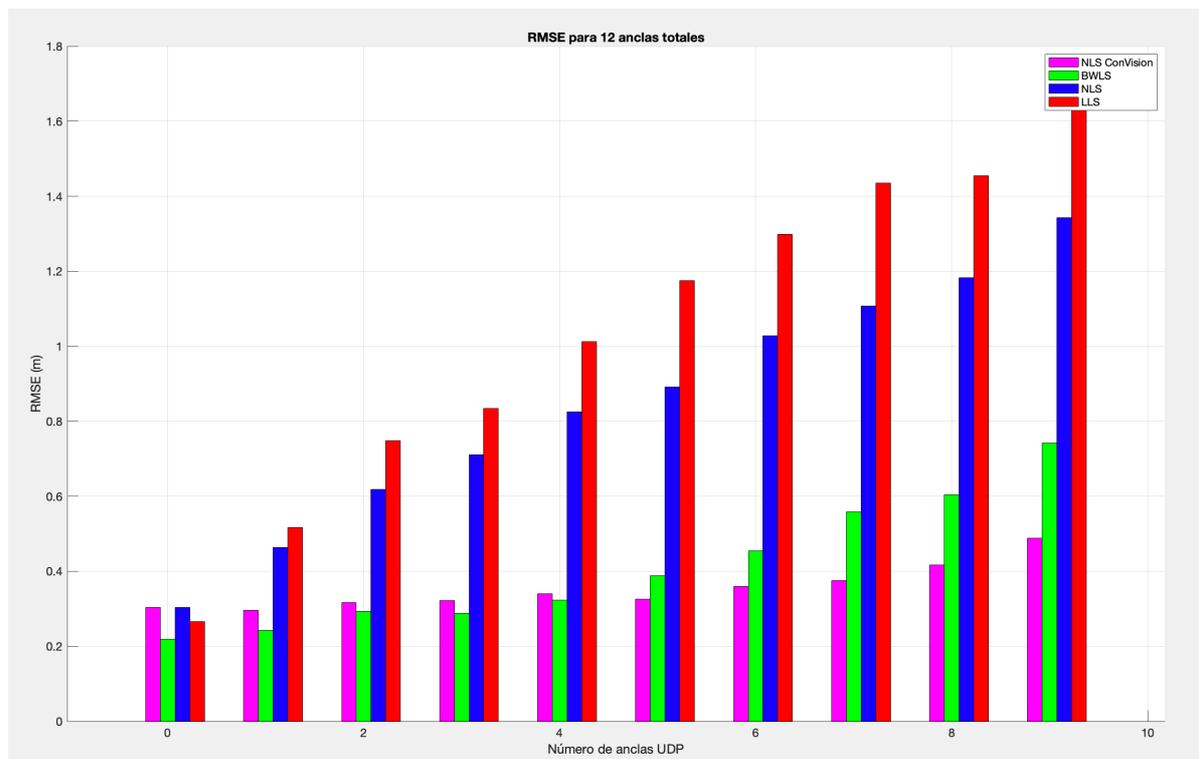


Figura 6-6 Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 10m x10m

Al analizar los resultados obtenidos, se pueden destacar los siguientes puntos clave:

1. **Escenarios sin anclas UDP:** Cuando el número de anclas UDP es cero, los valores de RMSE para los métodos NLS y NLS-CCV son idénticos, como era esperable al no haber necesidad de ponderar las mediciones. En estos casos, el método B-WLS presenta un RMSE ligeramente inferior al de los demás algoritmos. Este resultado no se debe a una mayor precisión teórica del método, sino a que la implementación de NLS y NLS-CCV se ha realizado mediante una búsqueda en malla (grid). Esta estrategia limita la precisión alcanzable, ya que el RMSE mínimo está condicionado por la resolución del grid. Si se empleara una malla más densa, es razonable esperar que los valores de RMSE obtenidos por NLS y NLS-CCV fueran menores y, posiblemente, inferiores a los de B-WLS en escenarios con condiciones ideales de propagación, sin embargo, se ha escogido un valor razonable para mantener limitada la carga computacional del algoritmo NLS.
2. **Impacto de un bajo número de anclas UDP:** A medida que se introduce un pequeño número de anclas UDP, el método B-WLS continúa mostrando un RMSE inferior al de los métodos que no distinguen entre condiciones de propagación, como LLS y NLS. Esto indica que su estrategia de ponderación basada en Bounding Box es efectiva para reducir el impacto de mediciones NLOS. Aunque en algunos casos el RMSE de B-WLS también resulta inferior al de NLS-CCV, esto se debe a la implementación de este último mediante búsqueda en malla, como se comentó anteriormente. En general, NLS-CCV representa la cota inferior a la que B-WLS aspira a acercarse, ya que ambos métodos buscan atenuar el efecto de las anclas UDP.
3. **Escenarios con un alto número de anclas UDP:** Incluso cuando el número de anclas UDP es elevado (aproximadamente  $\text{NumAnclasUDP} \approx N-3$ ), el RMSE de B-WLS sigue siendo notablemente más bajo que el de NLS y LLS. Esto demuestra que el método es más robusto ante la presencia de errores de propagación y degradación en las mediciones.
4. Como era de esperar, el método NLS-CCV, al contar con información ideal sobre las mediciones, presenta el mejor desempeño en términos de RMSE. Esto es un comportamiento lógico, ya que su conocimiento perfecto de las condiciones le permite superar incluso a B-WLS.

## 6.2 Análisis de los algoritmos en un área 5m x 5m

TotalAnclas	NumAnclasUDP	RMSE_NLS (m)	RMSE_NLS_CCV (m)	RMSE_LLS (m)	RMSE_BWLS (m)
4	0	0,337029907	0,337029907	0,259424992	0,259390348
4	1	0,957322403	0,333242425	1,332472511	0,628538794
5	0	0,286709696	0,286709696	0,239956851	0,223576764
5	1	0,769492004	0,316299338	1,147897078	0,477705948
5	2	1,046335036	0,385180902	1,475392108	0,795250298

6	0	0,281443572	0,281443572	0,235285579	0,200394108
6	1	0,667877962	0,289221968	0,93242918	0,302504782
6	2	0,957291355	0,310917597	1,312356701	0,514801708
6	3	1,173430036	0,384946473	1,563858679	0,817373636
7	0	0,263926321	0,263926321	0,224819581	0,187612528
7	1	0,589080617	0,289187208	0,837724768	0,262938898
7	2	0,793383153	0,310312556	1,204285473	0,348961887
7	3	0,960112809	0,337182445	1,430473146	0,54793009
7	4	1,211820523	0,364571269	1,652961612	0,79764385
8	0	0,266001445	0,266001445	0,21237739	0,147887714
8	1	0,545433787	0,275726718	0,747328146	0,184960504
8	2	0,745845709	0,276502331	1,035264181	0,260092979
8	3	0,911826385	0,303116464	1,326910981	0,346371231
8	4	0,99527713	0,313011727	1,471058032	0,511374832
8	5	1,176621116	0,35639674	1,656749873	0,743705472
12	0	0,258455891	0,258455891	0,197448104	0,141050704
12	1	0,431505832	0,262919682	0,543360278	0,154975985
12	2	0,583554994	0,263623779	0,790297264	0,170097732
12	3	0,687240587	0,276796723	0,951732011	0,191613252
12	4	0,755771036	0,278803315	1,084822829	0,227391466
12	5	0,866933667	0,288894849	1,241216772	0,275002294
12	6	1,012108408	0,299485101	1,425112718	0,312782026
12	7	1,09990013	0,309569806	1,600086419	0,431582214
12	8	1,196848199	0,32747432	1,66914478	0,497375971
12	9	1,229237452	0,383582452	1,707024864	0,663915428

