

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

Máster en Comunicaciones

“Análisis y diseño de un sistema de RF
operando en el entorno marítimo de la Bahía de
Cádiz”

Alumno: Adrián Beruete Lacomba

Tutor: Francisco Javier Falcone Lanás

Pamplona, 4 septiembre de 2014

Índice:

1. Introducción:	5
2. Objetivos:	9
3. Estado del arte:	11
3.1. Sistemas de observación costeros a nivel nacional.	11
3.1.1. <i>Puertos del Estado (PE)</i>	11
3.1.2. <i>Estaciones océano-meteorológicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco</i>	14
3.1.3. <i>Boya oceanográfica Augusto González de Linares del Instituto Español de Oceanografía</i>	15
3.2. Redes de sensores inalámbricos. WSN.....	15
3.2.1. <i>Tecnologías de comunicación de área inalámbrica</i>	17
3.2.2. <i>IEEE 802.15.4. ZigBee</i>	20
3.3. Monitorización de un entorno marino real mediante una red de sensores inalámbricos WSN con tecnología ZigBee.....	24
4. Desarrollo del TFM:	27
4.1. Construcción del escenario.	27
4.2. Google Earth.....	28
4.3. Google Street View	29
4.4. Construcción del Primer escenario.....	30
4.4.1. <i>Primeras Simulaciones</i>	33
4.5. Escenario con edificios.....	38
4.5.1. <i>Segundas simulaciones:</i>	40
4.6. Creación del escenario final.	41
4.6.1. <i>Construcción de la tierra firme</i>	42
4.6.2. <i>Rellenado del escenario con agua</i>	46
4.6.3. <i>Construcción de los edificios del escenario</i>	50
4.6.4. <i>Escenario final</i>	52
5. Resultados	55
5.1. Primera simulación con escenario final.....	55
5.2. Validación del escenario.....	57
5.2.1. <i>Medidas en la Bahía de Cádiz</i>	58
5.2.2. <i>Medidas en simulación</i>	60

5.3. Scattering Sea Surface.	64
5.4. Simulación con Scattering.....	66
5.4.1. Simulación con obstáculos.....	66
5.4.2. Simulación con pared.....	71
5.5. Comparación final.	71
6. Red de Sensores ZigBee.	74
6.1. Aplicaciones de la red de sensores ZigBee.	75
6.2. Simulación de la red de sensores.....	75
6.3. Análisis de la red de sensores.	84
7. Conclusiones.	86
8. Líneas futuras.	88
9. Bibliografía:.....	90
9.1. Bibliografía de imágenes.	91
10. Anexo 1: Código para rellenar agua.	92
11. Anexo 2: Especificaciones técnicas de dispositivos ZigBee utilizados.....	96
Índice de Figuras:.....	97
Índice de Tablas:.....	101
Índice de Gráficos:	101

1. Introducción:

Las comunicaciones inalámbricas se pueden definir como aquellas comunicaciones en las que la transmisión de información entre el emisor y el receptor no se encuentra unida por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio.

A pesar del uso extenso de medios de transmisión alámbricos como la fibra óptica, las líneas microstrip o las guías de onda; las transmisiones inalámbricas constituyen una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de voz, datos y vídeo sin las necesidad de utilizar cables para establecer la conexión.

Las comunicaciones inalámbricas han experimentado una exponencial evolución en los últimos años. Este rápido avance, unido al gran número de empresas que explotan este tipo de tecnologías y al consecuente establecimiento de estándares y abaratamiento de los equipos, han hecho que las comunicaciones inalámbricas adopten un papel muy importante en la vida diaria de las personas.

Un ejemplo muy claro es el caso del teléfono móvil. En solo quince años de existencia, la telefonía móvil ya tuvo más usuarios que la telefonía fija. Actualmente, más de un 75% de la población tiene un contrato de telefonía móvil; esto quiere decir que, la telefonía móvil de voz cuenta con más de 5.000 millones de usuarios en 212 países. Por otro parte, más del 60 % de la población mundial se conecta a Internet con una conexión inalámbrica.

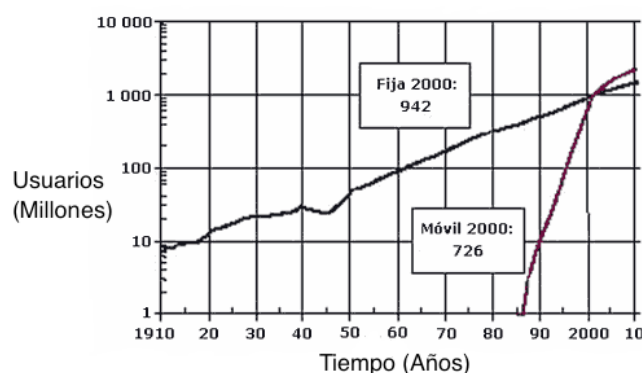


Figura 1.1: convergencia de telefonía fija y móvil en el mundo. Fuente [iv].

Las posibilidades que brindan este tipo de tecnologías son muy amplias ya que pueden amoldarse a cualquier entorno ambiental. Además de la telefonía sin cable existen una infinidad de sistemas inalámbricos, como son la radiodifusión, las comunicaciones por satélite, etc. y todos estos sistemas tienen en común que utilizan el mismo canal para comunicarse, el espacio libre.

Es en este punto es donde radican las principales desventajas de las tecnologías inalámbricas. Todos los posibles sistemas inalámbricos comparten el mismo medio, el aire, lo que conlleva problemas añadidos relacionados con interferencias, condiciones climatológicas, seguridad... Además, tiene un alcance dependiente de la distancia al cuadrado.

Asimismo, a todos estos problemas, hay que añadir los problemas derivados de la propia geografía del espacio en el que se quiere desplegar el sistema inalámbrico. Estos

problemas son los efectos físicos que pueden sufrir las señales debido a fenómenos reflexivos, refractivos, difractivos... Es por esto, que, en entornos geográficos más fuertes o más abruptos, la limitación es aún mayor y el alcance depende fuertemente del entorno. Por tanto, la limitación más importante existente en estos sistemas inalámbricos es el propio canal.

Otro de los aspectos clave en los sistemas de comunicación inalámbricos es el de definir cuál es la frecuencia de operación correcta. Si se opta por utilizar bajas frecuencias, los efectos relacionados con las pérdidas de propagación son menores y mayor es la penetración sobre el terreno, pero sin embargo, el ancho de banda disponible es mucho menor. Por otro lado, si la elección de la frecuencia de operación corresponde con frecuencias altas, se dispondrá de un ancho de banda mayor; no obstante, cualquier obstáculo o cambio brusco de dirección atenuará gravemente la señal.

Por todas estas razones, el desarrollo y aplicación de las tecnologías inalámbricas no resulta sencillo en algunos entornos. Por ello, es necesario realizar un detallado estudio previo antes de realizar cualquier sistema de comunicación inalámbrico.

Durante esta última década la monitorización del medio marino se ha convertido en un importante campo de interés científico. Los sistemas marinos costeros son particularmente vulnerables a la influencia de la actividad humana debido principalmente al desarrollo industrial, turístico y urbanístico, y es por ello por lo que estas aguas se convierten en objetivos ideales en el ámbito de la investigación cuya finalidad es analizar el entorno marino costero.

Las tecnologías de la información y las comunicaciones ofrecen soluciones, desde redes a pequeña escala hasta complejos sistemas de observación costeros, para la monitorización en tiempo real de estos ecosistemas.

Las tecnologías inalámbricas actuales utilizadas en aplicaciones marinas se basan principalmente en VHF, sistemas de telecomunicación móviles celulares, (GSM, UMTS, etc.) y sistemas de comunicaciones por satélite como INMARSAT, VSAT... Sin embargo, estos sistemas sufren muchas debilidades como bajo ancho de banda y baja capacidad (GSM, sistemas de satélite y VHF), corto alcance (móviles celulares), alto costo (comunicaciones por satélite y móvil) y gran tamaño y peso de las antenas y transmisores-receptores (sistemas VHF).

Estas limitaciones han motivado una nueva actividad de investigación con el objetivo de diseñar y desarrollar un sistema de comunicación de banda ancha inalámbrica para llevar a cabo aplicaciones como las relacionadas con el seguimiento en tiempo real del medio marino a través de la detección de múltiples parámetros físicos.

Dentro de las redes a pequeña escala, las WSNs (Wireless Sensor Networks) constituyen una solución muy atractiva por su facilidad de despliegue, operación y repliegue, así como por su reducido coste.

Son un tipo de red ad-hoc autónoma, auto gestionable compuesta por decenas, cientos o incluso miles de nodos de sensores inteligentes que pueden monitorizar grandes entornos físicos. En una WSN, los nodos sensores tienen no sólo el componente de sensor, sino también las capacidades de procesamiento, comunicación, energía, y almacenamiento a bordo.

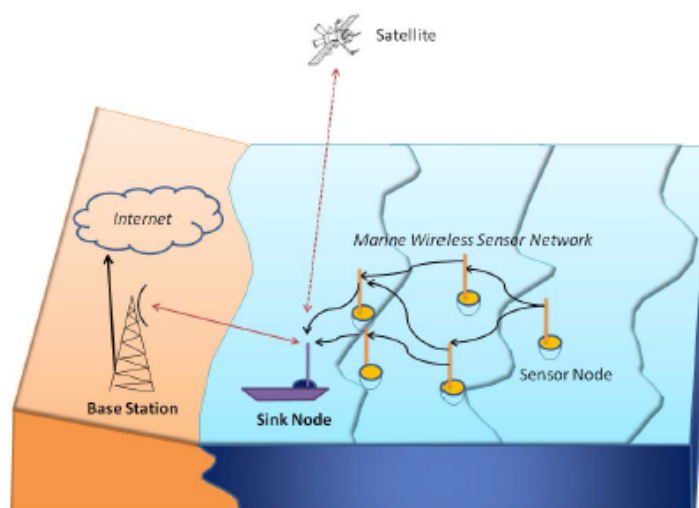


Figura 1.2: ejemplo de red de sensores WSN en entorno marino. Fuente [1].

La red se compone de nodos sensores que podrían ser generalmente boyas, barcos o plataformas estables en el mar, que, a su vez, transmite los datos de forma inalámbrica a un nodo receptor mediante el uso de comunicaciones multisalto; es decir, un nodo podría enviar los datos medidos a la estación base a través de nodos intermedios. El nodo receptor es el encargado de la recolección de todos los datos y a su vez, es el encargado de transmitirlos a una estación base en tierra para el procesamiento y seguimiento. El enlace inalámbrico entre el nodo de sumidero y la estación base es crítico para la red WSN marina.

De esta manera, en el caso concreto del entorno marino es posible, por ejemplo, obtener en tiempo real parámetros relaciones con condiciones del mar: altura del oleaje, temperatura del agua, presión, salinidad, nutrientes, velocidad de la corriente del agua...

Es aquí donde nace la motivación de este proyecto, con el fin de intentar establecer una red de sensado inalámbrica con el objetivo de analizar el comportamiento de estas redes en espacios marinos.

Esta página se deja en blanco de forma intencionada.

2. Objetivos:

El principal objetivo de este proyecto es el de realizar el diseño y el análisis de una red de sensores inalámbricos en un entorno marítimo, concretamente situado en la Bahía de Cádiz.

El estudio puede desglosarse en varios objetivos que se plantearán a lo largo del desarrollo del proyecto. Uno de ellos será la creación de un escenario complejo, como es la Bahía de Cádiz, analizando las características del entorno y de los materiales.

Luego, cuando el escenario haya sido creado, mediante software, se realizarán varias simulaciones en distintas localizaciones dentro de la Bahía con el método de trazado de rayos 3D, creando distintos mapas de cobertura. Se compararán las medidas realizadas en simulación con medidas obtenidas 'in situ', con el objetivo de verificar que efectivamente el escenario simulado cumple las condiciones que se producen en la realidad.

Por último, el objetivo final del proyecto será desarrollar una posible aplicación que dé una solución viable para aplicar redes de sensores en entornos marinos utilizando la tecnología ZigBee.

Esta página se deja en blanco de forma intencionada.

3. Estado del arte:

3.1. Sistemas de observación costeros a nivel nacional.

Los SOCs son sistemas de observación oceanográfica cuyo objetivo es llevar a cabo la monitorización de las zonas costeras permitiendo de esta forma investigar, entre otras cosas, el impacto de los océanos en la variabilidad de las costas, el impacto del hombre, la presencia de nutrientes y de otros elementos en las aguas costeras, los ecosistemas, la morfología de las costas y la erosión de las playas.

Los SOCs en España están en pleno desarrollo tanto tecnológico como logístico. El SOC más desarrollado en este momento pertenece a Puertos del Estado (en adelante PE). Esto se debe a que dicho organismo se encarga de la seguridad portuaria y marítima de la que dependen gran cantidad de empresas nacionales e internacionales.

Por otro lado, también existen otras que cuentan con gran cantidad de instrumentación oceanográfica dedicadas principalmente a tareas de control y observación marítima dependiendo de diferentes administraciones. Todas ellas se pueden ver en la Tabla 3.1.

Localización	Acrónimo	Observatorio	Web
España	PE	Puertos del Estado	http://www.puertos.es
Cataluña	XIOM	Red de instrumentación oceanográfica y meteorológica de la Generalitat de Catalunya	http://www.boiescat.org/
País Vasco	AZTI	Estaciones océano-meteorológicas de AZTI	http://www.azti.es/aanderaa/experiencia.htm
Cantabria	VIGIA	Red de Vigilancia Integral de las Aguas	http://www.redvigia.es/
Islas Canarias	ACOMAR	Red experimental de alerta control y observación marina	http://www.rcngc.com/boya
Vilanova i la Geltrú	OBSEA	Observatorio Submarino Expansible	http://www.obsea.es/
Golfo de Vizcaya	AGL	IEO (Instituto Español de Oceanografía): Boya oceanográfica Augusto González de Linares	http://www.boya-agl.st.ieo.es

Tabla 3.1: SOCs a nivel nacional. Fuente [13]

3.1.1. Puertos del Estado (PE).

Puertos del Estado es una institución dependiente del Ministerio de Fomento que tiene la responsabilidad global sobre el sistema portuario dependiente del Estado. [26]. Comprende un total de 28 Autoridades Portuarias (ver Figura 2.11) y es la encargada de coordinar dicho sistema, así como de implementar la política del gobierno en materia portuaria. Uno de sus

papeles fundamentales es el mantenimiento de las redes de observación del medio físico que afecta al sistema portuario. Esta labor es realizada por parte del área del medio físico, y tiene tres ámbitos fundamentales de actividad:

- a) *redes de observación.*
- b) *sistemas de predicción:* Las aplicaciones de los sistemas de predicción permiten obtener la agitación en el interior del puerto, mientras que las aplicaciones en playas, además del oleaje, generan información relativa a nivel, corrientes en la playa y características de las zonas de rompientes.
- c) *bases de datos:* El banco de datos de PE almacena todos los datos generados tanto en la red de observación como los datos de los sistemas de predicción. Asimismo incluye varias bases de datos numéricas de retroanálisis siendo éstas accesibles on-line.

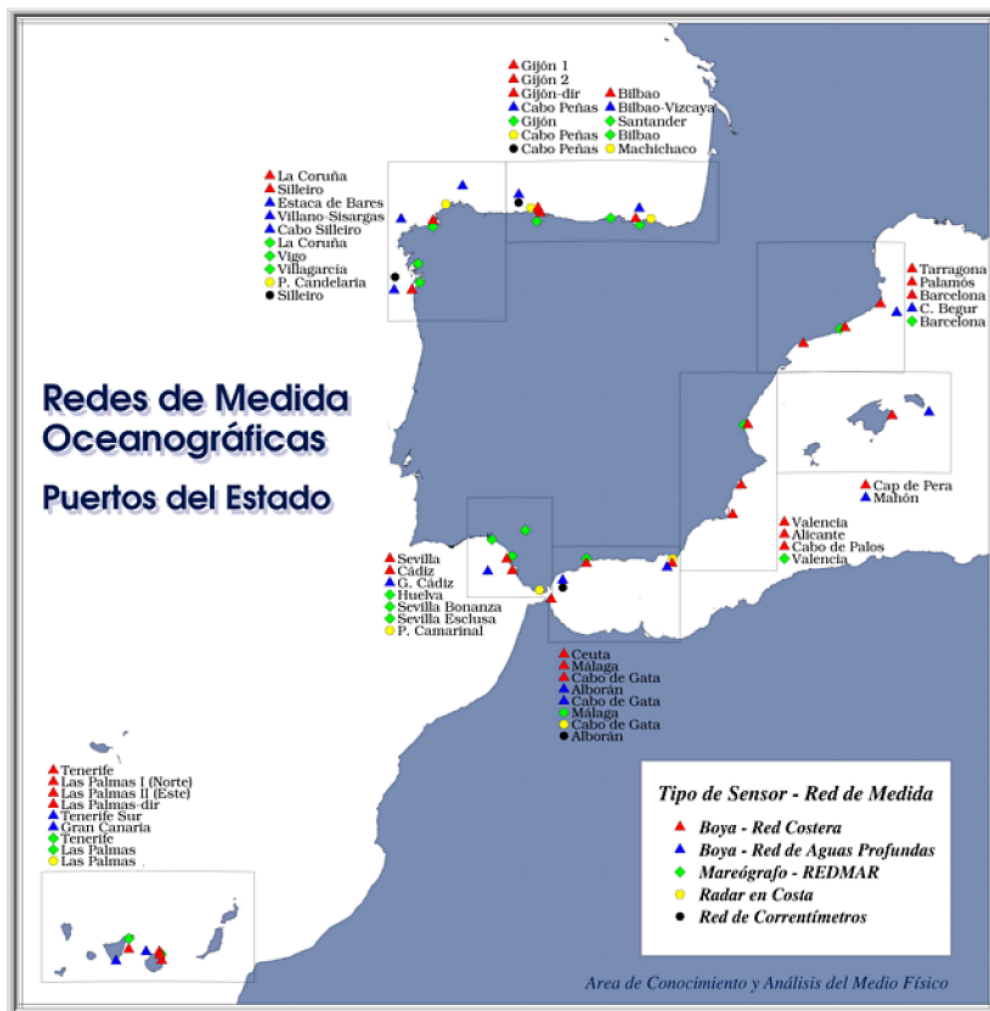


Figura 3.1: Redes de observación de PE. Fuente [26].

Dentro de la red de observación de la red de Puertos del Estado se encuentra la red de aguas profundas formada por 13 boyas Seawatch y 3 WavesScan.. Los instrumentos están ubicados a profundidades entre 200 y 800 metros y miden parámetros relacionados con el

océano y meteorológicos. Los datos son enviados vía satélite y se envían a la web donde pueden ser visualizados por los usuarios en tiempo real. Ver Figura 3.4.

Además, la red de observación cuenta con una red costera que proporciona datos del oleaje en tiempo real en aguas poco profundas. Consta de boyas Waverider y de boyas Tryaxis.

Existe también una red de correntímetros que se encarga de obtener medidas relacionadas con parámetros marinos como las corrientes, la temperatura y la salinidad del mar, que complementan y ayudan a interpretar las medidas obtenidas en las otras redes. Asimismo, la red de observación cuenta con una red de meteorología portuaria REAMPOR que consta de 30 estaciones meteorológicas instaladas en 21 Autoridades Portuarias.

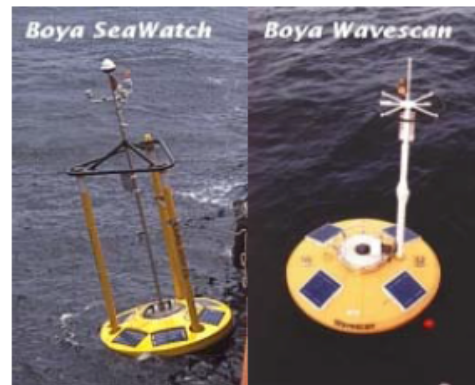


Figura 3.2: Boyas WaveScan y SeaWatch

La red de mareógrafos REDMAR tiene como objetivo la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas para su posterior explotación. En la actualidad está constituida por 15 mareógrafos acústicos SONAR y 7 mareógrafos de presión AANDERAA.

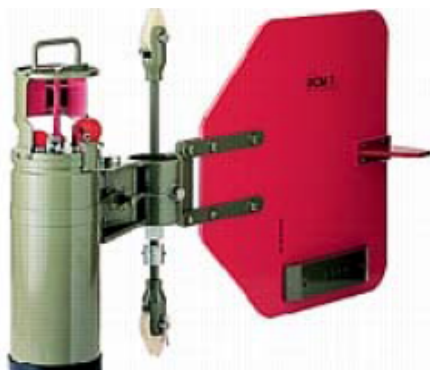


Figura 3.3: Correntímetro de la red de PE

Por último, La tecnología radar de alta frecuencia permite la monitorización remota de corrientes y oleaje en un área con rango entre centenas y miles de kilómetros cuadrados.



Figura 3.4: interfaz usuario en tiempo real. Fuente[x].

3.1.2. Estaciones océano-meteorológicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

La red meteorológica del País Vasco está formada por seis estaciones en los puertos de : Bilbao, Armintza, Bermeo, Ondarroat, Getaria y Hondarribia. Cada estación registra parámetros meteorológicos como: viento, presión atmosférica, temperatura del aire, y radiación.

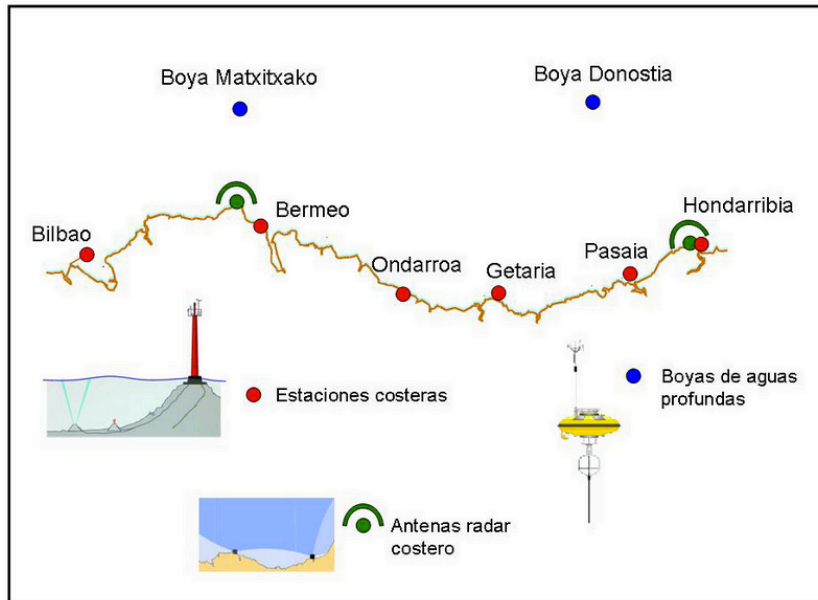


Figura 3.5: Red Océano-Meteorológica del País Vasco. Fuente[ix]

La información oceanográfica se recibe gracias a un correntímetro de fondo, que mide simultáneamente la velocidad y dirección de las corrientes marinas. Además, un mareógrafo registra la altura de la marea, la altura del oleaje y la altura máxima final de la ola.

Toda la información oceanográfica es transmitida por cable a un receptor de datos alojado en la estación meteorológica. Esta información es recogida junta a la meteorológica y es enviada vía radio a la unidad de recepción, instalada en una oficina en cada puerto.

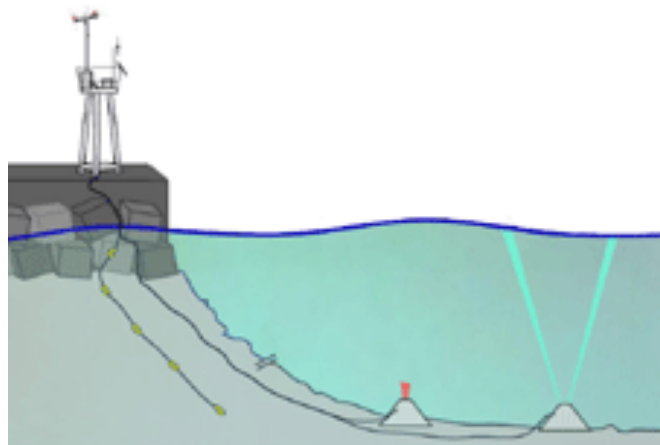


Figura 3.6: Esquema de una estación tipo y la torreta metereologica.

3.1.3. Boya oceanográfica Augusto González de Linares del Instituto Español de Oceanografía.

La boya océano-meteorológica Augusto González de Linares (en adelante AGL) está situada a 40 km de costa en el Golfo de Vizcaya frente a la ciudad de Santander, y es la ubicada a mayor profundidad (2.850 m) de las que se encuentran actualmente repartidas por las aguas de la Península Ibérica. La boya AGL ofrece en tiempo real información de interés científico e informativo en general de las aguas del mar Cantábrico. Con ella, se analiza la evolución del régimen de brisas costeras y su desarrollo espacial en el medio marino. [27].

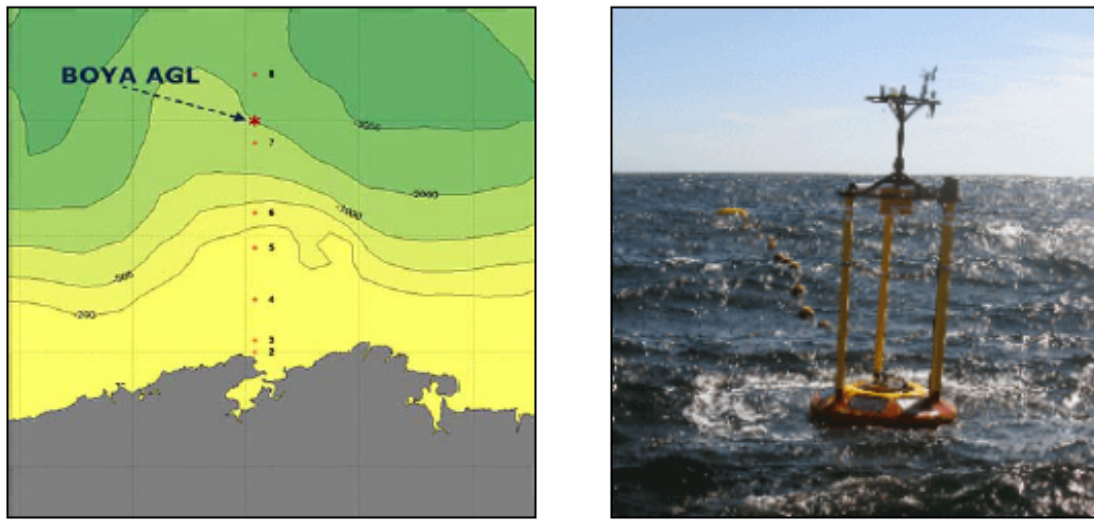


Figura 3.7: Localización y vista de la Boya AGL

Se trata de una boya de tipo Seawatch, con un diámetro total de 1,7 m, 8,6 m de longitud total y un peso de 710 kg. Está equipada con sensores atmosféricos, hidrológicos, oceanográficos y biogeoquímicos, un GPS que permite monitorizar su posición, una unidad de procesado y almacenamiento y un módem satélite para la transferencia de datos. En cuanto a la alimentación de la boya, se realiza a través de paneles solares.

3.2. Redes de sensores inalámbricos. WSN.

Como se ha definido en los objetivos del proyecto, uno de los fines de este documento es simular una red de sensores inalámbrica en la Bahía de Cádiz. Por ello, resulta necesario definir y explicar el concepto de red de sensores y comentar las diferentes tecnologías que se pueden utilizar dentro de ésta.

Las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks) se encuadran dentro de la llamada Inteligencia Ambiental. La inteligencia ambiental consiste en la creación de una serie de objetos de uso cotidiano con cualidades interactivas de carácter ‘suave’; es decir, poco invasivo en el medio. El objetivo básico de estas redes es dotar a los objetos de capacidades de adquisición de información, tanto del entorno físico, como del estado actual del objeto en cuestión. Además deberán tener capacidades de procesamiento de datos y comunicación, de tal forma que pueden comunicarse entre ellos y ofrecer nuevos servicios a sus usuarios.

Las redes de sensores inalámbricas (WSN-Wireless Sensor Networks) se basan en dispositivos de bajo coste y consumo, llamados nodos, que son capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación. Los nodos reenvían los mensajes transmitidos por nodos más lejanos hacia el centro de coordinación.



Figura 3.8: ejemplo de WSN en mar. Fuente [vi].

La red de sensores inalámbricos está formada por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan los sensores para diferentes objetivos en diferentes entornos: como pueden ser temperatura, sonido, vibraciones, presión, movimiento, contaminantes o en este caso que nos ocupa parámetros relacionados con el entorno marino. Los sensores pueden ser fijos o móviles.

Los dispositivos son unidades autónomas que están formadas normalmente por un microcontrolador, una fuente de energía (batería), un radio-transceptor (RF) y un elemento sensor.

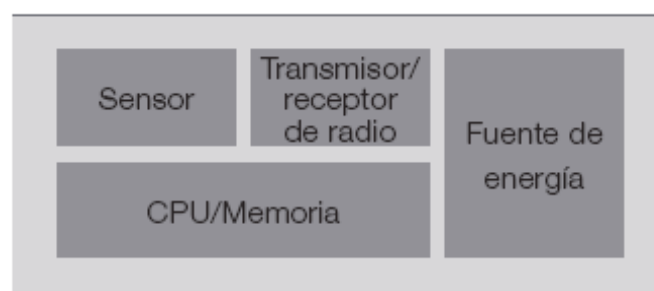


Figura 3.9: elementos de un nodo inalámbrico. Fuente [v].

Para entornos de control de sistemas en tiempo real, los transceptores inteligentes cumplen con el estándar del IEEE 1451.5 de normalización de sensores. Se trata de una familia de estándares propuestos para definir una interfaz para sensores y actuadores, que es independiente de los protocolos de la red de comunicaciones utilizada.

Los transceptores son sensores equipados con microcontroladores que les proveen de capacidad de comunicación. Para la comunicación entre los nodos sensores es posible, o bien desarrollar protocolos de comunicaciones sobre la capa de enlace de datos a partir de diferentes mecanismos de acceso al medio (tales como TDMA, FDMA y CSMA), o bien soportados sobre diferentes estándares y tecnologías de comunicación inalámbrica (ver

Tabla 3.2).

Tecnología	Estándar	Descripción
WiFi	IEEE 802.11n	Sistema de envío de datos de forma inalámbrica sobre redes computacionales
WiMAX	IEEE 802.16	Norma de transmisión de datos usando ondas de radio
Bluetooth	IEEE 802.15.1	Especificación industrial para <i>Wireless Personal Area Networks</i> (en adelante WPANs) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia segura y globalmente libre (2,4 GHz)
GSM		Sistema estándar para la comunicación mediante teléfonos móviles que incorporan tecnología digital
GPRS		Extensión GSM para la transmisión de datos no conmutada (o por paquetes)
	IEEE 802.15.4	Estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de WPANs con tasas bajas de transmisión de datos
ZigBee	IEEE 802.15.4	Especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de WPANs

Tabla 3.2: tecnologías de comunicación inalámbrica. Fuente [13].

La elección de una u otra tecnología dependerá de los requisitos de la WSN que se pretenda realizar, principalmente de la cantidad de información que se debe enviar así como de si requiere el envío de imágenes en tiempo real.

3.2.1. Tecnologías de comunicación de área inalámbrica.

Para la transmisión de información de forma inalámbrica se suelen usar las bandas de infrarrojo, con las que se pueden alcanzar tasas de transferencia de hasta 4 Mbps a pequeñas distancias, con el transmisor y receptor en línea de visión directa; y RF, que poseen altas tasas de transferencia, permitiendo una comunicación entre dos puntos muy alejados y sin línea directa de visión.

La banda ISM, dentro del espectro de RF, es de propósito general por lo que puede ser usada sin necesidad de licencias respetando ciertos límites de potencia emitida. Los sistemas diseñados para trabajar en la banda ISM se caracterizan por un bajo consumo y, en principio, tasas de transmisión no muy altas, aunque se está trabajando para alcanzar mayores velocidades.

Dentro de esta banda ISM, destacan las tecnologías que funcionan a una frecuencia de 2,4 GHz, como por ejemplo, Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth y ZigBee, las cuales se describen brevemente a continuación.

- *WiFi* es un sistema de envío de datos de forma inalámbrica sobre redes computacionales, que permite formar redes inalámbricas equiparables en prestaciones a Ethernet.
- *WiMAX* (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es una norma de transmisión de datos usando ondas de radio.
- *Bluetooth* es una especificación industrial para WPANs que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia segura y globalmente libre.
- *ZigBee*, es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4, que define el nivel físico y el control de acceso al medio de WPANs.

La Tabla 5.1 recoge las principales características de las tecnologías de comunicación inalámbricas citadas en este apartado.

Teniendo en cuenta las especificaciones de una WSN, ZigBee es la mejor alternativa ya que ofrece una baja tasa de transferencia de información y permite su utilización con radios digitales de bajo consumo.

En cuanto al alcance obtenido con ZigBee, depende fuertemente de las características del hardware utilizado y de las características del entorno de transmisión. Por tanto, en este Trabajo Fin de Máster se estudia la viabilidad de ZigBee en entornos marinos.

	WiFi (*)	WiMAX – Fijo (*)	WiMAX – Móvil (*)	Bluetooth	ZigBee
Estándar	802.11	802.16a	802.16e	802.15.1	802.15.4
Movilidad	Sí	No	Sí. < 120 km/h	Sí	Sí
Velocidad	<54 Mbps	< 70 o 100 Mbps (20 MHz)	< 70 o 100 Mbps (20 MHz)	Versión 1.2: 1 Mbps Versión 2.0: 3 Mbps UWB (Ultra Wide Band): 53 - 480 Mbit/s	20kbps: 868 MHz Europe 40kbps: 915 MHz Americas 250 kbps: 2,4 GHz Worldwide
Cobertura	<100 m	5 a 50 km	1,5 a 5 km	Clase 1: 100 m Clase 2: 15-20 m Clase 3: 10 m	10-20 m
Frecuencia de operación	2,4 GHz	2 – 11 GHz	< 6 GHz	2,4 GHz	868/915 MHz 2,4 GHz.
Licencia	No	Puede operar en bandas con o sin licencia	Puede operar en bandas con o sin licencia	No	No
Seguridad	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Consumo	Alto	Alto	Alto	40 mA transmitiendo 0,2 mA en reposo	30 mA transmitiendo 3 uA en reposo

Tabla 3.3: comparativa de tecnologías inalámbricas. Fuente [13].

3.2.2. IEEE 802.15.4. ZigBee.

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal área Network, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. [14].

A diferencia de otras tecnologías, ZigBee está especialmente diseñada para grandes redes de sensores, con las características inherentes a ellas: fiabilidad, larga duración de las baterías de los dispositivos, bajo coste, tamaño pequeño y complejidad reducida, sin requerimientos de calidad de servicio importantes, etc.

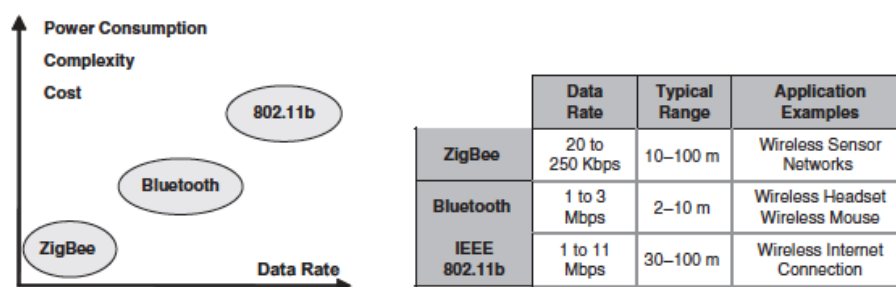


Figura 3.10: Comparación del estándar ZigBee con Bluetooth y IEEE 802.11b. Fuente [14].