Tabla 6-2 Resultados para área 5m x5m

### 6.2.1 Cuatro Anclas totales en un área 5m x 5m

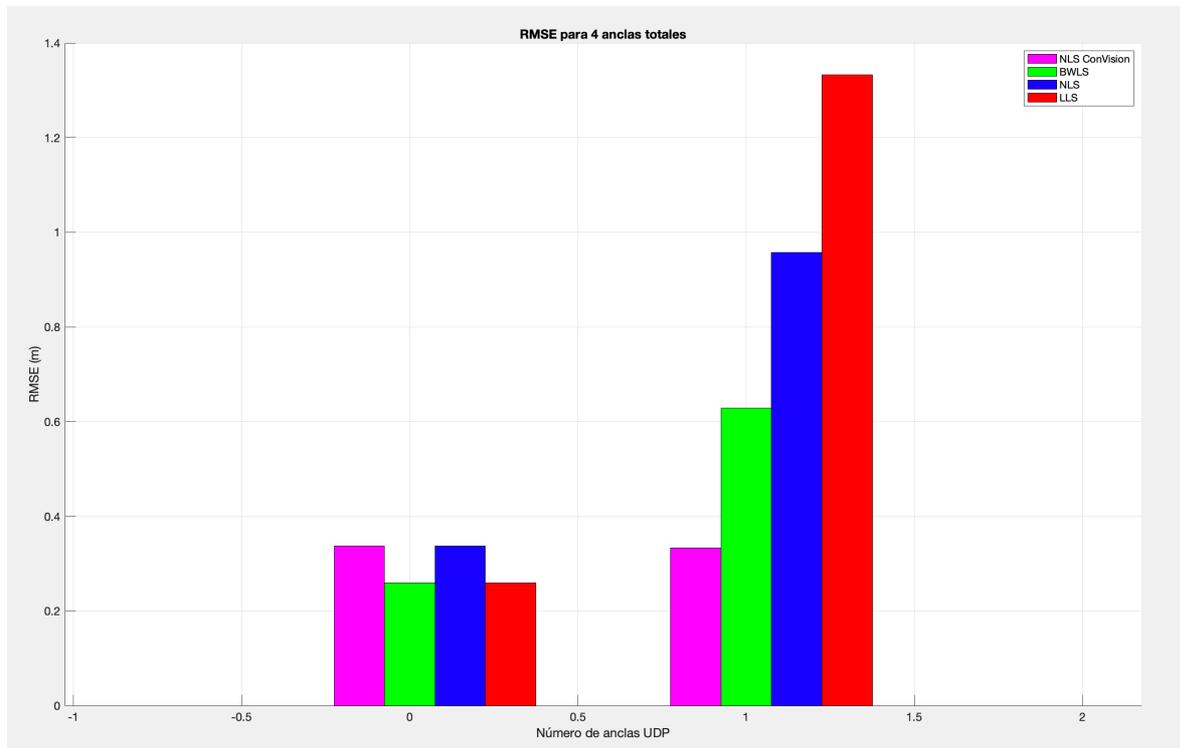


Figura 6-7 Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 5m x 5m

### 6.2.2 Cinco Anclas totales en un área 5m x 5m

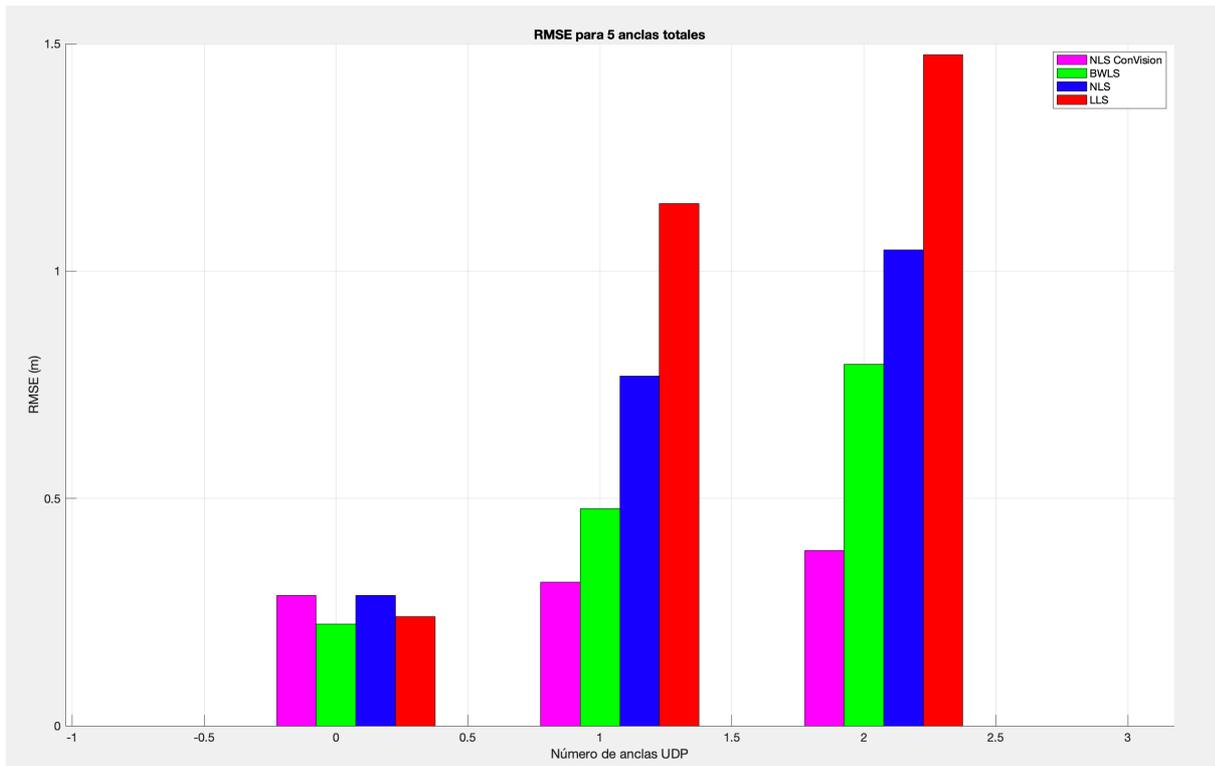


Figura 6-8 Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 5m x 5m

### 6.2.3 Seis Anclas totales en un área 5m x 5m

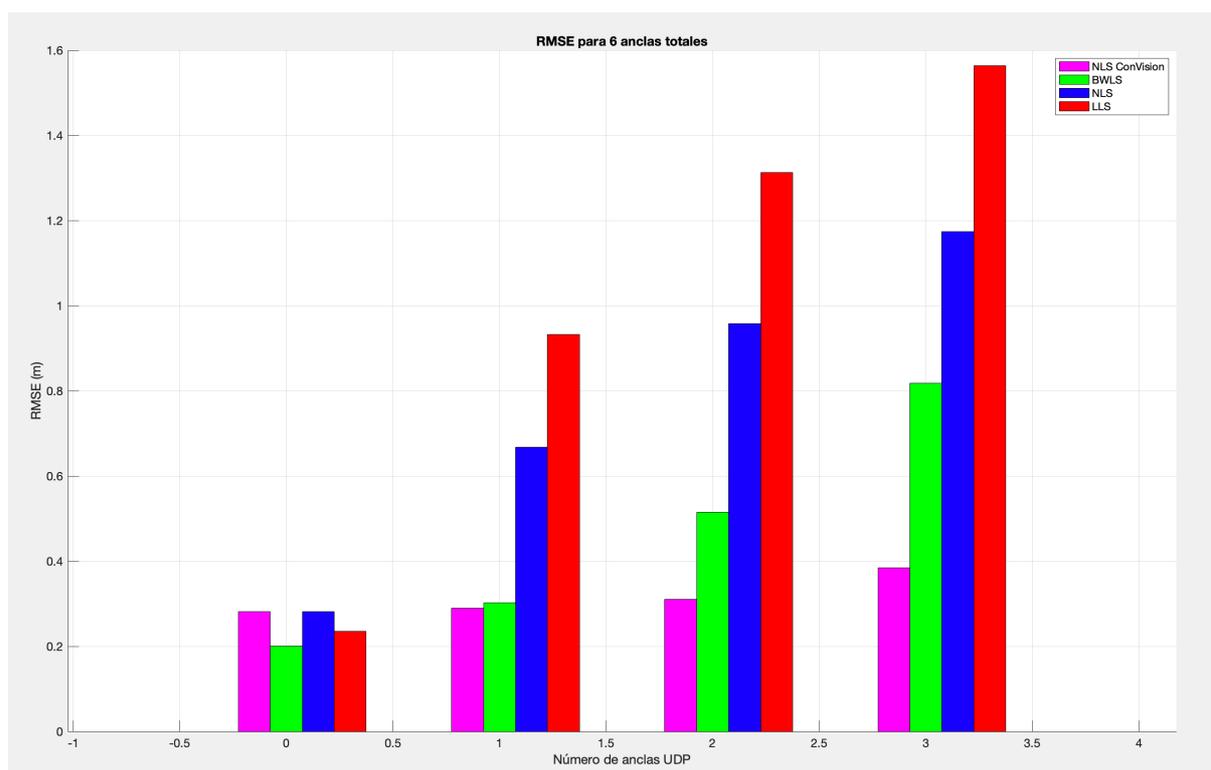


Figura 6-9 Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 5m x 5m

### 6.2.4 Siete Anclas totales en un área 5m x 5m

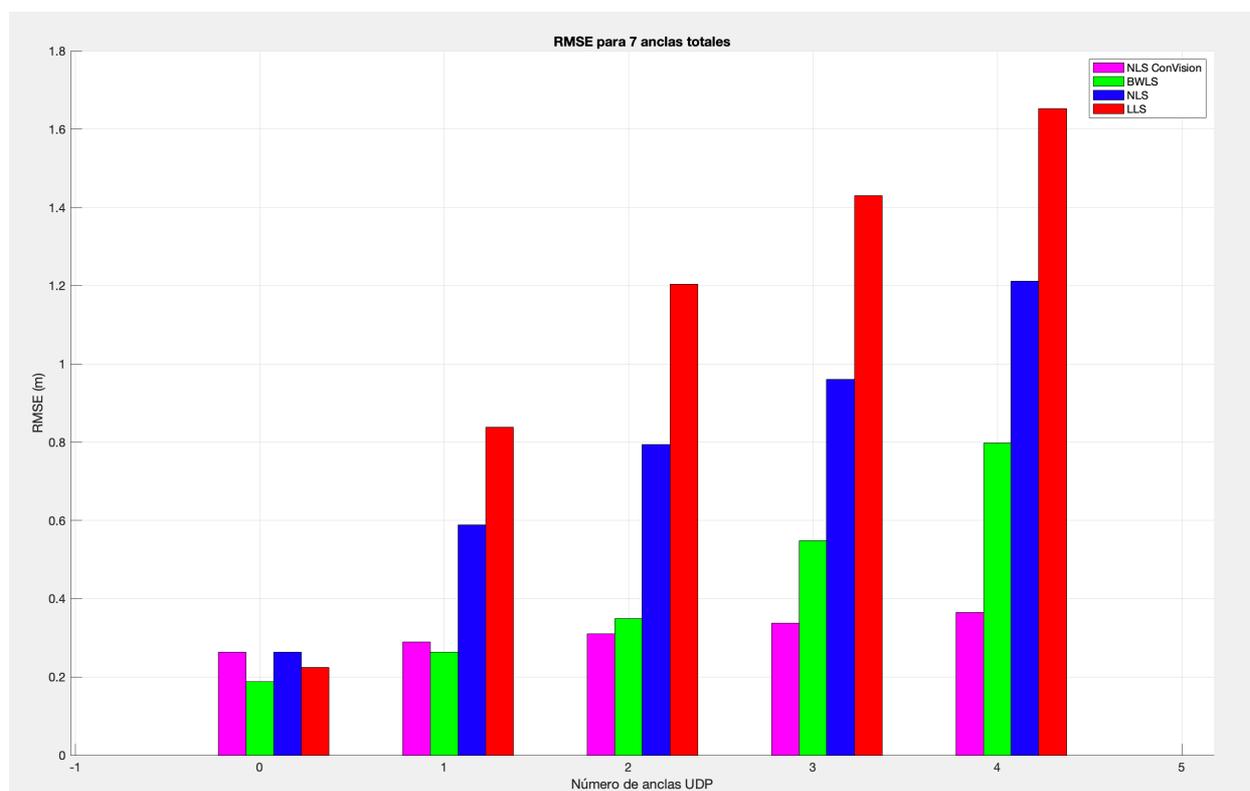


Figura 6-10 Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 5m x 5m

6.2.5 Ocho Anclas totales en un área 5m x 5m

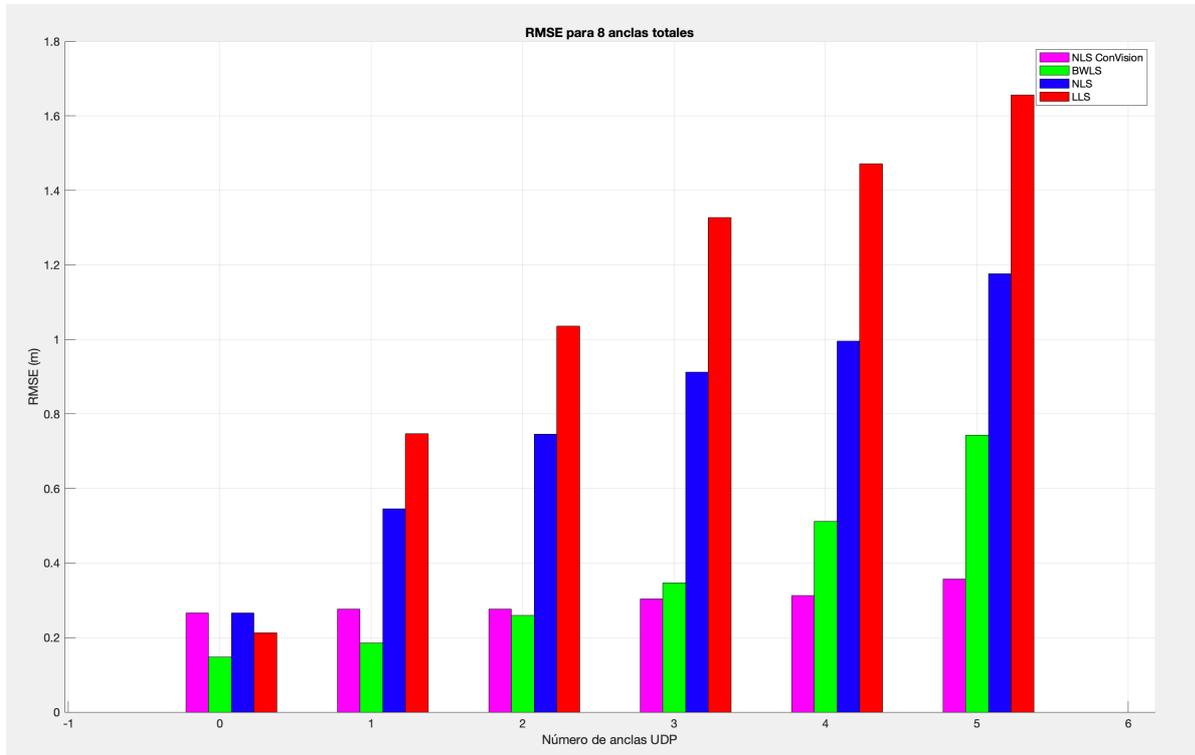


Figura 6-11 Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 5m x 5m

6.2.6 Doce Anclas totales en un área 5m x 5m

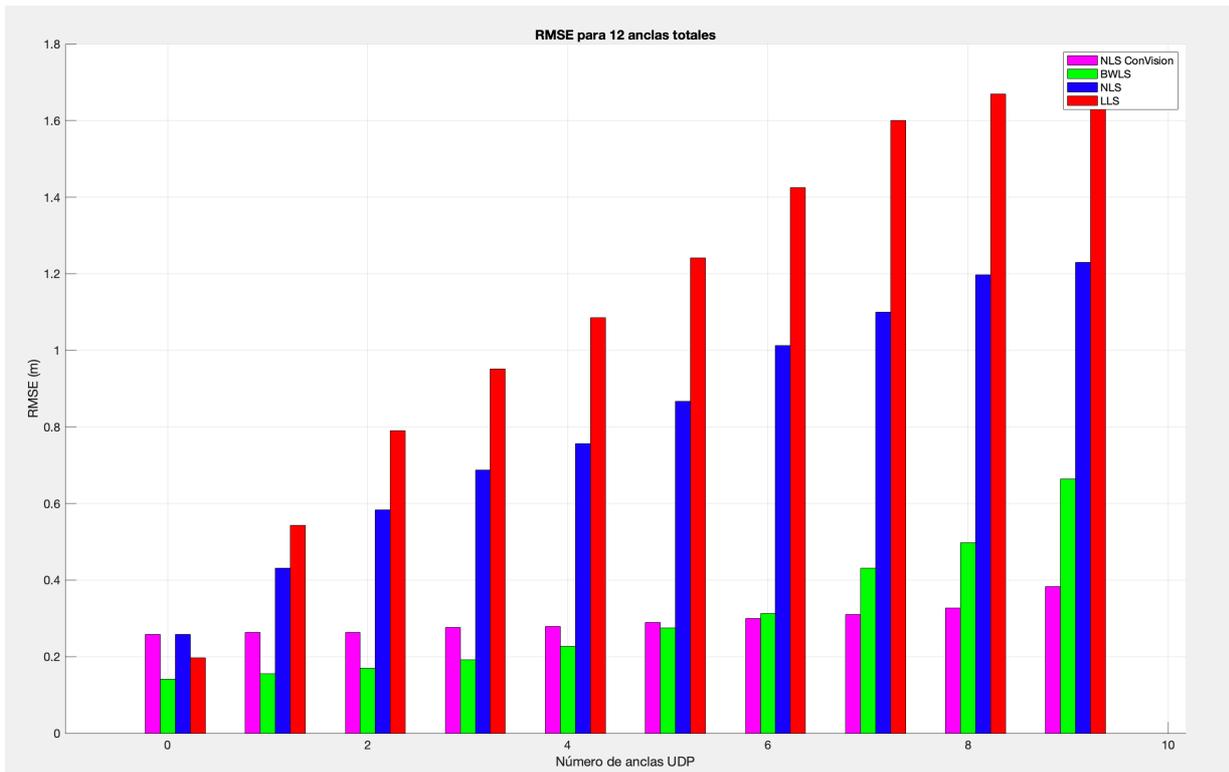


Figura 6-12 Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 5m x 5m

### 6.3 Análisis de los algoritmos en un área 15m x 15m

TotalAnclas	NumAnclasUDP	RMSE_NLS (m)	RMSE_NLS_CCV (m)	RMSE_LLS (m)	RMSE_BWLS (m)
4	0	0,419228404	0,419228404	0,373783761	0,367869671
4	1	1,091833332	0,497684514	1,278008402	0,859861918
5	0	0,385382223	0,385382223	0,358370832	0,357889183
5	1	0,859324844	0,436987676	0,932729994	0,705711997
5	2	1,170654084	0,555688498	1,340459885	1,030140289
6	0	0,371936866	0,371936866	0,371689984	0,339155543
6	1	0,742212918	0,400656738	0,956724742	0,517315291
6	2	0,972565087	0,466555122	1,117331355	0,73473263
6	3	1,237125807	0,542022014	1,44894268	0,967724188
7	0	0,351927694	0,351927694	0,346095291	0,331836869
7	1	0,6626678	0,350317153	0,761020425	0,482825319
7	2	0,940476429	0,405865205	1,100199819	0,650985392
7	3	1,081675292	0,438530743	1,267757631	0,765872327
7	4	1,249693419	0,538367539	1,479883949	0,959292404
8	0	0,344532804	0,344532804	0,328076121	0,263615997
8	1	0,608465016	0,373456711	0,735764137	0,386497445
8	2	0,867536841	0,357389721	0,993737129	0,480877026
8	3	0,926377167	0,39791694	1,147161318	0,571916908
8	4	1,157411439	0,442139956	1,367465597	0,770163724
8	5	1,211137386	0,545827788	1,449763724	0,854053105
12	0	0,331300816	0,331300816	0,310000178	0,267070036
12	1	0,504801428	0,33966118	0,537617874	0,307444296
12	2	0,633733106	0,347408123	0,74801723	0,301247597
12	3	0,734075113	0,360919833	0,891879652	0,338611652
12	4	0,838766913	0,363185875	0,986130746	0,441750503
12	5	0,939248261	0,358360781	1,126836669	0,470840974
12	6	1,024180733	0,379227049	1,243101294	0,513933814
12	7	1,124236065	0,417374802	1,347594093	0,568261948
12	8	1,221660763	0,435758281	1,466147951	0,694576644
12	9	1,319250337	0,512900501	1,544778401	0,777257897

Tabla 6-3 Resultados para área 15m x 15m

### 6.3.1 Cuatro Anclas totales en un área 15m x 15m

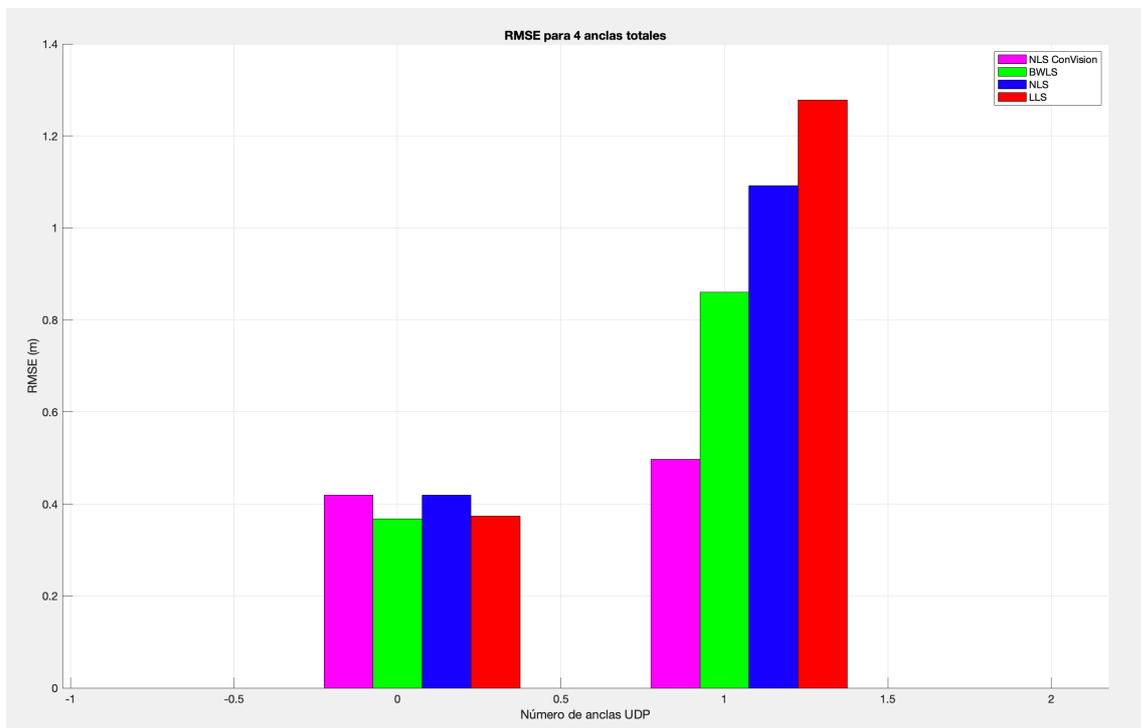


Figura 6-13 Comparativa de los algoritmos para 4 anclas totales. Área 15m x 15m

### 6.3.2 Cinco Anclas totales en un área 15m x 15m

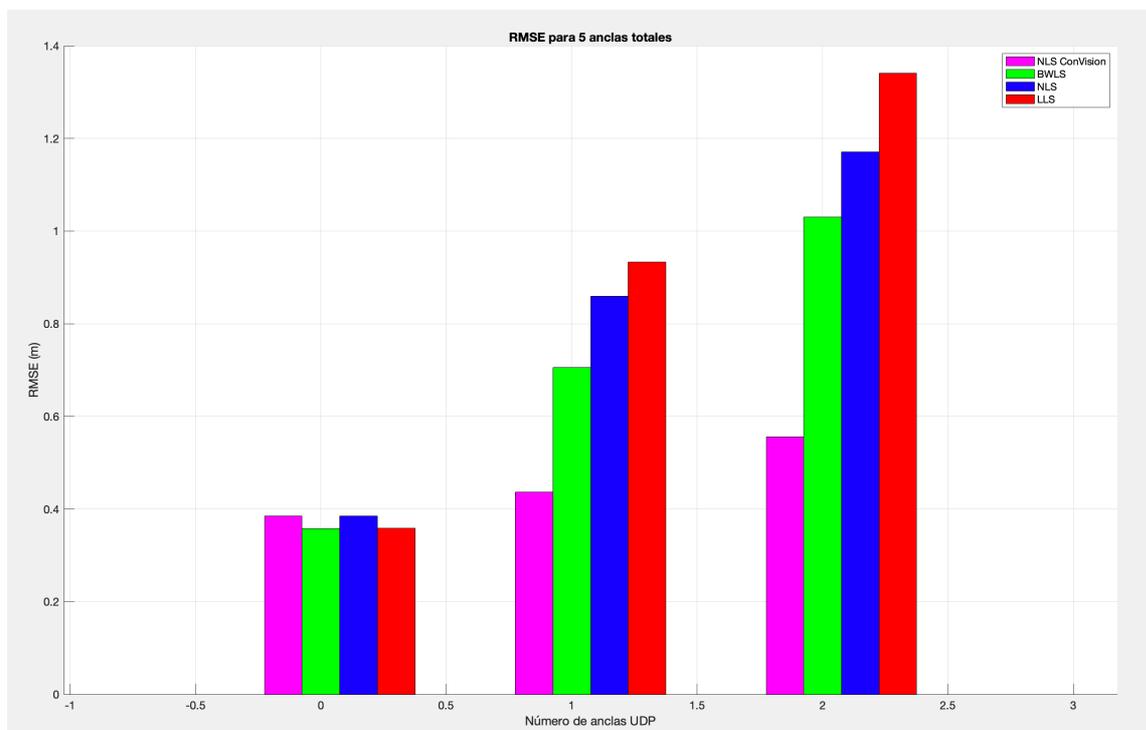


Figura 6-14 Comparativa de los algoritmos para 5 anclas totales. Área 15m x 15m

### 6.3.3 Seis Anclas totales en un área 15m x 15m

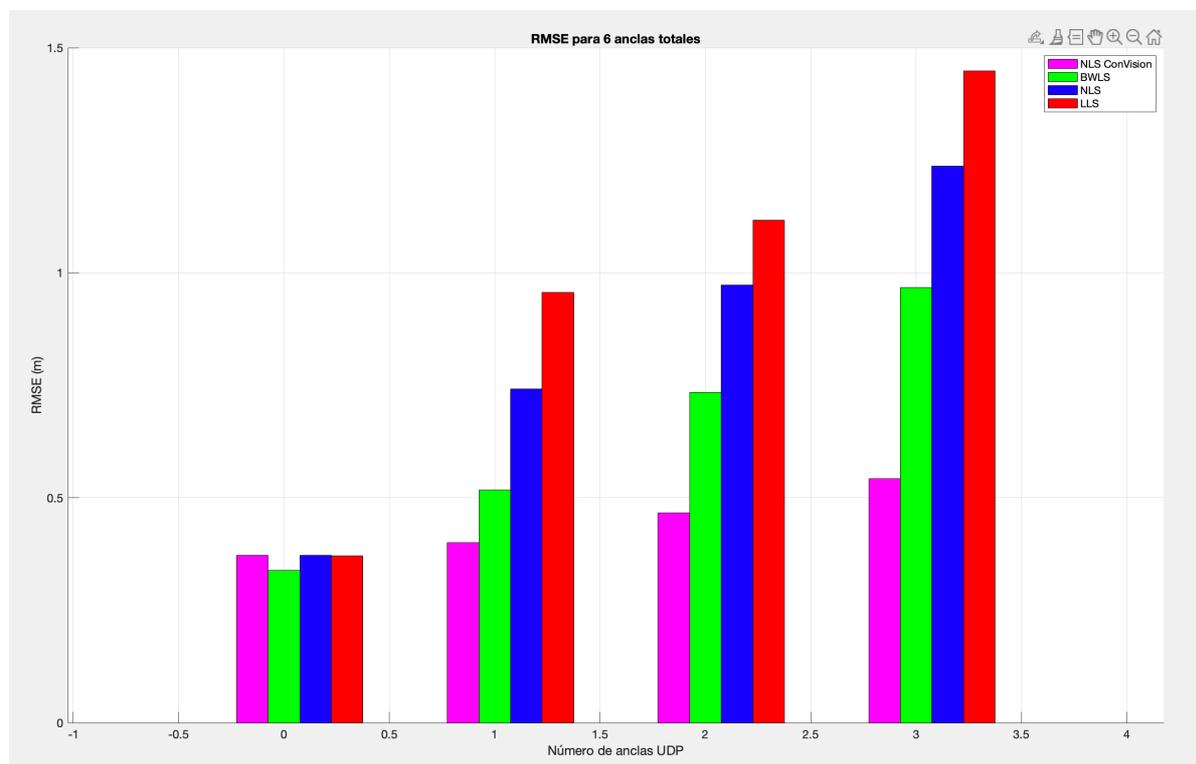


Figura 6-15 Comparativa de los algoritmos para 6 anclas totales. Área 15m x 15m

### 6.3.4 Siete Anclas totales en un área 15m x 15m

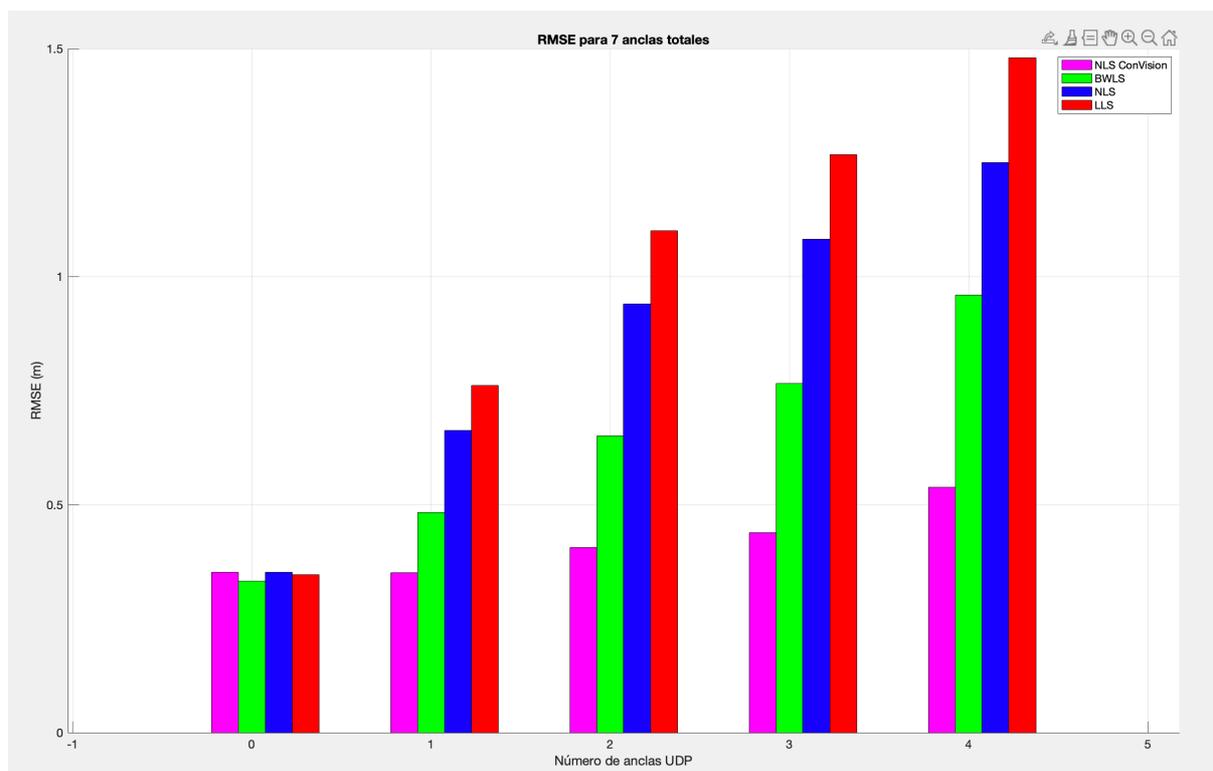


Figura 6-16 Comparativa de los algoritmos para 7 anclas totales. Área 15m x 15m

### 6.3.5 Ocho Anclas totales en un área 15m x 15m

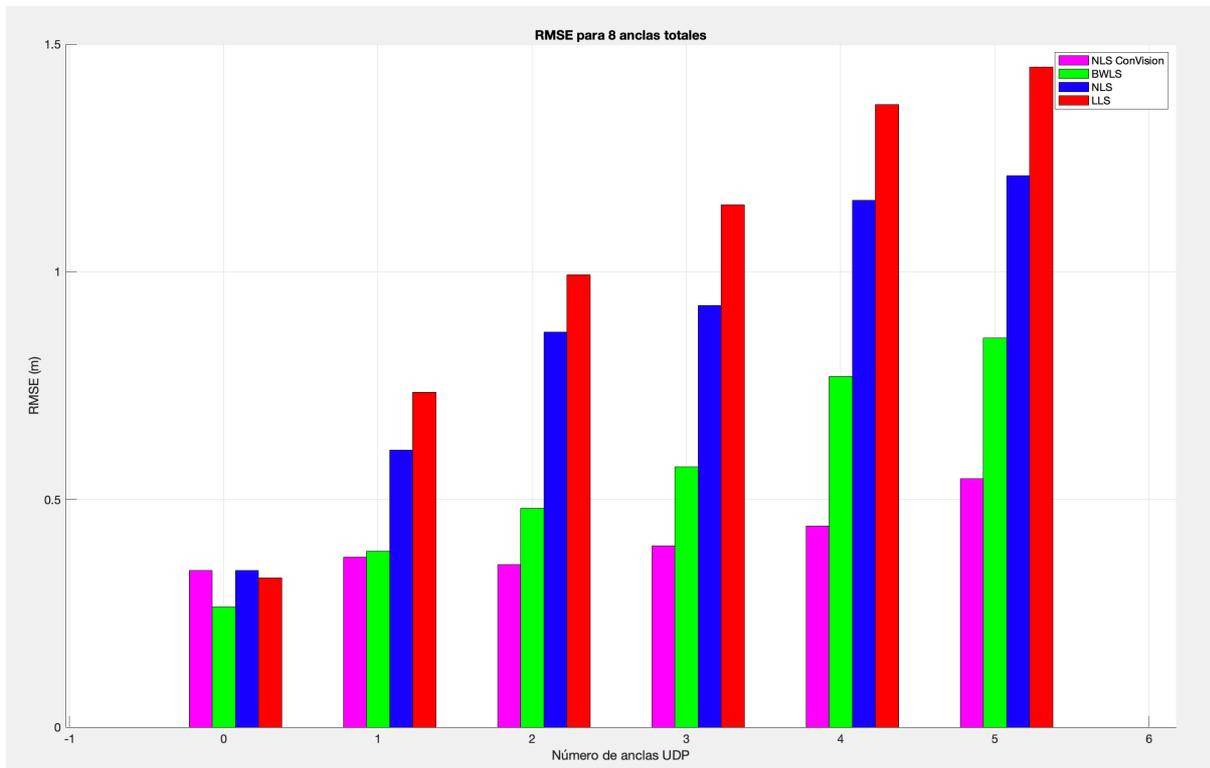


Figura 6-17 Comparativa de los algoritmos para 8 anclas totales. Área 15m x 15m

### 6.3.6 Doce Anclas totales en un área 15m x 15m

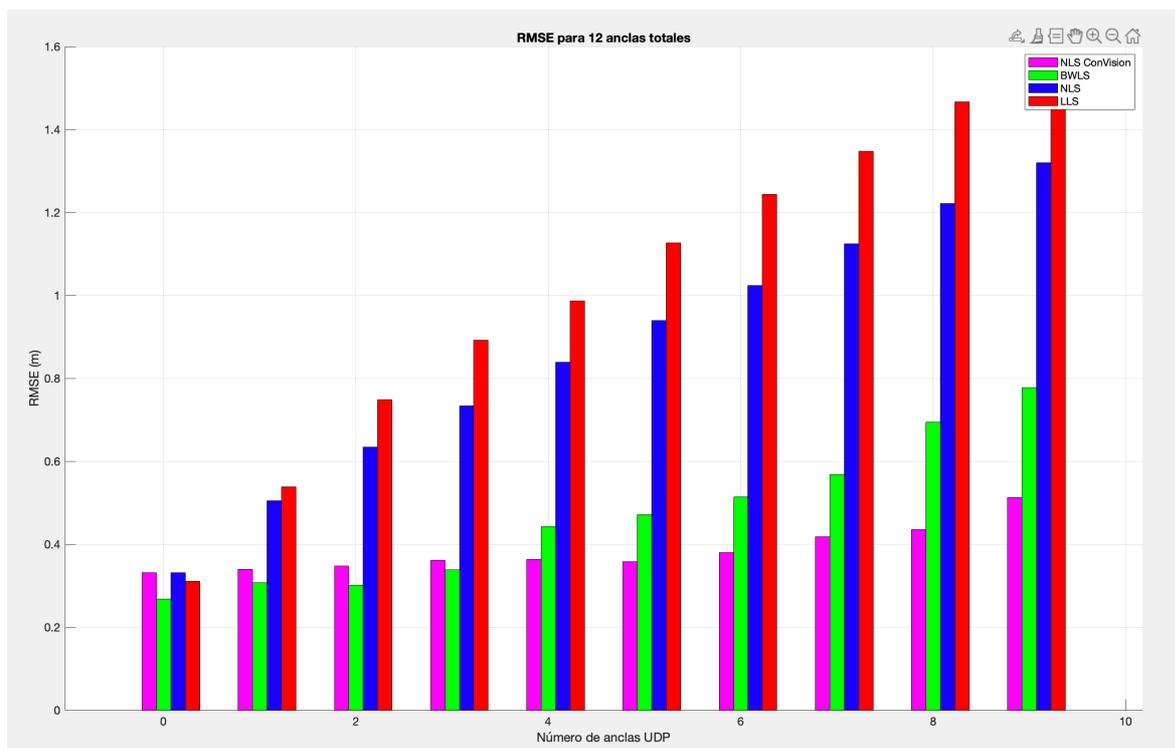


Figura 6-18 Comparativa de los algoritmos para 12 anclas totales. Área 15m x 15m

## 6.4 Análisis comparativo en diferentes áreas de trabajo

Para evaluar el impacto del tamaño del área en la precisión de los métodos, se han realizado simulaciones en tres escenarios, cuyos resultados se han presentado en los apartados anteriores. En cada uno de esos casos, se ha variado el número total de anclas y el número de anclas UDP para analizar el comportamiento del RMSE en función del espacio de trabajo.

En términos generales, el RMSE tiende a aumentar a medida que el área crece. Esto es esperable, ya que, en espacios más grandes, las distancias entre los nodos y las anclas son mayores, lo que incrementa la incertidumbre en las mediciones.

### 6.4.1 Comparación del rendimiento de los métodos

En áreas más pequeñas como 5x5, los errores de localización son menores para todos los métodos, y la diferencia entre ellos no es tan pronunciada. Sin embargo, a medida que el área de trabajo aumenta, los errores de B-WLS se incrementan de manera más significativa, mientras que de LLS y NLS siguen manteniendo un RMSE parecido para las tres áreas de trabajo.