El objetivo es ofrecer un estándar abierto, eficiente, de poco consumo e inalámbrico para la monitorización y control de dispositivos. Es un protocolo de comunicación multi-salto; es decir, que se puede establecer comunicación entre dos nodos aún cuando estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten, incrementándose de esta manera el área de cobertura de la red.

ZigBee utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo (ver Tabla 3.4). Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optan, prácticamente siempre, por la banda de 2,4 GHz, por ser libre a nivel mundial. El desarrollo de la tecnología se centra en la sencillez y el bajo coste más que otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN, como por ejemplo Bluetooth.

A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto es debido a su baja tasa de transmisión y, a características propias del estándar IEEE 802.15.4.

Entre las características más importantes se pueden mencionar:

- Puede trabajar tanto en las bandas de 2.4 GHz como en la de 868/915MHz.
- Tasa de transmisión de hasta 250 kbps en 2.4 GHz, 40kbps en 915MHz y 20 kbps en 868 MHz.
- Produce alto rendimiento y baja latencia para dispositivos de bajo ciclo de trabajo, muy adecuado esto para sensores y controles.
- Usa CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) para

acceso al canal. Evitan colisiones en el canal, ya que ZigBee antes de transmitir escucha, y sólo transmitirá cuando el canal esté libre. También puede acceder al canal mediante ALOHA.

- Baja potencia. Ideal para equipos a batería.
- 64 bits de direccionamiento
- 16 bits para identificar redes que determina un total de 65536 redes.
- Permite el uso de ranuras de tiempo (time slots) para posibilitar aplicaciones de baja latencia.
- Protocolo con handshake (diálogo) para mejorar la seguridad en las transferencias.
- Rango: hasta 50 m (valor típico, depende del ambiente).

Frecuencia	Banda	Cobertura	Datos	Canales	Sensibilidad de recepción	Modulación
2,4 GHz	ISM	Mundial	250 kbps	16	-85 dBm	O-QPSK
888 MHz		Europa	20 kbps	1	-92 dBm	BPSK
915 MHz	ISM	América	40 kbps	10	-92 dBm	BPSK

Tabla 3.4: Características de radio ZigBee. Fuente [13].

Las aplicaciones usadas en ZigBee tienen un tráfico que puede clasificarse en uno de los siguientes tipos:

a) *Datos periódicos (continuo)*: la aplicación define una tasa de datos. Es un caso típico de sensores en donde por ejemplo un sensor necesita transmitir la temperatura cada 10 segundos.

b) *Datos intermitentes (por eventos)*: en este caso la aplicación junto a otros estímulos externos al dispositivo definen la tasa de datos. Por ejemplo en un sistema domótico, los interruptores de luces transmiten solo ante un cambio de posición. Mientras tanto están desconectados (comúnmente denominado en modo dormir) y consumiendo una energía de batería mínima.

c) *Datos periódicos con comunicación garantizada (GTS) (Guaranteed time slot)*: hay aplicaciones de baja latencia que requieren comunicación libre de competencia por el canal. GTS es un método de calidad de servicio que garantiza la atención por un cierto ' Δt ' dentro de un período T llamado Supertrama. IEEE 802.15.4 provee un modo de trabajo denominado "con baliza" que sirve como multiplexación temporal.

Además, el estándar 802.15.4 define 2 tipos de dispositivos con el objeto de minimizar el costo del sistema:

a) *FFD (Full Function Device)*: son dispositivos capaces de funcionar en cualquier topología, pueden ser coordinadores ó coordinadores de red. Este tipo de dispositivo puede dialogar con cualquier otro.

b) RFD (Reduced Function Device): Pueden solamente ser miembros de una red con topología estrella. Solo pueden conversar con el coordinador de red. Son dispositivos de baja complejidad con bajo requerimiento de procesamiento y memoria.

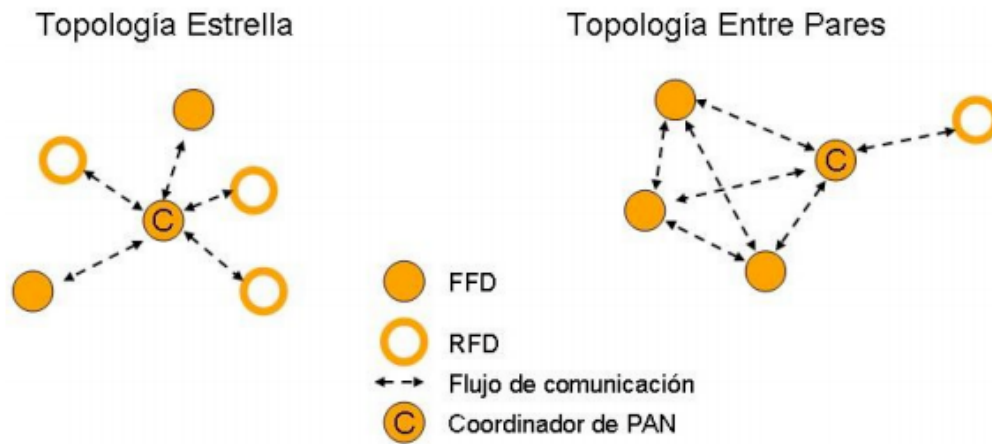


Figura 3.11: Topología en IEEE 802.15.4. Fuente.[viii]

Sin embargo, El estándar ZigBee utiliza terminología ligeramente diferente: un coordinador ZigBee es en un estándar IEEE 802.15.4 un coordinador PAN. Un router ZigBee es un dispositivo que puede actuar como un coordinador IEEE 802.15.4. Y un dispositivo final ZigBee es un dispositivo que no es ni un coordinador ni un router. Tiene el tamaño mínimo de memoria y capacidad de procesamiento. Es el dispositivo menos caro en la red.

Todos los métodos de comunicación inalámbrica de IEEE 802.15.4 usan las técnicas de DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) o PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) para mejorar el rendimiento del receptor.

Es importante apuntar que un dispositivo compatible con ZigBee también es compatible con IEEE 802.15.4.

Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Teóricamente pueden existir hasta 16.000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65.000 nodos, para lo que existe la posibilidad de utilizar varias topologías de red: en estrella, en malla o en grupos de árboles, como puede verse en la Figura 3.11.

Obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas como por ejemplo la memoria disponible y el ancho de banda. Una posible configuración de una red ZigBee podría ser la que se observa en la siguiente imagen:

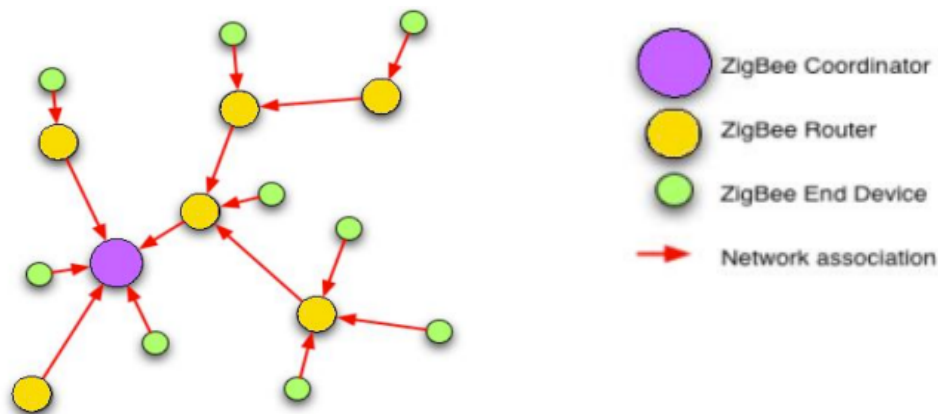


Figura 3.12: Ejemplo de red ZigBee. Fuente[15].

Por último, en la Figura 3.13 se muestran las capas del protocolo ZigBee. Estas se basan en el modelo de referencia ISO para interconexión de sistemas abiertos OSI. Este modelo cuenta con 7 capas pero ZigBee usa solo 4 capas con el objeto de simplificar la arquitectura para el armado de una red de baja tasa de transmisión, simple y de bajo consumo.

Las 2 capas inferiores, o sea la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) son las definidas por el Standard IEEE 802.15.4. Las capas de red (NWK) y de aplicación (APL) se definen en ZigBee. Cada capa se conecta con las capas adyacentes por medio de un SAP (Service Access Point). Un SAP es un lugar por donde una capa superior requiere un servicio a una capa inferior.

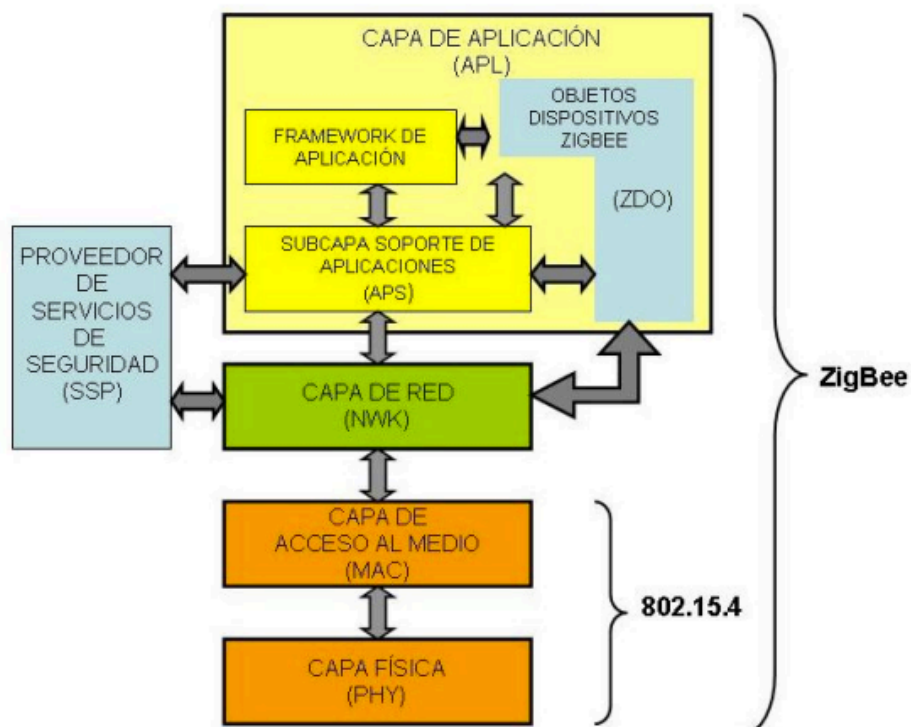


Figura 3.13: capas de 802.15.4 y ZigBee. Fuente [viii].

3.3. Monitorización de un entorno marino real mediante una red de sensores inalámbricos WSN con tecnología ZigBee.

El diseño, la implementación y el despliegue de una WSN para aplicaciones oceanográficas implican resolver los nuevos desafíos, tales como el impacto del medio ambiente marino en los componentes de hardware. El medio marino es un medio agresivo y complejo que requiere un mayor nivel de protección del dispositivo, viviendas flotantes y sistemas de amarre. Además, hay que tener en cuenta los movimientos de los nodos causados por las mareas, olas, barcos, etc. es un problema adicional que podría empeorar la conectividad entre nodos.

En [16] y más detalladamente en [13] se puede ver cómo se ha desplegado una red de sensores inalámbrico en el entorno marino de la laguna del Mar Menor en Murcia.

La Figura 3.14 muestra el despliegue de una WSN para monitorear la laguna costera del Mar Menor. Esta WSN se compone de varios sensores, formados por nodos ‘router’ y nodos ‘Coordinador’. Los nodos ‘Coordinador’ son los encargados de transmitir los mensajes que reciben de los nodos sensores a un servidor de datos situado en una estación remota.

En esta red se han colocado 4 tipos de nodos de sensores : ‘Nodos de profundidad, correntímetros, ‘nodos completos’ y ‘nodos Watercourse’. Los ‘Nodos profundidad’ miden de la temperatura y la presión del mar. Los correntímetros vigilan la velocidad de la corriente. Los ‘Nodos completos’ incluyen sensores para controlar la profundidad, las corrientes, la salinidad y el perfil de temperaturas. Finalmente, los nodos ‘Watercourse’, miden otros parámetros cómo la turbidez, la concentración de oxígeno en el agua, clorofila y nitratos.

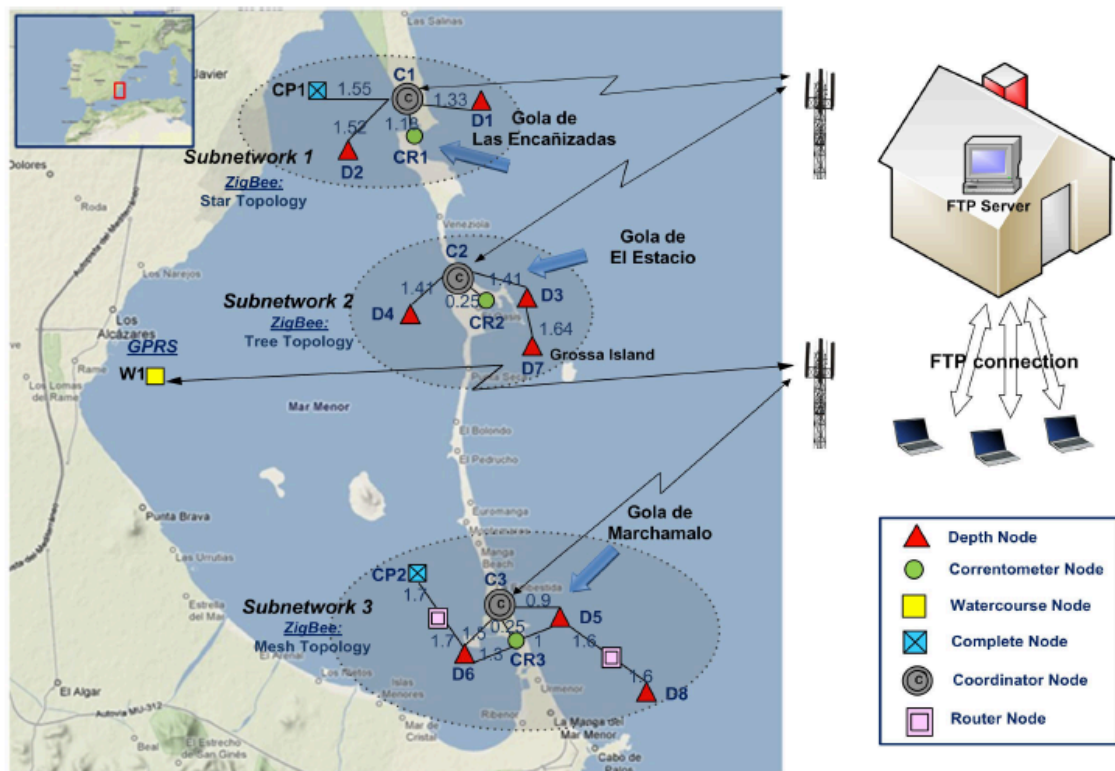


Figura 3.14: desarrollo de la WSN. Fuente [16].

La mayoría de los sensores se encuentran en el fondo del mar y están unidos por cable a la boya instrumental que flota en la superficie. Ver Figura 3.15.

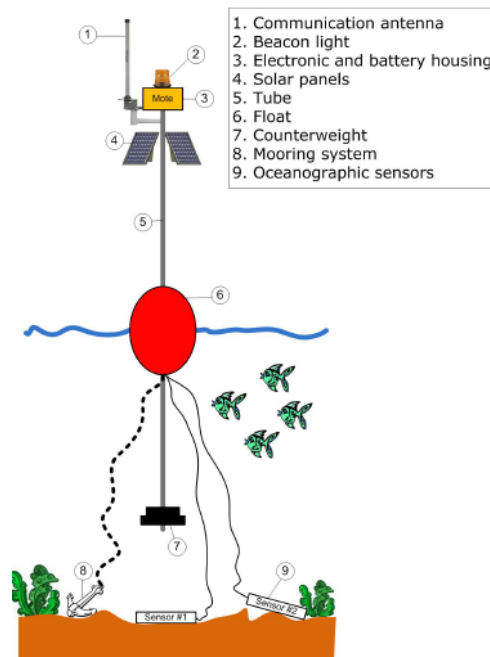


Figura 3.15: diseño de la boya del nodo sensor. Fuente [16].

Las ubicaciones de los nodos sensores se han estudiado de acuerdo con el rendimiento hidrodinámico de la laguna. Hay tres canales marinos que conectan el mar Mediterráneo con la laguna (Las Encañizadas, El Estació y Marchamalo).

En estas regiones hay corrientes de agua cuyo conocimiento es esencial para conocer el rendimiento hidrodinámico del Mar Menor.

Todos los nodos de sensores que miden diferentes parámetros y regiones de la laguna, envían los datos al nodo coordinador correspondiente (C1, C2 o C3) o al nodo sensor que implementa multi-hop.

Por otra parte, hay un nodo de sensor que se comunica directamente con la estación base por GPRS (ver W1 en la Figura 3.14). Esto es debido a que la distancia a los otros nodos es demasiado grande. La distancia entre los nodos de una subred es de un máximo de 2 kilómetros. La comunicación de estos nodos se realiza con tres sub-redes y en cada uno se implementa una topología inalámbrica ZigBee (estrella, árbol y malla de topologías).

En la topología de estrella el nodo Coordinador está situado en el centro de la red, en la topología árbol, el nodo Coordinador es la raíz del árbol y en la topología de malla al menos un nodo tiene más de dos conexiones. Hay nodos de sensores que tienen doble funcionalidad. Trabajan como sensor y como router.

Por otra parte, otros nodos sólo funcionan como routers con el objetivo de cubrir la región de monitoreo conjunto.

La comunicación inalámbrica utilizada entre los nodos de la red es ZigBee. ZigBee es un conjunto de especificaciones construidas alrededor del estándar IEEE 802.15.4 de Baja Tasa de área personal inalámbricas Redes (LR-WPAN) y se utiliza con radios digitales de baja potencia como se ha explicado en el apartado 3.2.2.

En cuanto al trabajo de ciclo de cada nodo sensor de un intervalo de muestreo mínimo de 20 minutos ha sido seleccionado. En las mayoría de los casos, con este valor es posible obtener la resolución temporal necesario. Si fuera necesario, el período anterior podría reducirse aumentando el consumo de los nodos sensores.

Por otro lado, en [16] se puede ver como para poder visualizar los datos que se recogen en los sensores, crearon un interfaz donde se puede ver el desarrollo de la red y la posición geográfica de todos los sensores de la misma. Si se clicla en cada nodo, dentro de la aplicación, se puede ver la información del último mensaje recibido en ese nodo.

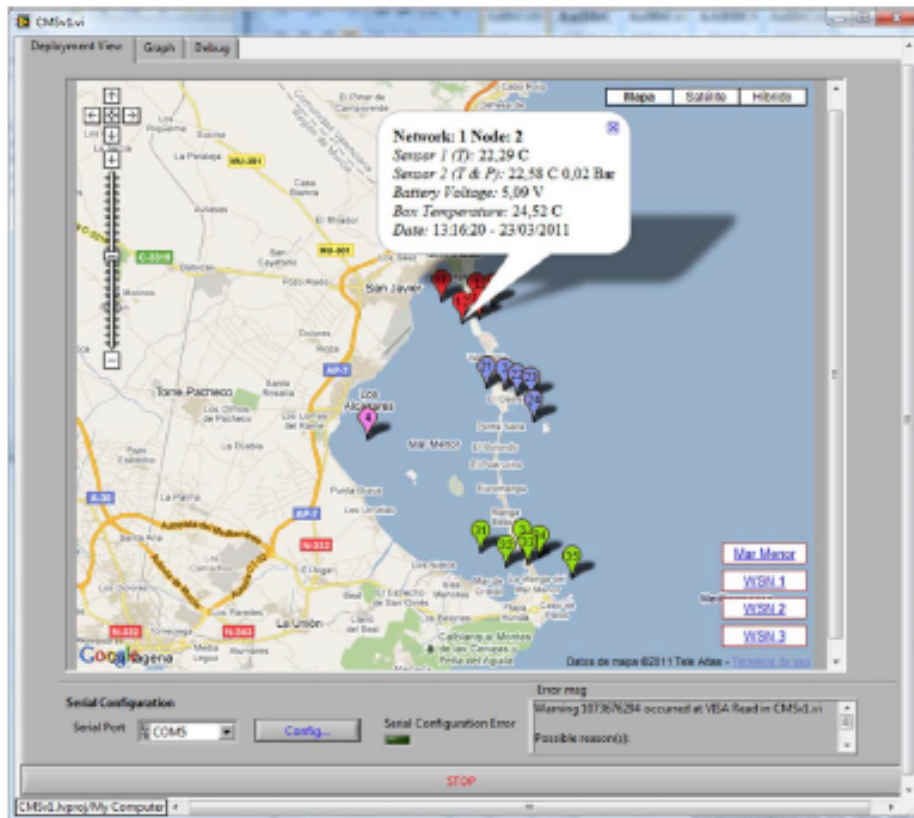


Figura 3.16: aplicacion creada para la WSN. Fuente [16].

La boya y su electrónica se colocaron en el puerto de Cartagena durante 1 mes con el fin de verificar en condiciones reales la robustez de la boya y el comportamiento de las baterías junto con el sistema de recogida de datos. Otro objetivo fue validar la eficacia de la comunicación entre dos nodos, un coordinador y un nodo sensor. La distancia entre dos nodos era 110 m.

Con este estudio queda claro que los objetivos que se marcan en este TFM son reales y que se pueden llevar a cabo de forma física en un entorno real.

4. Desarrollo del TFM:

En la elaboración del proyecto ha sido necesario seguir unas determinadas pautas par una correcta finalización del proyecto. En primer lugar, hubo que entender el código de trazado de rayos 3D con el que se realizaban las simulaciones. Una vez que el código se podía usar, hubo que crear el escenario óptimo para el diseño del trabajo.

El tercer paso del proyecto trataba sobre realizar las primeras simulaciones para determinar la convergencia del código. Seguidamente, y viendo que el escenario no daba problemas de código, se realizaron una serie de medidas para comprobar con medidas reales si el escenario se comportaba de acuerdo a la realidad.

Por último, se creó una red de sensores ZigBee para proponer una aplicación al diseño y análisis del sistema en un entorno marino. En los siguientes puntos se detallarán de manera más precisa cada uno de los pasos que se han mencionado.

4.1. Construcción del escenario.

Como se ha descrito en los puntos anteriores, se quiere hacer el diseño de un sistema de radiofrecuencia en el entorno marítimo de la Bahía de Cádiz. El primer paso para realizar este objetivo es crear el escenario que se quiere analizar mediante el software de trazado de rayos con el que luego se realizará el análisis del sistema.

Por ello, en primer lugar, se delimitará el espacio que se va a diseñar dentro del entorno geográfico de la Bahía de Cádiz. Para acotar este espacio, se coge como modelo a seguir el escenario utilizado por [1]. Ver Figura 4.1.



Figura 4.1: Escenario utilizado en [1].

4.2. Google Earth

Google Earth es un programa informático que permite observar la cartografía mundial a través de fotos realizadas mediante satélite. El programa fue creado bajo el nombre de EarthViewer 3D por la compañía Keyhole Inc. financiada por la Agencia Central de Inteligencia.

Esta compañía fue comprada por Google en 2004 absorbiendo el programa. El mapa de Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por Imagen satelital, fotografías aéreas e información geográfica proveniente de modelos de datos de todo el mundo y de modelos creados por ordenador.

En 2013 Google Earth se había convertido en el programa más popular para visualizar cartografía, con más de mil millones de descargas. Además, Google Earth soporta datos geoespaciales tridimensionales mediante los archivos Keyhole Markup Language o '.kml'. De esta manera, es posible importar datos que otras personas han introducido en el software, como por ejemplo, coordenadas específicas de un punto del mapa.

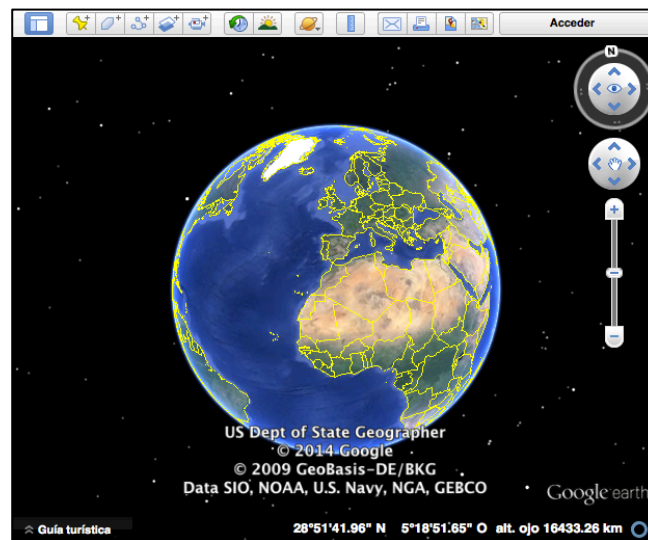


Figura 4.2: Interfaz de Google Earth.

Por otro lado, google Earth tiene una herramienta que permite medir en diferentes unidades de medida, la distancia que hay entre dos puntos en el mapa. Esta herramienta ha sido vital para la construcción del escenario, ya que, por motivos de movilidad y operabilidad es muy complicado realizar las medidas de un escenario tan espacioso. Por ello, con esta herramienta, se han podido hacer las medidas reales de la Bahía de Cádiz y extrapolarlas al escenario diseñado en Matlab. Ver Figura 4.3.

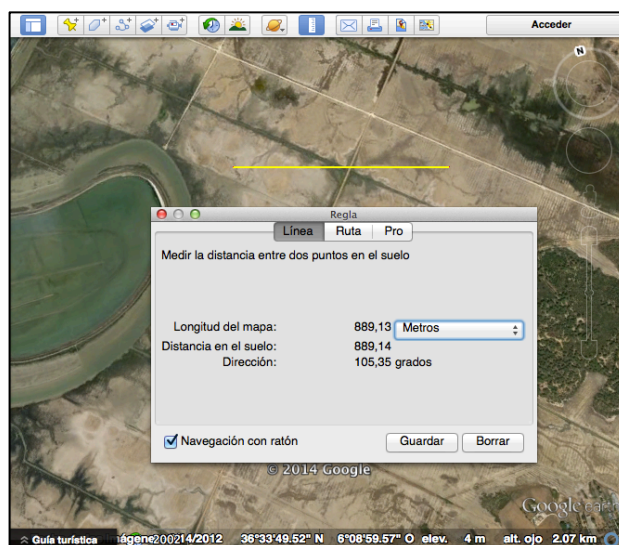


Figura 4.3: Herramienta de medida de Google Earth.

4.3. Google Street View

Google Street View es una característica de Google Earth que proporciona panorámicas a nivel de calle (360 grados de movimiento horizontal y 290 grados de movimiento vertical), permitiendo a los usuarios ver partes de las ciudades seleccionadas y sus áreas metropolitanas circundantes. Un ejemplo de cámara utilizada por Google para obtener las imágenes de Google Street View se puede observar en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Cámara 360° en coche de Google Street View. Fuente: [i].

Se introdujo, en primer lugar, en los Estados Unidos el 25 de mayo de 2007. Cuando se lanzó el servicio, sólo cinco ciudades estadounidenses estaban incluidas. Desde entonces se ha expandido a 31 países europeos, 5 de América Latina, 11 asiáticos, 4 africanos y hasta la Antártida disfruta ya de esta aplicación.

Se puede navegar a través de estas imágenes utilizando los cursores del teclado o usando el ratón. Además, en mayo de 2009 se introdujo una novedad de navegación en la aplicación, basada en los datos proporcionados por la tecnología láser, que permite una navegación más rápida a lo largo del recorrido.

Todas las fotografías son siempre modificadas antes de su publicación final, difuminando caras y matrículas, debido a las políticas de privacidad internas de los diferentes países en los que el servicio está presente.

Mediante esta aplicación de Google Earth ha sido posible captar las alturas de los edificios y de partes de la Bahía de Cádiz que de no haber existido este software habría sido imposible de modelar, a menos que hubiéramos tomado las medidas ‘in situ’. Un ejemplo real que se ha utilizado para hallar medidas del escenario ha sido las alturas de los edificios que se encuentran al lado del mar en la propia ciudad de Cádiz. Ver Figura 4.5.

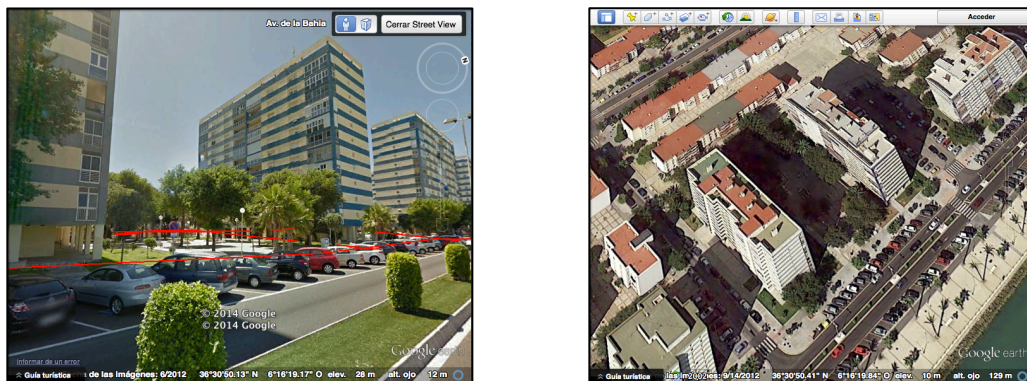


Figura 4.5: Captura de Google Street View en Ciudad de Cádiz

4.4. Construcción del Primer escenario.

Hasta este momento, diversos escenarios habían sido modelados por el programa de trazado de rayos creado por la Universidad Pública de Navarra. Sin embargo, nunca se había simulado un espacio tan amplio como el que se quiere probar en el presente documento. Por ello, antes de crear el escenario Final de la manera más parecida al escenario real, se realizaron una serie de pruebas para ver si realmente un escenario tan grande se podía simular con el trazado de rayos.

Por otro lado, había que ver cuánto tiempo tardaba el programa en simular y había que definir las posibles resoluciones que podía tener el escenario. Por estas razones, el primer escenario que se creó fue muy sencillo. Simplemente, se quería probar que efectivamente era viable colocar un escenario tan grande.

El primer paso para la realización del escenario fue acotar en Google Earth el trozo de tierra que se quería diseñar. Como se ha señalado en párrafos anteriores, se quería simular el escenario utilizado en la Figura 4.1. Sin embargo, en esta figura aparecen muchos edificios que para nuestras simulaciones no nos aportan ninguna información. Estos edificios son los que se encuentran a la izquierda de la zona marítima. Ver Figura 4.6. Por ello, el escenario que en este documento se va a modelar será el escenario de la Figura 4.1, incluyendo únicamente los edificios situados en “primera línea de playa”, ya que, éstos serán los únicos obstáculos reseñables en cuantos a efectos de posibles desvanecimientos o reflexiones.

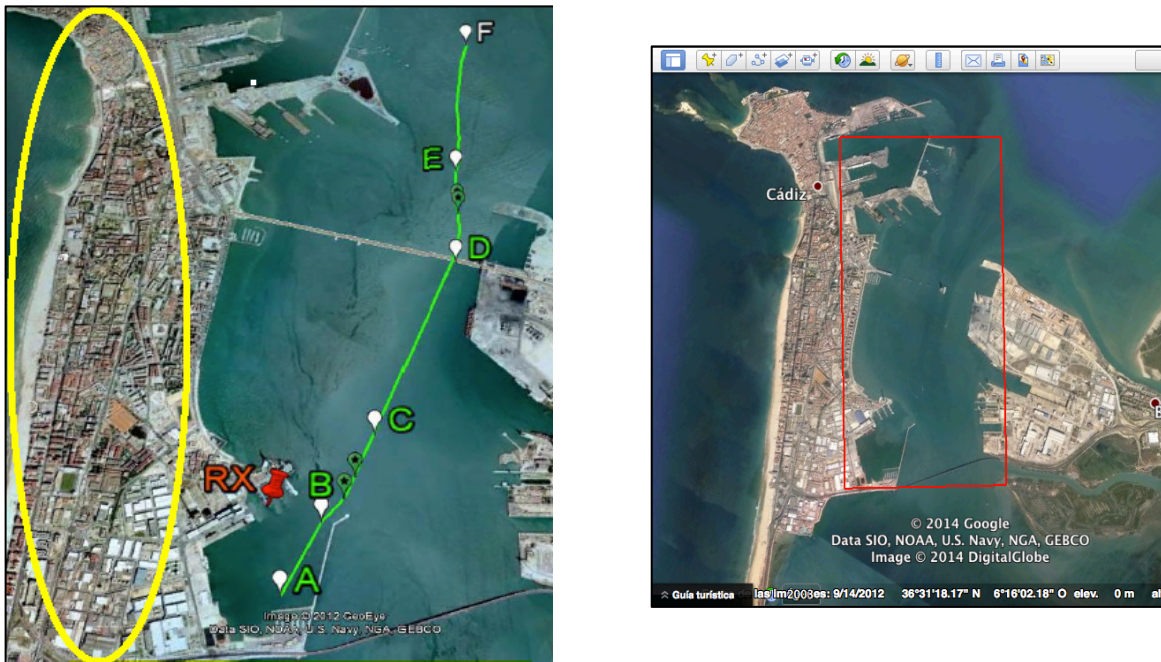


Figura 4.6: acortamiento del escenario a crear.

Para acotar el escenario de Google Earth se utilizó su versión Pro del software que permite la creación de polígonos en los propios mapas cartográficos. En la Figura 4.7 se puede ver el escenario que se va a modelar. Este escenario tiene unas dimensiones reales de 2598 x 4972 x 20 metros.



Figura 4.7: acotamiento del escenario a crear con Google Earth.

El primer escenario que se creó fue un escenario en forma de ‘U’. A partir del escenario acotado que se puede ver en la Figura 4.7 se crearon 3 cubos de tierra en forma de U que querían asemejarse al escenario real. Estos cubos tenían unas medidas de 112 metros anchura y 20 metros de altura (112 x 4860 x 20 m y 2598 x 112 x 20 m). Además se crea un cubo de agua

de medidas 2374 x 4860 x 10 m. Es decir, el agua tiene 10 metros de profundidad, y la distancia entre el agua y la tierra también es de 10 m de altura.

Por otro lado, hay que añadir las características dieléctricas de cada material. Los cubos de tierra están formados por hormigón con una constante dieléctrica de $\epsilon = 0.25$ y una conductividad de $\sigma = 0.02$. El agua está formada por agua salada con una constante dieléctrica de $\epsilon = 71$ y una conductividad de $\sigma = 6.4$. De tal manera, el escenario que se quería crear es el mostrado en la Figura 4.8.

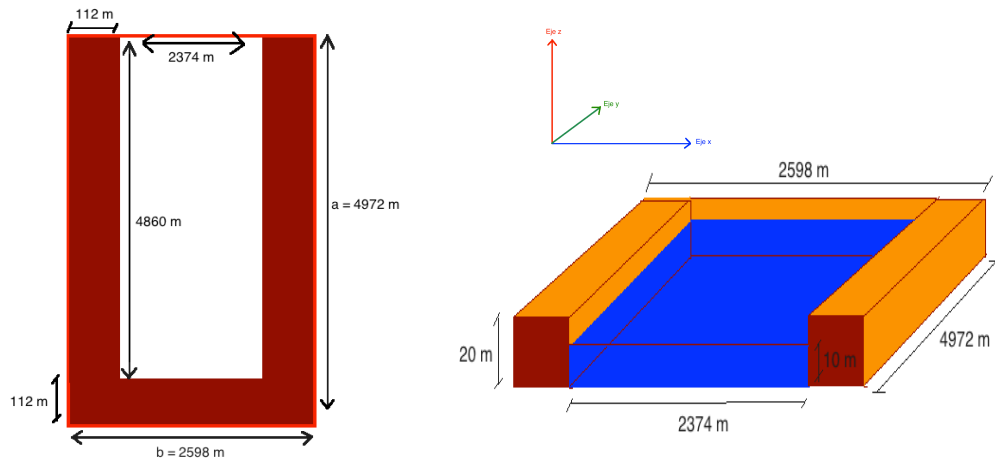


Figura 4.8: esquema de escenario 1 en forma de 'U'.