Como era de esperar, el método NLS-CCV sigue obteniendo los mejores resultados en todas las áreas, debido a que parte de una condición idealizada de medición, lo que le otorga una ventaja que en condiciones reales no siempre es alcanzable.

En todas las áreas, el incremento en el número de anclas UDP genera un aumento del RMSE en todos los métodos, pero este efecto es más evidente en áreas grandes, ya que la incertidumbre en la propagación es mayor y las mediciones erróneas afectan más significativamente la estimación de posición.

En áreas más pequeñas, B-WLS y NLS-CCV logran mantener valores de error relativamente bajos incluso con varias anclas UDP, lo que indica que la ponderación y la compensación de errores de propagación funcionan bien en espacios reducidos.

En las siguientes figuras, se pueden observar las diferencias en el RMSE en función del número de anclas UDP para cada una de las tres áreas analizadas. Estas comparaciones permiten visualizar cómo los métodos de localización se ven afectados por el crecimiento del área de trabajo y el número de anclas con condiciones de propagación desfavorables.

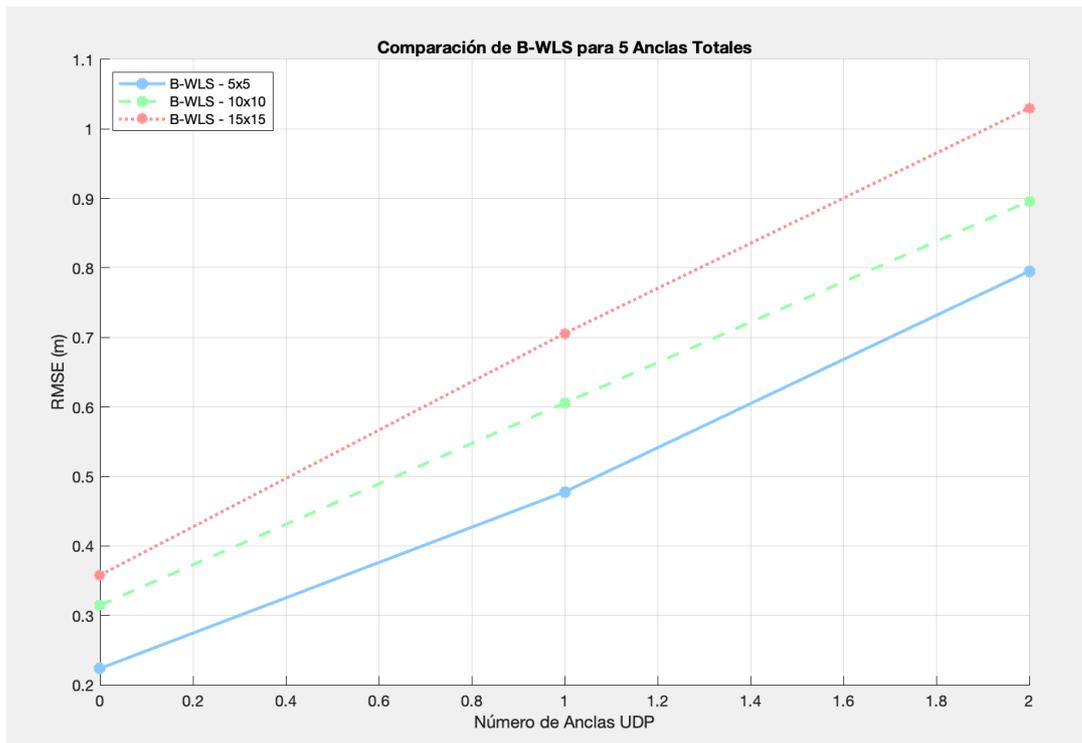


Figura 6-19 Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en B-WLS

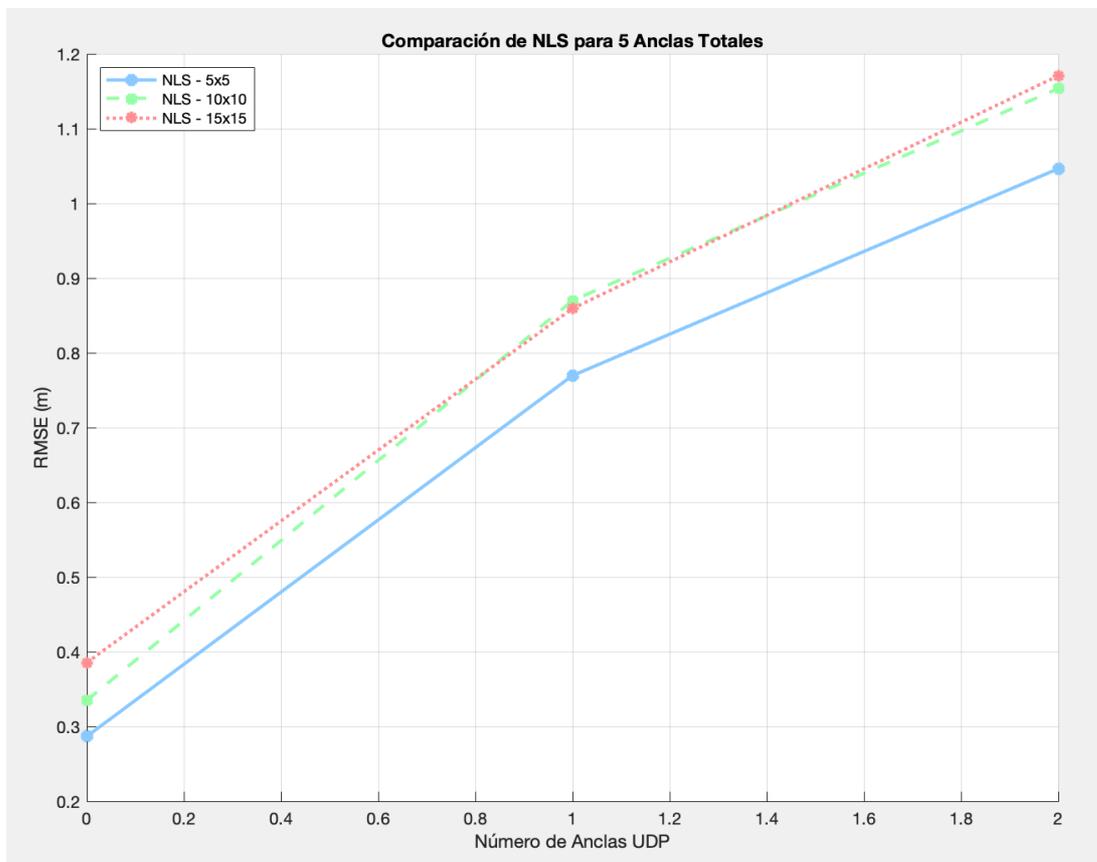


Figura 6-20 Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en NLS

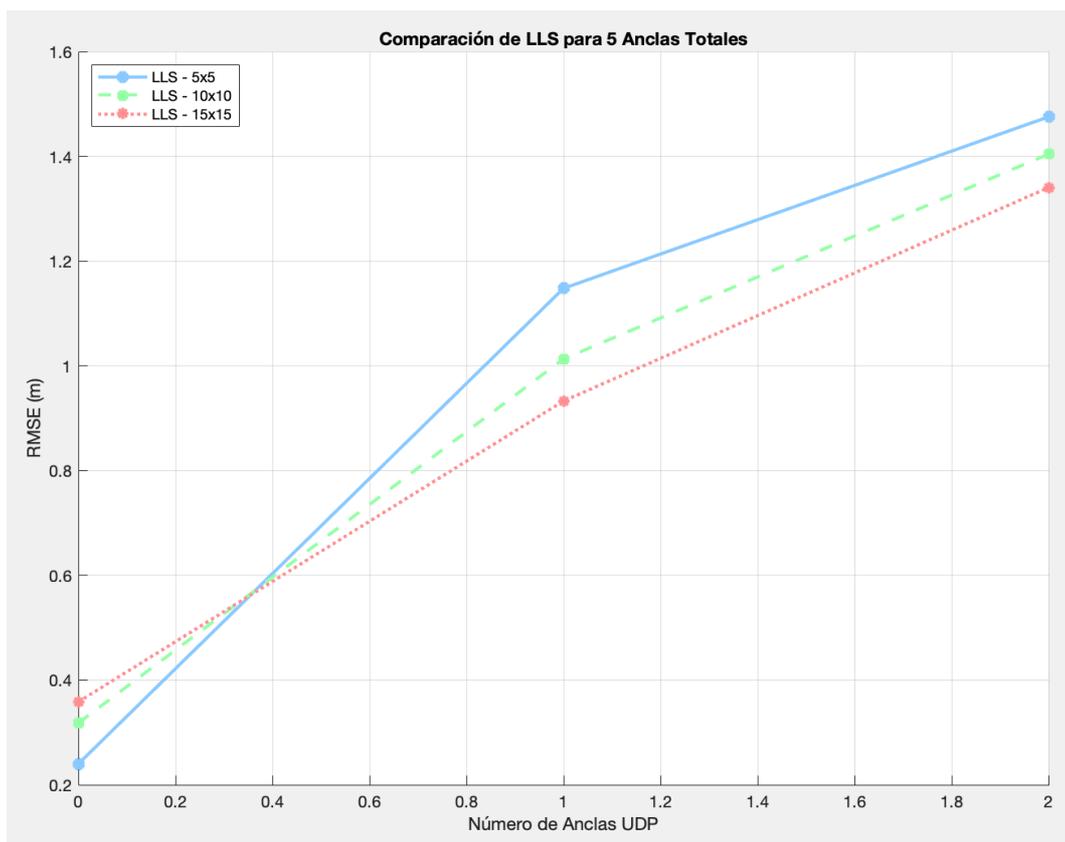


Figura 6-21 Análisis de las áreas de trabajo para 5 anclas totales en LLS

Analizando las tres gráficas, se observa que para B-WLS en áreas más pequeñas (5mx5m), muestra valores de RMSE muy bajos, pero a medida que el número de anclas aumenta, el error crece de manera constante. Este comportamiento indica que B-WLS es eficiente en áreas pequeñas, pero su rendimiento empeora a medida que se aumenta la proporción de anclas UDP.

En áreas más grandes (10mx10m y 15mx15m), los valores de RMSE obtenidos con B-WLS tienden a ser más altos, lo cual es coherente con el aumento de las distancias entre nodo y ancla. Esto sugiere que B-WLS tiene dificultades para manejar un gran número de anclas UDP de manera efectiva en espacios más grandes, lo que provoca un aumento significativo en el error. La tasa de crecimiento del RMSE en estas áreas grandes refleja que B-WLS no rinde tan bien cuando, tanto el número de anclas UDP como el tamaño del área aumentan.

No obstante, a pesar de este crecimiento en el error, los valores de RMSE siguen siendo significativamente más bajos que los de los otros métodos.

En NLS, las tres áreas se comportan de manera muy parecida y de acuerdo con lo esperado. El RMSE es más bajo en el área más pequeña, y aunque el error aumenta con el número de anclas en las áreas más grandes, el comportamiento sigue siendo consistente en todas las configuraciones.

LLS muestra una tendencia similar a NLS, pero con valores de RMSE ligeramente más altos en todas las áreas. El RMSE aumenta significativamente con el aumento del número de anclas UDP.

Curiosamente, en el área de 15mx15m, LLS parece rendir mejor que en el área de 10mx10m, mostrando una mejora inesperada en áreas más grandes y alcanzando mayor RMSE para el área

5mx5m. Este fenómeno podría explicarse por el hecho de que LLS compensa mejor los errores en áreas más grandes y dispersas, similar a NLS, permitiendo que el error se distribuya de una forma que favorezca su desempeño en áreas grandes.

## 6.5 Análisis para distinto ancho de banda

Para evaluar el impacto de la frecuencia en la precisión de los métodos de localización, se realizará una nueva serie de simulaciones en las que se ajustarán los parámetros del modelo según el estudio “*Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements*” de Bardia Alavi, Student Member, IEEE, and Kaveh Pahlavan, Fellow, IEEE a un ancho de banda de  $W=1000$  MHz, en contraste con las simulaciones previas realizadas a 500 MHz.

En esta ocasión, se ha actualizado la caracterización del error de medición tanto para condiciones DDP como para UDP, utilizando los siguientes valores:

- **Error DDP:**
  - Media:  $m_{M,W} = 0.09$  m.
  - Desviación estándar:  $\sigma_{M,W} = 13.6 / 100$  m.
- **Error UDP:**
  - Media:  $m_{U,W} = 0.96$  m.
  - Desviación estándar:  $\sigma_{U,W} = 60.4 / 100$  m.

Para garantizar una comparación justa entre ambos escenarios, la configuración de la simulación se mantendrá consistente en cuanto al número total de anclas, el número de anclas UDP y el método de evaluación. En particular, se analizará el caso de 12 anclas totales, replicando el mismo procedimiento de simulación utilizado anteriormente, pero con los parámetros de error adaptados a la nueva frecuencia.

TotalAnclas	NumAnclasUDP	RMSE_NLS (m)	RMSE_NLS_CCV (m)	RMSE_LLS (m)	RMSE_BWLS (m)
12	0	0,220920911	0,220920911	0,125270954	0,121749031
12	1	0,315293746	0,23692274	0,294526824	0,135787766
12	2	0,401555173	0,226765025	0,393914101	0,17867704
12	3	0,449419756	0,22524758	0,470214619	0,195789515
12	4	0,499789248	0,236000033	0,55968555	0,254779656
12	5	0,592719434	0,241650654	0,675042341	0,238272892
12	6	0,628855631	0,247925556	0,725156034	0,296305584
12	7	0,702450677	0,253669704	0,814148195	0,359961038
12	8	0,754481171	0,273603289	0,871518595	0,455518234
12	9	0,76297582	0,315415952	0,910347984	0,478973748

Tabla 6-4 RMSE para un total 12 anclas y ancho de banda de 1000Mhz

TotalAnclas	NumAnclasUDP	RMSE-NLS (m)	RMSE-NLS_CCV (m)	RMSE_LLS (m)	RMSE_BWLS (m)
12	0	0,303179291	0,303179291	0,265419817	0,218768918
12	1	0,463311108	0,296437266	0,516606027	0,242134523
12	2	0,618466877	0,317079883	0,748527145	0,292892317
12	3	0,711331203	0,322489605	0,834309945	0,287953265
12	4	0,824914577	0,339822546	1,01200575	0,32280524
12	5	0,891172404	0,326408168	1,174511497	0,388391689
12	6	1,028427554	0,359085713	1,298369512	0,455015051
12	7	1,107727317	0,37511701	1,434974611	0,558491448
12	8	1,183189975	0,417406281	1,454161637	0,60392501
12	9	1,34281293	0,488028965	1,664824032	0,74260927

Tabla 6-5 RMSE para un total 12 anclas y ancho de banda de 500Mhz

Los resultados muestran una reducción generalizada del RMSE en la simulación a 1000 MHz en comparación con la de 500 MHz, lo que sugiere que una mayor frecuencia contribuye a mejorar la precisión de la estimación de posición. Este efecto se debe principalmente a que un mayor ancho de banda implica mayor resolución en el tiempo, por tanto, menor error en los casos DDP.

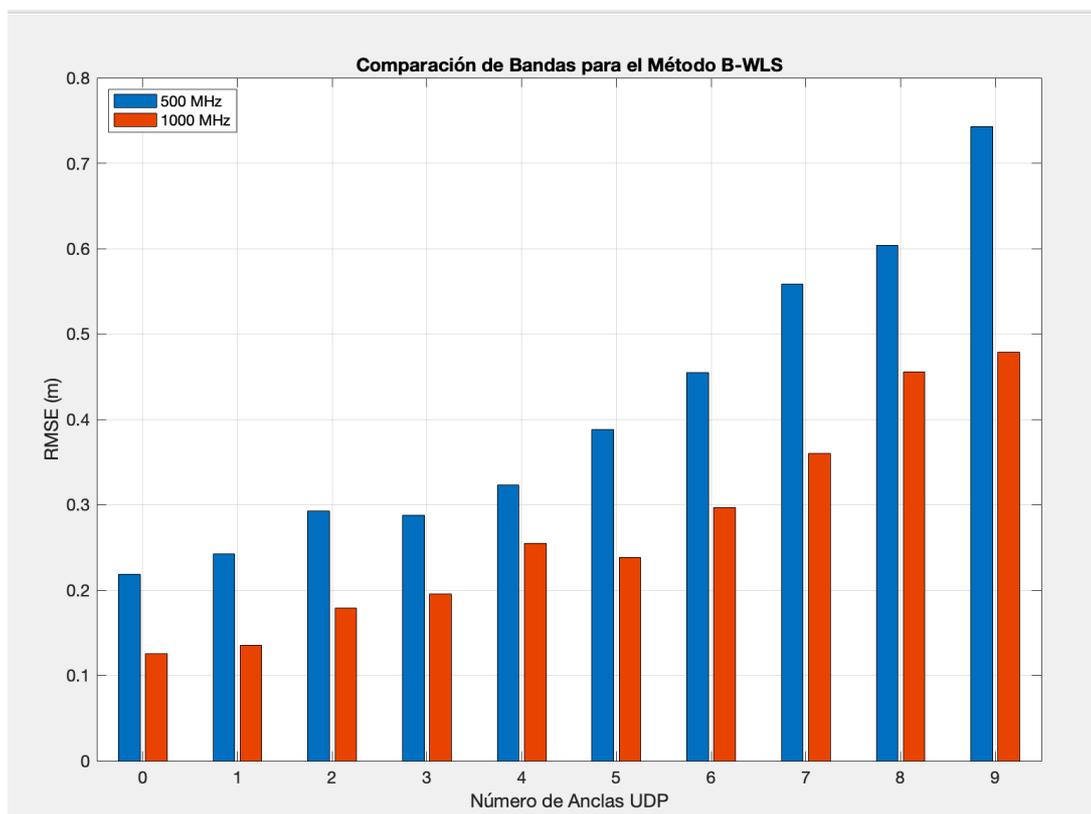


Figura 6-22 Comparativa del ancho de banda en B-WLS para un total de 12 anclas.

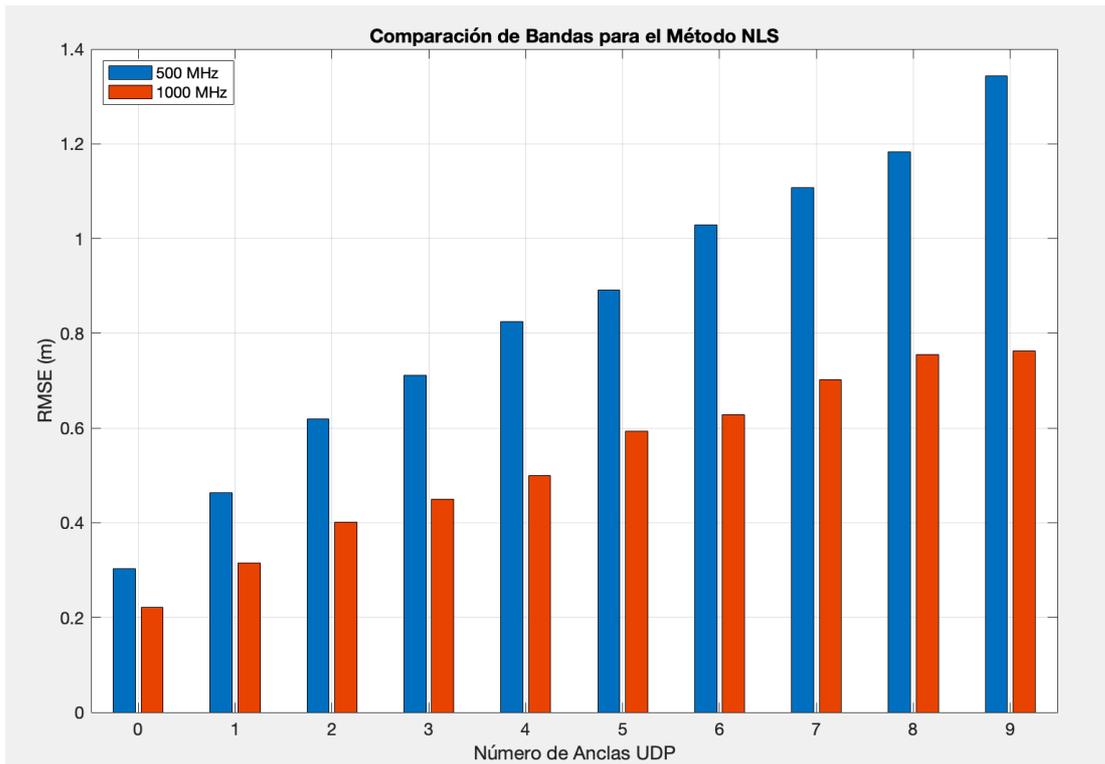


Figura 6-23 Comparativa del ancho de banda en NLS para un total de 12 anclas.

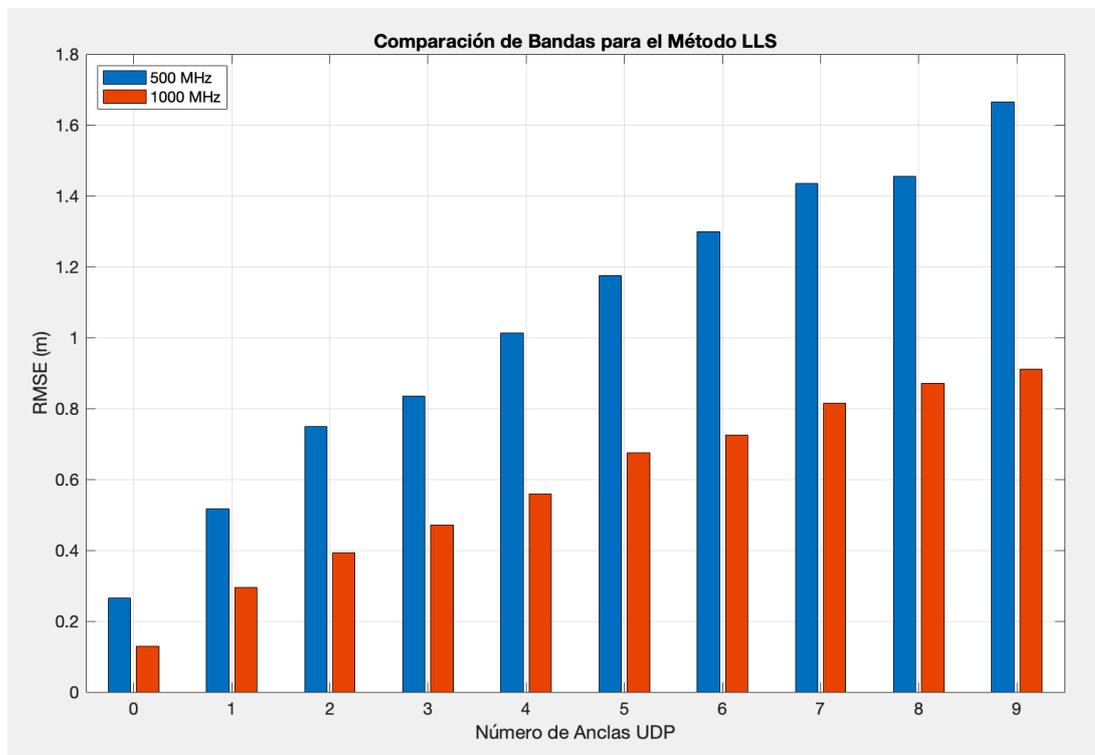


Figura 6-24 Comparativa del ancho de banda en LLS para un total de 12 anclas.