Una vez que el escenario fue creado por el código de Matlab, el resultado fue el que se puede apreciar en la Figura 4.9. Además se le añadió una antena transmisora en un punto del escenario 1085 x 1204 x 11 metros (punto rojo) para realizar las futuras simulaciones.

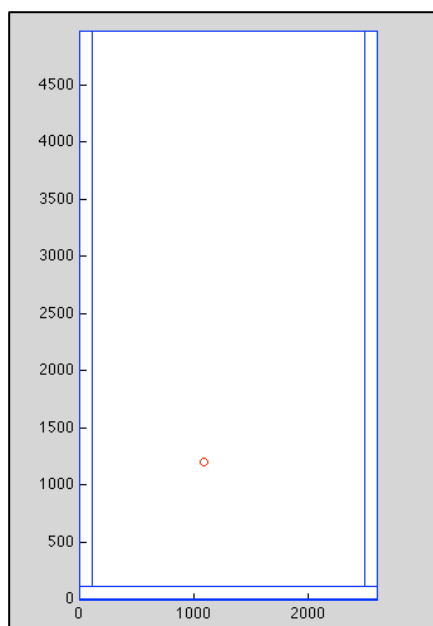
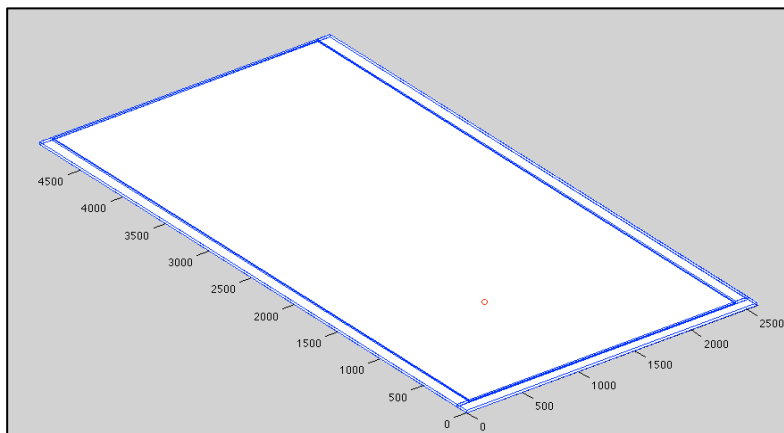


Figura 4.9: escenario en forma de 'U' creado en Matlab



4.4.1. Primeras Simulaciones

Una vez que el escenario ha sido construido, se realizan las primeras pruebas. En primer lugar hay que ver cuál es la resolución correcta para este escenario y también hay que parametrizar la potencia del transmisor. Para ello, se realizan tres simulaciones con tres tipos de resolución diferentes:

1. *Resolución 50 m*: formada por ‘cubos’ de 50 metros y 10 metros de altura.
2. *Resolución 20 m*: formada por ‘cubos’ de 20 metros y 10 metros de altura.
3. *Resolución 10 m*: formada por ‘cubos’ de 10 metros y 10 metros de altura.

Además si hicieron las simulaciones variando la potencia del transmisor. Para las primeras la potencia del transmisor fue de 0.001 W y después de 1 W. Asimismo, para ver el comportamiento del escenario se colocó una antena omnidireccional en el transmisor. Los resultados obtenidos se pueden ver en las siguientes ilustraciones. Ver de Figura 4.10 a Figura 4.15.

Para realizar estas representaciones gráficas se han utilizados unas matrices de datos que dependiendo de la resolución empleada, estaban formadas por:

- *Resolución 50 m*: formada por una matriz de 52 x 100 datos.
- *Resolución 20 m*: formada por una matriz de 130 x 249 datos.
- *Resolución 10 m*: formada por una matriz de 260 x 498 datos.

Si se comparan las figuras anteriores se puede ver como una potencia de transmisión de 0,001 W es demasiado pequeña para el tamaño del escenario que se está utilizando. Sin embargo, se puede observar que utilizando una potencia de transmisión de 1 W en la antena transmisora, el nivel de señal mínimo que llega a la mayoría de espacios del escenario es mayor a -100 dB como se muestra en la escala. Por este motivo, de aquí en adelante, todas las simulaciones se parametrizarán con 1 W de salida en la antena transmisora.

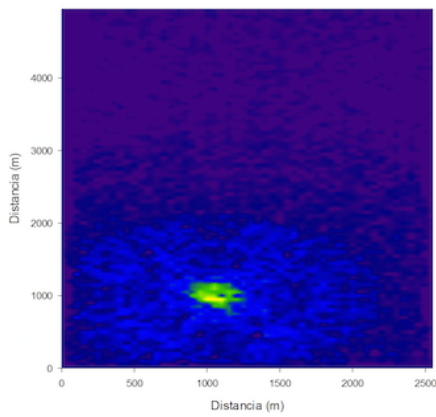


Figura 4.10 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 50 m y 0,001 W de Potencia transmisora.

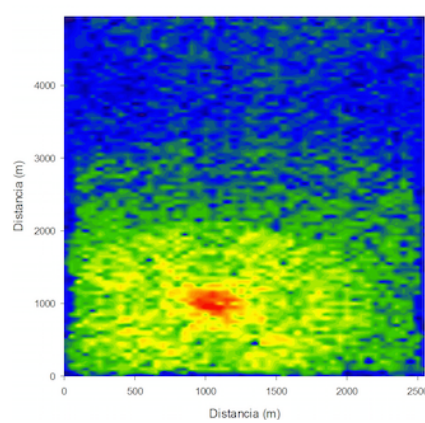
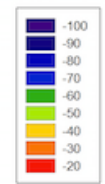


Figura 4.11 (b): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 50 m y 1 W de Potencia transmisora.



Potencia
(dBm)

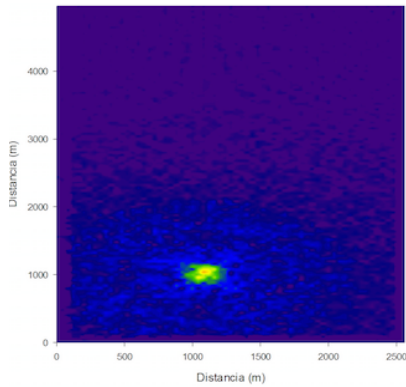


Figura 4.12 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución transmisora de 20 m y 0,001 W de Potencia.

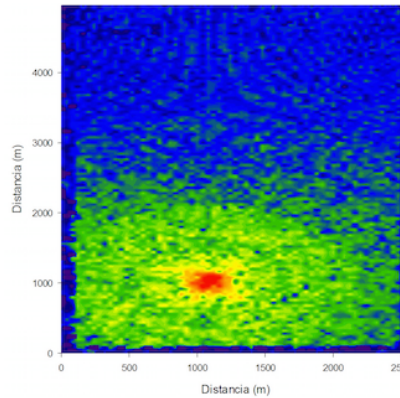
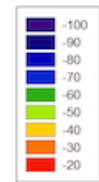


Figura 4.13 (b): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 20 m y 1 W de Potencia transmisora.



Potencia
(dBm)

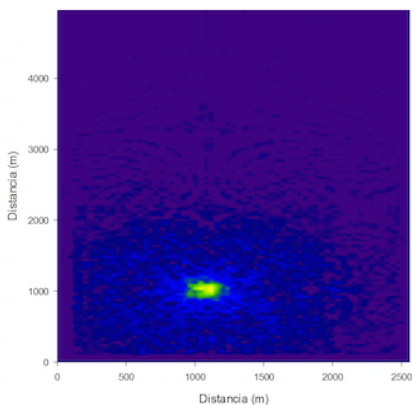


Figura 4.14 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 10 m y 0,001 W de Potencia transmisora.

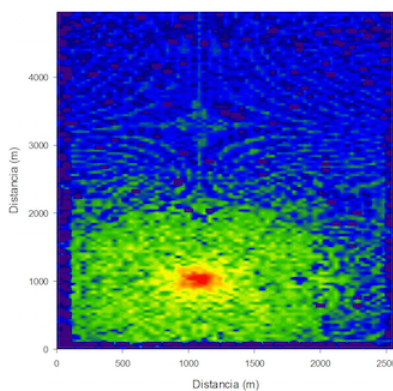
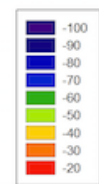


Figura 4.15 (b): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 10 m y 1 W de Potencia transmisora.



Potencia
(dBm)

Por otro, comparando las diferentes resoluciones utilizadas se puede observar como los resultados obtenidos son muy similares. No obstante, en los escenarios que se han utilizado las resoluciones de 20 y 10 metros se pueden observar pequeñas divergencias de código debido a que el software de rayos no llega a todos los puntos del escenario.

Esto es debido a que en la realidad el transmisor emite la señal como un frente de ondas que llega a todas las partes del espacio que su potencia radiada le permite. Sin embargo, en el programa de trazado de rayos, este frente de ondas es discretizado por los diferentes rayos que son enviados. Este número de rayos es un parámetro variable. Por este motivo, conforme los rayos se van alejando del transmisor, existen más espacios en el escenario en donde no se puede calcular la potencia recibida en ese punto. Esta particularidad se denomina divergencia de código, ya que el software de trazado de rayos no tiene manera de solucionar este problema.

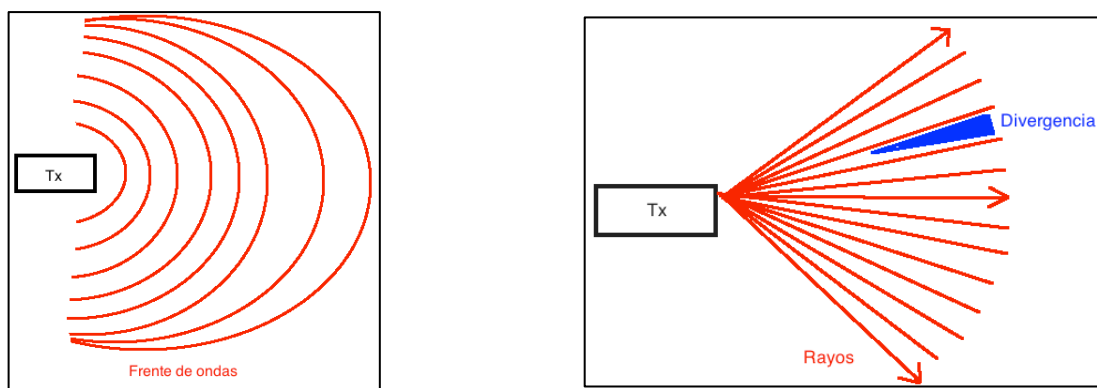


Figura 4.16: Comparación entre frente de ondas y trazado de rayos

Por otro lado, las matrices de datos que genera Matlab a la hora de obtener los resultados son demasiados grandes para el programa de representación de los datos SigmaPlot, por lo que para obtener estas simulaciones hay que tratar estos datos antes y comprimirlos a una matriz de datos que el programa puede adaptar.

Por este motivo, la resolución que se ha escogido para realizar las futuras simulaciones es la de 50 m por cubo.

Además se realizaron cortes radiales en el eje 'x' y en el eje 'y' en la posición de la antena para ver el comportamiento que tenía la potencia conforme iba decayendo con la distancia para las tres posibles resoluciones.

En estas figuras se puede ver como en las resoluciones de 50 y 20 metros se producen algunos puntos donde la potencia es demasiado baja. Es aquí donde también se pueden ver las causas producidas por la divergencia de código.

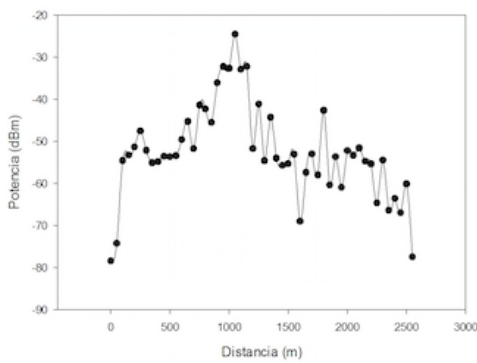


Figura 4.17 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena $y=1204$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

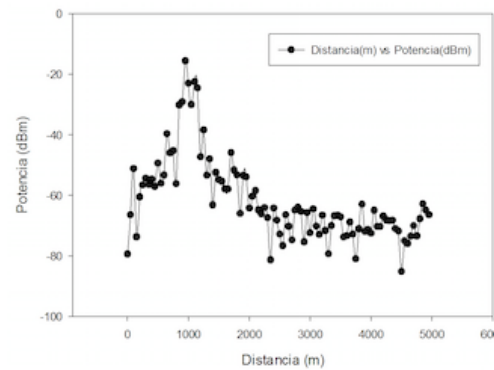


Figura 4.18: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena $x=1085$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

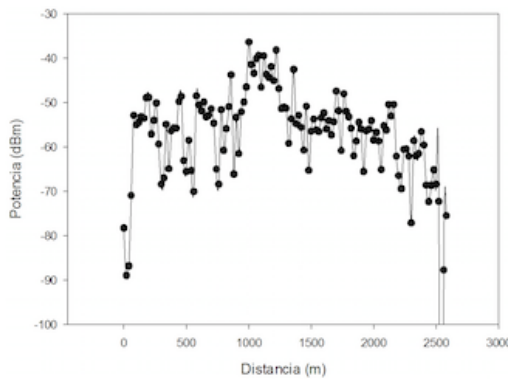


Figura 4.19 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena $y=1204$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

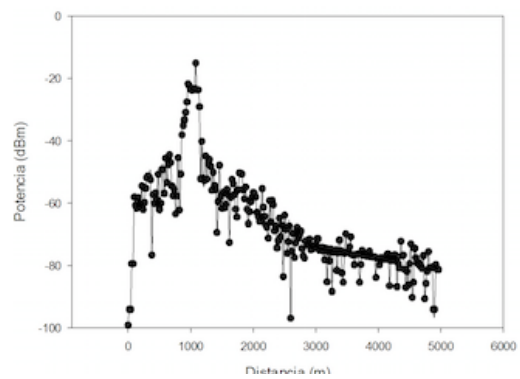


Figura 4.20: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena $x=1085$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

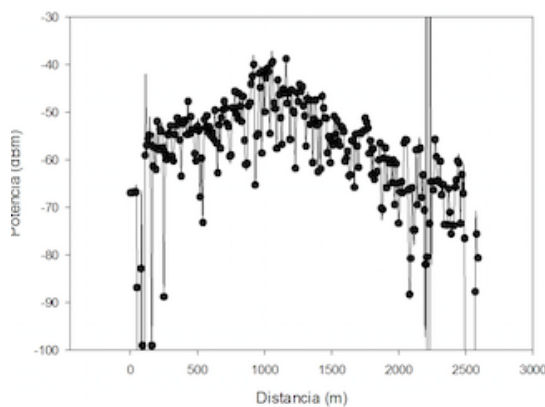


Figura 4.21 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena $y=1204$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

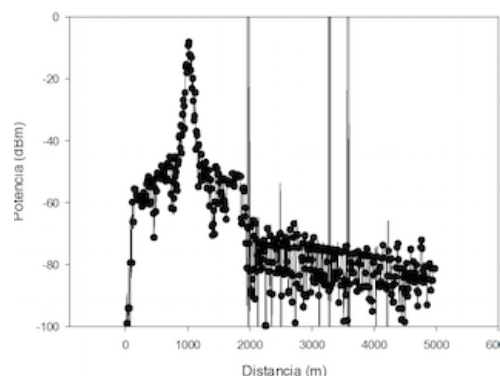


Figura 4.22: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena $x=1085$ m del escenario en 'U' en resolución 50 m.

Las siguientes figuras demuestran como existen muchas reflexiones en este entorno mediante el ‘delay spread’, el cual representa la diferencia de retardos entre la primera componente de multitrayecto que atraviesa un cuboide y la última componente.

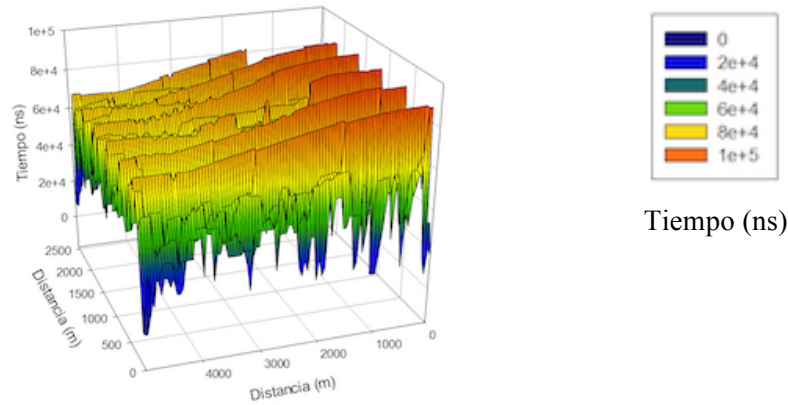


Figura 4.23: Delay Spread en ‘ns’ del escenario en ‘U’ en resolución de 50 m.

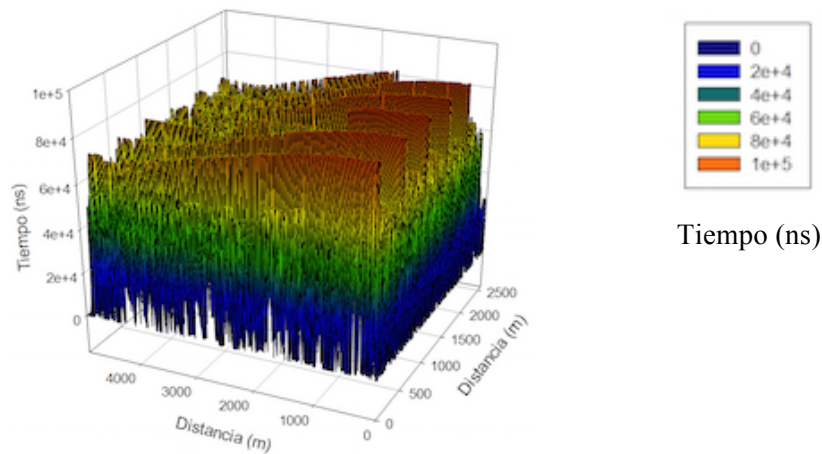


Figura 4.24: Delay Spread en ‘ns’ del escenario en ‘U’ en resolución de 20 m.

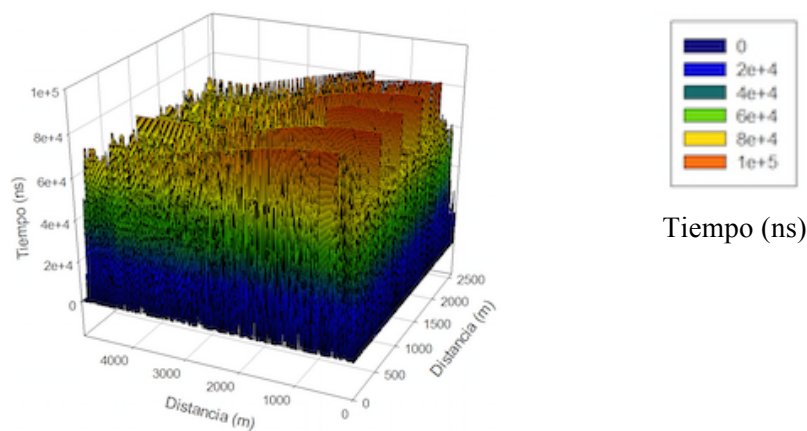


Figura 4.25: Delay Spread en ‘ns’ del escenario en ‘U’ en resolución de 10 m.

4.5. Escenario con edificios.

Una vez que se ha construido el primer escenario, y se han realizado las pertinentes simulaciones, se complica el escenario un paso más añadiéndole edificios al tramo de tierra creado en el primer escenario. Únicamente se quiere ver si el tamaño de los edificios que se añade al escenario es soportado por el software para llevar a cabo las simulaciones del escenario. Por ello, los edificios que se añaden se colocan alineados y no tienen una concordancia con el escenario real.

Para la adición de los edificios al escenarios se utiliza una función que está ya añadida en la biblioteca del programa de trazado de rayos y que fue diseñado por: Maryuri Flores [2]. En la Figura 4.26 se puede ver un ejemplo de la función utilizada para añadir los edificios al escenario.

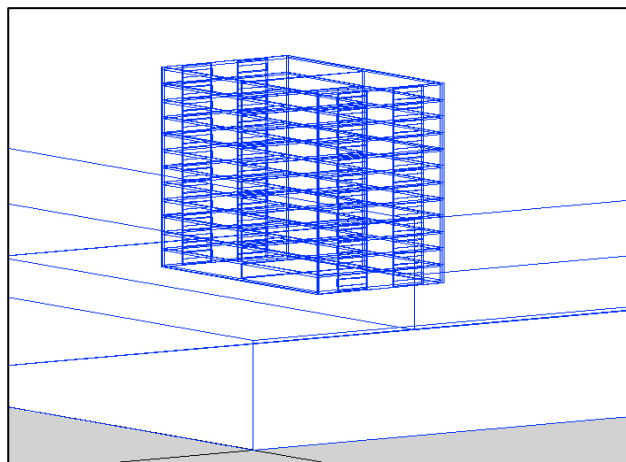


Figura 4.26: ejemplo de edificio colocado en escenario.

Cada edificio tiene unas medidas de 25 x 43 x 36 m. Cada construcción consta de 12 plantas a una media de 3 metros por planta. Los edificios están separados entre ellos una distancia de 83 metros. En este caso, como se añaden los edificios al escenario y la altura de éstos es añadida a la altura que tenía la tierra creada (20m), se cambia la altura total del escenario a 60 m. El total de edificios colocados en el escenario es de 147 distribuidos de la siguiente manera: 59 en la parte izquierda, 59 en la parte derecha y 29 en la parte de abajo.

En la Figura 4.27 se puede ver un dibujo esquemático del escenario que se creará en Matlab.

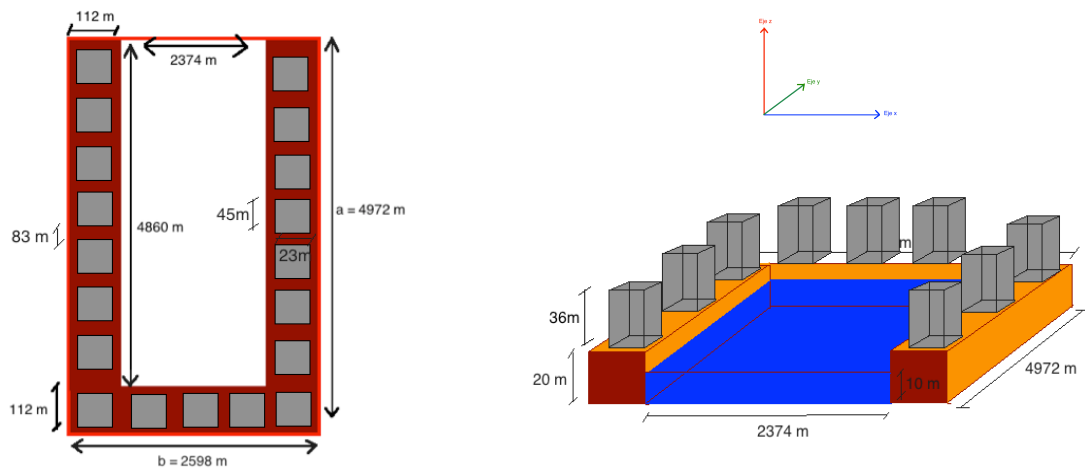


Figura 4.27: esquema de escenario en forma de 'U' con edificios.

A continuación se crea el escenario en Matlab. El resultado se puede observar en la Figura 4.28.

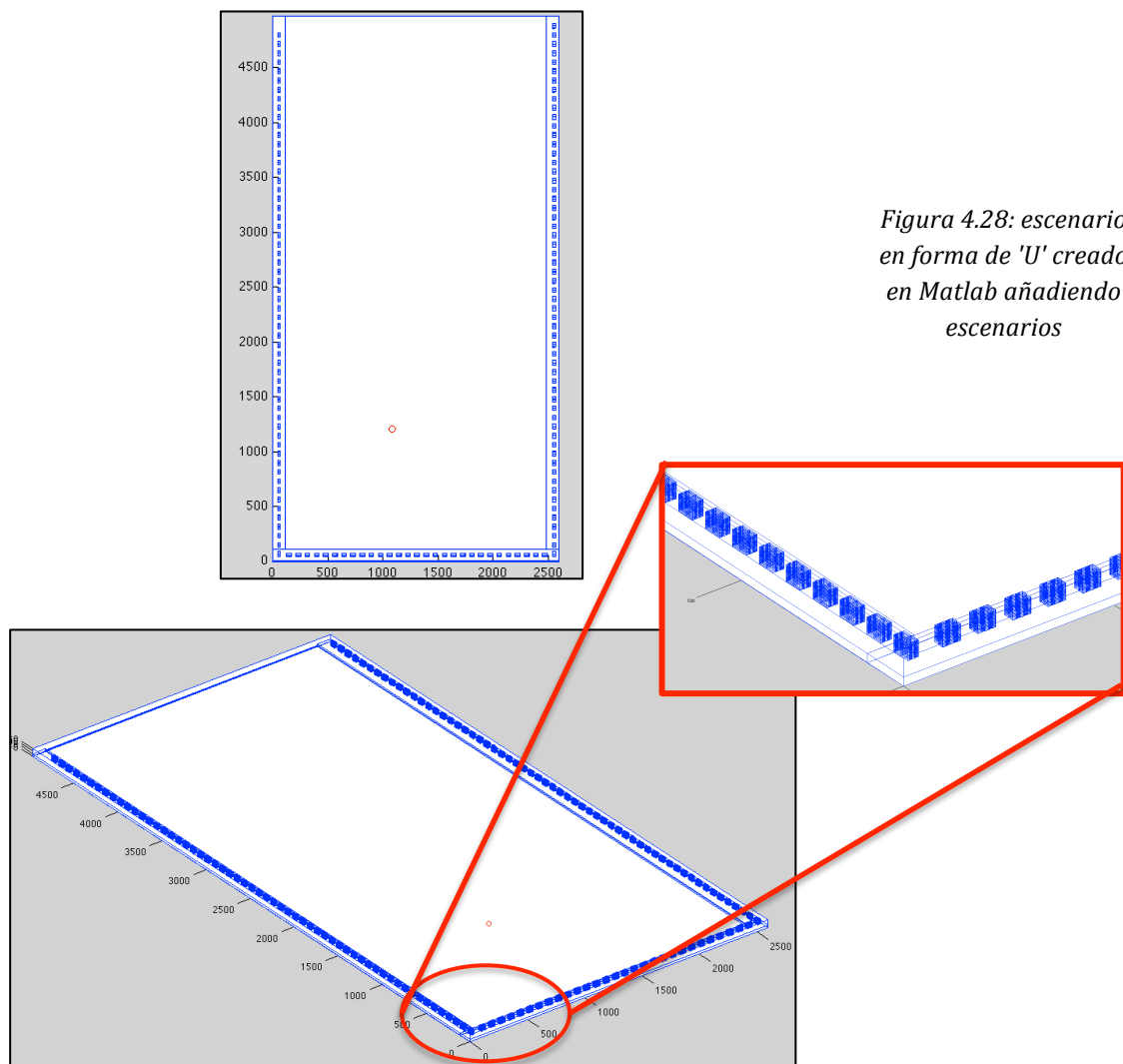


Figura 4.28: escenario en forma de 'U' creado en Matlab añadiendo escenarios

4.5.1. Segundas simulaciones:

Las simulaciones de este escenario se realizaron para los tres tipos de resoluciones que se estimaron en el apartado anterior 4.4.1. Las comparaciones entre las primeras simulaciones realizadas sin edificios y las realizadas añadiendo los edificios se puede contemplar a continuación.

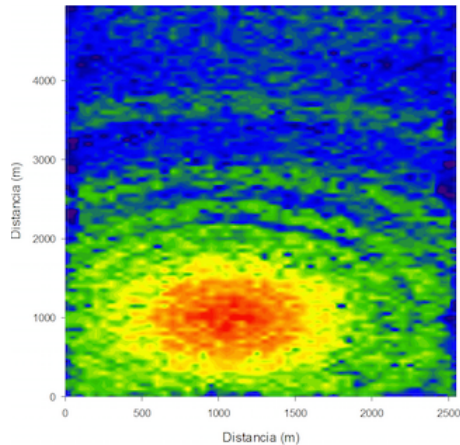


Figura 4.29 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 50 m.

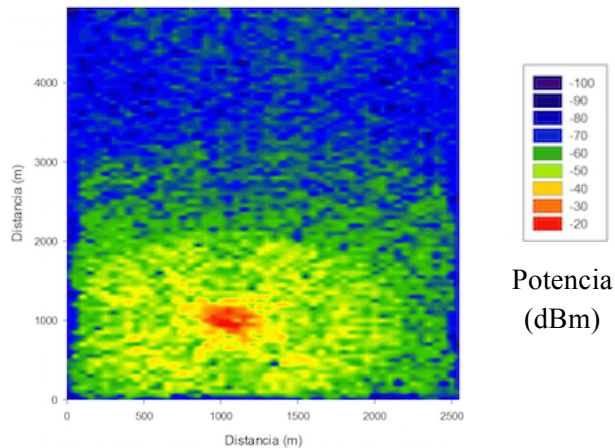


Figura 4.30 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 50 m.

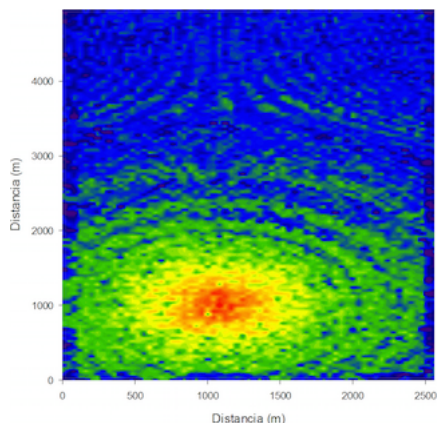


Figura 4.31 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 20 m.

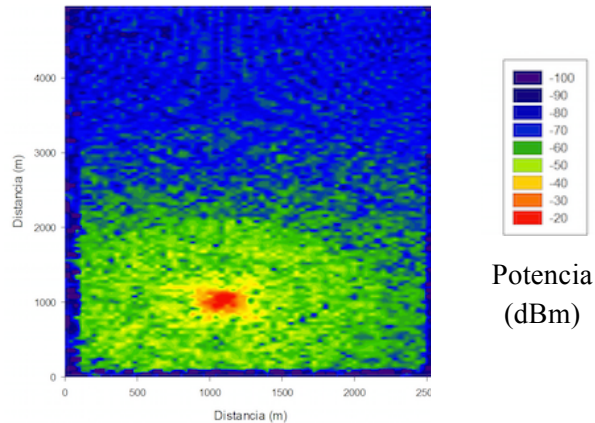


Figura 4.32 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 20 m.

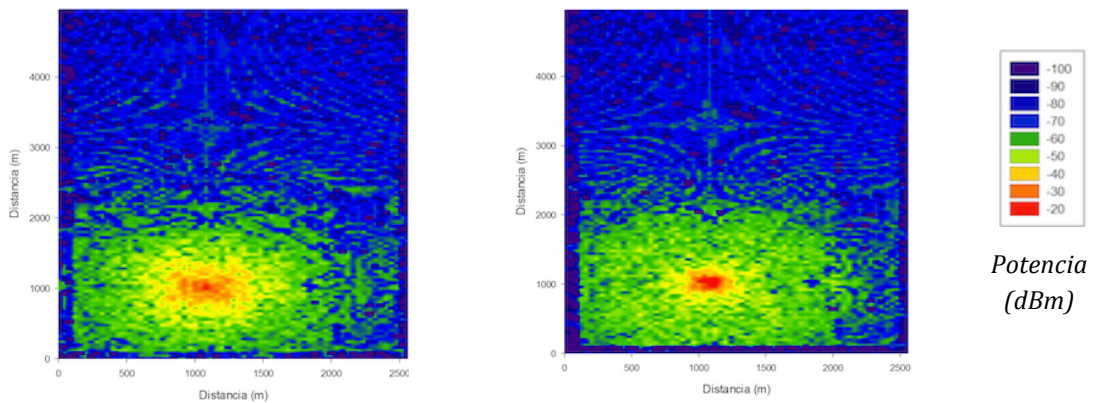


Figura 4.33 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 50 m.

Figura 4.34 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 20 m.

El tiempo de simulación de estos escenarios fue alrededor de las dos semanas debido a la cantidad de cubos que componían el escenario. El escenario estaba formado por alrededor de los 45 000 cubos.

4.6. Creación del escenario final.

Una vez que se han creado los primeros escenarios y se han visto y analizado los resultados obtenidos, se puede crear el escenario final. Este escenario se intentará parecer lo máximo posible al escenario real. Recordemos que el escenario que se quiere crear es la topología de la Figura 4.7 correspondiente a la Bahía de Cádiz.



Figura 4.35: acotamiento del escenario final a crear con Google Earth.

Para ello, en primer lugar modificamos las dimensiones del escenario que se había creado anteriormente. Las dimensiones finales del escenario que se quiere crear son:

- Eje x: 2180 m
- Eje y: 4979 m
- Eje z: 90 m

Este cambio es debido a que la ventana que se ha cogido para delimitar el espacio a crear ha sido modificada para facilitar la creación del escenario.

El escenario final ha sido creado en tres etapas diferenciadas. En primer lugar se creó el conjunto de tierra que forma la Bahía de Cádiz. En segundo lugar se añadió el agua y por último se crearon los edificios que forman la Bahía.

4.6.1. Construcción de la tierra firme.

En este apartado se explicará como se ha creado la tierra firme que corresponde al escenario final de la Bahía de Cádiz. El programa de trazado de rayos con el que se simulan los escenarios no permite más que crear cubos o prismas para dibujar los escenarios. Asimismo, estos cubos no pueden girarse y por lo tanto están siempre alineados con los ejes. Este hecho es una limitación muy grande que complica mucho la creación de los mismos.

Por ello, el proceso de creación de la Bahía de Cádiz ha sido complicado y laborioso. Como se puede observar en la Figura 4.35 la parte correspondiente a la Tierra firme dentro del escenario es sinuoso y desigual. Por tanto, para la creación de esta parte del escenario ha sido vital la herramienta de software Google Earth, como se explica en el apartado 4.2.

En primer lugar, gracias a la herramienta de creación de líneas de Google Earth se divide el escenario en cubos, como se muestra en la Figura 4.36. A su vez, se van midiendo las dimensiones de cada cubo y se van añadiendo estos cubos en el programa de diseño de escenario del entorno Matlab.

Para crear un cubo en el programa de diseño es necesario saber las dimensiones del cubo y las coordenadas donde se va a colocar el cubo. Ilustrativamente, se explicará con un ejemplo.

Se quiere colocar el primer cubo del escenario. Para ello, se tiene creado el escenario de dimensiones 2180 x 4979 x 90 m. Primeramente, se define el primer cubo en Google Earth. A continuación, se toman las medidas con la propia herramienta del programa. (Figura 4.37).

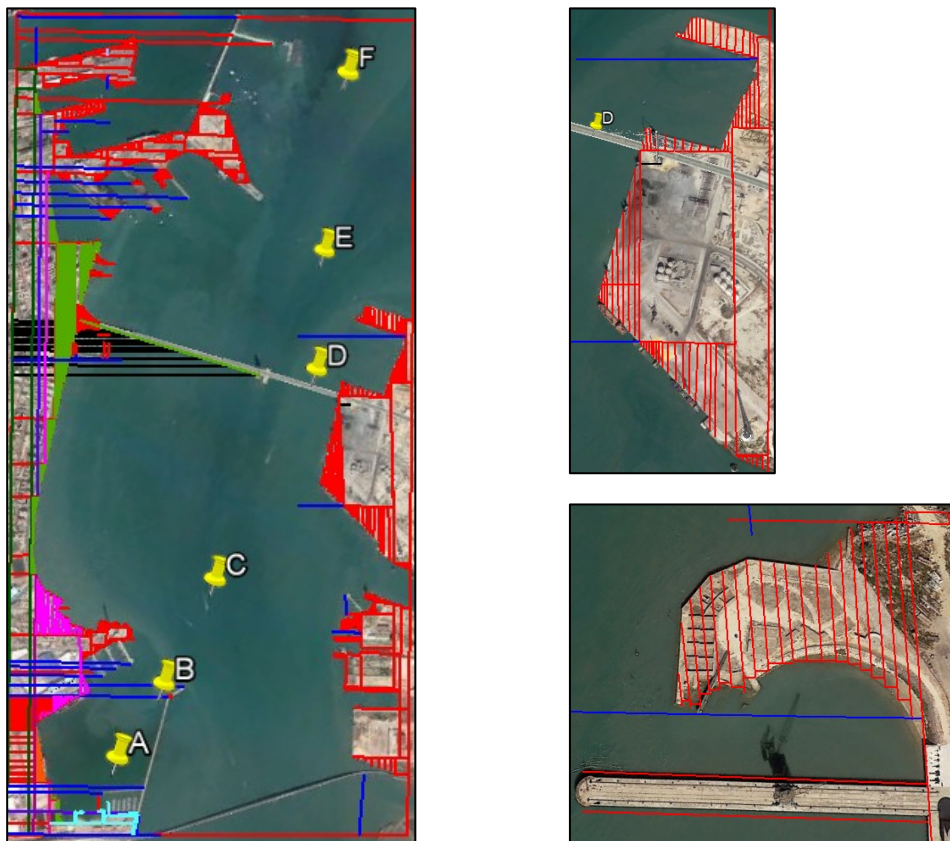


Figura 4.36: creación de cubos en entorno Google Earth.

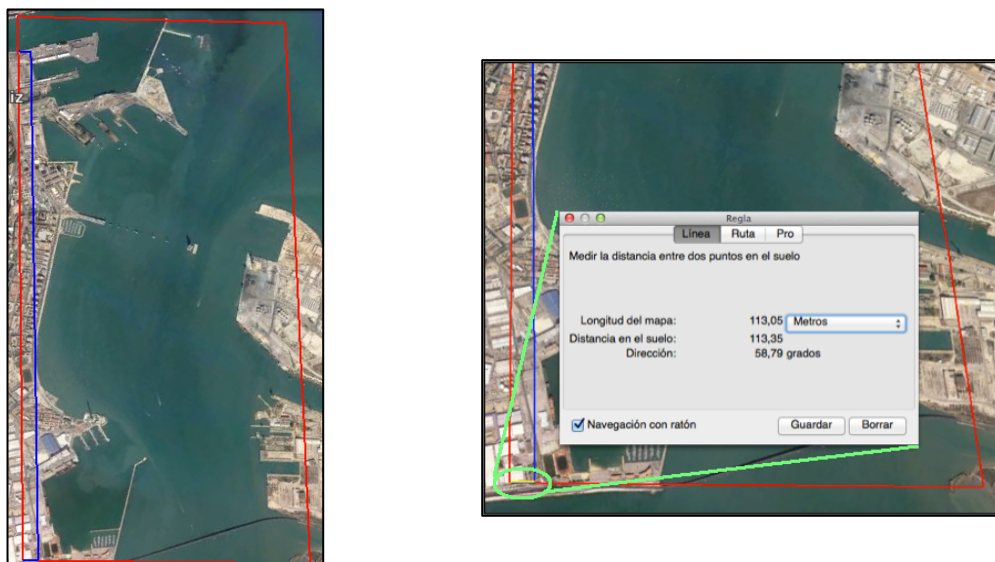


Figura 4.37: creación del primer cubo del escenario (azul) y toma de medidas en Google Earth.

El cubo tiene unas dimensiones de $113 \times 4475 \times 12$ m. Se toman también las medidas con respecto a las coordenadas para colocar el cubo en la posición deseada. Por último se añaden los datos en Matlab y se crea el cubo. (Tabla 4.1). Este proceso se vuelve a hacer con cada uno de los cubos diseñados.

	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Material
Cubo_1	67.5 + 0	2237.5 + 0	6 + 0	113	4475	12	Hormigón

Tabla 4.1: Medidas para creación de un cubo en entorno Matlab.

El resultado en Matlab se puede ver en la siguiente figura:

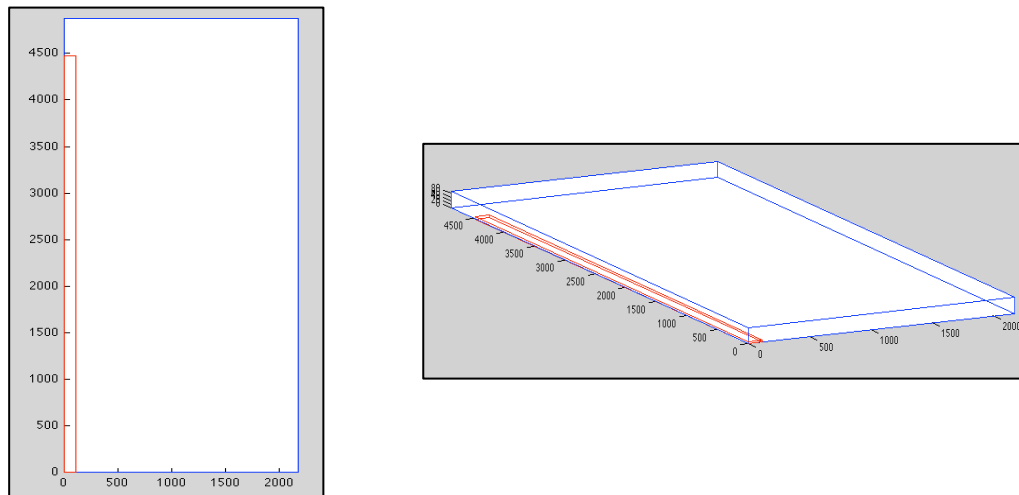


Figura 4.38: Representación del primer cubo del escenario final en Matlab.

Una vez que se ha colocado el primer cubo, se van colocando los siguientes de la misma manera. Así progresivamente, la tierra firme queda colocada definitivamente en el escenario final. Hay que señalar que todos los cubos tienen la misma altura. Todos están formados por cubos de 12 metros de profundidad. Además, de lado a lado del escenario hay construidos dos puentes que unen las dos partes de tierra.

Uno de los puentes corresponde a una carretera que se puede considerar que tiene la misma altura en todas las partes del mismo. Este puente es denominado “Puente de Carranza” (Figura 4.39). Este puente está situado a 20 metros del suelo del escenario. Este puente ha sido construido mediante 21 filas de cuatro pilares de 20 m colocados a 70 metros de distancia cada unos de ellos. (Figura 4.40).

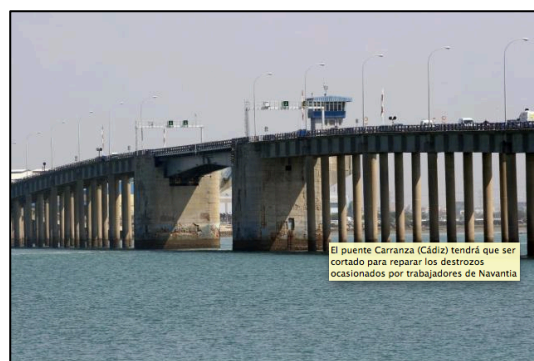


Figura 4.39: Puente de Carranza. Fuente: [iii].

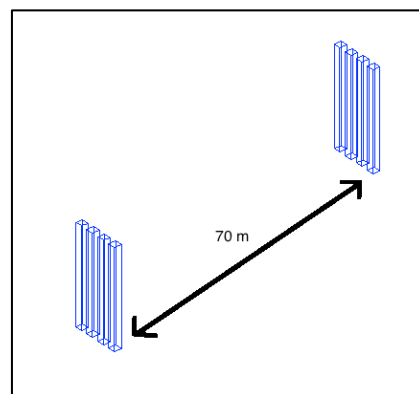


Figura 4.40: Pilares del Puente de Carranza.

Asimismo, el otro puente es el llamado Puente de la Pepa o Puente de la Constitución de 1812. Este puente de reciente construcción es uno de los viaductos de mayor altura en Europa con un gálibo de 69 metros y 5 kilómetros de longitud total. Es un puente atirantado con dos grandes torres: 187 metros la del mar y 181 metros la de tierra. Este puente se puede ver en la Figura 4.41. Para la colocación de los pilares en el escenario se ha tenido en cuenta que el mayor pilar de todos estaba colocado a 69 metros del agua y con respecto a éste se han ido colocando los demás teniendo en cuenta una pendiente decreciente del puente de un 5%. En total son 12 pilares colocados sobre el agua y 3 sobre la tierra.



Figura 4.41: Puente de la Pepa. Fuente: [ii].

El resultado final de la tierra firme del escenario se puede observar en la Figura 4.42.

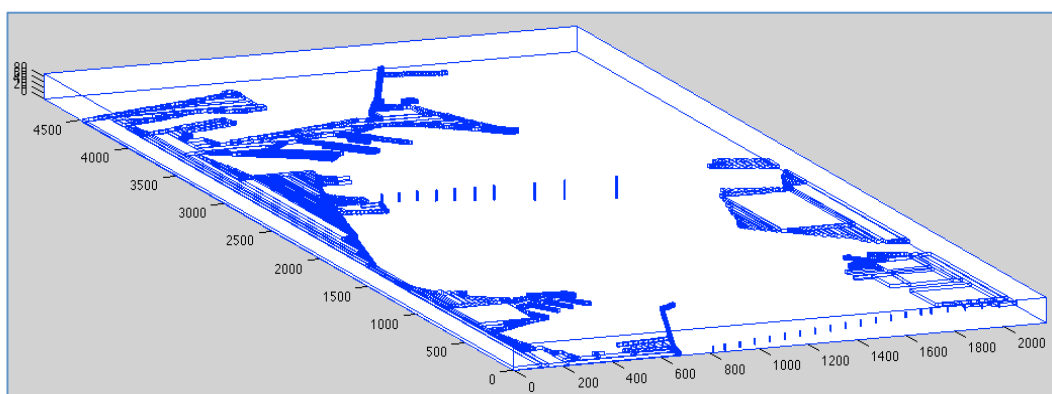


Figura 4.42: Resultado final de tierra firme en el escenario final.

La primera parte del escenario está formada por un total de 1135 cubos. Si se comparan el escenario real con el que se acaba de crear, se puede ver en la Figura 4.43 como los resultados

son muy parecidos. A la hora de realizar las simulaciones es importante que al utilizar un programa de trazado de rayos el escenario sea lo más parecido a la realidad.

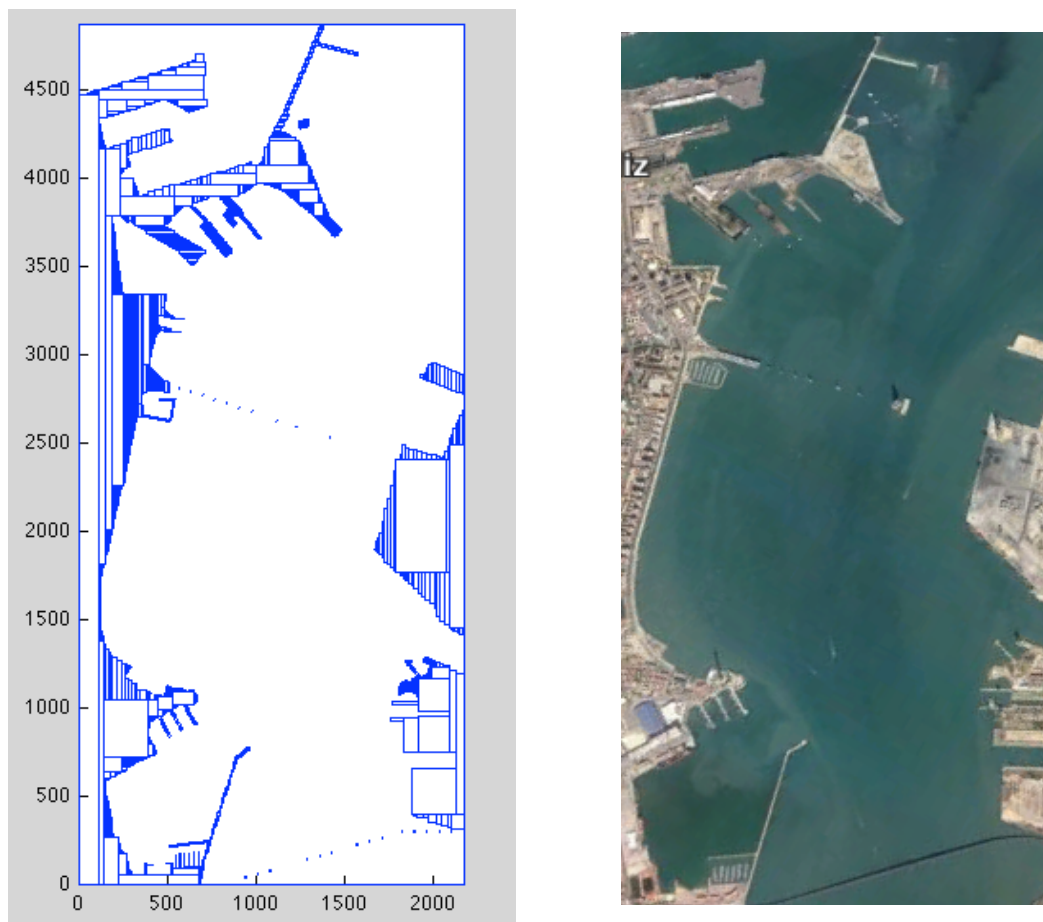


Figura 4.43: Comparación con vista en planta de la tierra firme del escenario final.

4.6.2. Rellenado del escenario con agua.

Una vez que la tierra firme ha sido creada, el escenario está listo para rellenarse con agua. Este procedimiento es un punto clave en la creación del escenario, ya que como se puede observar en la Figura 4.43, el trozo de escenario que queda por rellenar es muy amplio. Por este motivo, realizar los cubos mediante el procedimiento realizado en el apartado anterior; es decir, manualmente, no parece una buena manera. Es por ello, por el que se propusieron varias maneras de realizar esta tarea.

En primer lugar, se pensó en crear un único cubo que tuviera las dimensiones de todo el escenario en el eje x y en el eje y, pero únicamente 10 m en el eje z. Es decir, que se superpusiera un cubo de agua que atravesará las zonas de tierra. Sin embargo, esta idea no pudo llevarse a cabo debido a problemas de compatibilidad con el código de trazado de rayos.

Por otro lado, se pensó en crear un único cubo de agua de las mismas dimensiones que en la idea anterior. No obstante, ahora el cubo se colocaría en primer lugar y la tierra firme se colocaría encima de este cubo de agua (ver Figura 4.44). De esta manera se cambiaría la profundidad de la tierra firme de 12 m a 2 metros. Esta idea no se llegó a desarrollar ya que no se estarían teniendo en cuenta las condiciones que se producen en la realidad y podríamos tener

diferencias significativas debido a las reflexiones que se producen cerca de las zonas de costa. El esquema de esta propuesta su puede observar en la Figura 4.44.

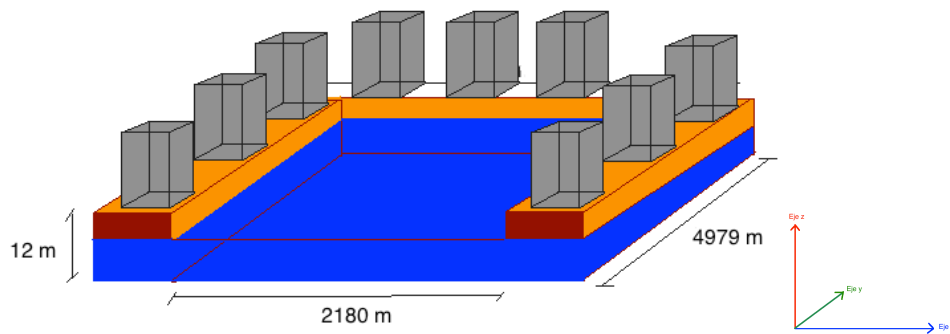


Figura 4.44: esquema de rellenado de agua tipo balsa.

Por último, la idea que se llevo a cabo fue la de crear una función dentro del entorno Matlab que rellenara los espacios vacíos del escenario con cubos de agua. Se explicará el funcionamiento de la función con un ejemplo.

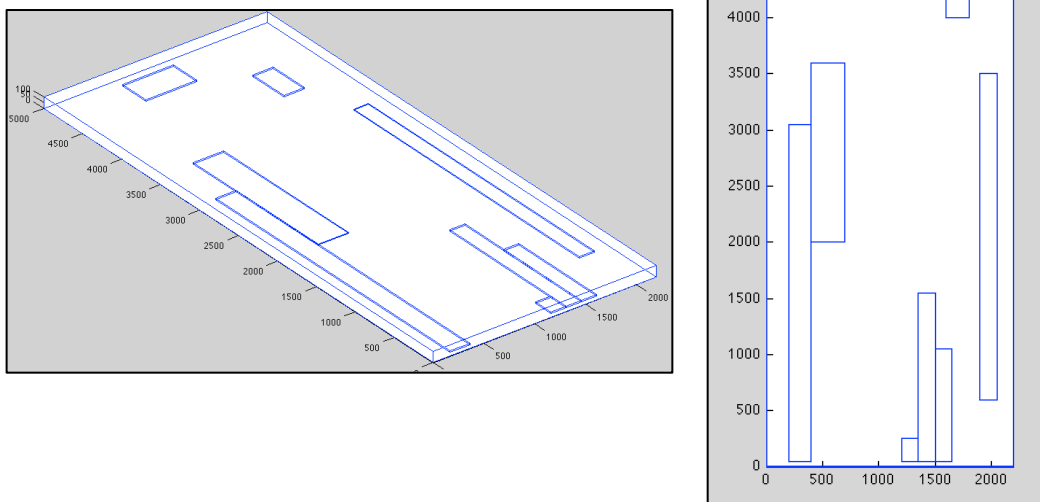


Figura 4.45: ejemplo de función 'rellena agua' en entorno Matlab.

Imaginemos que tenemos el escenario de la Figura 4.45. Este escenario tiene una serie de obstáculos queremos rellenar con agua. La idea principal de la función es tomar el escenario por líneas e ir rellenando el escenario de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha. En primer lugar, se mira a ver dónde se encuentra el límite inferior del primer obstáculo del escenario. (Ver Figura 4.47) El primer obstáculo siempre será el más cercano al suelo del escenario. Si el primer obstáculo no está en contacto con el suelo, se creará el primer cubo de agua que rellenará el trozo vacío entre el suelo del escenario y el primer cubo de tierra. Este cubo está marcado en rojo en la Figura 4.52 como '1'. (Ver Figura 4.48).

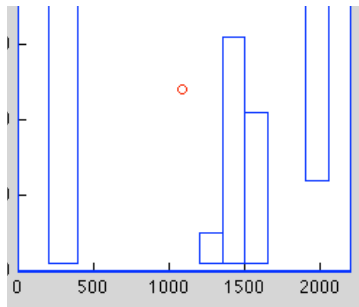


Figura 4.46: esquema funcionamiento de función rellena agua.

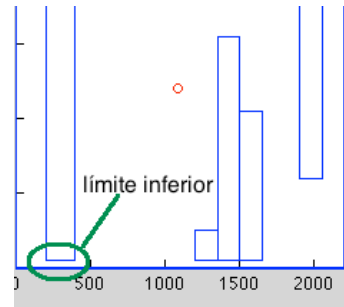


Figura 4.47: función rellena agua. Límite inferior.

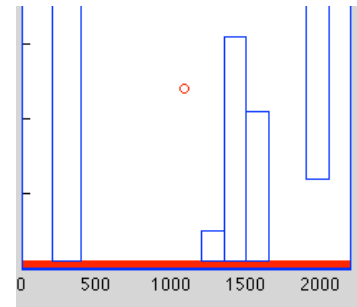


Figura 4.48: función rellena agua. Primer cubo de agua.

Seguidamente, se busca en el eje ‘y’ del escenario el siguiente límite del obstáculo más pequeño después del límite inferior del primer obstáculo. (Ver Figura 4.49) Es decir, en este caso, en la Figura 4.52, se puede ver como el cubo de tierra azul ‘1’ es el límite inferior del escenario y el cubo de tierra ‘2’ es el siguiente límite más pequeño. Hay que resaltar que el siguiente límite a encontrar puede ser el límite superior o inferior de un obstáculo. Una vez que se tiene el límite inferior y el siguiente límite se obtiene la altura de la línea. (Ver Figura 4.50).

Una vez que ya se ha conseguido la altura de la línea se buscan los obstáculos que se encuentran situados dentro de esa línea que se quiere rellenar de agua. Únicamente queda crear los cubos de agua desde la parte izquierda del escenario hacia la derecha. El primer cubo ocupará desde ‘0’ hasta el principio del primer obstáculo. El segundo cubo empezará desde el final del primer obstáculo hasta el principio del segundo obstáculo y así sucesivamente hasta el último obstáculo encontrado. El último cubo rellenará el espacio que se encuentra desde el último obstáculo hasta el final del escenario cerrando la línea. Una vez que se han creado los cubos de una línea, se buscará el siguiente límite más pequeño y se iniciará otra línea a rellenar. (Ver Figura 4.51).

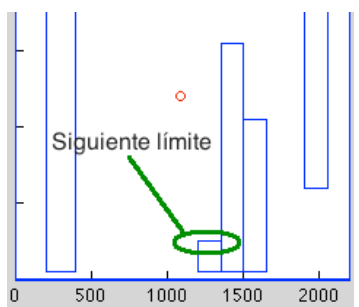


Figura 4.49: función rellena agua. Siguiete límite.

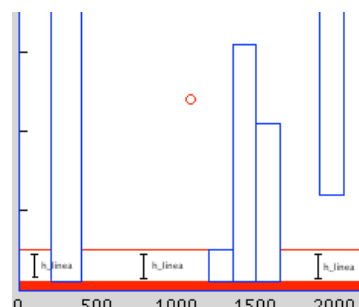


Figura 4.50: función rellena agua. Primera línea.

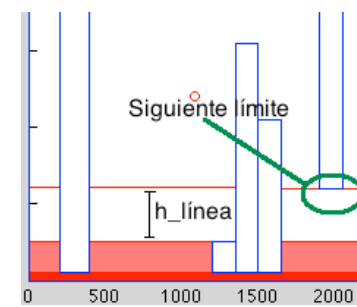


Figura 4.51: función rellena agua. Siguiete línea.

Rellenados todas las líneas se mira si el último límite encontrado coincide con el final del escenario. Si no es así, se crea un cubo que cubre el trozo vacío en lo alto del escenario. Este cubo es el correspondiente al cubo 33 en la Figura 4.52.

En la Figura 4.52 se puede observar como al efectuar la función ‘rellena agua’ sobre el escenario de la Figura 4.45, todo el escenario es rellenado por agua (cubos rojos). Hay que resaltar que para rellenar un escenario de 8 cubos se han necesitado 33 de agua.

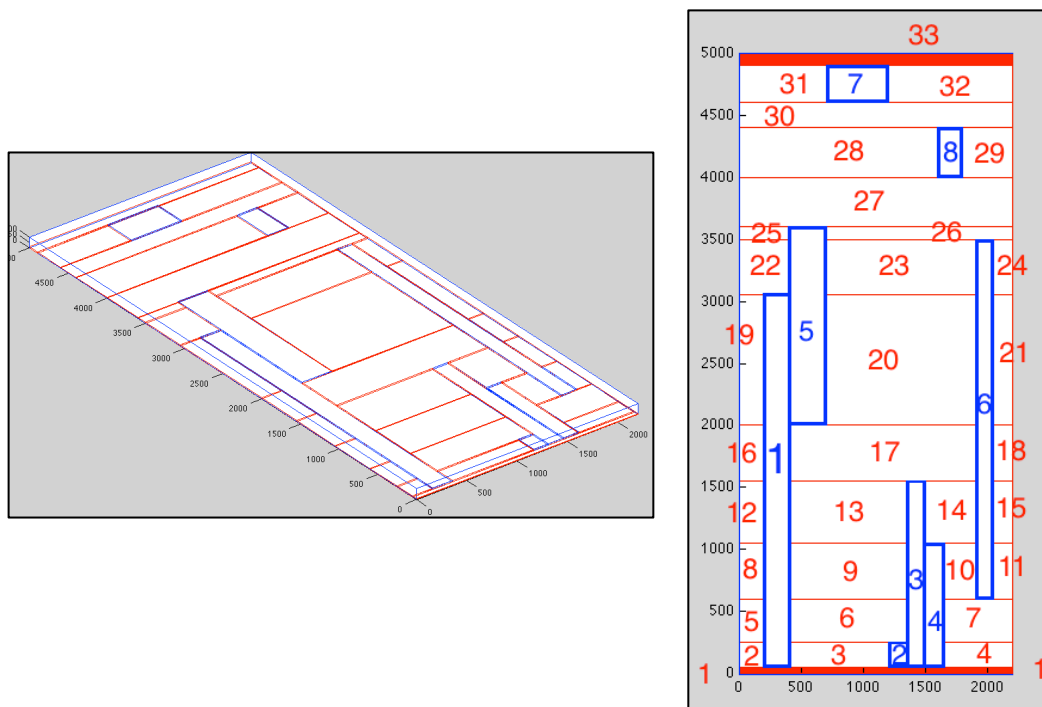


Figura 4.52: esquema de función 'rellena agua' en entorno Matlab.

Una vez que la función ha sido creada y explicada, se aplica sobre el escenario final creado. El resultado es el esperado y todo el escenario es rellenado por agua. (Ver Figura 4.53).

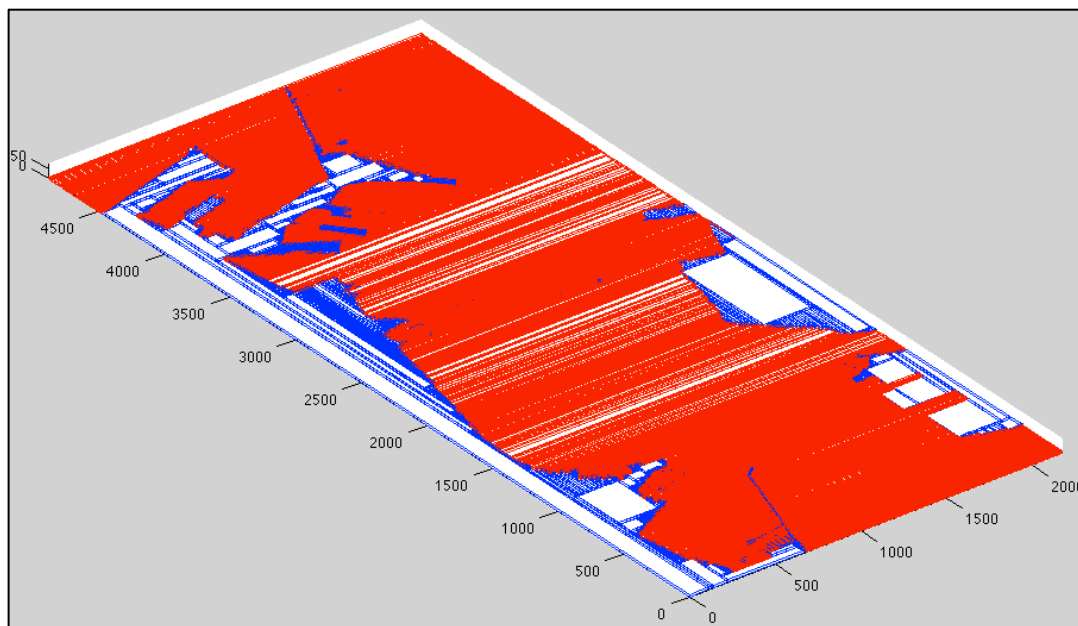


Figura 4.53: función 'rellena agua' en escenario final.

En la Figura 4.54, se puede ver la comparación entre el escenario final únicamente con la tierra firme y el escenario final añadiendo el agua.

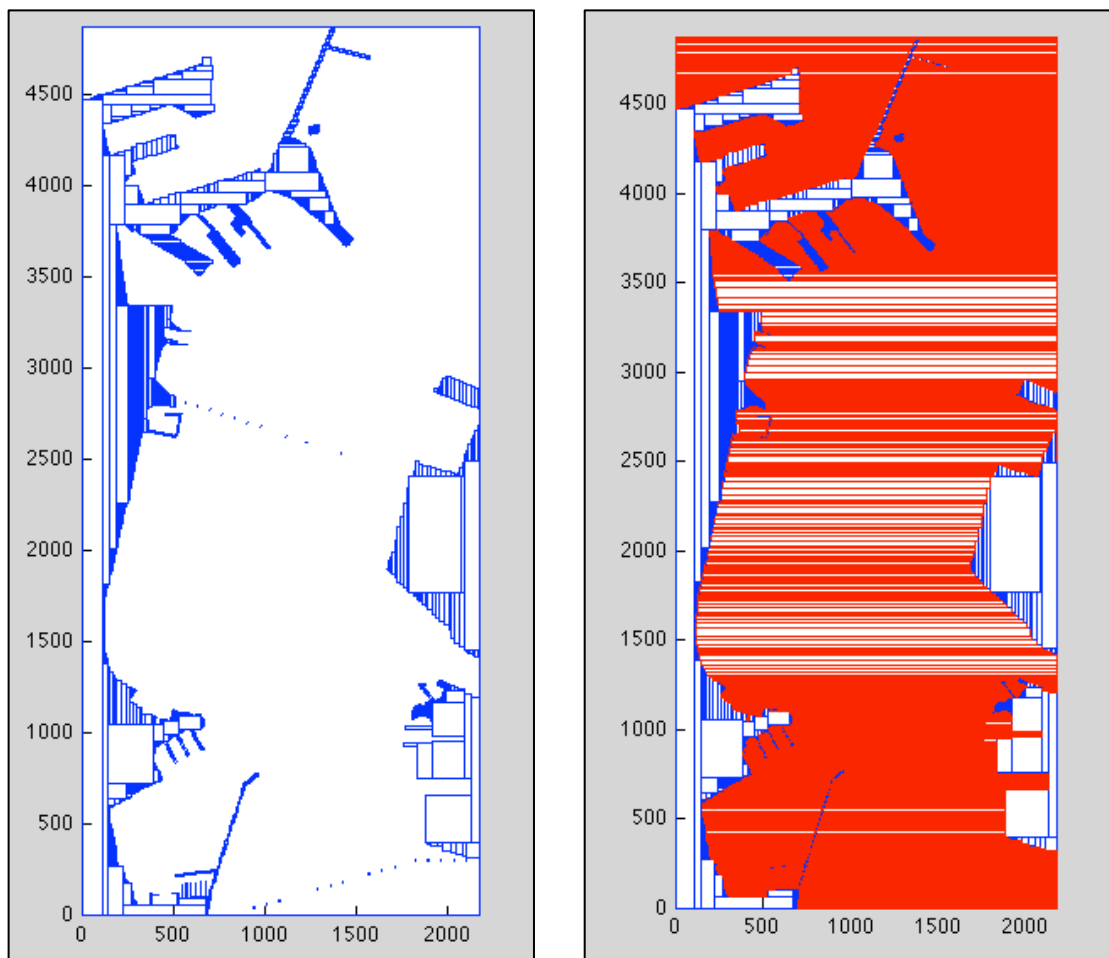


Figura 4.54: comparación entre escenario con tierra firme y relleno con agua.

En el escenario con tierra firme recordemos que se habían necesitado 1135 cubos para realizarlo. Para crear el escenario con agua, se han necesitado 3311 cubos de agua, lo que quiere decir, que el escenario final está formado hasta el momento por 4446 cubos.

En el Anexo 1 se puede ver el código realizado para la programación en Matlab de la función ‘rellena agua’.

4.6.3. Construcción de los edificios del escenario.

El siguiente y último paso para la creación del escenario final ha sido la implantación de los edificios que se encuentran colocados en el tramo elegido de la Bahía de Cádiz. Una parte de estos edificios son naves industriales que se encuentran situadas dentro de la zona portuaria y otra parte de ellos son edificios de viviendas que se encuentran alojados en la zona marítima de la Bahía de Cádiz.

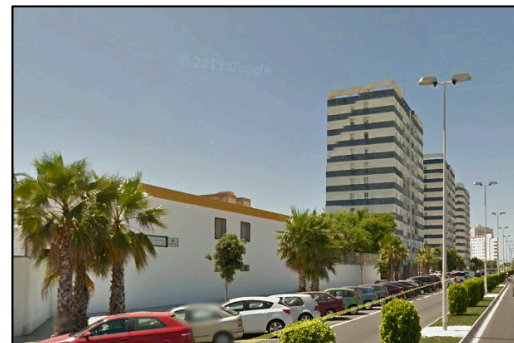


Figura 4.55: nave industrial en zona portuario de la Bahía de Cádiz

Figura 4.56: zona de edificio de viviendas en la Bahía de Cádiz

Para la creación de estos edificios, se ha utilizado el mismo método que para el caso de la tierra firme. Se han ido midiendo las posiciones de los edificios y se han ido creando éstos manualmente. Esta vez, en lugar de crear los edificios como cubos opacos, que era el caso de la tierra firme, se han creado los edificios como si fueran cajas; es decir, cubos que por dentro tenían espacio con aire. En el apartado 4.5, se describe un escenario en el que se colocan edificios, pero debido al elevado número de cubos necesario para cada edificio se descarta la idea de colocarlos.

Además de la elaboración de los edificios, se añaden las carreteras que van colocadas encima de los pilares de los puentes. Una vez añadidos todos los edificios y los puentes, el resultado del escenario final con los edificios añadidos es el que se puede ver en la Figura 4.57 y en la Figura 4.58.

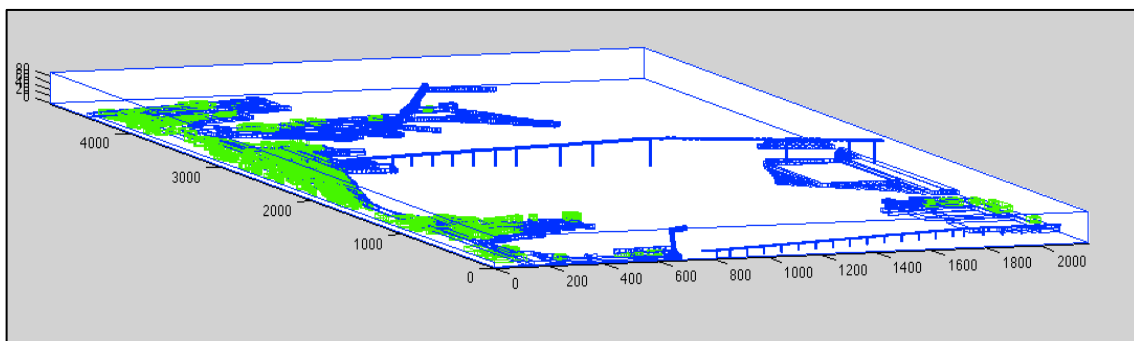


Figura 4.57: escenario final añadiendo los edificios.