Para los algoritmos NLS y LLS se observa una notable mejora en la precisión con 1000 MHz, especialmente para valores bajos de anclas UDP. A medida que aumenta el número de anclas

UDP, el RMSE sigue incrementando en ambos métodos, aunque de manera más controlada en 1000 MHz que en 500 MHz.

Para B-WLS en ambas frecuencias, este método sigue demostrando su robustez ante el error NLOS, manteniendo un RMSE más bajo que NLS y LLS para valores altos de anclas UDP.

La mejora en 1000 MHz es significativa, con una reducción del RMSE en escenarios con múltiples anclas UDP, lo que refuerza su capacidad de mitigación del error.

Para 0 anclas UDP, los valores de RMSE son más bajos en todos los métodos y se observa una reducción importante al aumentar el ancho de banda a 1000 MHz.

## 6.6 Conclusión y futuras líneas de investigación

Los resultados obtenidos en este estudio refuerzan la eficacia del método B-WLS en la estimación de posición, especialmente en entornos donde la presencia de anclas UDP introduce errores significativos en las mediciones. A lo largo de las simulaciones, B-WLS ha demostrado ser el método más estable, logrando reducir de manera notable el RMSE en comparación con métodos, los cuales no incorporan estrategias de ponderación para mitigar el impacto del error NLOS.

El análisis comparativo entre diferentes áreas de simulación (5x5, 10x10 y 15x15 m<sup>2</sup>) ha evidenciado que el desempeño del método puede verse afectado por el tamaño del entorno, siendo más eficiente en espacios reducidos, donde las distancias entre las anclas y el nodo objetivo son menores.

Asimismo, el análisis de distintas frecuencias de operación ha demostrado que, al incrementar el ancho de banda a 1000 MHz, se logra una reducción del RMSE en todos los métodos evaluados. Este resultado sugiere que un mayor ancho de banda permite mejorar la precisión en la localización, al reducir el impacto del error NLOS y LOS en las mediciones de distancia. No obstante, la mejora no es uniforme en todos los casos, y el efecto del ancho de banda sobre la estimación de posición podría depender también de otros factores, como la disposición de las anclas y la cantidad de medidas en visión directa.

Dado que el rendimiento de los métodos de localización depende en gran medida de las condiciones del entorno, una posible línea de investigación sería estudiar el impacto de diferentes distribuciones de anclas dentro del área de simulación. Actualmente, las anclas han sido ubicadas en el perímetro del espacio de trabajo de manera equidistante, pero explorar configuraciones más densas o distribuciones irregulares podría proporcionar información valiosa sobre cómo mejorar la precisión del sistema en escenarios reales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Che F, Ahmed QZ, Lazaridis PI, Sureephong P, Alade T. Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)—For Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors* [Internet]. 1 de junio de 2023 [citado 24 de marzo de 2025];23(12). Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/12/5710>
2. CUSAT. LINKEDIN. 2023 [citado 24 de marzo de 2025]. Breve Historia del GPS. Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/breve-historia-del-gps-cusatpy>
3. ATRIA. Sistemas de localización en interiores [Internet]. [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://atriainnovation.com/blog/sistemas-localizacion-interiores/>
4. Autor: Ge Yujun, Tutor/a: Víctor Miguel Sempere Payá. Análisis y mejoras en algoritmos para posicionamiento y localización basado en Ultra-Wide Band [Internet]. 2024 [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/entities/publication/bc1443ee-a4aa-4d36-bbba-4ce877d18240>
5. Enrique Pérez. Comparativa Frecuencias [Internet]. 2019 [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://www.xataka.com/servicios/que-ventajas-tiene-tecnologia-banda-ultrancha-uwv-vieja-alternativa-al-bluetooth-que-apple-samsung-estan-revitalizando>
6. Julio Suárez-Páez y Gonzalo Llano-Ramírez. Revisión del estado del arte de IR-Ultra-Wideband y simulación de la respuesta impulsiva del canal IEEE 802.15.4a. *Ingeniería y Ciencia*, ISSN 1794–9165 [Internet]. 2010 [citado 24 de marzo de 2025];6. Disponible en: <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/250>
7. Llancy Jazmín Ramírez Pool. Ultra WideBand como alternativa de comunicaciones inalámbricas [Internet]. 2012 [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <http://192.100.164.85/handle/20.500.12249/3571>
8. Millán RJ. UWB (Ultra Wide-Band) «Debido a la extremadamente corta duración de los impulsos, el espectro de frecuencias de una señal UWB es de un ancho de banda de varios GHz» [Internet]. 2004. Disponible en: [www.uwb.org](http://www.uwb.org)
9. Jordi Diaz. Tecnología Ultra-wideband (UWB) la revolución a corto alcance [Internet]. 2003 abr [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9890/Article010.pdf>
10. Autor: Juan Chóliz Muniesa, Director: Ángela Hernández Solana. Arquitecturas para la adquisición y distribución de la información de localización en sistemas de seguimiento en interiores basados en UWB [Internet]. 2010 sep [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/4942>
11. Autor: César Gutiérrez Carrero, Director: Francisco Javier Segovia Pérez. Seguimiento de objetos por UWB (Ultra Wide Band) [Internet]. 2018 ene [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://oa.upm.es/49432/>
12. Autor: Mario Casas González, Dr. Carlos Crespo Cadenas. Localización Precisa de Objetos Indoor mediante señales UWB y técnicas TOA [Internet]. [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11505/fichero/PFC+Mario+Casas+Gonzalez.pdf> Proyecto fin de carrera.
13. Hayward SJ, van Lopik K, Hinde C, West AA. A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications in Industry. Vol. 20, *Internet of Things* (Netherlands). Elsevier B.V.; 2022.

14. Alarifi A, Al-Salman A, Alsaleh M, Alnafessah A, Al-Hadhrami S, Al-Ammar MA, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. Vol. 16, Sensors (Switzerland). MDPI AG; 2016.
15. García Polo EM. Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores \* [Internet]. 2008 [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>
16. Yusnita Rahayu, Tharek Abd. Rahman, Razali Ngah, P.S. Hall. Ultra Wideband Technology and Its Applications [Internet]. IEEE; 2008 [citado 29 de marzo de 2025]. 4 p. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4542537>
17. Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida, Tutora: Eva María Arias de Reyna Domínguez. Diseño de un método eficiente de localización en interiores para un sistema Ultra Wideband en presencia de obstáculos [Internet]. 2021 [citado 24 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://idus.us.es/items/25d56a8d-2130-4cb5-a42d-9d213e5998a8>  
Trabajo Fin de Máster.
18. Yash Wate. TECHPP. 2023 [citado 29 de marzo de 2025]. Ultra Wideband (UWB) and its significance. Disponible en: <https://techpp.com/2020/08/14/ultra-wideband-uwband-explained/>
19. Güvenç I, Chong CC. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques. IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2009;11(3):107-24.
20. Yuan Yang, Yubin Zhao, Marcel Kyas. Weighted Least-squares by Bounding-box (B-WLS) for NLOS Mitigation of Indoor Localization. IEEE; 2013.
21. Alavi B, Pahlavan K. Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements. IEEE COMMUNICATIONS LETTERS [Internet]. 2006;10(4). Disponible en: <http://www.tmcnet.com/enews/120602h.htm>
22. Davide Dardari, Pau Closas, Petar M. Djurić. Indoor tracking: Theory, methods, and technologies. IEEE. 2015. DOI: 10.1109/TVT.2015.2403868

---

# ANEXOS

---

Para complementar la información proporcionada en los puntos anteriores, se incluyen a continuación los códigos utilizados para la generación de los diferentes métodos descritos en el documento.

## 1. General.m

```
% Definir el área del grid
x_min = 0; x_max = 10; % Límites en X
y_min = 0; y_max = 10; % Límites en Y
resolucion_grid = 0.5; % Resolución del grid (espaciado entre puntos)
iteraciones = 300; % Número de iteraciones
% Generar grid
[grid_X, grid_Y] = meshgrid(x_min:resolucion_grid:x_max,
y_min:resolucion_grid:y_max);
grid_posiciones = [grid_X(:), grid_Y(:)]; % Combinar en pares de coordenadas
(x, y)

% Inicializar vectores para almacenar errores
errores_cuadraticos_BWLS = [];
errores_cuadraticos_LLS = [];
errores_cuadraticos_NLS = [];
errores_cuadraticos_NLS_ConVision = [];

% Mostrar grid
figure;
scatter(grid_posiciones(:,1), grid_posiciones(:,2), 'b. ');
title('Grid de posiciones');
xlabel('X');
ylabel('Y');
grid on;
axis([x_min x_max y_min y_max]);
hold on;
% Crear carpeta para guardar los resultados
carpeta_resultados = 'BW1000';
if ~exist(carpeta_resultados, 'dir')
    mkdir(carpeta_resultados);
end

% Generar Anclas
TotalAnclas = 12;
```

---

```

PosAnclas = generar_anclas(TotalAnclas);
scatter(PosAnclas(:,1), PosAnclas(:,2), 100, 'r', 'filled');
legend('Puntos del Grid', 'Anclas');
hold off;

for iter = 1:iteraciones
    % Calcular distancias del grid a las anclas
    Distancia_Ancla_Grid = calcular_distancia(PosAnclas, grid_posiciones);

    % Generar Puntos
    Num_puntos = 1;
    PosNodo = generar_posiciones( 0, 10, 0, 10);

    % Calculamos La Distancia del ancla al nodo
    DistanciaAnclaNodo = calcular_distancia(PosAnclas, PosNodo);

    % Generacion de tabla de las distancias estimadas
    [ErrorEstima, TipoError] = generar_error(PosAnclas, PosNodo);
    MedidaDistancia = DistanciaAnclaNodo + ErrorEstima;

    % Método BWLS

    [AnclaReferencia, CoordAnclaRef] =
    calculo_ancla_referencia(MedidaDistancia, PosAnclas, TotalAnclas,
    Num_puntos);

    [x_e] = metodo_BWLS(PosAnclas, MedidaDistancia, AnclaReferencia,
    CoordAnclaRef);

    x_e_LLS =
    metodo_LLS_basico(PosAnclas, MedidaDistancia, AnclaReferencia, CoordAnclaRef);

    x_e_NLS = metodo_NLS_basico(PosAnclas, MedidaDistancia , grid_posiciones,
    Distancia_Ancla_Grid);

    x_e_NLS_convision=metodo_NLS_con_cond_vision(PosAnclas, MedidaDistancia ,
    grid_posiciones, Distancia_Ancla_Grid, TipoError);

    x_e_LLS = x_e_LLS';
    x_e=x_e';

    % Guardar errores cuadráticos para esta iteración
    errores_cuadraticos_BWLS = [errores_cuadraticos_BWLS; sum((PosNodo -
    x_e).^2, 2)];
    errores_cuadraticos_LLS = [errores_cuadraticos_LLS; sum((PosNodo -
    x_e_LLS).^2, 2)];
    errores_cuadraticos_NLS = [errores_cuadraticos_NLS; sum((PosNodo -
    x_e_NLS).^2, 2)];
    errores_cuadraticos_NLS_ConVision = [errores_cuadraticos_NLS_ConVision;
    sum((PosNodo - x_e_NLS_convision).^2, 2)];

end

RMSE_BWLS = sqrt(mean(errores_cuadraticos_BWLS));

```

```

RMSE_LLS = sqrt(mean(errores_cuadraticos_LLS));
RMSE_NLS = sqrt(mean(errores_cuadraticos_NLS));
RMSE_NLS_ConVision = sqrt(mean(errores_cuadraticos_NLS_ConVision));

% Graficar
hold on;
scatter(PosNodo(:,1), PosNodo(:,2), 100, 'g', 'filled'); % Nodo real
scatter(x_e(:,1), x_e(:,2), 100, 'm', 'filled'); % Nodo estimado
legend('Puntos del Grid', 'Anclas', 'Posición Real del Nodo', 'Posición
Estimada del Nodo');

%% Guardar resultados después de todas las iteraciones
resultados = struct();
resultados.TipoError = TipoError; % Vector con el tipo de anclas (UDP/DDP)
resultados.num_anclas_udp = sum(TipoError == 1); % Número de anclas UDP
resultados.num_total_anclas=TotalAnclas;
resultados.rmse_NLS = RMSE_NLS;
resultados.rmse_NLS_ConVision=RMSE_NLS_ConVision;
resultados.rmse_LLS = RMSE_LLS;
resultados.rmse_BWLS = RMSE_BWLS;

%Guardar en un archivo con un nombre dinámico
nombre_archivo = fullfile(carpeta_resultados,
sprintf('resultados_promedio_iteracion_12_anclas_9udp%d.mat', iter));
save(nombre_archivo, '-struct', 'resultados');

%COMPROBAR VALORES INTERMEDIOS

% Comprobar dimensiones después de generar posiciones del nodo
disp('Dimensiones de PosNodo:');
disp(size(PosNodo));

% Comprobar dimensiones de las distancias calculadas
disp('Dimensiones de MedidaDistancia:');
disp(size(MedidaDistancia));

% Comprobar dimensiones de las posiciones estimadas
disp('Dimensiones de x_e (BWLS):');
disp(size(x_e));
disp('Dimensiones de x_e_LLS:');
disp(size(x_e_LLS));
disp('Dimensiones de x_e_NLS:');
disp(size(x_e_NLS));

% Comprobar dimensiones de los errores acumulados
disp('Dimensiones de errores_cuadraticos_BWLS:');
disp(size(errores_cuadraticos_BWLS));
disp('Dimensiones de errores_cuadraticos_LLS:');
disp(size(errores_cuadraticos_LLS));
disp('Dimensiones de errores_cuadraticos_NLS:');
disp(size(errores_cuadraticos_NLS));

%COMPROBAR
disp('Prueba con error cero:');
disp('Posición real del nodo:');
disp(PosNodo);

```

```

disp('Posición estimada usando BWS:');
disp(x_e);
disp('Posición estimada usando LLS:');
disp(x_e_LLS);
disp('Posición estimada usando NLS:');
disp(x_e_NLS);