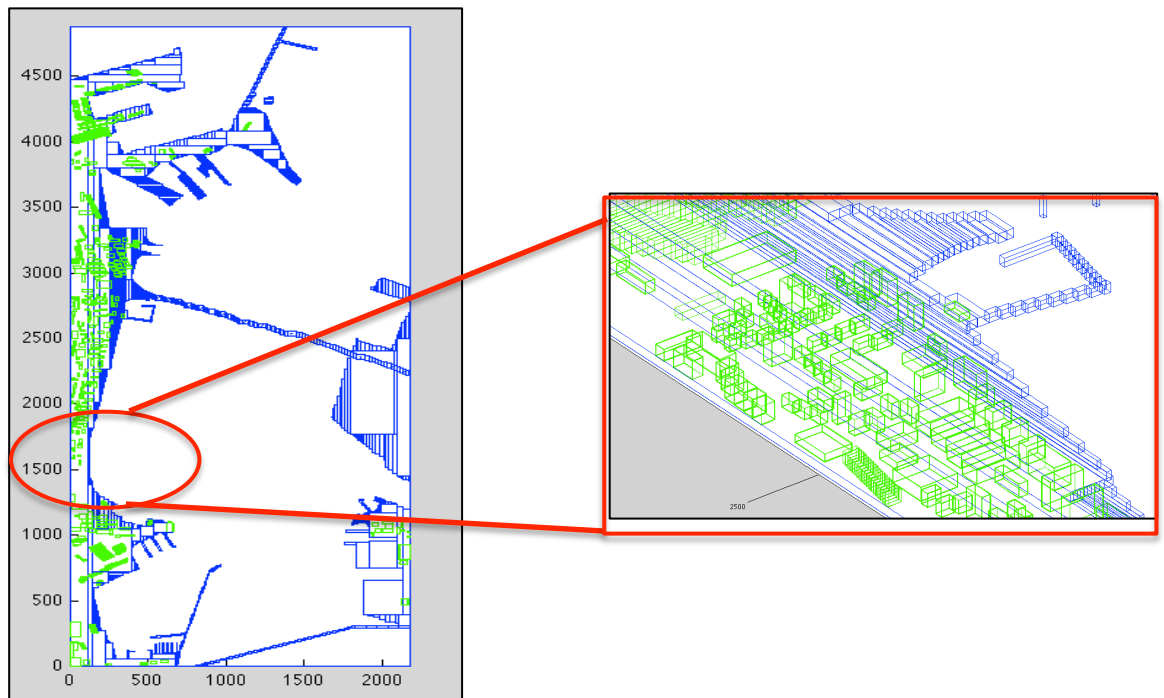


Figura 4.58: escenario final añadiendo los edificios.

Los edificios añadidos al escenario final están formados por un total de 4047 cubos y los tramos de carreta de los puentes están formados por 186 cubos. Esto hace un total de 8679 cubos que componen el escenario final.

4.6.4. Escenario final.

El resultado del escenario final se puede ver en la Figura 4.59. El escenario final está formado por 8679 cubos creado en tres partes: tierra firme, agua y edificios.

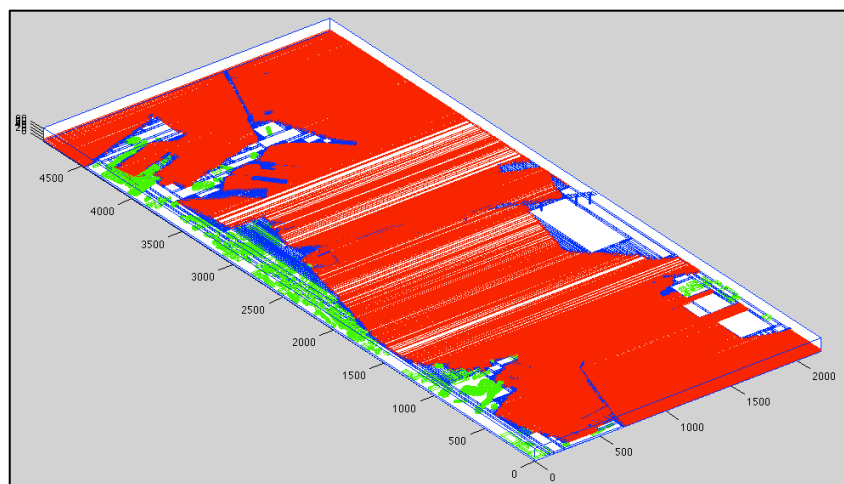


Figura 4.59: Escenario final en entorno Matlab.

Por último, en la Figura 4.60, se puede ver la comparación entre el escenario real visto desde Google Earth y el resultado en Matlab del escenario creado en Matlab.

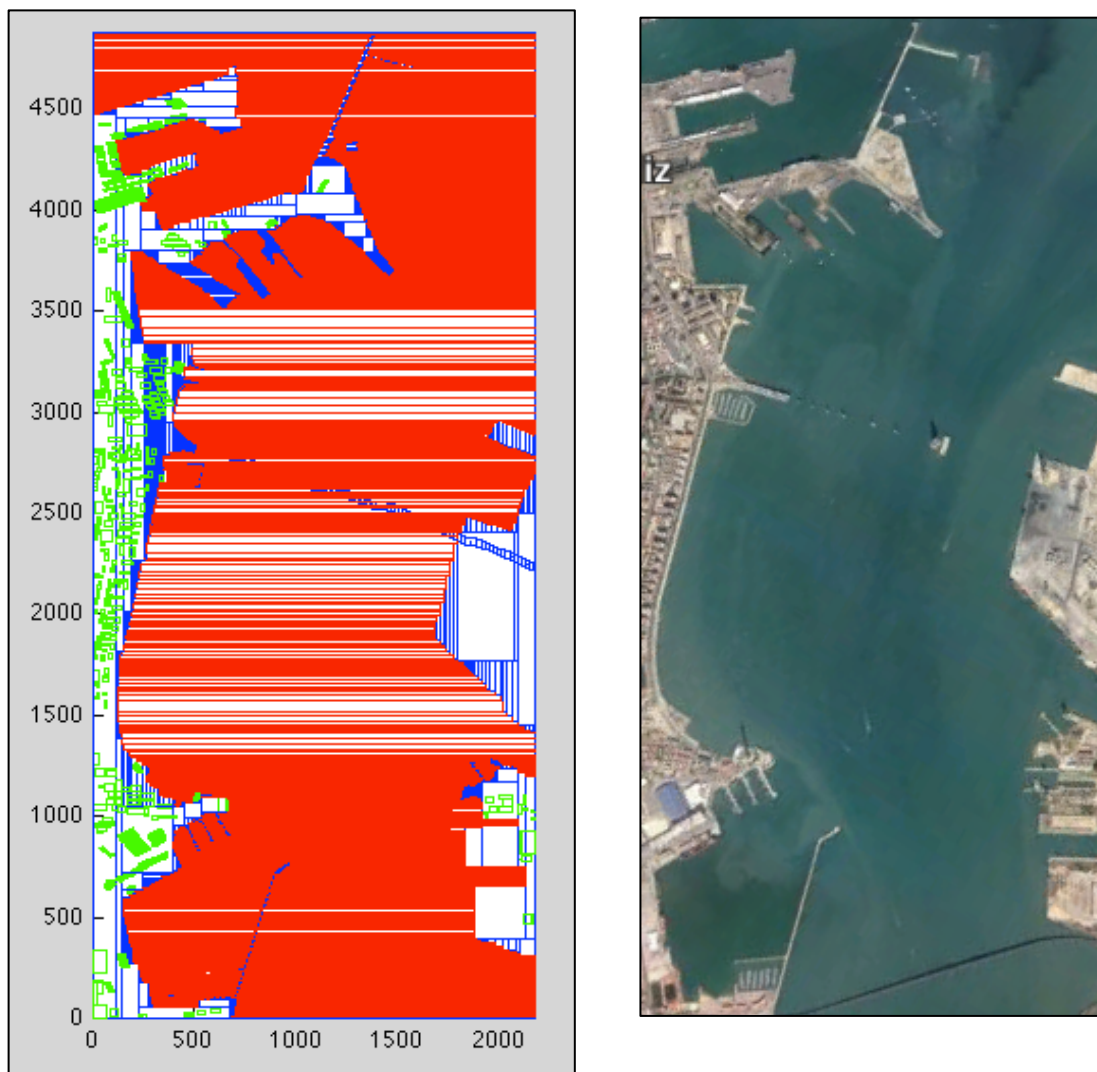


Figura 4.60: comparación entre escenario con escenario final y tierra firme.

Por último, añadir el escenario creado en Blender. Blender es un programa informático multi-plataforma, dedicado especialmente al modelado, iluminación, renderizado, animación y creación de gráficos tridimensionales. Mediante este programa se ha realizado la renderización del escenario final creado en Matlab, de tal manera, que en vez de ser en un dibujo creado a partir de líneas como en todos los casos anteriores, el resultado final de la imagen es más parecido a la realidad.

En la siguiente figura, ver Figura 4.61, se puede ver el escenario final creado mediante Blender.

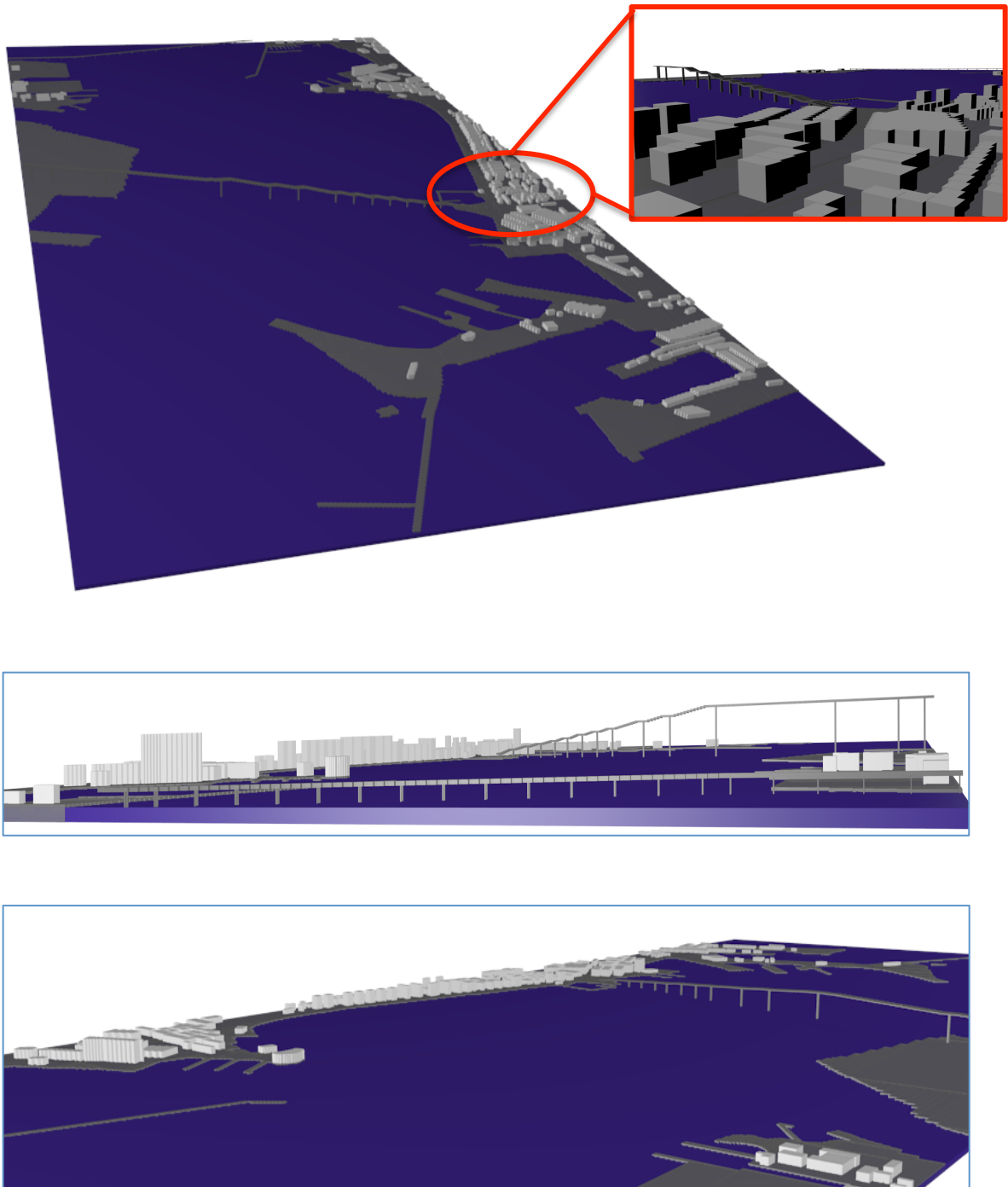


Figura 4.61: imágenes de escenario final creadas en Blender.

5. Resultados

En este apartado se realizarán las simulaciones correspondientes utilizando el escenario creado en el apartado anterior. Las primeras simulaciones tendrán como objetivo comprobar que el escenario ha sido creado correctamente y que los resultados obtenidos son coherentes con los obtenidos en apartados anteriores.

Por otro lado, uno de los objetivos del proyecto es validar los resultados obtenidos en simulación con medidas reales. En este apartado se compararán los resultados medidos en simulación con los datos medidos en la Bahía de Cádiz. Se verán las diferencias obtenidas, se analizarán las causas y se explicarán las soluciones adoptadas.

5.1. Primera simulación con escenario final.

Una vez que el escenario final ha sido creado, se deberán de realizar las pertinentes simulaciones para comprobar que el escenario está bien diseñado, que no contiene errores de código y que se comporta de una manera similar a las primeras simulaciones que se hicieron en los apartados anteriores.

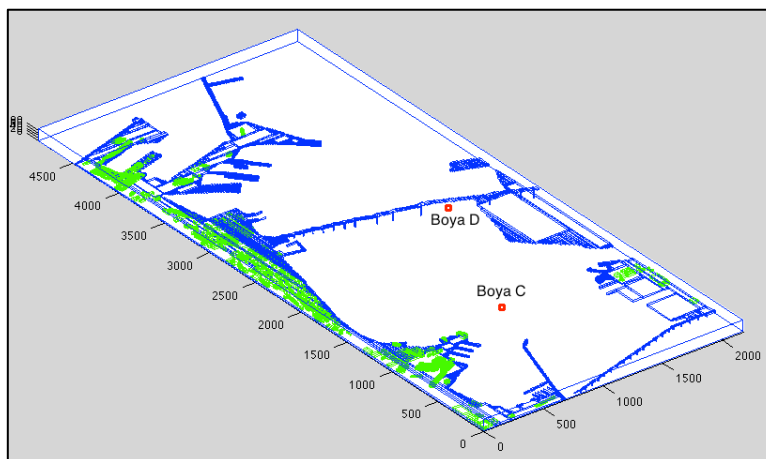


Figura 5.1: escenario final utilizado para simulación.

Para ello, se configuran una serie de parámetros necesarios para la simulación del escenario. Entre estos parámetros de configuración se encuentra la antena transmisora. En esta primera simulación se colocó una antena transmisora en el punto C que se puede observar en la Figura 5.1. Los parámetros de configuración de las antenas son los siguientes:

Frecuencia	2,4 GHz
Directividad	5 dB
Potencia	1 W = 30 dBm
Polarización	Vertical
Patrón de radiación en phi	Omnidireccional = 0 - 2π
Patrón de radiación en theta	Omnidireccional = 0 - π
Resolución angular	1°

Por otro lado, se configura el número de rebotes de los rayos a 6. La simulación ya está lista para lanzarse. El tiempo que tarda el ordenador en realizar esta simulación ronda los cuatro días. Una vez acabada la simulación sin errores se puede recoger los datos obtenidos. En primer lugar, como se puede observar en la Figura 5.2, se realiza un mapa de potencia del escenario en el plano XY desde la antena instalada en el punto C, para comprobar que es correcto el resultado de la simulación.

Se puede ver como efectivamente la antena transmisora se comporta de una manera omnidireccional en el plano horizontal. Como se puede ver en la Figura 5.2, cerca de la antena hay una potencia cercana a los -20 dBm y conforme nos vamos alejando de ésta la potencia decrece hasta los -100 dBm de potencia en los límites superiores del escenario.

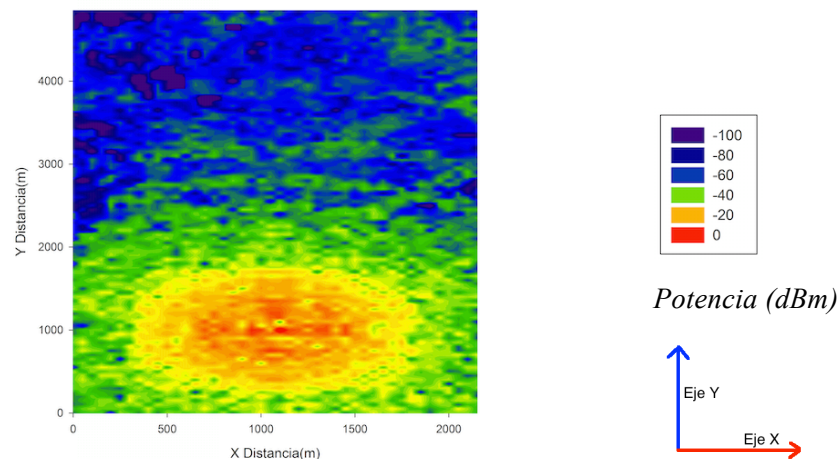


Figura 5.2: Mapa de potencia en plano XY (dBm) del escenario final.

Si se realiza un corte radial de potencia, tanto en el eje 'X' como en el eje 'Y' a la altura de la antena en el punto C, se puede observar como decae la potencia en función de la distancia. Ver Figura 5.3. Se puede diferenciar como en el eje 'X', la potencia decae hasta cerca de los -70 dBm, mientras que para el eje 'Y', la distancia decae hasta los -100 dBm debido principalmente al aumento de la distancia.

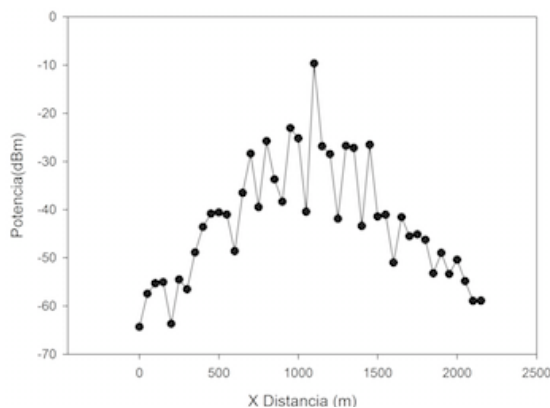


Figura 5.3: Corte radial de potencia en el eje 'x' en Boya C.

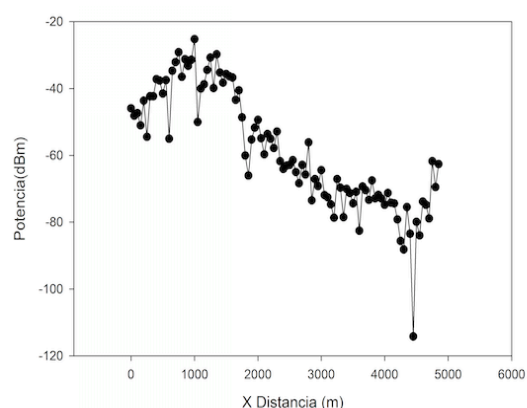


Figura 5.4: Corte radial de potencia en el eje 'y' en Boya C.

Si realizamos un corte de potencia en los planos XZ e YZ a la altura de la antena , (ver Figura 5.5), vemos como efectivamente en el plano vertical también el patrón de radiación de la antena es omnidireccional. También se puede observar como los rayos penetran en el mar, la cual tiene una capa de espesor de 10 m.

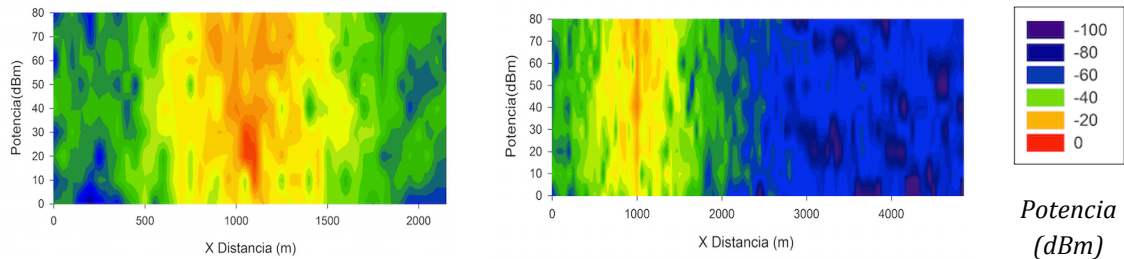


Figura 5.5: mapa de potencia en eje XZ en Boya C.

Figura 5.6: mapa de potencia en eje YZ en Boya C.

Si ahora se realiza en el mismo corte en el punto D, vemos como la potencia que llega a ese punto es mucho menor que la obtenida en posiciones cercana a la antena. También se puede ver en la Figura 5.8 como a partir de los 2000 metros en el eje y la potencia recibida es menor a -70 dBm.

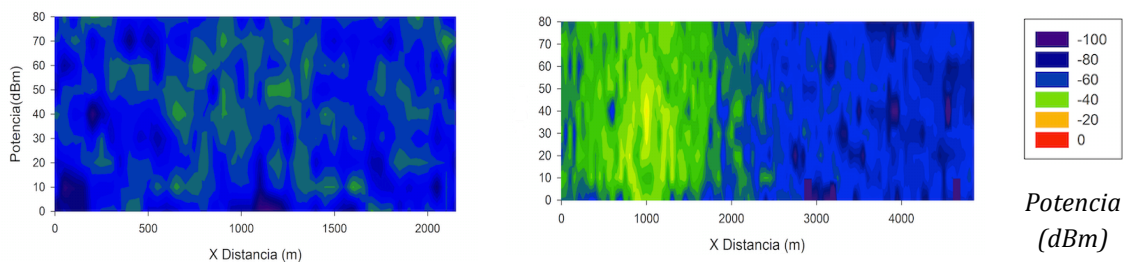


Figura 5.7: mapa de potencia en eje XZ en Boya D.

Figura 5.8: mapa de potencia en eje YZ en Boya D.

5.2. Validación del escenario.

Una vez que se ha realizado la primera simulación y se ha comprobado que los resultados son coherentes y que no se producen fallos relacionados con el escenario o con el código, es necesario comprobar si los resultados obtenidos se asemejan a la realidad.

Para poder comprobar si los resultados obtenidos en simulación se corresponden o se asemejan a los resultados que se obtienen en la realidad es necesario disponer de unos datos reales.

En este caso, para este proyecto, las medidas obtenidas en campo no han sido realizadas por los autores de este proyecto, sino que han sido obtenidas gracias a J. C. Reyes-Guerrero, Gordan Sisul y Luis A. Mariscal. Estas medidas están recogidas en el artículo del IEEE: “Measuring and Estimating the Propagation PathLoss and Shadowing Effects for Marine Wireless Sensor Networks at 5.8 GHz”. [1].

Por lo tanto, para poder comparar los resultados que se observan en este artículo se deberá realizar una simulación que cumpla las condiciones que se proponen en la realización de las medidas en la propia Bahía de Cádiz.

5.2.1. Medidas en la Bahía de Cádiz.

Para la realización de las medidas el escenario elegido como se ha repetido en anteriores ocasiones ha sido la Bahía de Cádiz. Esta zona tiene una topografía heterogénea con pobladas áreas urbanas, incluyendo grandes infraestructuras y edificios. Por otra parte, algunos clubes náuticos y un importante puerto comercial se colocan a lo largo de la costa. Por lo tanto, es fácil encontrar diversidad de barcos grandes y pequeños amarrados al puerto y navegando por la Bahía.

La toma de medidas fue llevada a cabo en un día soleado. La temperatura rondaba los 25°C y la humedad relativa era del 95%. El mar se encontraba en relativa calma. La presión atmosférica era de 1009 hPa y el viento soplaba con una fuerza de 12.5 m/s.



Figura 5.9: Localización fija de la antena receptora en tierra y ruta (A-F) seguida por el barco durante la toma de medidas. fuente [1].

Para la realización de las medidas fueron necesarias dos antenas, una transmisora y otra receptora. La antena receptora fue colocada en un barco amarrado en la costa y la antena transmisora fue colocada en un barco. Para la realización de las medidas se trazó una ruta. Esta ruta y la colocación de la antena receptora se puede observar en la Figura 5.9.

La toma de medidas se realizó de 'A' a 'F'. El barco donde iba montada la antena transmisora iba siguiendo la ruta marcada y cada cierto tiempo se iba transmitiendo una señal a la antena receptora. El barco lleva aproximadamente una velocidad de 2.5 m/s.

Durante toda la ruta no fue posible mantener una LOS (línea de visión) debido a las condiciones reales en escenarios marinos de bloqueo por barcos y por olas. Además hay que añadir que la curvatura de la Tierra bloquea la señal gradualmente con la distancia. De esta manera, durante el proceso de medida, de 'A' a 'B' hubo perfectas condiciones de LOS. Sin embargo, de 'B' a 'C' la señal fue parcialmente bloqueada debido a edificios y a algún barco que evitaba la línea de visión directa durante un periodo corto de tiempo. Durante la ruta de C a D la señal fue completamente bloqueada por barcos y edificios cercanos al lugar donde estaba

colocada la antena transmisora. En el resto de la ruta, de D a F la LOS fue completamente bloqueada por una larga infraestructura (Puente de la Constitución de 1812) y algunos barcos.

Las medidas fueron llevadas a cabo transmitiendo una onda continua (CW) de 30 dBm de potencia, es decir, una onda electromagnética de constante amplitud y frecuencia, de duración infinita.

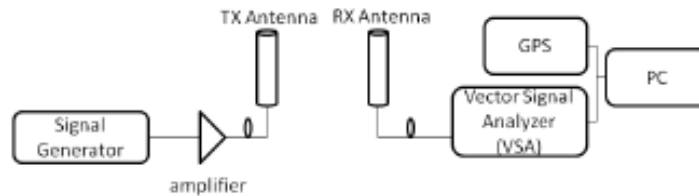


Figura 5.10: diagrama de bloques del sistema de medida. Fuente [1].

El esquema de transmisión completo se puede ver en la Figura 5.10. Una CW es generada a 0 dBm a 5.8 GHz. Esta onda es amplificada hasta los 33 dBm y las pérdidas producidas por cables son alrededor de 3 dB. Esta señal es la enviada por la antena transmisora. La antena tiene las siguientes características:

Frecuencia	5.8 GHz
Directividad	9 dBi
Potencia	1 W = 30 dBm
Polarización	Vertical
Patrón de radiación en phi	Omnidireccional = 0 - 2π
Patrón de radiación en theta	7°
Posición	2.7 m por encima del mar

La antena receptora tiene las mismas características que la antena transmisora, pero se encuentra situada 5.45 metros por encima del nivel del mar.

Una vez que las condiciones de medida y la ruta han sido definidos, se realiza el proceso de toma de datos. Los resultados se pueden ver en la siguiente gráfica. Ver Gráfico 5.1.

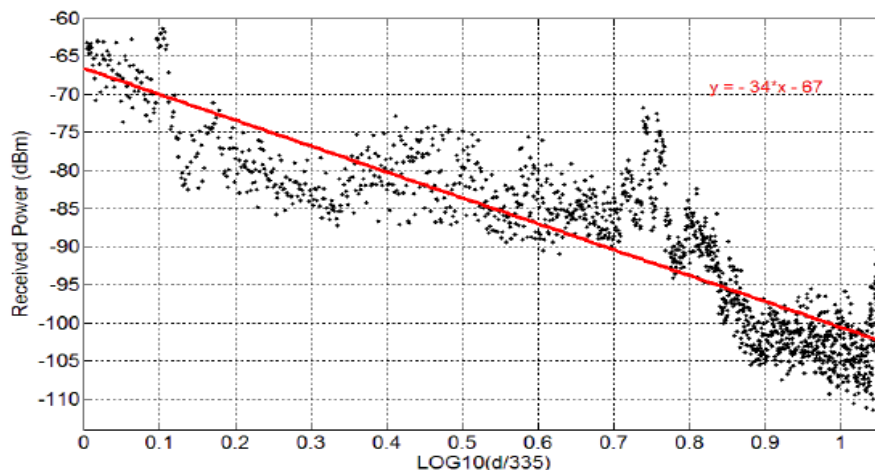


Gráfico 5.1: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1].

En este gráfico aparece representado el nivel de señal recibido en la antena receptora en función de la distancia que hay desde ésta hasta la antena transmisora. La distancia está normalizada de 0 a 1.

5.2.2. Medidas en simulación.

Como ya se tienen datos reales, se puede comprobar si el escenario creado se comporta de una manera similar a la realidad. Para ello se van a realizar una serie de simulaciones con las mismas condiciones que en el caso de medida real del apartado anterior.

En primer lugar, se adapta el escenario al caso concreto que nos ocupa. Se colocan 6 antenas transmisoras de 'A' a F para formar la misma ruta que se ha explicado en la toma de medidas real. Ver Figura 5.11.

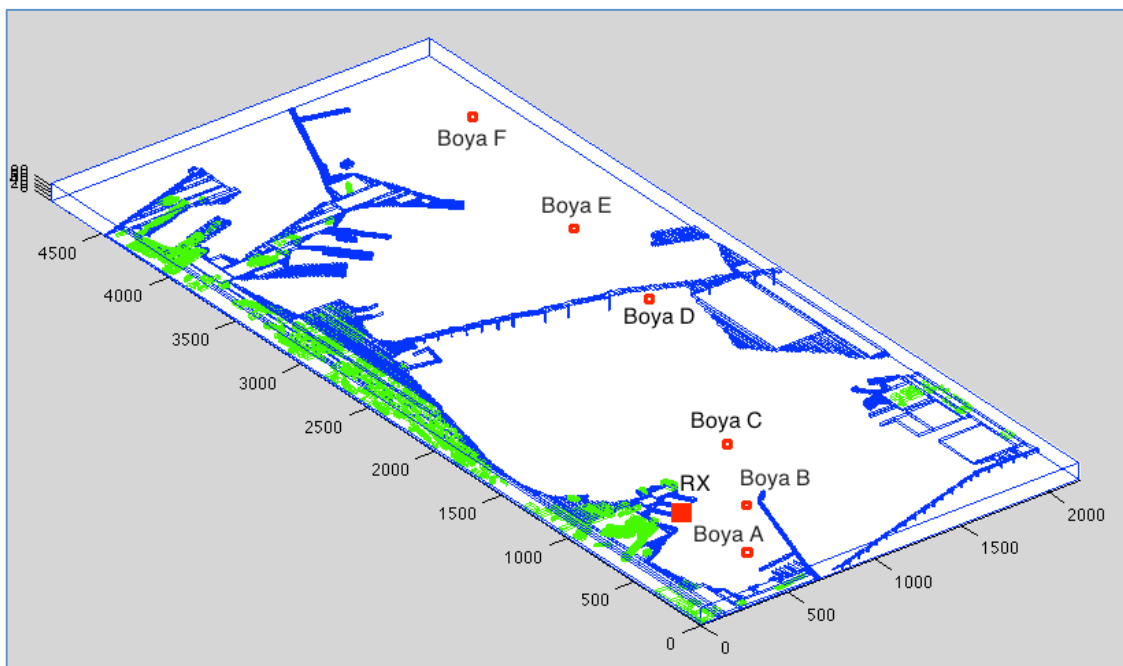


Figura 5.11: escenario final utilizado para validación del escenario.

Cada antena transmisora necesita de una simulación por separado, de tal manera, que para obtener todos los datos necesarios para la comprobación de las medidas se realizan 6 simulaciones en paralelo. El tiempo de coste computacional de cada simulación es de 1 día aproximadamente.

Cada antena se configura de tal manera que se comporta de la mismo modo que en el caso real. Así, se garantiza que el resultado de simulación se comporte lo más semejante al proceso de toma de medidas. Por ello, la configuración de las antenas transmisoras son las siguientes:

Frecuencia	5.8 GHz
Directividad	9 dBi
Potencia	1 W = 30 dBm
Polarización	Vertical
Patrón de radiación en phi	Omnidireccional = 0 - 2π
Patrón de radiación en theta	$7^\circ = \frac{\pi}{2} - \frac{3.5 \cdot \pi}{180} - \frac{\pi}{2} + \frac{3.5 \cdot \pi}{180}$
Resolución angular	1°

El número de rebotes de los rayos es 6.

Una vez que se han configurado las diferentes parámetros se pueden recoger los resultados. En primer lugar, se comprueba que la antena está comportándose como se ha definido. En la Figura 5.12 se puede observar un corte en el plano XZ y otro corte en el plano YZ en el punto C. En estas figuras se puede ver el patrón de radiación en el plano vertical.

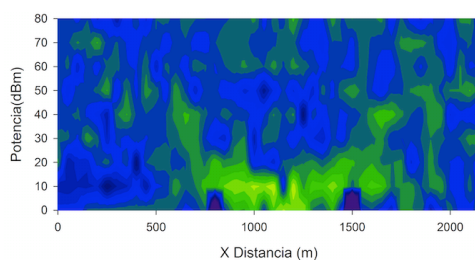


Figura 5.12: mapa de potencia en plano XZ de boya C.

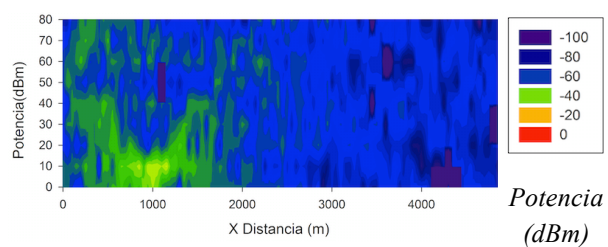


Figura 5.13: mapa de potencia en plano YZ de boya C.

Por otro lado, entre la Figura 5.14 y la Figura 5.19 se puede apreciar el patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal. Además, se puede ver el mapa de potencia en cada uno de los 6 puntos de las correspondientes antenas transmisoras en el plano XY.

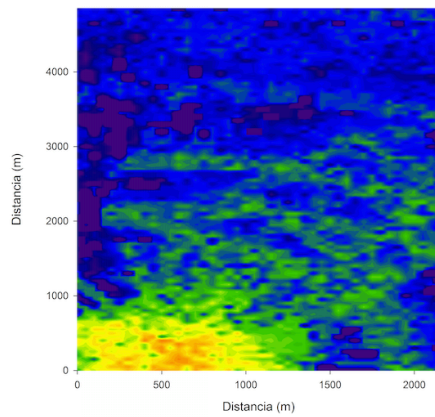


Figura 5.14: mapa de potencia en plano XY de boya A.

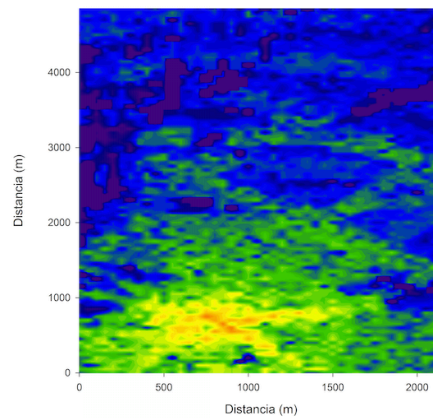
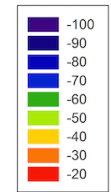


Figura 5.15: mapa de potencia en plano XY de boya B.



Potencia
(dBm)

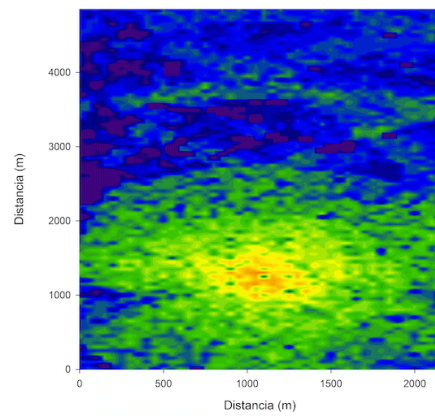


Figura 5.16: mapa de potencia en plano XY de boya C.

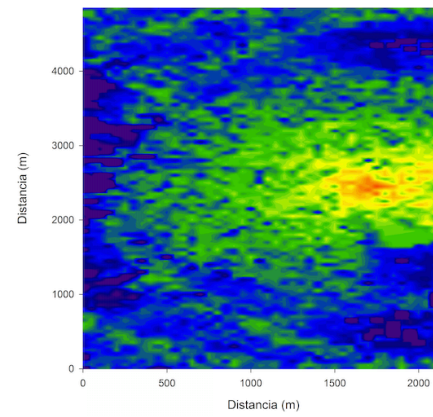
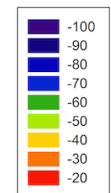


Figura 5.17: mapa de potencia en plano XY de boya D.



Potencia
(dBm)

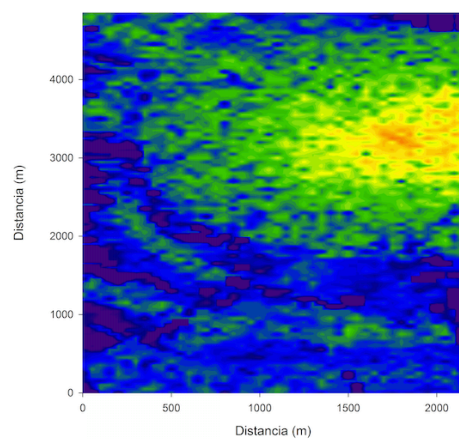


Figura 5.18: mapa de potencia en plano XY de boya E.

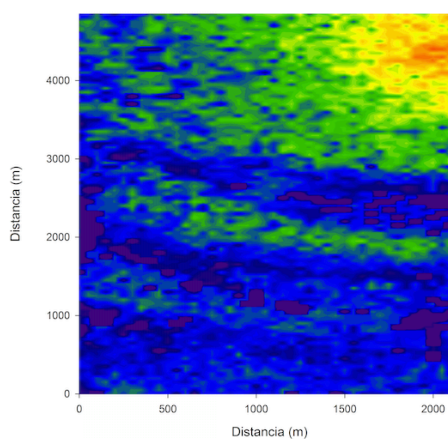
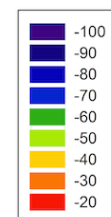


Figura 5.19: mapa de potencia en plano XY de boya F.



Potencia
(dBm)

A continuación se miran los datos de potencia recibida en el punto donde está colocada la antena receptora. Los resultados se muestran en el siguiente gráfico. Ver Gráfico 5.2.

Si comparamos los datos simulados con los datos reales, vemos que la curva de potencia es similar al comportamiento real del experimento. Sin embargo, al hacer el análisis de regresión lineal se observa como aunque la regresión tiene la misma pendiente que en el caso real, los resultados de potencia del escenario simulado están 15 dBm por encima que en la situación real.

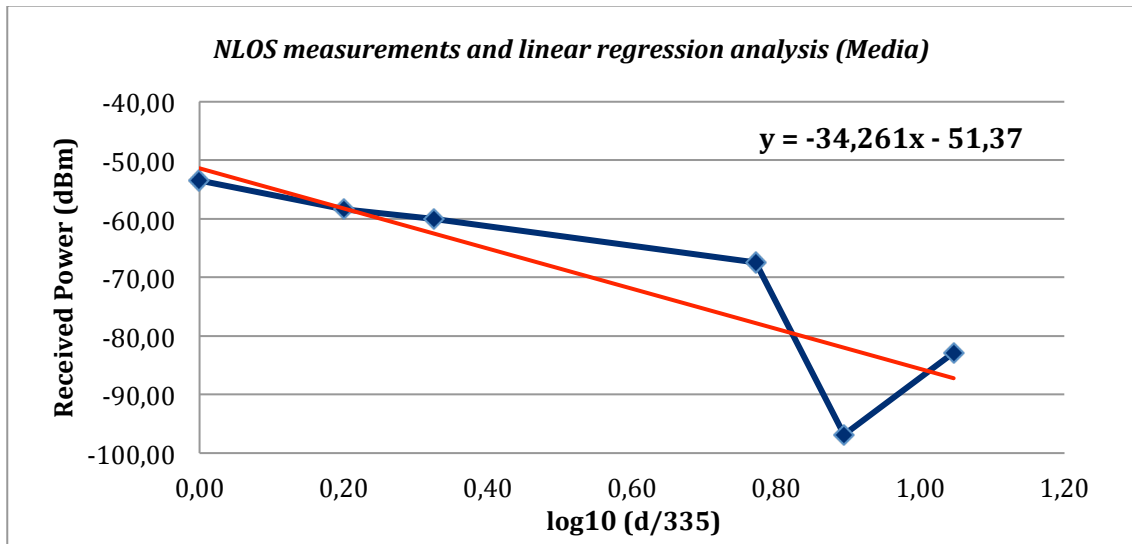


Gráfico 5.2: medida en simulación NLOS y análisis de regresión lineal. 'd' es distancia en metros entre antena transmisora y receptora.

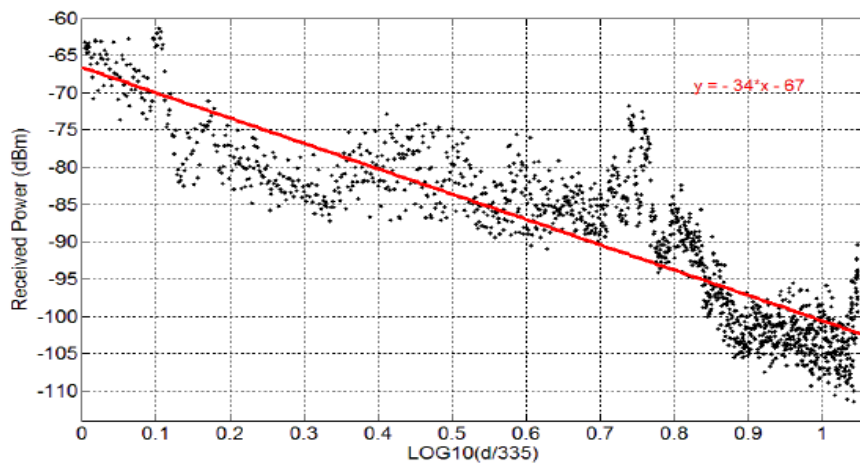


Gráfico 5.3: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1].

5.3. Scattering Sea Surface.

Una de las posibles causas de que al receptor le llega más potencia de la que se le supone es el hecho de que el simulador de trazado de rayos trata el agua como si fuera completamente lisa. Esto difiere bastante de la realidad. El mar obviamente está formado por olas y este fenómeno afecta en la radiopropagación.

La teoría de la reflexión especular se basa en una suposición de que la superficie de reflexión es suave. Sin embargo, la superficie del mar raramente es suave debido a la rugosidad causada por el movimiento del mar, lo que hará que el modelo de reflexión especular sea inadecuado para las frecuencias de radio móviles, especialmente para superficies de olas grandes que ocurren durante las malas condiciones meteorológicas.

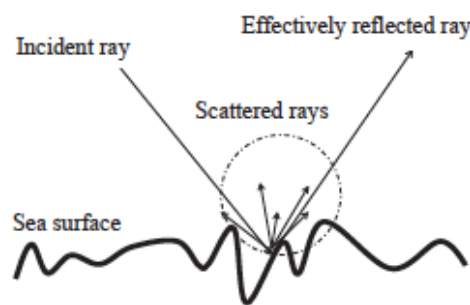


Figura 5.20: efecto de la reflexión debida al Scattering en el mar. Fuente [3].

La rugosidad de la superficie del mar se traducirá en una reducción de la potencia del rayo especular reflejada, porque parte de la potencia reflejada se dispersa en otras direcciones (Scattering Sea Surface), como se muestra en la Figura 5.20. Se han propuesto dos teorías principales para la dispersión por superficies rugosas: la teoría de Kirchhoff y la teoría de la perturbación [4].

La teoría Kirchhoff asume que cualquier punto de la superficie no hace sombra a otros puntos de la superficie. Además, se supone que la distribución de la altura de las olas sigue una distribución gaussiana.[5]. Bajo estos supuestos, el coeficiente de reflexión efectivo Rough se convierte en:

$$R_{\text{rough}} = R \cdot \exp\left[-2 \left(\frac{2\pi\sigma_h \sin\theta_e}{\lambda}\right)^2\right]$$

Ecuación 1: Coeficiente de reflexión con Scattering. Fuente [3].

Siendo:

- R_{rough} = coeficiente de reflexión teniendo en cuenta el Scattering.
- R = coeficiente de reflexión especular.
- σ_h = desviación estándar de la distribución de altura de la superficie.
- $\theta_e = \frac{\pi}{2} - \theta_i$
- θ_e = ángulo de incidencia

- θ_i = ángulo de elevación
- λ = longitud de onda para 5.8 GHz.

Bajo estos supuestos, el coeficiente de reflexión efectivo es menor que el coeficiente de reflexión especular y disminuye con el aumento de la derivación estándar de altura de la ola. Es decir, cuanto mayores sean las olas, menor será el coeficiente de reflexión de Scattering (R_{rough}) y menor será la potencia que llega al receptor.

Para comprobar esta teoría se realizó una prueba analítica variando los ángulos de incidencia de los rayos y la altura media de las olas. Ver esquema en Figura 5.21.

Si se tiene en cuenta que la antena receptora tiene una altura de 5,45 m, que la antena transmisora tiene una altura de 2,7 m y que la distancia entre ellas es de 521,44 m, se puede hallar el ángulo de incidencia de los rayos.

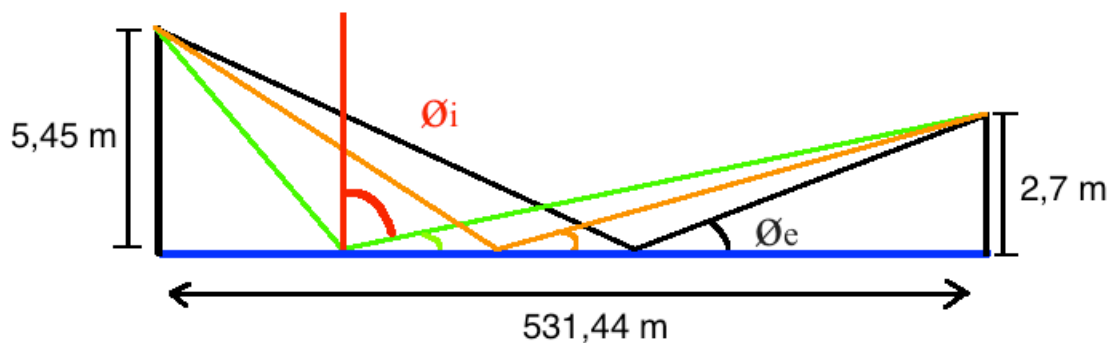


Figura 5.21: esquema de prueba analítica del coeficiente de Scattering.

Para el caso real que se analiza en la figura anterior se halla los ángulos de incidencia, θ_e , de los rayos reflejados para así poderse hacer un idea de los valores reales de los ángulos de incidencia. En la siguiente tabla se observan los ángulos hallados:

Distancia Tx-Reflexión en mar (m)	Ángulo de incidencia (θ_e , °)
138,85 m	1,11°
248,96 m	0,62°
397,38 m	0,38°

Como se puede ver los ángulos hallados son muy cercanos a '0', muy rasantes. Por ello se procede a hacer una gráfica para ver el comportamiento del nuevo coeficiente de reflexión en función de los ángulos de incidencia y compararlo con el caso en el que no se tiene en cuenta la reflexión de Scattering. A la hora de realizar la gráfica se han barrido ángulos de 0,1° hasta 3° y se ha variado la longitud media de las olas de 0 a 2 metros. Esta gráfica se puede ver en el Gráfico 5.4.

En el Gráfico 5.4 se puede ver lo que ya se había explicado en la fórmula de la Ecuación 1. El coeficiente de reflexión de Scattering es menor que el coeficiente de reflexión especular (azul en la gráfica) y disminuye con el aumento de la desviación estándar de altura de la ola.

Se puede observar como el parámetro de desviación estándar de la ola es muy influyente en el resultado del coeficiente de reflexión.

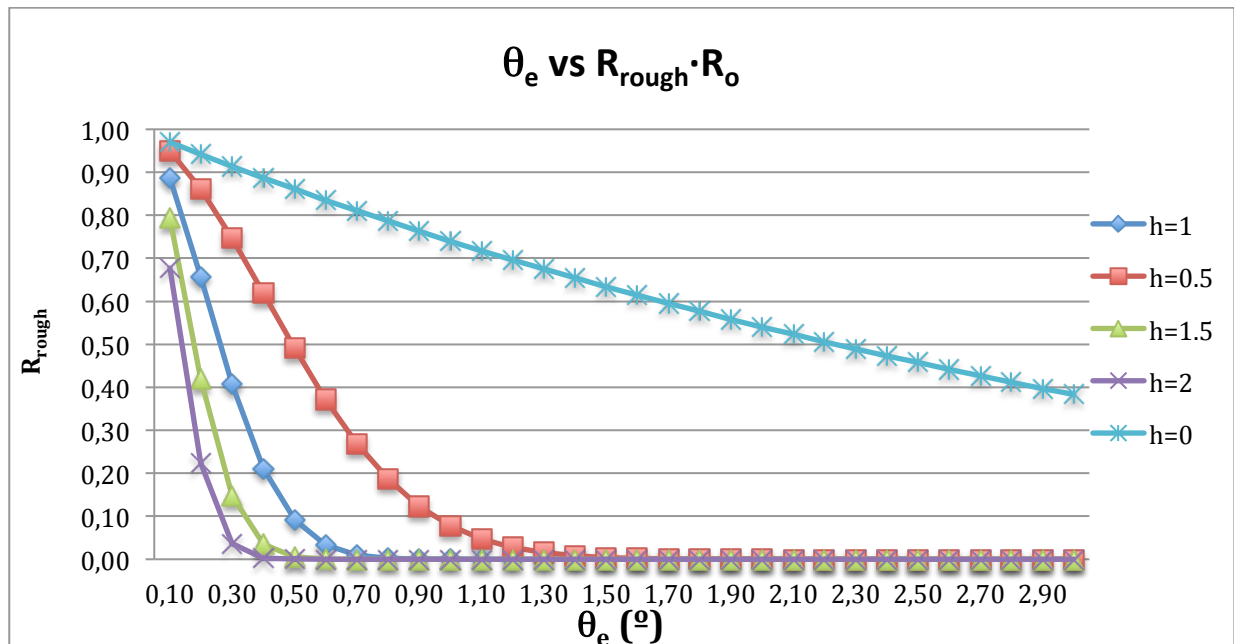


Gráfico 5.4: Coeficiente de reflexión con Scattering a diferentes alturas medias de las olas del mar.

Por esta razón, parece lógico que si se añade este nuevo coeficiente de reflexión teniendo en cuenta la reflexión por Scattering, el resultado final del diseño del sistema sea más parecido a los resultados reales.

5.4. Simulación con Scattering.

Para incorporar el nuevo coeficiente de reflexión, R_{rough} , a los resultados de simulación fue necesario cambiar algunos scripts del código de trazado de rayos. La idea básica fue buscar en el código el lugar donde se guardaba el ángulo de incidencia de cada rayo cuando chocaba contra los obstáculos y multiplicar el antiguo coeficiente de reflexión que no tenía en cuenta las reflexiones por Scattering por el nuevo coeficiente de reflexión.

Esta idea se pudo llevar a cabo de dos maneras diferentes:

1. Tratando el agua del mar como obstáculos.
2. Quitando todo el agua del escenario y tratando el suelo del escenario como si fuera el mar.

5.4.1. Simulación con obstáculos.

En este apartado se adecuó el código para incluir la dispersión de los rayos debida al Scattering. En este caso, el escenario creado es el mismo que para simulaciones anteriores. Para cambiar el código fue necesario decirle el tipo de material en el que se quería tener en cuenta la dispersión de Scattering.

Para ello, en el código hay un apartado donde todos los materiales utilizados están guardados y cada uno de ellos está representado por un número. De esta manera, el código ya sabía cuáles eran los rayos de los que tenía que guardar el ángulo de incidencia.

El proceso es relativamente sencillo. Cuando un rayo choca contra un obstáculo, si ese obstáculo es agua salada, el programa guarda el ángulo de incidencia de ese rayo en ese punto y le aplica la fórmula del nuevo coeficiente de reflexión.

Por otro lado, también hubo que crear un parámetro para definir la altura media de las olas.

Una vez que el código estaba listo se pudieron lanzar las pertinentes simulaciones. El proceso a seguir fue el mismo que en el apartado 5.2.2. Las condiciones de simulación tenían que ser las mismas que en el proceso de medida real y las características de las antenas también.

Se realizaron diferentes simulaciones cambiando las condiciones de la altura media de las olas. Estos fueron los resultados obtenidos:

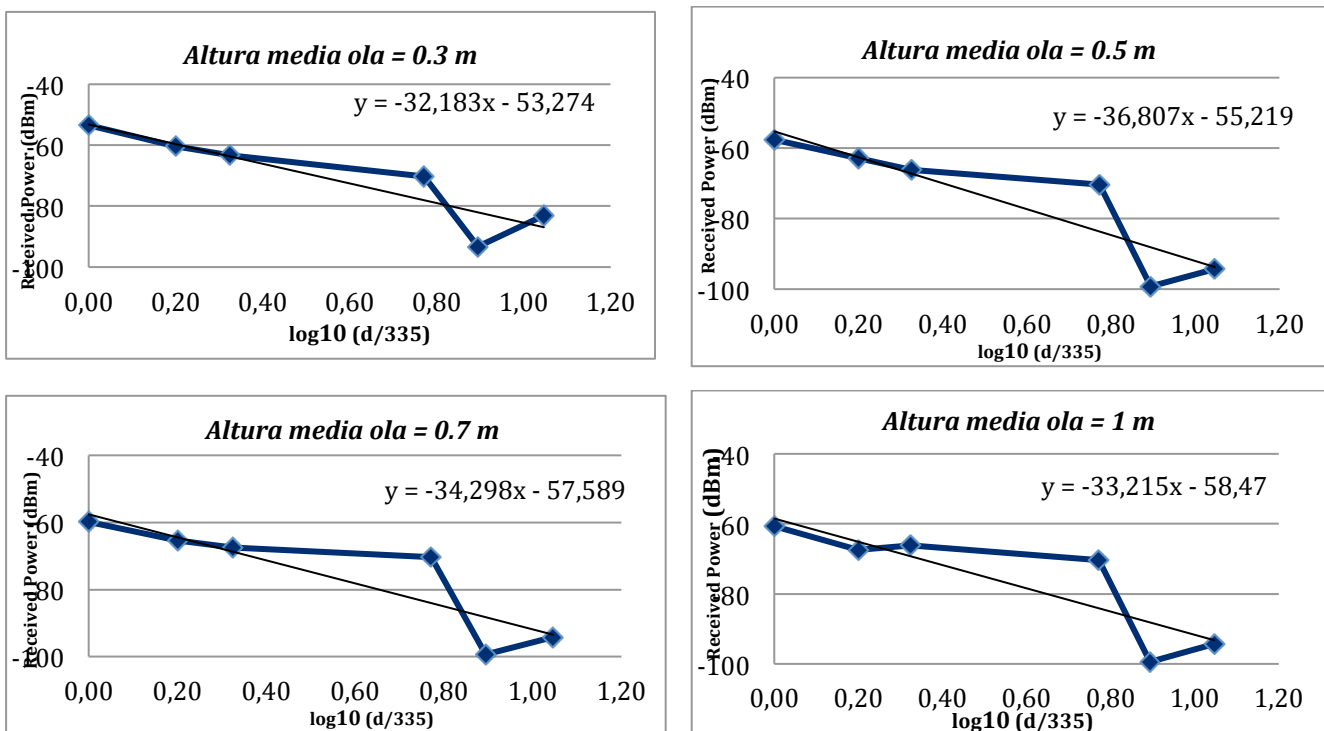


Gráfico 5.5: Medidas en simulación NLOS con diferentes alturas medias de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el agua.

Como se puede observar en el Gráfico 5.5, los resultados son obtenidos para alturas medias de olas de 0.3, 0.5, 0.7 y 1 metros. Se representa el nivel de potencia recibido en el punto de la antena receptora en función de la distancia, teniendo en cuenta la ruta seguida en la Figura 5.22.

Se puede observar como la distribución que siguen los resultados de potencia es muy parecida al caso real y al caso estudiado teniendo en cuenta el mar completamente liso.

En el Gráfico 5.6 se puede ver una comparación de los resultados de potencia recibida en el RX. Como se puede ver el comportamiento de todos los modelos es similar, salvo que al aumentar la altura media de las olas, la potencia que le llega al receptor es menor.

Con este gráfico se comprueba que el modelo explicado en el apartado 5.3 (página 64), se comporta correctamente. Y que, por lo tanto, el coeficiente de reflexión de Scattering ayuda a mejorar el comportamiento del diseño simulado.

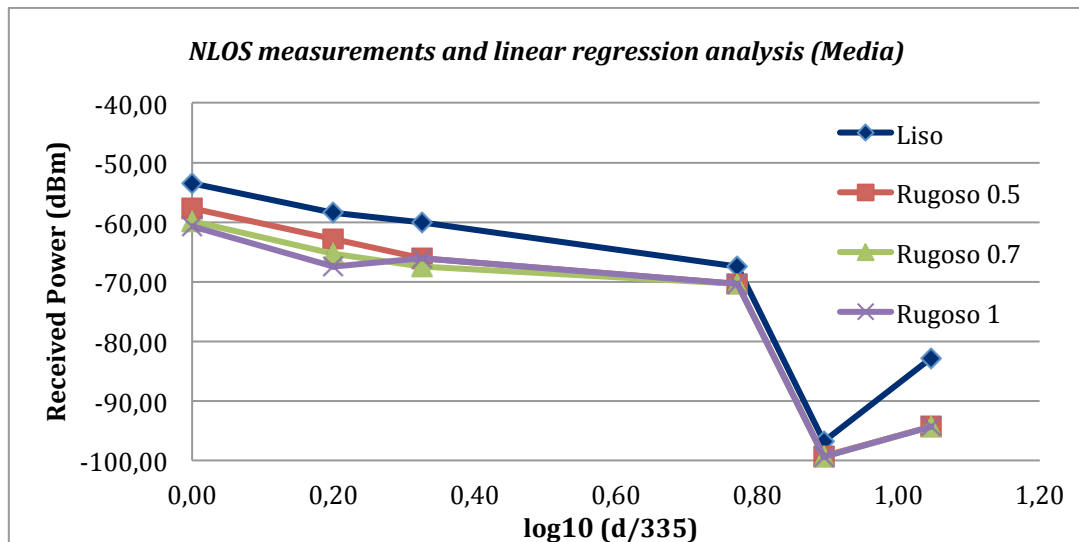


Gráfico 5.6: Comparación de medida en simulación NLOS con diferentes alturas medias de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el agua.

Analíticamente, el modelo correspondiente a la altura media de ola de 1 metro de altura ha conseguido mejorara el modelo liso en casi 8 dB.

Si se analiza detenidamente el resultado para el modelo de altura de ola a 0.7 m, se puede observar como efectivamente la reflexión de Scattering hace que se pierda más potencia.

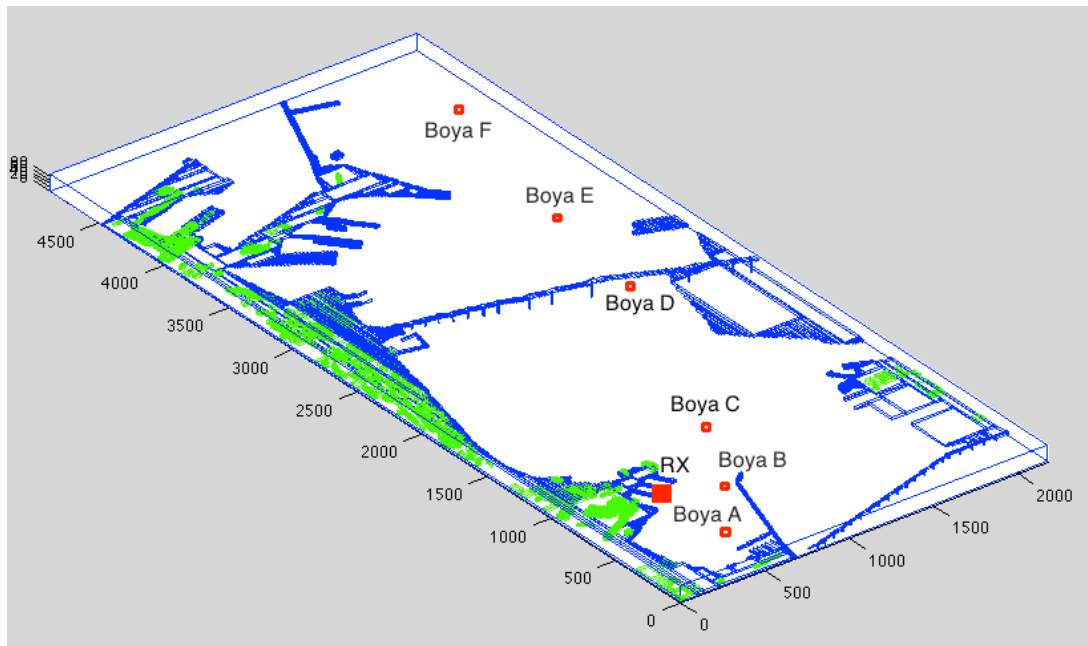


Figura 5.22: esquema de puntos donde se han colocado las antenas transmisoras.

Si se observa la Figura 5.23 a la Figura 5.26 se puede ver la comparación del mapa de potencia en los planos XZ e YZ a la altura de la antena en el punto C. Se observa como los rayos emitidos en la antena son mayores cuando no existe la reflexión por Scattering.

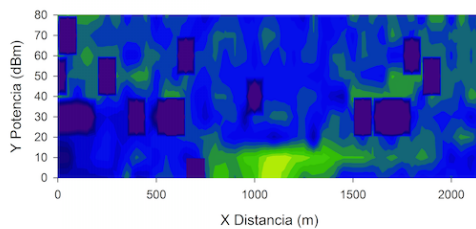


Figura 5.23: mapa de potencia en plano XZ en boya C con Scattering.

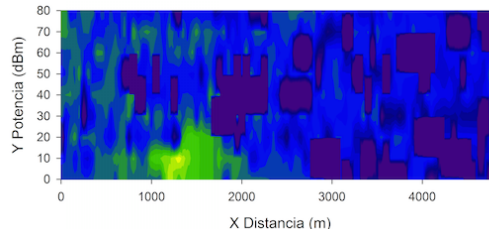
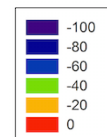


Figura 5.24: mapa de potencia en plano YZ en boya C con Scattering.



Potencia (dBm)

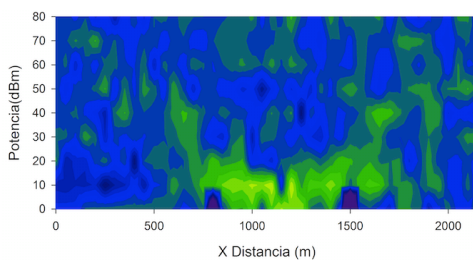


Figura 5.25: mapa de potencia en plano XZ de boya C sin Scattering.

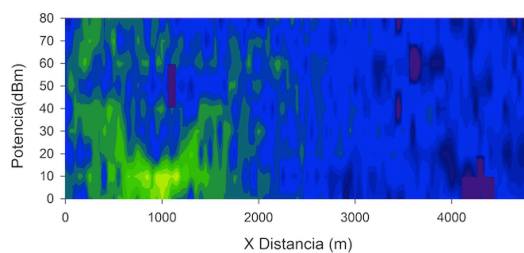


Figura 5.26: mapa de potencia en plano YZ de boya C sin Scattering.

Por otro lado, en las siguientes figuras se puede observar como al mostrar el mapa de potencia del plano XY en cada punto de transmisión, la absorción debida al mar y a la dispersión por Scattering es clara. Estas gráficas se pueden comparar con los resultados obtenidos en la página 64.

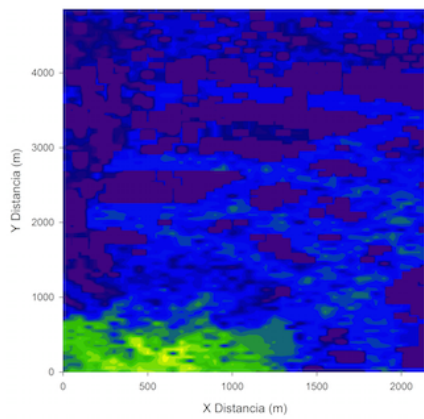


Figura 5.27: mapa de potencia en plano XY en boya A.

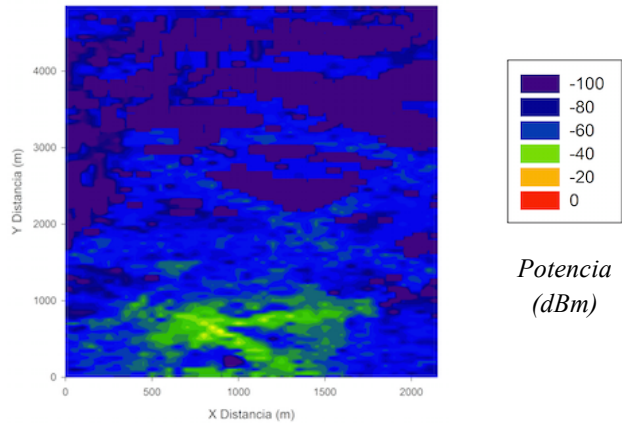


Figura 5.28: mapa de potencia en plano XY en boya B.

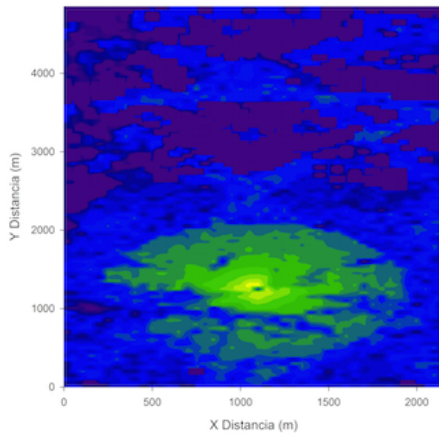


Figura 5.29: mapa de potencia en plano XY en boya C.

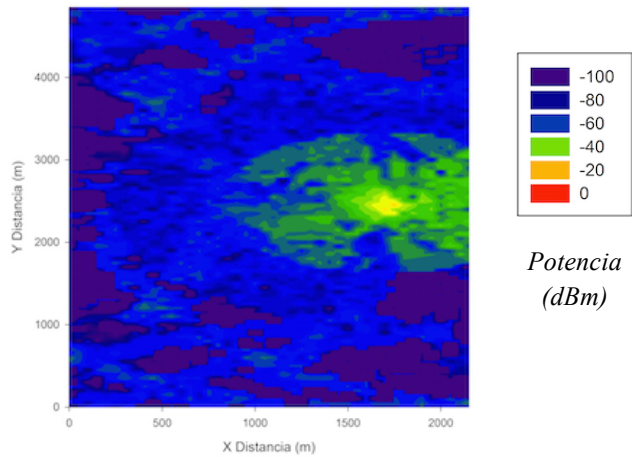


Figura 5.30: mapa de potencia en plano XY en boya D.

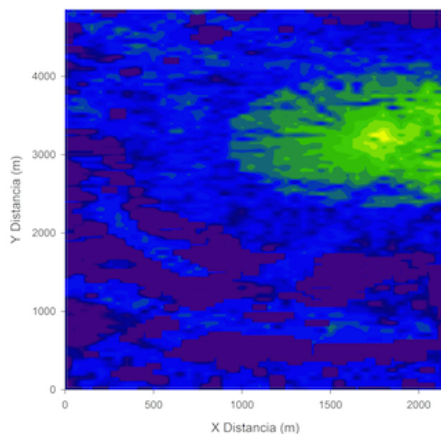


Figura 5.31: mapa de potencia en plano XY en boya E.

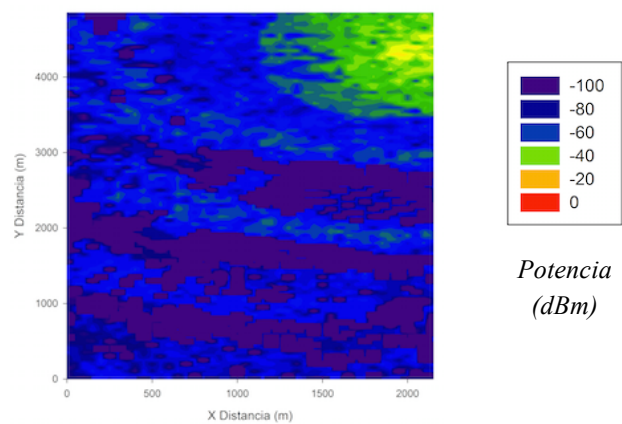
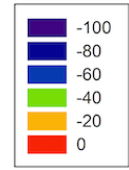
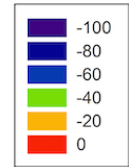


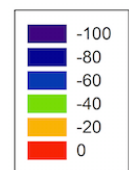
Figura 5.32: mapa de potencia en plano XY en boya F.



Potencia
(dBm)



Potencia
(dBm)



Potencia
(dBm)

5.4.2. Simulación con pared.

Por otro lado, se puede realizar el cambio de código del trazado de rayos de una manera diferente. La idea conlleva un cambio en el escenario creado.

Es necesario quitar todo el agua del escenario. De esta manera, en el escenario creado la diferencia de altura entre la tierra firme y el mar era de 2 metros; así que habrá que bajar todo el escenario en consonancia para que las proporciones se mantengan. Es decir, hay que cambiar la altura de la tierra firme, los edificios y la altura de los pilares que forman los dos puentes.

Una vez que este escenario se creó, se volvió a definir el suelo del escenario y se puso de agua salada. En este caso, para que se tuviera en cuenta el nuevo coeficiente de reflexión la idea fue la siguiente. Cuando un rayo es reflejado, el código comprueba si ha chocado contra el suelo. Si es así, se le aplica el nuevo coeficiente de reflexión.

Una vez añadido el nuevo código, se configuraron las diferentes antenas transmisoras de igual manera que en apartados anteriores y se lanzaron las pertinentes simulaciones. En este caso, el modelo se probó para un altura media de olas de 0.5 metros.

Sin embargo, como se puede observar en el Gráfico 5.7, los resultados de la simulación no fueron los esperados. La potencia recibida no se asemeja a los resultados reales ni se parecen a los resultados anteriores. Además, la regresión lineal muestra que el comportamiento del escenario es erróneo.