```

```

%-----%
function PosAnclas = generar_anclas(TotalAnclas)
% Inicializar la posición de las anclas
PosAnclas = [];
%AREA 10X10
% Si hay solo 4 anclas, se colocan en las esquinas
if TotalAnclas == 4
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10]; % Esquinas del área 10x10

% Si hay 5 anclas, se coloca una en el medio de un lado
elseif TotalAnclas == 5
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10; 5, 0]; % Una ancla en el
medio del borde inferior

% Si hay 6 anclas, se colocan en el centro de los lados
elseif TotalAnclas == 6
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10; 5, 0; 5, 10]; % Una en cada
lado
% Si hay 6 anclas, se colocan en el centro de los lados
elseif TotalAnclas == 7
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10; 5, 0; 5, 10; 10,5]; % Una
en cada lado
elseif TotalAnclas == 8
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10; 5, 0; 5, 10; 10,5; 0,5];
elseif TotalAnclas == 12
    PosAnclas = [0, 0; 10, 0; 0, 10; 10, 10; 5, 0; 5, 10; 10,5; 0,5;
2.5,0; 7.5,0;2.5,10;7.5,10];
end
end

% % %Area5X5
%     if TotalAnclas == 4
%         PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5];
%
%     %Si hay 5 anclas, se añade una en el centro de un lado
%     elseif TotalAnclas == 5
%         PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5; 2.5, 0];
%
%     % Si hay 6 anclas, se colocan en el centro de los lados
%     elseif TotalAnclas == 6
%         PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5; 2.5, 0; 2.5, 5];
%
%     %Si hay 7 anclas, se añade una en la mitad del borde derecho
%     elseif TotalAnclas == 7
%         PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5; 2.5, 0; 2.5, 5; 5, 2.5];
%
%     %Si hay 8 anclas, se añaden puntos intermedios en los lados
%     elseif TotalAnclas == 8

```

```

%         PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5; 2.5, 0; 2.5, 5; 5, 2.5; 0,
2.5];
%
%         %Si hay 12 anclas, se distribuyen equidistantes en los bordes
%         elseif TotalAnclas == 12
%             PosAnclas = [0, 0; 5, 0; 0, 5; 5, 5; 2.5, 0; 2.5, 5; 5, 2.5; 0,
2.5;
%                 1.25, 0; 3.75, 0; 1.25, 5; 3.75, 5];
%         end
%     end
% Si hay 4 anclas, se colocan en las esquinas del área 15x15
%     if TotalAnclas == 4
%         PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15];
%
%         % Si hay 5 anclas, se añade una en el centro de un lado
%         elseif TotalAnclas == 5
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0];
%
%         % Si hay 6 anclas, se colocan en el centro de los lados
%         elseif TotalAnclas == 6
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0; 7.5, 15];
%
%         % Si hay 7 anclas, se añade una en la mitad del borde derecho
%         elseif TotalAnclas == 7
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0; 7.5, 15; 15, 7.5];
%
%         % Si hay 8 anclas, se añaden puntos intermedios en los lados
%         elseif TotalAnclas == 8
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0; 7.5, 15; 15, 7.5;
0, 7.5];
%
%         % Si hay 12 anclas, se distribuyen equidistantes en los bordes
%         elseif TotalAnclas == 12
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0; 7.5, 15; 15, 7.5;
0, 7.5;
%                 3.75, 0; 11.25, 0; 3.75, 15; 11.25, 15];
%
%         % Si hay 16 anclas, se colocan aún más puntos equidistantes en los
bordes
%         elseif TotalAnclas == 16
%             PosAnclas = [0, 0; 15, 0; 0, 15; 15, 15; 7.5, 0; 7.5, 15; 15, 7.5;
0, 7.5;
%                 3.75, 0; 11.25, 0; 3.75, 15; 11.25, 15; 15, 3.75; 15,
11.25; 0, 3.75; 0, 11.25];
%         end
%     end
%-----%

```

```

%-----%

```

```

function [ErrorEstima, TipoError] = generar_error (PosAnclas, PosNodos)

```

```

% Inicializar los vectores de salida

```

```

ErrorEstima = [];

```

```

TipoError = [];

```

```

PosicionAncla = PosAnclas;

```

```

PosicionNodos = PosNodos;

[TotalAnclas, ~] = size(PosicionAncla);
[TotalNodos, ~] = size(PosicionNodos);

% Calcular las distancias entre anclas y puntos
for i=1:TotalAnclas
    Ancla = [PosicionAncla(i,1), PosicionAncla(i,2)];
    for x=1:TotalNodos
        Nodo = [PosicionNodos(x,1), PosicionNodos(x,2)];
        DistAnclaNodo(i,x) = pdist2(Nodo, Ancla, 'euclidean');
    end
end
%-----%

% Configuración del error DDP 1000MHZ
media_ddp = 0.09;
desv_ddp = 13.6 / 100;
e_M_w = media_ddp * ones(TotalAnclas, TotalNodos) .* log10(1 + DistAnclaNodo)
+ desv_ddp * randn(TotalAnclas, TotalNodos) .* log10(1 + DistAnclaNodo);

% Inicialización del vector de error
ErrorEstimacion = e_M_w;

% Generar un vector de tipo de ancla (0 = DDP, 1 = UDP)
TipoError = zeros(TotalAnclas, 1); % Debe ser (5,1)

NumUDP = 9; % Número de anclas UDP a seleccionar

% % Seleccionar aleatoriamente cuáles serán las anclas UDP
indices_UDP = randperm(TotalAnclas, NumUDP);
TipoError(indices_UDP) = 1; % Marcar como UDP

% % Mostramos el vector TipoAncla
% disp('Vector de tipo de anclas (0 = DDP, 1 = UDP):');
% disp(TipoError);

% Configuración del error UDP PARA 1000 MHZ
media_udp = 0.96;
desv_udp = 60.4 / 100;
e_U_w = media_udp + desv_udp * randn(TotalAnclas, TotalNodos);

% Calcular el error total
ErrorEstima = e_M_w(:, 1) + TipoError .* e_U_w(:, 1); % Solo una columna
end

%-----%
% % Configuración del error DDP 500MHZ
% media_ddp = 0.21;
% desv_ddp = 26.9 / 100;
% e_M_w = media_ddp * ones(TotalAnclas, TotalNodos) .* log10(1 +
DistAnclaNodo) + desv_ddp * randn(TotalAnclas, TotalNodos) .* log10(1 +
DistAnclaNodo);
%
% % Inicialización del vector de error
% ErrorEstimacion = e_M_w;
%
```

```

%% Generar un vector de tipo de ancla (0 = DDP, 1 = UDP)
% TipoError = zeros(TotalAnclas, 1); % Debe ser (5,1)
%
% NumUDP = 1; % Número de anclas UDP a seleccionar
%
%% % Seleccionar aleatoriamente cuáles serán las anclas UDP
% indices_UDP = randperm(TotalAnclas, NumUDP);
% TipoError(indices_UDP) = 1; % Marcar como UDP
%
%% % Mostrar el vector TipoAncla
%% disp('Vector de tipo de anclas (0 = DDP, 1 = UDP):');
%% disp(TipoError);
%
%% Configuración del error UDP PARA 500 MHZ
% media_udp = 1.62;
% desv_udp = 80.9 / 100;
% e_U_w = media_udp + desv_udp * randn(TotalAnclas, TotalNodos);
%
% % Calcular el error total
% ErrorEstima = e_M_w(:, 1) + TipoError .* e_U_w(:, 1); % Solo una columna
%
% end
%-----%

%-----%
% Función para calcular RMSE
function rmse = calcular_rmse(PosNodo, PosEstimadas)
    % Calcula el RMSE entre las posiciones reales y estimadas
    errores = (PosEstimadas - PosNodo).^2; % Error cuadrático para x e y
    suma_errores = sum(errores, 2); % Suma de errores por nodo
    rmse = sqrt(mean(suma_errores)); % Promedio y raíz cuadrada
end
%-----%

%-----%
% %FUNCION PARA GENERAL EL PUNTO%
%
% function [Posiciones_Puntos] = generar_posiciones(min_x, max_x, min_y,
max_y)
%
% % Generar posiciones aleatorias para los puntos
% Posiciones_Puntos = [];
% Posiciones_Puntos(:, 1) = (max_x - min_x) .* rand(1, 1) + min_x;
% Posiciones_Puntos(:, 2) = (max_y - min_y) .* rand(1,1) + min_y;
%
% end
%-----%

function [Posiciones_Puntos] = generar_posiciones(min_x, max_x, min_y, max_y)

```

```

% Generar posiciones aleatorias dentro del rango definido
Posiciones_Puntos = zeros(1,2);
Posiciones_Puntos(1,1) = min_x + (max_x - min_x) * rand();
Posiciones_Puntos(1,2) = min_y + (max_y - min_y) * rand();

% Asegurar que los puntos están dentro del área permitida
Posiciones_Puntos(1,1) = max(min(Posiciones_Puntos(1,1), max_x), min_x);
Posiciones_Puntos(1,2) = max(min(Posiciones_Puntos(1,2), max_y), min_y);
end

%-----%
%FUNCION PARA CALCULAR DISTANCIA DEL ANCLA-NODO

function [DistEucl] = calcular_distancia(PosAnclas, PosNodo)
% Obtener el número de anclas y nodos
[TotalAnclas, ~] = size(PosAnclas); % Número de anclas
[TotalNodos, ~] = size(PosNodo); % Número de nodos

% Inicializamos la matriz de distancias
DistEucl = zeros(TotalAnclas, TotalNodos);

for i = 1:TotalAnclas
    CoordAncla = PosAnclas(i, :); % Coordenada de la ancla
    for x = 1:TotalNodos
        CoordNodo = PosNodo(x, :); % Coordenada del nodo
        DistEucl(i, x) = pdist2(CoordAncla, CoordNodo, 'euclidean'); %
Distancia Euclidiana
    end
end
end

%-----%

%-----%
%FUNCION CALCULAR EL ANCLA DE REFERENCIA

function [Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(DistanciaEstimada_ancla_posicion, Posiciones_Anclas, N
um_anclas, punto)
for Ancla_r=1:Num_anclas
    for i=1:Num_anclas
        v_dis(i)=DistanciaEstimada_ancla_posicion(i, punto);
    end
end
Ancla_r = find(v_dis==min(v_dis),1);
A_r = Posiciones_Anclas(Ancla_r,:);
end

%-----%

%-----%
% Función bounding_box_gen
function [pos_estim] = bounding_box_gen(M_anclas, M_D_estim)
% Validar tamaños de las entradas
[Num_anclas, ~] = size(M_anclas);

```

```

[Num_anclas_M_D, Num_puntos] = size(M_D_estim);

if Num_anclas ~= Num_anclas_M_D
    error('Las dimensiones de M_anclas y M_D_estim no coinciden.');
```

---

```

end

% Inicializar la matriz de posiciones estimadas
pos_estim = zeros(Num_puntos, 2);

% Generar el bounding box para cada punto
for j = 1:Num_puntos
    esquina1 = zeros(Num_anclas, 2);
    esquina2 = zeros(Num_anclas, 2);
    for i = 1:Num_anclas
        esquina1(i, :) = M_anclas(i, :) - M_D_estim(i, j);
        esquina2(i, :) = M_anclas(i, :) + M_D_estim(i, j);
    end
    % Determinar las coordenadas finales del bounding box
    maxesquina1 = max(esquina1, [], 1); % Máximo de cada columna (X, Y)
    minesquina2 = min(esquina2, [], 1); % Mínimo de cada columna (X, Y)
    pos_estim(j, :) = mean([maxesquina1; minesquina2], 1); % Promedio de
las esquinas
end

% Validar que la salida tenga el tamaño correcto
[Num_x_bb, ~] = size(pos_estim);
if Num_x_bb ~= Num_puntos
    error('El número de puntos en x_bounding_box no coincide con
Num_puntos.');
```

---

```

end
%-----%

%-----%

function [x_e] = metodo_BWLS(Posiciones_Anclas, d_e, Ancla_r, A_r)
    Num_anclas = size(Posiciones_Anclas, 1);

    % Generación de A_3
    A_p = Posiciones_Anclas;
    A_p(Ancla_r, :) = [];
    A_3 = A_p - repmat(A_r, Num_anclas-1, 1);

    % Cálculo de k_i y k_r_i
    k_i = sum(Posiciones_Anclas.^2, 2);
    k_r = k_i(Ancla_r);
    k_r_i = k_r - k_i;
    k_r_i(Ancla_r) = [];

    d_e_sin_ref = d_e(:, 1);
    d_e_sin_ref(Ancla_r) = [];
    % Construcción de P_3
    P_3 = d_e(Ancla_r, 1)^2 - d_e_sin_ref(:,1).^2 - k_r_i;

    % Bounding Box
    x_bounding_box = bounding_box_gen(Posiciones_Anclas, d_e);
    d_bounding_box = zeros(Num_anclas, 1);
    for k = 1:Num_anclas
```

```

        d_bounding_box(k) = pdist2(x_bounding_box(1, :), Posiciones_Anclas(k,
:), 'euclidean');
    end
%   d_bounding_box(Ancla_r) = [];
    sigma = d_e(:,1) - d_bounding_box(:,1);

%   Cálculo de W (matriz de pesos)
    M_diag = [];
    for i = 1:Num_anclas
        if i ~= Ancla_r
            M_diag = [M_diag, 4 * sigma(i)^2 * d_e(i, 1)^2 + 2 * sigma(i)^4];
        end
    end

%   Sumar el término global a toda la matriz
    C = diag(M_diag) + (4 * d_e(Ancla_r, 1)^2 * sigma(Ancla_r)^2 + 2 *
sigma(Ancla_r)^4);

    W = pinv(C);

%   Cálculo de x_e
    x_e = 0.5 * (A_3' * W * A_3)^(-1) * A_3' * W * P_3;

end
%-----%

%-----%
function [x_e_NLS] = metodo_NLS_basico(Posiciones_Anclas, d_e,
grid_posiciones, Distancia_Ancla_Grid)
%   Número de nodos (puntos) y anclas
    Num_anclas = size(Posiciones_Anclas, 1); % Filas de Posiciones_Anclas son
las anclas
    Num_grid = size(grid_posiciones, 1); % Número de puntos en el grid

%   Inicializar matriz de errores
    Matriz_Errores = zeros(Num_grid, 1);

%   Cálculo de errores
    for ancla = 1:Num_anclas
        for grid_indice = 1:Num_grid
            % Error cuadrático entre distancia estimada y real
            Matriz_Errores(grid_indice, 1) = Matriz_Errores(grid_indice,
1) + ...
            (d_e(ancla, 1) - Distancia_Ancla_Grid(ancla,
grid_indice))^2;
        end
    end

%   Determinar la posición estimada para cada nodo
    x_e_NLS = zeros(1, 2);
    %   Encontrar el índice del menor error
    [~, indice_min] = min(Matriz_Errores(:, 1));
    %   Guardar la posición estimada correspondiente al menor error
    x_e_NLS(1, :) = grid_posiciones(indice_min, :);
end