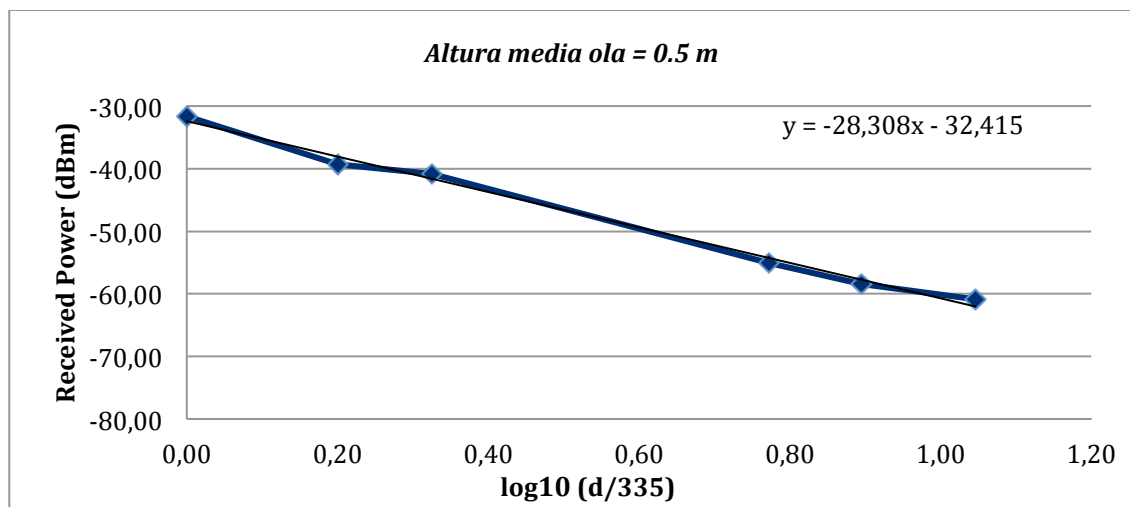


Gráfico 5.7: medida en simulación NLOS con altura media de ola de 0.5 m teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el suelo.

5.5. Comparación final.

En este apartado se hará un pequeño resumen de todos los modelos simulados. Recordemos que en el objetivo de este apartado es conseguir que el escenario simulado sea lo más parecido a los resultados que se producen en la realidad.

En la siguiente tabla se puede ver la regresión lineal que se obtienen de todos los resultados.

Modelo	Altura Media de la ola	Regresión lineal
Caso real	*****	$y = -34.0 \cdot x - 67.0$
Simulación con mar plano	0	$y = -34.3 \cdot x - 51.4$
Scattering – Obstáculos	0.3	$y = -32.2 \cdot x - 53.2$
Scattering – Obstáculos	0.5	$y = -36.8 \cdot x - 55.2$
Scattering – Suelo	0.5	$y = -28.3 \cdot x - 32.4$
Scattering – Obstáculos	0.7	$y = -34.3 \cdot x - 57.6$
Scattering – Obstáculos	1	$y = -33.2 \cdot x - 58.5$

Tabla 5.1: Comparación de regresión lineal entre modelos simulados.

Como se puede ver en la tabla anterior, los modelos que más se asemejan al resultado real son los realizados teniendo en cuenta el coeficiente de reflexión de Scattering y con alturas medias de olas entre 0.7 y 1 metro.

Es por ello, que se realizó una última simulación con estos modelos en donde se añadieron más puntos de transmisión para que el comportamiento de la curva fuera más completo. Estos resultados se pueden observar en el Gráfico 5.8.

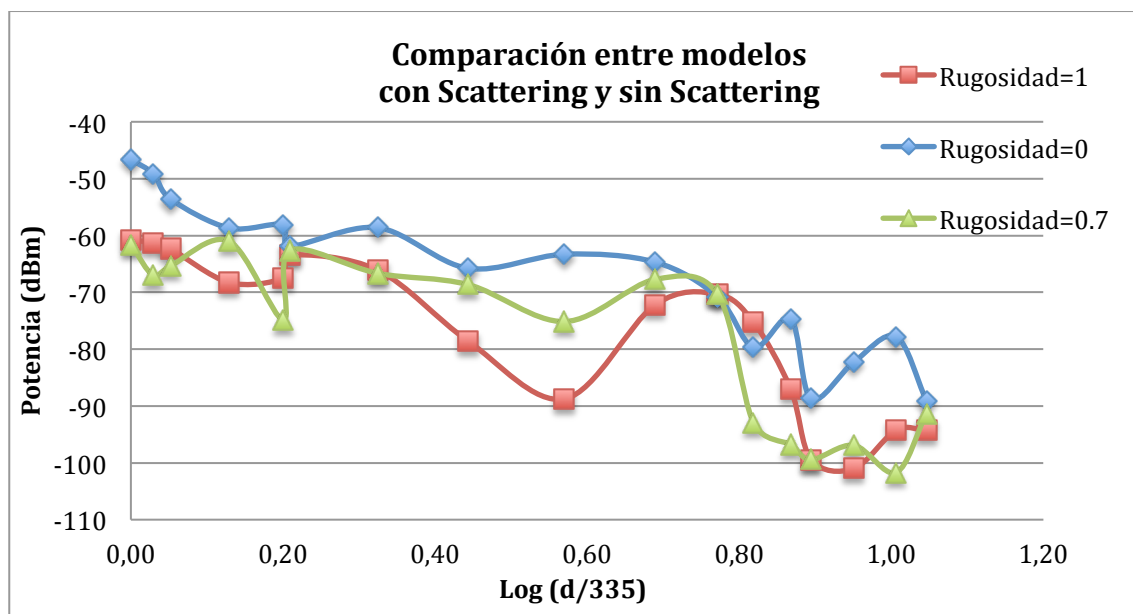


Gráfico 5.8: Comparación de medida en simulación NLOS a diferentes alturas de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface.

En el Gráfico 5.8 se puede ver la comparación entre el modelo sin Scattering (azul) que tiene en cuenta el agua del mar como si fuera lisa, y los modelos con Scattering con altura media de ola de 0,7 y 1 m. Se puede observar como conforme la altura de la ola es mayor, la potencia recibida en el receptor es menor.

Por último, si se vuelve a hallar la regresión lineal del modelo con rugosidad de 0,7 metros con 17 antenas transmisoras, se puede ver como el resultado final es un poco mejor que antes. Ver

Gráfico 5.9.

Se puede ver que el resultado simulado se acerca bastante a la realidad. El comportamiento de la curva es muy parecido y la regresión lineal tiene la misma pendiente. Sin embargo, aún está 7 dB por encima que en el caso real. Este hecho puede ser debido a diferentes factores que no se están teniendo en cuenta en el programa de trazado de rayos como pueden ser: pequeñas diferencias en la creación del escenario, ausencia de barcos en el proceso de simulación...

Por otro lado, el hecho de que la antena transmisora esté colocada en un barco también influye en el resultado final, ya que muchos de los rayos directos que envía la antena chocan contra la cubierta del barco. Estos sucesos no son contemplados en el código de trazado de rayos.

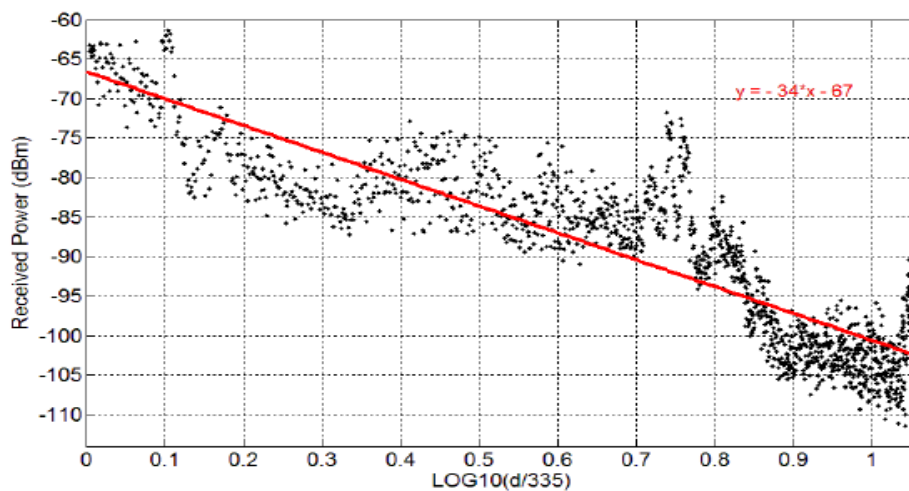


Gráfico 5.9: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1].

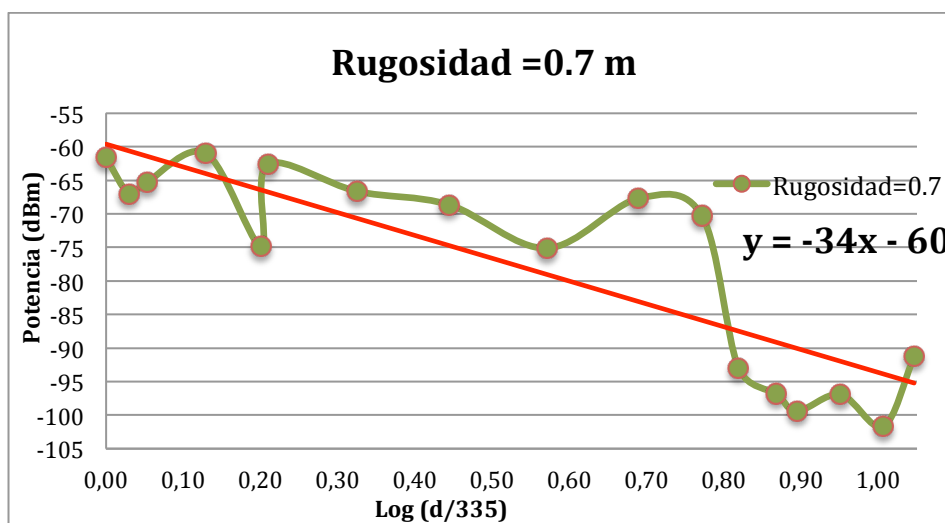


Gráfico 5.10: medida en simulación NLOS y análisis de regresión lineal para olas de 0.7 m teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface.

6. Red de Sensores ZigBee.

Teniendo en cuenta lo visto en apartados anteriores, se ha conseguido diseñar y analizar el entorno marino de la Bahía de Cádiz. Se ha creado un escenario que se corresponde fielmente con la realidad, teniendo en cuenta las condiciones de permitividad y conductividad de los materiales. Además, se ha conseguido simular las condiciones de rugosidad propias del entorno marino, de tal manera que se han comprobado las medidas reales y las medidas en simulación y los resultados son aceptables.

Esto quiere decir, que el escenario que se ha analizado concuerda con los resultados que se miden 'in situ'. Por ello, en este momento, es posible hacer simulaciones con aplicaciones que se podrían llevar a cabo en la realidad.

En este caso, se va a proceder a diseñar una posible red de sensores en la Bahía de Cádiz. Como se ha explicado en los apartados 3.2.1 y 3.2.2, la red de sensores propuesta utilizará tecnología ZigBee.

En el mercado comercial se pueden encontrar multitud de marcas y modelos de transceptores ZigBee con diferentes parámetros y diferentes precios. Para que los datos configurados en simulación sean lo más reales posibles se han utilizado tres tipos diferentes de transceptores ZigBee. Ver Figura 6.1.



Figura 6.1: Diferntes tipos de transceptores ZigBee para redes de sensores WSN de Fractum, Telos B y libelium . Fuente [Anexo 2].

En esta red de sensores, únicamente se tendrá en cuenta la capa física de la red. Lo que se quiere conseguir con estas simulaciones es ver las zonas de cobertura que podría cubrir esta posible red de sensores teniendo en cuenta las condiciones de potencia transmitida y sensibilidad de los receptores.

En la Tabla 6.1 se pueden ver las principales características de los transceptores ZigBee utilizados en la simulación de red de sensores WSN.

Modelo	Marca	Potencia Tx	Sensibilidad	Frecuencia	Protocolo
U-Bee v2.0	Fractum	100 mW ó 20 dBm	-100 dBm	2,4 GHz	802.15.4
Smart Water	Libelium	1,25 mW ó 1 dBm	-95 dBm	2,4 GHz	802.15.4
TPR2420CA	TelosB	- 24dBm - 0 dBm	-90 dBm	2,4 GHz	802.15.4

Tabla 6.1: Características de transceptores ZigBee para redes de sensores WSN.

6.1. Aplicaciones de la red de sensores ZigBee.

Teniendo en cuenta que la red de sensores se encuentra en un entorno marino, las posibles aplicaciones que puede tener una red de sensores es bastante amplia. Los sistemas marinos costeros son particularmente vulnerables a la influencia de la actividad humana, por lo que esta agua se convierten en objetivos esenciales en el ámbito de la investigación.

Por ello, colocar una red de sensores permitiría, entre otras cosas, investigar el impacto de los océanos en la variabilidad de las costas, el impacto del hombre, la presencia de nutrientes y de otros elementos en las aguas costeras, los ecosistemas, la morfología de las costas y la erosión de las playas.

Por otro lado, la Bahía de Cádiz es un entorno de pesca tradicional donde cientos de pequeños barcos pesqueros salen a faenar diariamente. Es por esta razón, que otra posible aplicación, sería la de colocar transceptores ZigBee en estos barcos creando una red ad-hoc que serviría para comunicarse entre ellos en temas relacionados con las condiciones de la mar o con la búsqueda de zonas de bancos de peces. En la Figura 6.2 se puede ver como la Bahía de Cádiz está formada por cientos de botes pesqueros.

Es decir, esta red de sensores podría estar formada por boyas que se colocan en determinadas partes de la Bahía donde se medirían parámetros relacionados con el mar, como por ejemplo, salinidad, presión o temperatura. Sin embargo, esta red también podría estar formada por transceptores ZigBee colocados en multitud de barcos con el objetivo de comunicarse entre ellos para diferentes fines.

En realidad, en este documento, no se busca una aplicación concreta para la red de sensores, sino analizar la viabilidad de colocar la red de sensores en la Bahía de Cádiz.

6.2. Simulación de la red de sensores.

Para esta simulación, se va a tener en cuenta la red de barcos que se encuentra alojada en una parte de la Bahía. Esta zona se puede observar en la Figura 6.2. Se trata de una zona donde se amarran pequeños barcos pesqueros. Por lo tanto, uno de los objetivos de esta red de sensores es que sea barata y que su implantación sea simple. Para la simulación de esta red de sensores se han creado 5 puntos o nodos. En cada uno de ellos se coloca una antena transmisora que equivale a un punto de la red de sensores.



Figura 6.2: barcos pesquero situados en Bahía de Cádiz. Fuente: Google Earth.

Para la realización de esta simulación, se han creado 200 barcos para recrear el área donde se encuentran alojados los barcos en la Bahía. Dentro de esta red de barcos se han colocado 5 puntos y en cada uno de ellos se ha colocado una antena transmisora equivalente a las características de cada uno de los transceptores que aparecen en la Tabla 6.1: Características de transceptores ZigBee para redes de sensores WSN.

El escenario simulado se puede ver en la Figura 6.3:

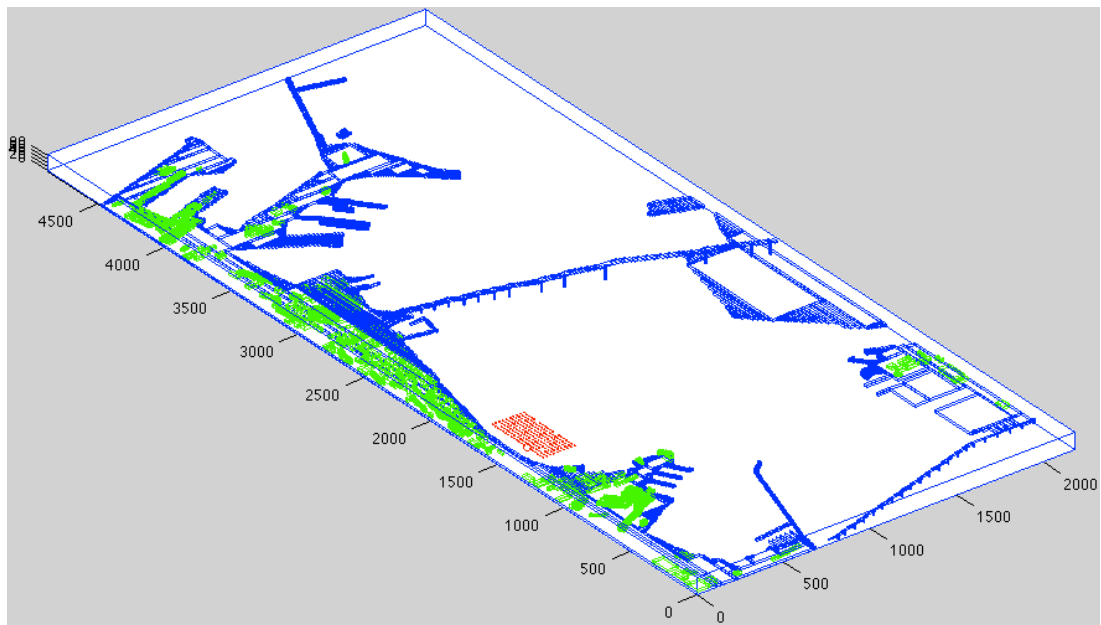


Figura 6.3: escenario con barcos pesquero para simulación de WSN.

Por otro lado, en el la Figura 6.4, se describe el lugar donde se han colocado los puntos de transmisión.

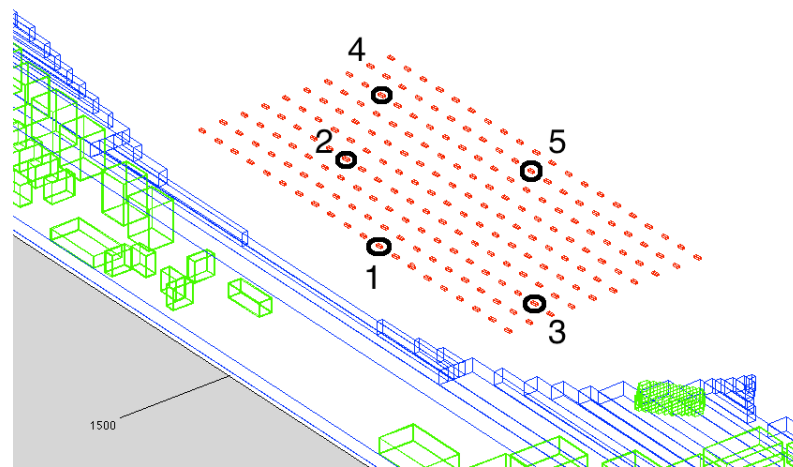


Figura 6.4: barcos utilizados para crear la red de sensores ZigBee y supuesta colocación de los transmisores/nodos de la red.

Las características de configuración de las antenas se describen a continuación en la siguiente tabla:

Frecuencia	2.4 GHz
Directividad	5 dBi
Potencia	100 mW = 20 dBm 1,25 mW = 1 dBm 0.01 mW = -20 dBm
Polarización	Vertical
Patrón de radiación en phi	Omnidireccional = $0 - 2\pi$
Patrón de radiación en theta	Omnidireccional = $0 - \pi$
Resolución angular	1 rayo/ $^{\circ}$

El número de rebotes de los rayos es 6.

Una vez que las condiciones de simulación han sido definidas se lanza las simulaciones. Cada simulación tardó 4 días en realizarse. Los resultados se pueden ver a continuación. De la Figura 6.5 a Figura 6.19 se puede ver los diferentes mapas de potencia en el plano XY de los distintos transceptores ZigBee utilizados. La escala de las figuras está colocada entre -85 y -110 dBm para poder distinguir las zonas de cobertura teniendo en cuenta las sensibilidades de los receptores.

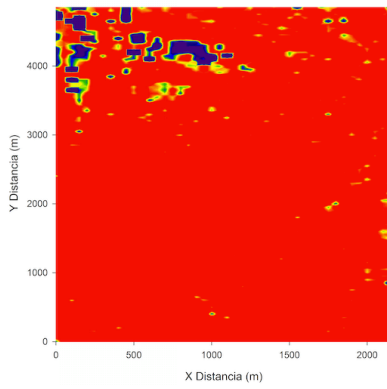


Figura 6.5: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 1.

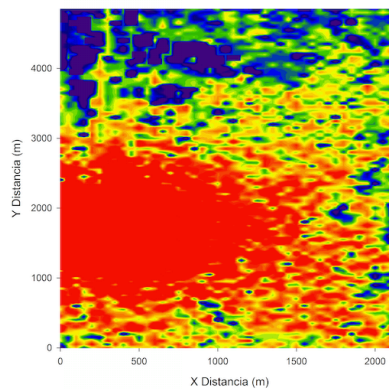


Figura 6.6: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 1.

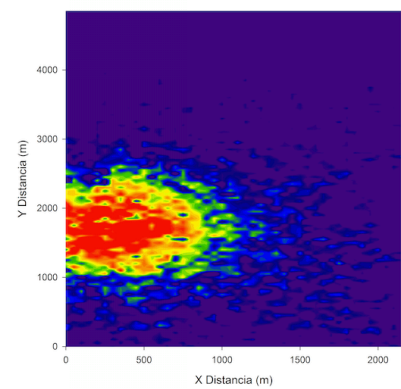


Figura 6.7: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 1.

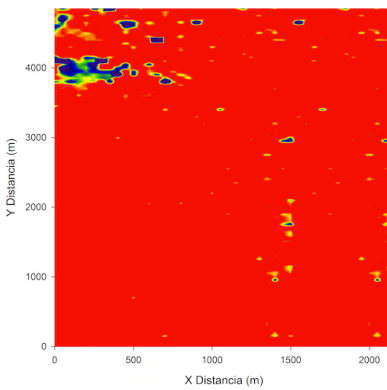


Figura 6.8: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 2.

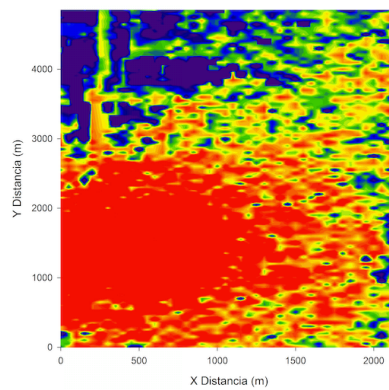


Figura 6.9: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 2.

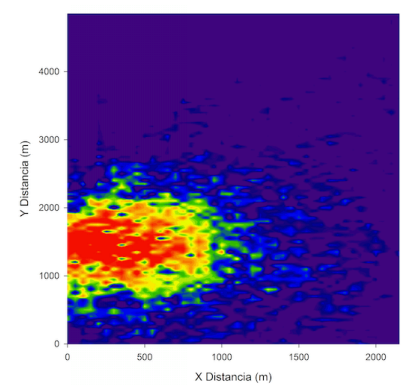


Figura 6.10: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 2.

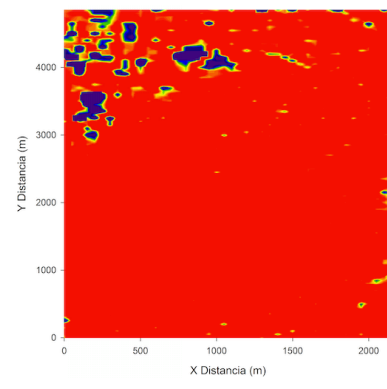


Figura 6.11: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 3.

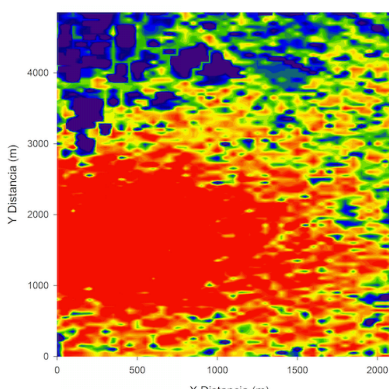


Figura 6.12: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 3.

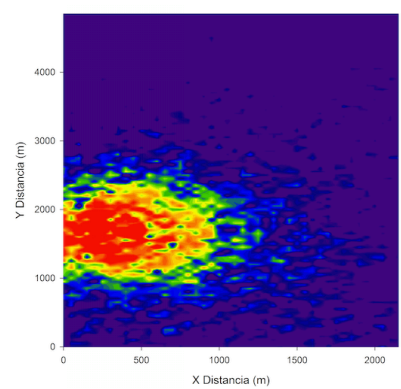


Figura 6.13: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 3.

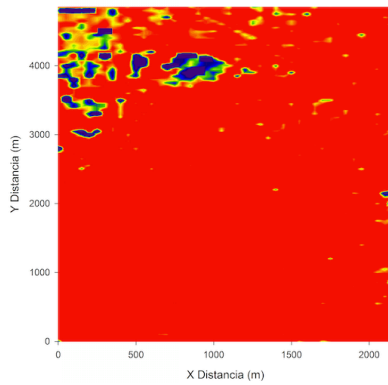


Figura 6.14: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 4.

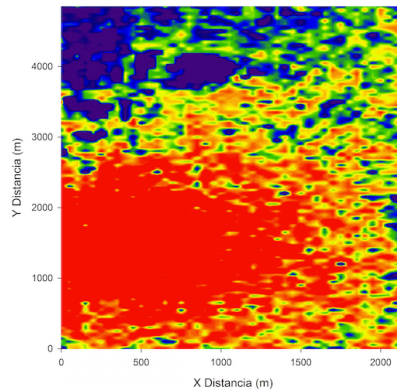


Figura 6.15: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 4.

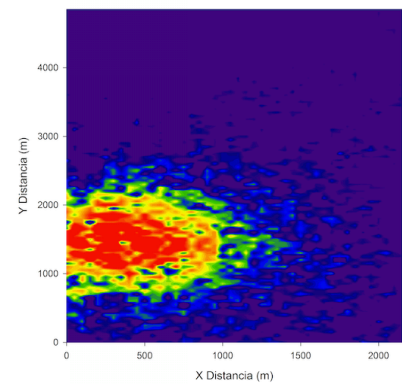


Figura 6.16: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 4.

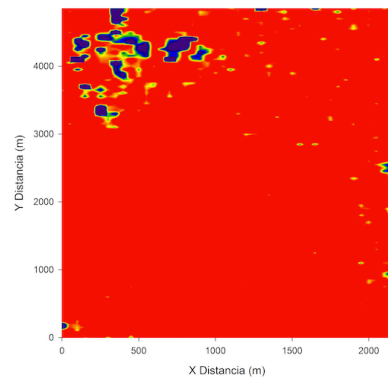


Figura 6.17: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 5.

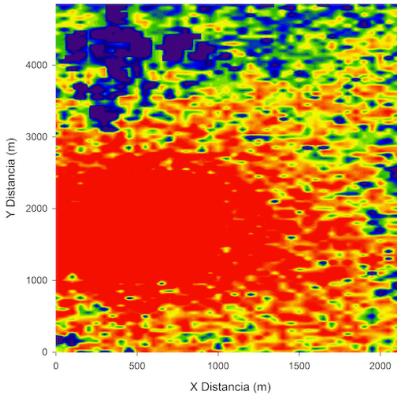


Figura 6.18: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 5.

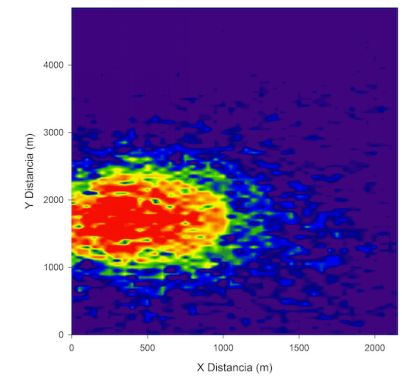
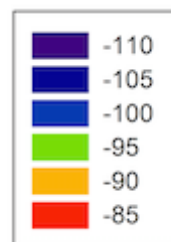


Figura 6.19: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 5.



Potencia
(dBm)

Además del Gráfico 6.1 al Gráfico 6.10 se pueden observar los cortes radiales tanto en el eje 'x' como en el eje 'y' de los diferentes puntos de transmisión a la altura de la antena. En dichos gráficos se puede observar donde se encuentran las sensibilidades de los receptores para comprobar que zonas del espacio están en cobertura de la red de sensores.

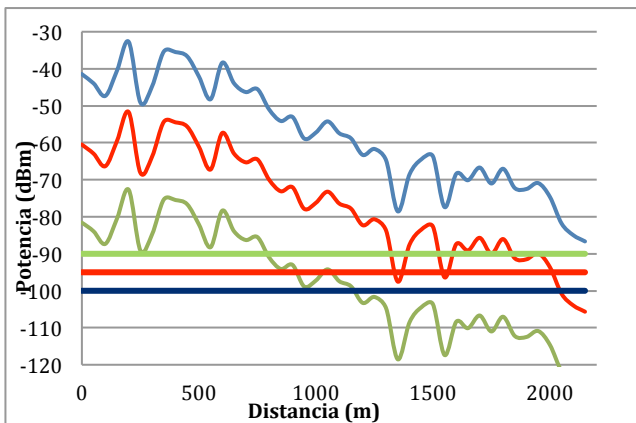


Gráfico 6.1: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

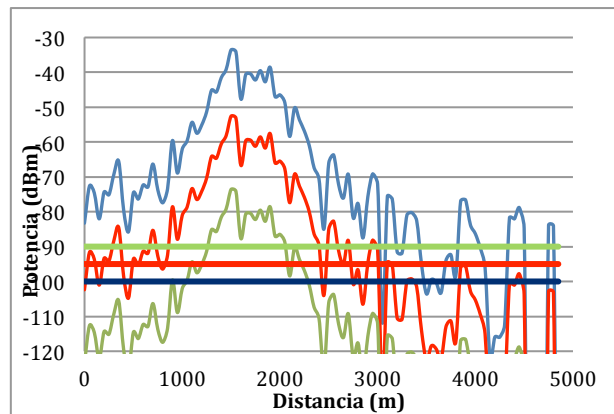


Gráfico 6.2: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

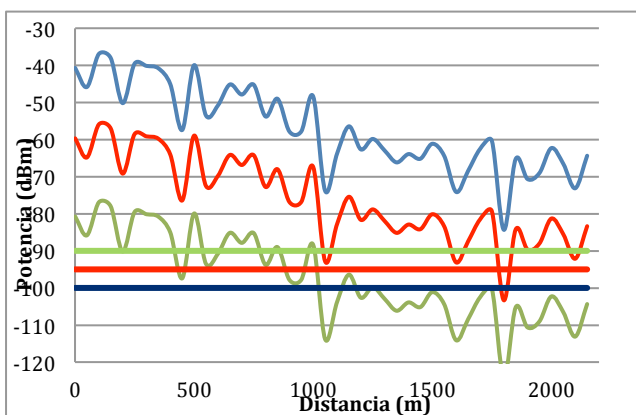


Gráfico 6.3: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

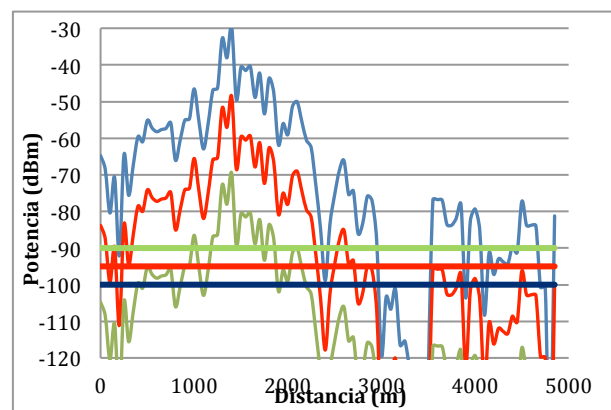


Gráfico 6.4: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

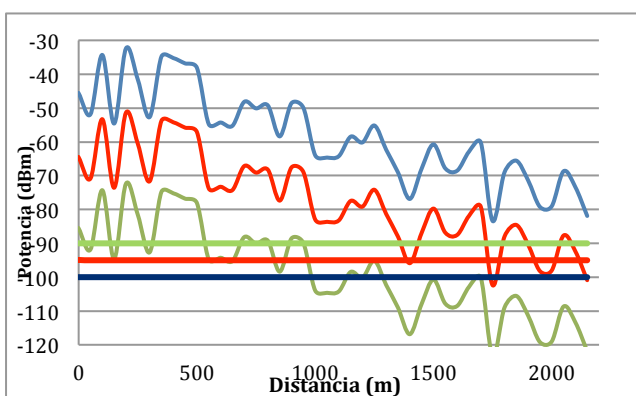


Gráfico 6.5: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

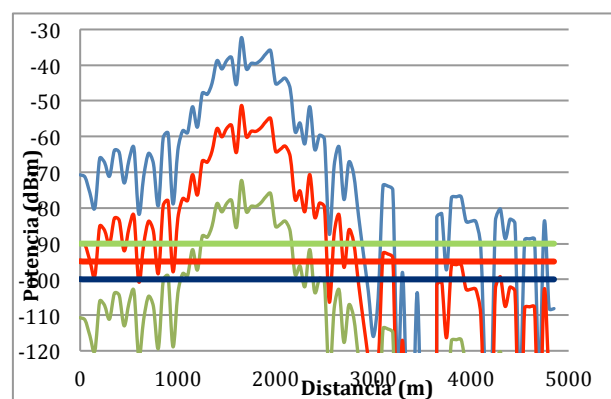


Gráfico 6.6: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

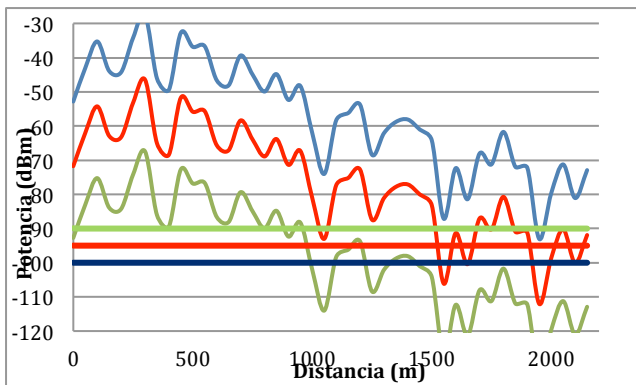


Gráfico 6.7: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

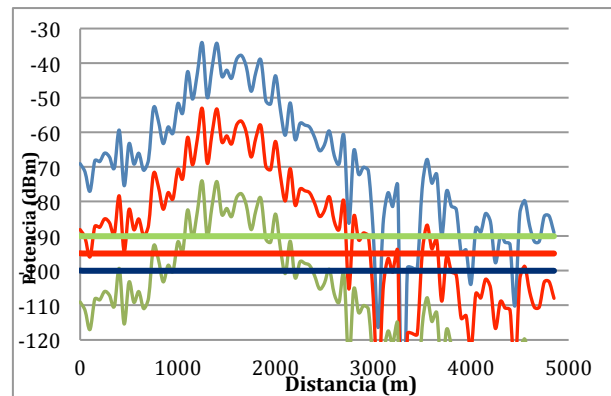


Gráfico 6.8: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

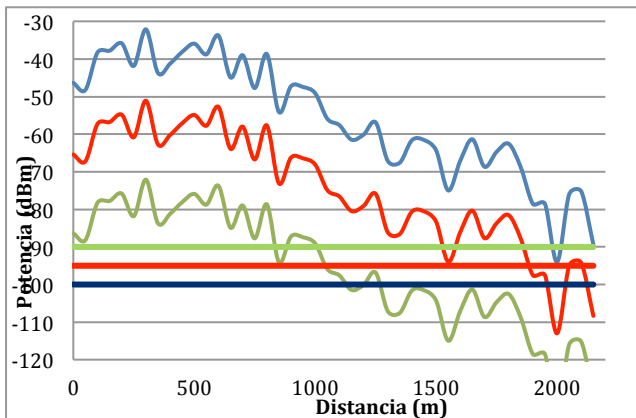


Gráfico 6.9: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.