```

```

%-----%

%-----%

function [x_e_NLS_convision] = metodo_NLS_con_cond_vision(Posiciones_Anclas,
d_e, grid_posiciones, Distancia_Ancla_Grid, M_tipo)

    % Número de anclas y número de puntos en el grid
    Num_anclas = size(Posiciones_Anclas, 1);
    Num_grid = size(grid_posiciones, 1);

    % Inicializar matriz de errores
    Matriz_Errores = zeros(Num_grid, 1);

    % Asignar pesos según la condición de visión directa (DDP o UDP)
    W_b = ones(Num_anclas, 1); % Inicialmente todas las mediciones tienen
peso 1
    W_b(M_tipo >= 1) = 0.005; % Si es UDP, se asigna un peso menor

    % Cálculo de errores ponderados
    for ancla = 1:Num_anclas
        for grid_indice = 1:Num_grid
            % Error cuadrático ponderado
            Matriz_Errores(grid_indice, 1) = Matriz_Errores(grid_indice, 1) +
...
            W_b(ancla) * (d_e(ancla, 1) - Distancia_Ancla_Grid(ancla,
grid_indice))^2;
        end
    end

    % Determinar la posición estimada con el menor error
    [~, indice_min] = min(Matriz_Errores(:, 1));
    x_e_NLS_convision = grid_posiciones(indice_min, :);

    % disp('Dimensiones de Posiciones_Anclas:'),
    disp(size(Posiciones_Anclas));
    % disp('Dimensiones de d_e:'), disp(size(d_e));
    % disp('Dimensiones de grid_posiciones:'), disp(size(grid_posiciones));
    % disp('Dimensiones de Distancia_Ancla_Grid:'),
    disp(size(Distancia_Ancla_Grid));
    % disp('Dimensiones de M_tipo:'), disp(size(M_tipo));
    %
    % disp('Pesos asignados:'), disp(W_b);
    % disp('Errores antes de minimizar:'), disp(Matriz_Errores);

end

%-----%

%-----%

```

---

```

function [x_e_LLS] = metodo_LLS_basico(Posiciones_Anclas, d_e,
AnclaReferencia, CoordAnclaRef)
    Num_anclas = length(Posiciones_Anclas);

    % Generación de la matriz de posiciones relativas de las anclas
    % excluyendo la de referencia
    % El ancla de referencia se utiliza como un punto fijo, y todas las demás
    % coordenadas
    % se miden en relación con ella.
    % Se crea una matriz llamada PosicionesRelativas que contiene las
    % posiciones de las demás anclas sin incluir la referencia.

    PosicionesRelativas = [];
    for i = 1:Num_anclas
        if i ~= AnclaReferencia
            PosicionesRelativas = [PosicionesRelativas; Posiciones_Anclas(i,
:)]];
        end
    end

    % Se calcula una matriz Matriz_Diferencias, que contiene las diferencias
    % entre las
    % posiciones de las anclas restantes y las coordenadas de la ancla de
    % referencia.
    Matriz_Diferencias = PosicionesRelativas - CoordAnclaRef .*
ones(Num_anclas - 1, 2);

    % Cálculo de las normas cuadradas de las posiciones de las anclas
    NormCuadradaReferencia = CoordAnclaRef(1).^2 + CoordAnclaRef(2).^2;
    NormCuadradas_Anclas = zeros(1, Num_anclas);
    for i = 1:Num_anclas
        if i ~= AnclaReferencia
            NormCuadradas_Anclas(i) = Posiciones_Anclas(i, 1).^2 +
Posiciones_Anclas(i, 2).^2;
        end
    end

    % Diferencias de las normas cuadradas entre la ancla de referencia y las
    % otras
    Diferencia_NormCuadrada = zeros(1, Num_anclas);
    for i = 1:Num_anclas
        if i ~= AnclaReferencia
            Diferencia_NormCuadrada(i) = NormCuadradaReferencia -
NormCuadradas_Anclas(i);
        end
    end

    % Cálculo del vector de términos independientes (P_3)
    Vector_Independientes = [];
    for i = 1:Num_anclas
        if i ~= AnclaReferencia
            Vector_Independientes = [Vector_Independientes; ...
d_e(AnclaReferencia,1).^2 - d_e(i, 1).^2 -
Diferencia_NormCuadrada(i)];
        end
    end

    % Resolución del sistema lineal para estimar la posición del nodo
    x_e_LLS = 0.5 * (Matriz_Diferencias' * Matriz_Diferencias)^(-1) *
Matriz_Diferencias' * Vector_Independientes;
end

```

## 2. *Generador gráficas*

```

clear; clc;

% Paso 1: Lista archivos de resultados
archivos_resultados = dir('resultados_promedio_iteracion_*.mat');

% Inicializar variables
num_anclas_udp = [];
num_total_anclas = [];
rmse_NLS_values = [];
rmse_NLS_ConVision_values = [];
rmse_LLS_values = [];
rmse_BWLS_values = [];

% Paso 2: Cargar datos
for i = 1:length(archivos_resultados)
    datos = load(archivos_resultados(i).name);
    if isfield(datos, 'num_anclas_udp') && isfield(datos, 'num_total_anclas')
    && isfield(datos, 'rmse_NLS')
        num_anclas_udp = [num_anclas_udp; datos.num_anclas_udp]; % Número de
anclas UDP
        num_total_anclas = [num_total_anclas; datos.num_total_anclas]; %
Número total de anclas
        rmse_NLS_values = [rmse_NLS_values; datos.rmse_NLS]; % RMSE NLS
        rmse_NLS_ConVision_values = [rmse_NLS_ConVision_values;
datos.rmse_NLS_ConVision]; % RMSE NLS_ConVision
        rmse_LLS_values = [rmse_LLS_values; datos.rmse_LLS]; % RMSE LLS
        rmse_BWLS_values = [rmse_BWLS_values; datos.rmse_BWLS]; % RMSE BWLS
    end
end

% Paso 3: Asegurar vectores columna
num_anclas_udp = num_anclas_udp(:);
num_total_anclas = num_total_anclas(:);
rmse_NLS_values = rmse_NLS_values(:);
rmse_NLS_ConVision_values = rmse_NLS_ConVision_values(:);
rmse_LLS_values = rmse_LLS_values(:);
rmse_BWLS_values = rmse_BWLS_values(:);

% Paso 4: Organizar datos en una tabla con agrupación por num_total_anclas y
num_anclas_udp
tabla_rmse = table(num_total_anclas, num_anclas_udp, rmse_NLS_values,
rmse_NLS_ConVision_values, rmse_LLS_values, rmse_BWLS_values, ...
    'VariableNames', {'TotalAnclas', 'NumAnclasUDP',
    'RMSE_NLS', 'RMSE_NLS_ConVision', 'RMSE_LLS', 'RMSE_BWLS'});

% Agrupar y calcular promedios por número total de anclas y número de anclas
UDP
promedio_rmse = varfun(@mean, tabla_rmse, 'InputVariables', {'RMSE_NLS',
    'RMSE_NLS_ConVision', 'RMSE_LLS', 'RMSE_BWLS'}, ...
    'GroupingVariables', {'TotalAnclas', 'NumAnclasUDP'});

```

```

% Paso 5: Graficar cada caso por separado
total_anclas_unicos = unique(promedio_rmse.TotalAnclas); % Encontrar valores
únicos de anclas totales

for i = 1:length(total_anclas_unicos)
    total_anclas = total_anclas_unicos(i);

    datos_filtrados = promedio_rmse(promedio_rmse.TotalAnclas ==
total_anclas, :);

    figure;
    hold on;

    ancho_barras = 0.15;

    bar(datos_filtrados.NumAnclasUDP - ancho_barras,
datos_filtrados.mean_RMSE-NLS_ConVision, 'FaceColor', 'm', 'BarWidth',
ancho_barras, 'DisplayName', 'NLS ConVision');
    bar(datos_filtrados.NumAnclasUDP, datos_filtrados.mean_RMSE_BWLS,
'FaceColor', 'g', 'BarWidth', ancho_barras, 'DisplayName', 'BWLS');
    bar(datos_filtrados.NumAnclasUDP + ancho_barras,
datos_filtrados.mean_RMSE-NLS, 'FaceColor', 'b', 'BarWidth', ancho_barras,
'DisplayName', 'NLS');
    bar(datos_filtrados.NumAnclasUDP + 2*ancho_barras,
datos_filtrados.mean_RMSE_LLS, 'FaceColor', 'r', 'BarWidth', ancho_barras,
'DisplayName', 'LLS');

    % Personalización del gráfico
    title(sprintf('RMSE para %d anclas totales', total_anclas));
    xlabel('Número de anclas UDP');
    ylabel('RMSE');
    legend('show', 'Location', 'northeast');
    grid on;
    set(gca, 'FontSize', 12);

    hold off;
end

% Paso 6: Mostrar resultados en consola
disp('Promedios de RMSE por número de anclas UDP y total de anclas:');
disp(promedio_rmse);

% Definimos el nombre del archivo Excel
nombre_archivo = 'promedio_rmse.xlsx';

% Escribimos la tabla en el archivo Excel
writetable(promedio_rmse, nombre_archivo);

% Mensaje de confirmación
disp(['Tabla exportada exitosamente a ', nombre_archivo]);

```

### 3. Graficas\_areasBWLS.m

---

```

clear; clc; close all;

base_path = pwd;
carpetas = {fullfile(base_path, 'Area5x5'), fullfile(base_path, 'Area10x10'),
fullfile(base_path, 'Area15x15')};
nombres_areas = {'5x5', '10x10', '15x15'}; % Etiquetas para la leyenda

% Estructura para almacenar los resultados de cada área
resultados = struct();

% Iterar sobre cada carpeta para cargar los archivos
for i = 1:length(carpetas)
    carpeta = carpetas{i};

    % Obtener lista de archivos dentro de la carpeta
    archivos = dir(fullfile(carpeta, 'resultados_promedio_iteracion_*.mat'));

    % Verificar si hay archivos en la carpeta
    if isempty(archivos)
        warning(['No se encontraron archivos en: ', carpeta]);
        continue;
    end

    % Inicializar almacenamiento de datos
    resultados(i).area = nombres_areas{i};
    resultados(i).num_total_anclas = [];
    resultados(i).num_UDP = [];
    resultados(i).RMSE_BWLS = [];

    % Cargar cada archivo dentro de la carpeta
    for j = 1:length(archivos)
        archivo_path = fullfile(carpeta, archivos(j).name);
        datos = load(archivo_path);

        % Verificar que los datos requeridos existan en el archivo
        if ~isfield(datos, 'num_anclas_udp') || ~isfield(datos, 'rmse_BWLS')
        || ~isfield(datos, 'num_total_anclas')
            warning(['Archivo incompleto: ', archivo_path]);
            continue;
        end

        % Guardar datos en listas dentro de la estructura
        resultados(i).num_total_anclas = [resultados(i).num_total_anclas;
datos.num_total_anclas];
        resultados(i).num_UDP = [resultados(i).num_UDP;
datos.num_anclas_udp];
        resultados(i).RMSE_BWLS = [resultados(i).RMSE_BWLS; datos.rmse_BWLS];
    end
end

% Verificar si hay datos cargados
if isempty(resultados)
    error('No se cargaron datos de ninguna carpeta. Verifique los archivos y
nombres de ruta.');
```

```

end

% Obtener los valores únicos de "TotalAnclas"
num_total_anclas_all = [];
for i = 1:length(resultados)

```

---

```

    num_total_anclas_all = [num_total_anclas_all;
resultados(i).num_total_anclas];
end
total_anclas_unicos = unique(num_total_anclas_all);

% **Colores personalizados en tonos claros**
colores = {[0.6 0.8 1], [0.7 1 0.7], [1 0.6 0.6]}; % Azul Claro, Verde Claro,
Rojo Claro
marcadores = {'o', 's', 'd'}; % Estilos de marcador para distinción

% **Generar una figura lineal por cada número total de anclas**
for t = 1:length(total_anclas_unicos)
    total_anclas = total_anclas_unicos(t);

    figure;
    hold on;

    leyenda_labels = {}; % Para la leyenda

    for a = 1:length(carpetas)
        % Buscar los datos del área y número de anclas totales
        idx = find(resultados(a).num_total_anclas == total_anclas);

        if isempty(idx)
            warning(['No hay datos para ', nombres_areas{a}, ' con ',
num2str(total_anclas), ' anclas.']);
            continue;
        end

        % Obtener datos de esa área y ese total de anclas
        num_anclas_UDP = resultados(a).num_UDP(idx);
        RMSE_BWLS = resultados(a).RMSE_BWLS(idx);

        % Ordenar por número de anclas UDP
        [num_anclas_UDP, sort_idx] = sort(num_anclas_UDP);
        RMSE_BWLS = RMSE_BWLS(sort_idx);

        % Graficar líneas con marcadores
        plot(num_anclas_UDP, RMSE_BWLS, '-o', 'Color', colores{a},
'MarkerFaceColor', colores{a}, ...
'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);

        % Agregar etiquetas a la leyenda
        leyenda_labels{end+1} = ['B-WLS - ' nombres_areas{a}];
    end

    % Configurar ejes y etiquetas
    xlabel('Número de Anclas UDP');
    ylabel('RMSE');
    title(['Comparación de B-WLS para ', num2str(total_anclas), ' Anclas
Totales']);
    legend(leyenda_labels, 'Location', 'northwest');
    grid on;
    hold off;
end

```