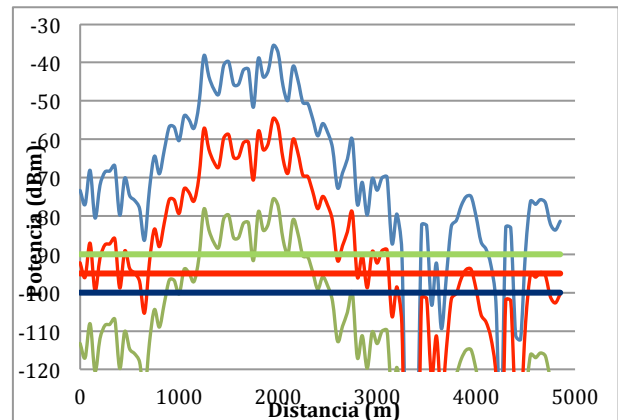
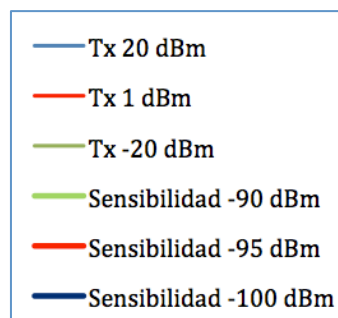


Gráfico 6.10: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.



Por otro lado, se estudia la probabilidad de error de la red de sensores en el escenario estudiado. Cuando se transmiten señales digitales por un canal, en este caso el aire, el efecto del ruido se pone de manifiesto en el número de errores que comete el receptor. Se deduce inmediatamente que dicho número es tanto mayor cuanto más grande sea la probabilidad de error.

La probabilidad de error P_e es una expectativa teórica (matemática) de la tasa de error de bit (BER) para un sistema determinado. Por ejemplo, para una $P_e = 10^{-6}$ se puede esperar que ocurra un error de bit cada millón de bits transmitidos.

La probabilidad de error depende del valor de la relación señal/ruido $\left(\frac{S}{N}\right)$ o de la relación de la densidad de potencia de energía por bit $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$.

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right)$$

siendo:

$P_e =$ Probabilidad de error.

$E_b =$ Energía media de bit.

$N_0 =$ densidad espectral de potencia de ruido.

Cuanto mayor sea esta relación, más destaca la señal sobre el ruido y, por tanto, menor es la probabilidad de error. Cuando el ruido se añade a una señal con distorsión, la probabilidad de error crece rápidamente.

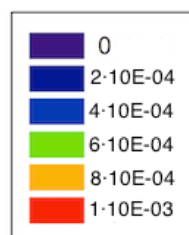
La energía media por bit es un parámetro que depende de la potencia recibida y de la tasa de transmisión de datos.

$$P_{Rx} = E_b \cdot R_b \rightarrow E_b = \frac{P_{Rx}}{R_b}$$

La distorsión que produce el ruido en una determinada comunicación depende de su potencia, de su distribución espectral respecto al ancho de banda de la señal, y de la propia naturaleza de la señal y de la información que transporta.

Teniendo en cuenta esto, se halla la probabilidad de error para el sistema definiendo una tasa máxima de transmisión de datos de 250000 bps y diferentes valores de la densidad de potencia de ruido: -100 dB, -110 dB y -120 dB.

Así, del Gráfico 6.11 al Gráfico 6.19 se pueden ver estos resultados. Conforme los valores de N_0 son menos restrictivos, la probabilidad de error es menor y conforme la potencia recibida es mayor, la probabilidad de error también es menor.



Probabilidad de error $P(e)$

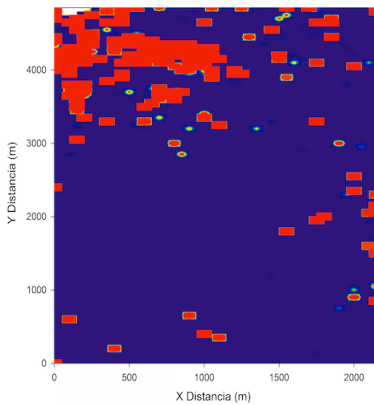


Gráfico 6.11: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 100\text{ dB}$

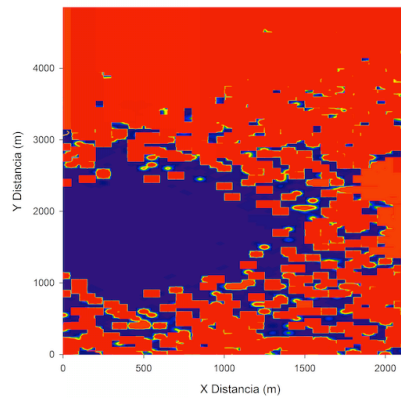


Gráfico 6.12: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 1\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 100\text{ dB}$

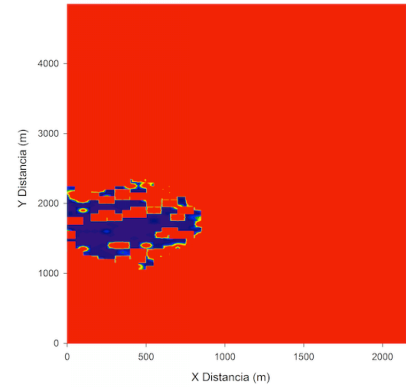


Gráfico 6.13: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = -20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 100\text{ dB}$

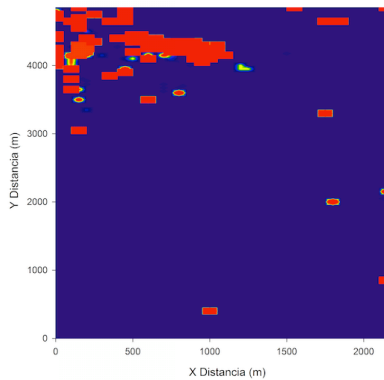


Gráfico 6.14: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 110\text{ dB}$

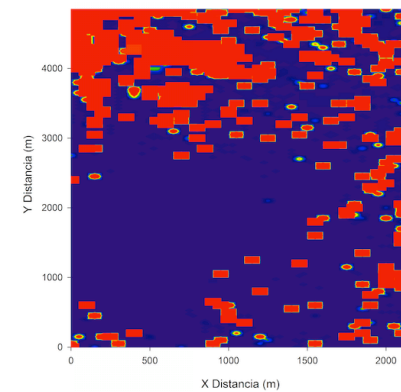


Gráfico 6.15: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 1\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 110\text{ dB}$

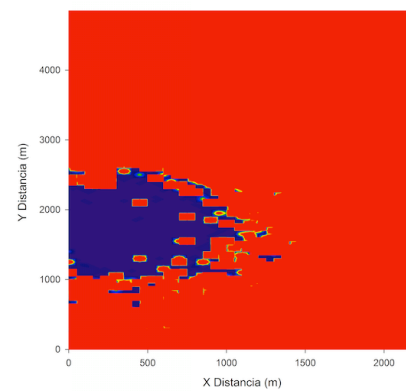


Gráfico 6.16: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = -20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 110\text{ dB}$

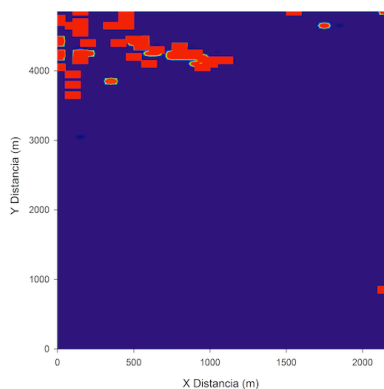


Gráfico 6.17: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 120\text{ dB}$

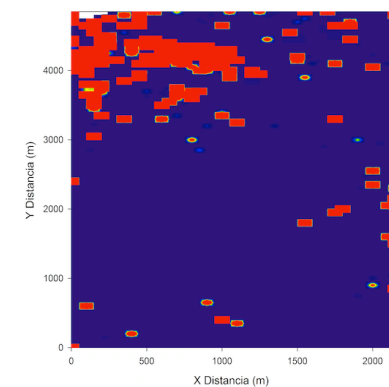


Gráfico 6.18: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = 1\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 120\text{ dB}$

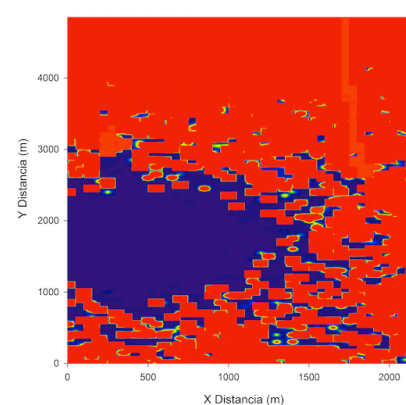


Gráfico 6.19: Mapa de probabilidad de error para $P_{Tx} = -20\text{dBm}$ y 250 kbps con $N_0 = 120\text{ dB}$

6.3. Análisis de la red de sensores.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el apartado anterior, se puede decir, que a nivel físico y teniendo en cuenta los resultados de potencia y probabilidad de error es viable implantar una red de sensores en la Bahía de Cádiz.

Dependiendo de la aplicación final que se desee en la red de sensores, será necesario utilizar un tipo de dispositivos ZigBee u otra atendiendo a sus características de potencia y sensibilidad.

Así, por ejemplo, para crear una red de sensores fija, donde el objetivo sea medir parámetros de contaminación del agua con un transceptor de -20 dBm y sensibilidad de -90 dBm sería suficiente. Sin embargo, si se quiere crear una red de sensores que abarca la totalidad de la Bahía, se tendrán que utilizar dispositivos de 20 dBm de potencia y es posible que en algunos lugares de la Bahía sea necesario la colocación de amplificadores de potencia o repetidores.

En la Figura 6.20, es posible ver un resumen de los diferentes mapas de cobertura que se han simulado.

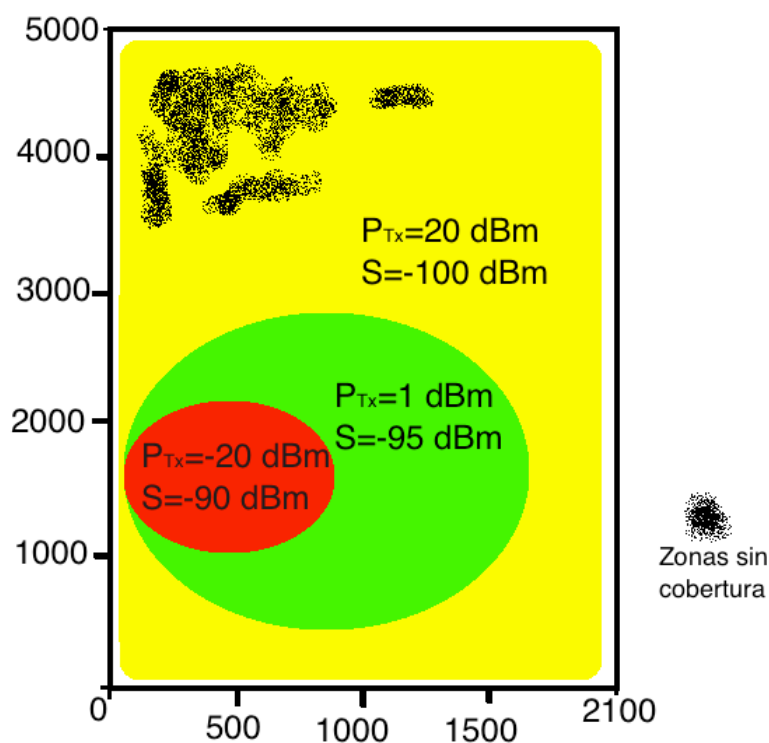


Figura 6.20: esquema de análisis de cobertura según diferentes dispositivos ZigBee.

Esta página se deja en blanco de forma intencionada.

7. Conclusiones.

El primer paso para la realización del diseño y análisis del entorno marítimo de la Bahía de Cádiz era la creación del escenario. La creación de éste no fue un proceso sencillo, ya que, hasta este momento no se había probado el software de trazado de rayos con un entorno tan grande. Por ello, el procedimiento de su creación fue mediante pequeños pasos que iban creciendo en complejidad.

Para ello, se creó un prototipo de escenario muy básico en forma de ‘U’ en donde se probaron diferentes parámetros. Se concluyó que la resolución de los cuboides del escenario debían ser de 50x50x10 metros. A este escenario se le añadieron edificios para tener una idea más real de las simulaciones y comprobar que si el número de cubos que forman el escenario es muy grande, el tiempo computacional de las simulaciones no es viable.

El siguiente paso ya fue crear el escenario completo. Este paso fue complejo y costoso. Se dividió el escenario en tres partes: tierra firme, agua y edificios. La tierra firme fue creada mediante cubos 1135 introducidos manualmente. Después, para rellenar la bahía con agua se creó una función que añadió 3311 y por último se añadieron los edificios, creando un escenario final de 8679 cubos en un entorno de 2180x4879x90 metros.

Un vez que el escenario fue creado, había que comprobar que los resultados obtenidos por el programa de trazado de rayos eran correctos y se ajustaban a la realidad. Para ello se hicieron una serie de simulaciones y se compararon con datos reales tomados en la Bahía. Los resultados obtenidos mostraban que el escenario se comportaba de una manera muy parecida a la realidad. Sin embargo, los resultados de potencia recibida que se recogían tenían un error de media de 15 dB superior a los datos reales.

Una de las causas de esta diferencia de potencia podía ser por no tener en cuenta las reflexiones que se producen en el mar. El trazado de rayos simula el escenario teniendo en cuenta que todos los materiales que se le añaden son lisos. En cambio, el mar está formado por olas, por lo que la dispersión de Scattering podría ser una de las causas de esta diferencia en las medidas.

Por ello, se cambió el código de trazado de rayos para tener en cuenta esta rugosidad que se producía en el entorno marino. Las simulaciones en las que se incluyó el nuevo código, el cual tenía en cuenta la rugosidad del mar, dieron un resultado satisfactorio. Se produjo una mejora que iba desde 1 dB hasta los 8 dB, dependiendo de la altura que se le asignaban a las olas.

Después de realizar la mejora en el código, los resultados de potencia recibida obtenidos por el software habían mejorado hasta tener un error medio de 7 dB con respecto a las mediciones reales. Estos resultados son aceptables y se puede concluir que el entorno de la Bahía de Cádiz está correctamente modelado por el programa de trazado de rayos.

Por último, se propuso una red de sensores WSN basada en tecnología ZigBee dentro de la Bahía de Cádiz. El objetivo de la red era comprobar que era viable desde el punto de vista de capa física, dejando un poco de lado el objetivo final de esta red. Para ello, se estudió el mapa de cobertura de la red y la probabilidad de error de ésta para tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee que se encuentran en el mercado.

La conclusión del estudio fue que era viable realizar dicha red de sensores inalámbrica.

Esta página se deja en blanco de forma intencionada.

8. Líneas futuras.

Con relación a los resultados obtenidos en esta TFM, a continuación se recogen algunas de las líneas de trabajo en las que se podría seguir profundizando en el futuro.

- Mejorar el escenario de trabajo. Añadir diferentes tipos de barcos al escenario, incluso la posibilidad de añadir personas al mismo.
- Añadir al escenario materiales que no se han tenido en cuenta como zonas de rocas en determinadas partes de la Bahía o zonas de arena.
- Realizar este mismo estudio, pero trabajando a distintas frecuencias como puede ser 868 MHz o las nuevas bandas de LTE como son 800, 1800 y 2600 MHz.
- Seguir trabajando en el código de trazado de rayos para mejorar la dispersión de Scattering y la rugosidad en los escenarios simulados.
- Añadir a la red de sensores puntos en tierra para la recogida de información y desarrollar la elección de un protocolo de comunicación entre ésta red de sensores y tierra.
- Realizar más medidas reales relacionadas con la red de sensores con el objetivo de mejorar los resultados del programa de simulación de trazado de rayos.
- Estudiar la migración a otro tipo de tecnología inalámbrica que permita una mayor alcance de las comunicaciones.

Esta página se deja en blanco de forma intencionada.

9. Bibliografía:

[1] J. C. Reyes-Guerrero, Gordan Sisul and Luis A. Mariscal. “Measuring and Estimating the Propagation PathLoss and Shadowing Effects for Marine Wireless Sensor Networks at 5.8 GHZ”.

[2] Erik Aguirre, Maryuri Flores, Leire Azpilicueta, Peio Lopez Iturri, Francisco Falcone, Victoria Ramos , Agusti Solanas. "Implementing Context Aware Scenarios to Enable Smart Health in Complex Urban Environments", 2014 IEEE International Symposium on Medical and Measurements and Applications MeMeA.

[3] Kun Yang, Andreas F. Molisch, Fellow, IEEE, Torbjörn Ekman, and Terje Røste. “A Deterministic Round Earth Loss Model for Open-Sea Radio Propagation”.

[4] A. F. Molisch, Wirless Communications 2nd edition. . IEEE Press -Wiley, 2011.

[5] Kahma, K., D. Hauser, H.E. Krogstad, S. Lehner, J.A.J. Monbaliu,L.R. Wyatt “Measuring and Analysing the Directional Spectra of Ocean Waves,” EU COST Action 714, EUR 21367, 465 p., ISBN 92-898-0003-8. 2005.

[6] Yuanming Ding, Jingjing Sun , Xue Wang. “Sea Surface Reflection and Power Attenuation Analysis of Radio Wave in UHF Satellite Communications”.

[7] Edward Y. T. Kuo. “Sea Surface Scattering and Propagation Loss: Review, Update, and New Predictions”. EEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 13, NO. 4, OCTOBER 1988.

[8] Rao Qinjiang, Gong Zhonglin and Xu Chenghe. “Diffraction loss for radiowave propagation over an island in the presence of rough sea Surface”.

[9] Morris Schulkin. “Sea surface loss in surface ducts and shallow water: a historical perspective”.

[10] W. S. Ament. “Toward a Theory of Reflection by a Rough Surface”.

[11] EUR 21367 EN. Danièle Hauser, Kimmo Kahma, Harald E. Krogstad, Susanne Lehner, Jaak A. J. Monbaliu, Lucy R. Wyatt. COST Action 714. “Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves”.

[12] <http://revistamarina.cl/revistas/2003/4/vasquez.pdf>

[13] D.^a Cristina Albaladejo Pérez. “Propuesta de una red de sensores inalámbrica para un sistema de observación costero.” Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.

[14] Shahin Farahani. “ZigBee Wireless Networks and Transceivers”. Editorial Newnes.

[15] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>

[16] C. Albaladejo Pérez, M. Jiménez, F. Soto, R. Torres, J.A. López, A. Iborra.” A System for Monitoring Marine Environments based on Wireless Sensor Networks”.

[17] Cai Wen-Yu, Liu Jing-Biao, Zhang Xue-Ting. “CDS-based Coverage Control algorithm for Buoys based Sensor Networks”.

[18] Jarrod Trevathan, Ian Atkinson, Wayne Read, Nigel Bajema, Yong Jin Lee, Adam Scarr and Ron Johnstone. "Developing Low-Cost Intelligent Wireless Sensor Networks for Aquatic Environments".

[19] Muhammad Ayaz, Azween Abdullah, Ibrahima Faye. "Hop-by-Hop Reliable Data Deliveries for Underwater Wireless Sensor Networks".

[20] Ahmed M. Mahdy. "Marine Wireless Sensor Networks: Challenges and Applications".

[21] John F. Vesecky, Kenneth Laws, Stephen I. Petersen, Cyrus Bazeghi and Don Wiber. "Prototype Autonomous Mini-buoy for use in a Wireless Networked, Ocean Surface Sensor Array".

[22] J. D. De Lorenzo and E. s. Cassedy. "A Study of the Mechanism of Sea Surface Scattering".

[23] Donald R. Thompson. "Microwave Scattering from the Sea".

[24] S.D. Ilcev. "Surface Reflection and Local Environmental Effects in Maritime and other Mobile Satellite Communications".

[25] J.J. Martinez-Benjamin, J.M. Davila, J. Garate, P. Bonnefond, M.M. Garcia, M. Castellon, J. Talaya, G.R. Velasco, y B. Perez, "Monitoring sea level by radar altimeter and CGPS in the northwestern Mediterranean", en Actas de IGARSS, vol. 3, pp. 577-580, 2008.

[26] <http://www.puertos.es/>

[27] D. Cano, R. Somavilla, J.L. Arteché, C. Rodríguez, y A. Lavín, "Información Océano-meteorológica en el Mar Cantábrico: Boya AGL", en Actas de XXXI Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, 2010.

9.1. Bibliografía de imágenes.

[i] <http://www.publico.es/81998/los-coches-de-google-ya-estan-aqui>.

[ii] <http://osborneblog.com/el-puente-de-cadiz-se-retrasa-indefinidamente/>

[iii] http://fotos.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/astilleros/el-puente-carranza-cadiz-tendra-que-ser-cortado-para-reparar-los-destrozos-ocasionados-por-trabajadores-de-navantia_Klgyv4JuPKLL6lGrsNpCM5/

[iv] http://congresosdelalengua.es/valladolid/mesas_redondas/martin_d.htm

[v] <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>

[vi] http://www.dsie.upct.es/proyectos/web_cms/proyecto_red_de_sensores.html

[vii] <http://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>

[viii] http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf

[ix] <http://www.itsasnet.com/red-oceano-meteorologica-del-pais-vasco/>

[x] http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

10. Anexo 1: Código para rellenar agua.

```
function [agua,obstaculos2]=rellenaagua(obstaculos1,a1,b1,c1)

room1=obstaculos1;
room1(:,8)=4;
[m1,n1]=size(room1);

% encontrar donde empieza el obstáculo con el 'yo' más bajo:
posy0=b1;
for i=1:m1
    cotay0=(room1(i,2))-(room1(i,5)/2);
    if cotay0<posy0
        posy0=cotay0;
    end
end

% CREAR EL PRIMER OBSTACULO SI 'POSY0' ES DISTINTO DE 0
i2=1;
if posy0>0
    Ax=a1;
    x=a1/2;
    Ay=posy0;
    y=Ay/2;
    agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
    room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
    i2=i2+1;
end
posy1=posy0;
posy2=0;
final=0;
cont=0; % comprobador de bucle;

while posy2<b
    m3=size(room1,1);
    % Buscar el siguiente límite superior:
    cotas=zeros(m3,2);
    for i=1:
        cotay0=(room1(i,2))-(room1(i,5)/2);
        cotay1=(room1(i,2))+(room1(i,5)/2);
        cotas(i,1)=cotay0;
        cotas(i,2)=cotay1;
    end

    if (posy1==max(cotas(:,2))) && (max(cotas(:,2))<b1)
% el último obstáculo no llega al tope del escenario
posy2=b1;
% Hacer el último obstáculo de agua en el tope del escenario:
Ax=a1;
x=a1/2;
Ay=posy2-posy1;
y=posy1+Ay/2;
agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
i2=i2+1;
```

```

        final=1;
    else
        posy2=min(cotas(cotas(:,>posy1));

    if posy2-posy1<0.5
        while posy2-posy1<0.5 && (final~=1)
            posyaux=posy2;
            if (posyaux==max(cotas(:,2))) &&
(max(cotas(:,2))<b1)
% el último obstáculo no llega al tope del escenario
                posy2=b1;
%Hacer el último obstáculo de agua en el tope del escenario:

                Ax=a1;
                x=a1/2;
                Ay=posy2-posyaux;
                y=posyaux+Ay/2;
                agua(i2,:)=x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
                room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
                i2=i2+1;
                final=1;
            else
                posy2=min(cotas(cotas(:,>posyaux));
                posy1=posyaux;
            end
        end
    end

    % Buscar los objetos que entrar dentro del rango que yo
    quiero:(siempre entre posy1 y posy2)

    if final~=1
        n1=1;
        candidatos=zeros(1,8);
        for i=1:m3
            if (cotas(i,2)>=posy2) && ((cotas(i,1)<=posy1))
                candidatos(n1,:)=room1(i,:);
                n1=n1+1;
            end
        end

    % Si hay un hueco libre de obstáculos en medio.

    if candidatos(1,:)==0
        Ax=a1;
        x=a1/2;
        Ay=posy2-posy1;
        y=posy1+Ay/2;
        agua(i2,:)=x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
        room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
        i2=i2+1;

    else
    % ordeno de menor a mayor x los candidatos:
        i=1;

```

```

while i<=size(candidatos,1)-1

    if candidatos(i,1)>candidatos(i+1,1)
        contenedor(1,:)=candidatos(i,:);
        candidatos(i,:)=candidatos(i+1,:);
        candidatos(i+1,:)=contenedor(1,:);
        i=0;
    end
    i=i+1;
end

% Miro cuál es el obstáculo más pequeño en 'x' dentro de la
línea:

[x1,posx1]=min(candidatos(:,1));
y1=candidatos(posx1,2);
Ax1=candidatos(posx1,4);
Ay1=candidatos(posx1,5);

% Si hay hueco entre el principio y el primer obstáculo, lo
relleno con agua.

if x1-(Ax1/2)>0.5

    Ax=x1-(Ax1/2);
    x=(x1-(Ax1/2))/2;
    Ay=posy2-posy1;
    y=posy1+Ay/2;
    agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
    room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
    i2=i2+1;
end

% Empezamos a colocar los obstáculos nuevos de agua en los
huecos

xaux=x1;
yaux=y1;
Axaux=Ax1;
Ayaux=Ay1;

if size(candidatos,1)>=2

    for h=2:size(candidatos,1)

        x2=candidatos(h,1);
        Ax2=candidatos(h,4);

        if (x2-Ax2/2)-(xaux+Axaux/2)>0.5

            Ax=(x2-(Ax2/2))-(xaux+(Axaux/2));
            x=(xaux+(Axaux/2))+Ax/2;
            Ay=posy2-posy1;
            y=posy1+Ay/2;
            agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
            room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
            i2=i2+1;
        end
    end
end

```

```

        end

        xaux=x2;
        Axaux=Ax2;

    end

    %último obstáculo:

    if (xaux+(Axaux/2))<a1

        Ax=a1-(xaux+(Axaux/2));
        x=(xaux+(Axaux/2))+Ax/2;
        Ay=posy2-posy1;
        y=posy1+Ay/2;

        agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
        room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
        i2=i2+1;
    end

elseif size(candidatos,1)==1 %% si solo hay un
obstaculo.

    if (xaux+(Axaux/2))<a1

        Ax=a1-(xaux+(Axaux/2));
        x=(xaux+(Axaux/2))+Ax/2;
        Ay=posy2-posy1;
        y=posy1+Ay/2;

        agua(i2,:)=[x,y,5,Ax,Ay,10,12,3];
        room1(m1+i2,:)=agua(i2,:);
        i2=i2+1;
    end
end
end

posy1=posy2;
clear cotas
clear candidatos

end

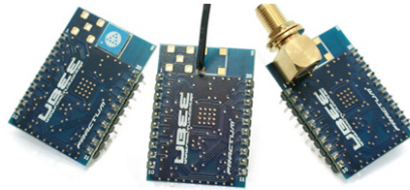
[m4,n4]=size(room1);
obstaculos2=zeros(m4,7);
for filas=1:m4
    obstaculos2(filas,1:7)=room1(filas,1:7);
end

[m4,n4]=size(room1);
obstaculos2=zeros(m4,7);
for filas=1:m4
    obstaculos2(filas,1:7)=room1(filas,1:7);
end
end

```

11. Anexo 2: Especificaciones técnicas de dispositivos ZigBee utilizados.

1. U-Bee v2.0 (Fractum):



- Especificaciones:

http://www.fractumrf.com/manuais/UBEE_REV11.pdf

2. Smart Water (Libelium):



- Especificaciones:

http://www.libelium.com/downloads/documentation/smart_water_sensor_board.pdf

3. TPR2420CA (TelosB):



- Especificaciones:

http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf

Índice de Figuras:

<i>Figura 1.1: convergencia de telefonía fija y móvil en el mundo. Fuente [iv].....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.2: ejemplo de red de sensores WSN en entorno marino. Fuente [1].</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3.1: Redes de observación de PE. Fuente [26].</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.4: interfaz usuario en tiempo real. Fuente[x].....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.5: Red Océano-Meteorológica del País Vasco. Fuente[ix].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.6: Esquema de una estación tipo y la torreta metereologica.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.7: Localizacion y vista de la Boya AGL.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.8: ejemplo de WSN en mar. Fuente [vi].</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.9: elementos de un nodo inalambrico. Fuente [v].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.10: Comparación del estándar ZigBee con Bluetooth y IEEE 802.11b. Fuente [14]... </i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.11: Topología en IEEE 802.15.4. Fuente.[viii]</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.12: Ejemplo de red ZigBee. Fuente[15].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.13: capas de 802.15.4 y ZigBee. Fuente [viii]</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.14: desarrollo de la WSN. Fuente [16].</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.15: diseño de la boya del nodo sensor. Fuente [16].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.16: aplicacion creada para la WSN. Fuente [16].</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.1: Escenario utilizado en [1].</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.2: Interfaz de Google Earth.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.3: Herramienta de medida de Google Earth.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.4: Cámara 360º en coche de Google Street View. Fuente: [i].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.5: Captura de Google Street View en Ciudad de Cádiz.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.6: acortamiento del escenario a crear.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.7: acotamiento del escenario a crear con Google Earth.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.8: esquema de escenario 1 en forma de 'U'.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.9: escenario en forma de 'U' creado en Matlab.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.10 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 50 m y 0,001 W de Potencia transmisora.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.11 (b):mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 50 m y 1 W de Potencia transmisora.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.12 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución transmisora de 20 m y 0,001 W de Potencia.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.13 (b):mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 20 m y 1 W de Potencia transmisora.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.14 (a): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 10 m y 0,001 W de Potencia transmisora.</i>	<i>34</i>

<i>Figura 4.15 (b): mapa de potencia en planta del escenario en 'U' en resolución de 10 m y 1 W de Potencia transmisora.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.16: Comparación entre frente de ondas y trazado de rayos</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.17 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena y=1204 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.18: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena x=1085 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.19 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena y=1204 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.20: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena x=1085 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.21 : corte radial en el eje 'x' a la altura de la antena y=1204 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.22: corte radial en el eje 'y' a la altura de la antena x=1085 m del escenario en 'U' en resolución 50 m.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.23: Delay Spread en 'ns' del escenario en 'U' en resolución de 50 m.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.24: Delay Spread en 'ns' del escenario en 'U' en resolución de 20 m.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.25: Delay Spread en 'ns' del escenario en 'U' en resolución de 10 m.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.26: ejemplo de edificio colocado en escenario.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.27: esquema de escenario en forma de 'U' con edificios.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.28: escenario en forma de 'U' creado en Matlab añadiendo escenarios.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.29 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 50 m.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.30 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 50 m.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.31 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 50 m.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.32 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 20 m.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.33 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' con edificios en resolución de 50 m.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.34 : mapa de potencia en planta del escenario en 'U' sin edificios en resolución de 20 m.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.35: acotamiento del escenario final a crear con Google Earth.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.36: creación de cubos en entorno Google Earth.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.37: creación del primer cubo del escenario (azul) y toma de medidas en Google Earth.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.38: Representación del primer cubo del escenario final en Matlab.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.39: Puente de Carranza. Fuente: [iii].....</i>	<i>44</i>

<i>Figura 4.40: Pilares del Puente de Carranza.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.41: Puente de la Pepa. Fuente: [ii]......</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.42: Resultado final de tierra firme en el escenario final.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.43: Comparación con vista en planta de la tierra firme del escenario final.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.44: esquema de relleno de agua tipo balsa.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.45: ejemplo de función 'rellena agua' en entorno Matlab.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.46: esquema funcionamiento de función rellena agua.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.47: función rellena agua. Límite inferior.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.48: función rellena agua. Primer cubo de agua.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.49: función rellena agua. Siguiete límite.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.50: función rellena agua. Primera línea.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.51: función rellena agua. Siguiete línea.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.52: esquema de función 'rellena agua' en entorno Matlab.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.53: función 'rellena agua' en escenario final.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.54: comparación entre escenario con tierra firme y relleno con agua.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.55: nave industrial en zona portuario de la Bahía de Cádiz.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.56: zona de edificio de viviendas en la Bahía de Cádiz.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.57: escenario final añadiendo los edificios.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.58: escenario final añadiendo los edificios.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.59: Escenario final en entorno Matlab.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.60: comparación entre escenario con escenario final y tierra firme.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.61: imágenes de escenario final creadas en Blender.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.1: escenario final utilizado para simulación.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.2: Mapa de potencia en plano XY (dBm) del escenario final.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.3: Corte radial de potencia en el eje 'x' en Boya C.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.4: Corte radial de potencia en el eje 'y' en Boya C.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.5: mapa de potencia en eje XZ en Boya C.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.6: mapa de potencia en eje YZ en Boya C.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.7: mapa de potencia en eje XZ en Boya D.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.8: mapa de potencia en eje YZ en Boya D.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.9: Localización fija de la antena receptora en tierra y ruta (A-F)seguida por el barco durante la toma de medidas. fuente [1].....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.10: diagrama de bloques del sistema de medida. Fuente [1].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.11: escenario final utilizado para validación del escenario.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.12: mapa de potencia en plano XZ de boya C.....</i>	<i>61</i>

<i>Figura 5.13: mapa de potencia en plano</i>	<i>YZ de boya C.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.14: mapa de potencia en plano XY de boya A.....</i>		<i>62</i>
<i>Figura 5.15: mapa de potencia en plano</i>	<i>XY de boya B.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.16: mapa de potencia en plano XY de boya C.....</i>		<i>62</i>
<i>Figura 5.17: mapa de potencia en plano</i>	<i>XY de boya D.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.18: mapa de potencia en plano XY de boya E.....</i>		<i>62</i>
<i>Figura 5.19: mapa de potencia en plano</i>	<i>XY de boya F.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.20: efecto de la reflexión debida al Scattering en el mar. Fuente [3].....</i>		<i>64</i>
<i>Figura 5.21: esquema de prueba analítica del coeficiente de Scattering.....</i>		<i>65</i>
<i>Figura 5.22: esquema de puntos donde se han colocado las antenas transmisoras.....</i>		<i>69</i>
<i>Figura 5.23: mapa de potencia en plano XZ en boya C con Scattering.....</i>		<i>69</i>
<i>Figura 5.24: mapa de potencia en plano</i>	<i>YZ en boya C con Scattering.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.25: mapa de potencia en plano XZ de boya C sin Scattering.....</i>		<i>69</i>
<i>Figura 5.26: mapa de potencia en plano</i>	<i>YZ de boya C sin Scattering.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.27: mapa de potencia en plano XY en boya A.....</i>		<i>70</i>
<i>Figura 5.28: mapa de potencia en plano XY en boya B.....</i>		<i>70</i>
<i>Figura 5.29: mapa de potencia en plano XY en boya C.....</i>		<i>70</i>
<i>Figura 5.30: mapa de potencia en plano XY en boya D.....</i>		<i>70</i>
<i>Figura 5.31: mapa de potencia en plano XY en boya E.....</i>		<i>70</i>
<i>Figura 5.32: mapa de potencia en plano</i>	<i>XY en boya F.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 6.1: Diferentes tipos de transceptores ZigBee para redes de sensores WSN de Fractum, Telos B y libelium . Fuente [Anexo 2].....</i>		<i>74</i>
<i>Figura 6.2: barcos pesquero situados en Bahía de Cádiz. Fuente: Google Earth.....</i>		<i>76</i>
<i>Figura 6.3: escenario con barcos pesquero para simulación de WSN.....</i>		<i>76</i>
<i>Figura 6.4: barcos utilizados para crear la red de sensores ZigBee y supuesta colocación de los transmisores/nodos de la red.....</i>		<i>77</i>
<i>Figura 6.5: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 1.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.6: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 1.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.7: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 1.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.8: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 2.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.9: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 2.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.10: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 2.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.11: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 3.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.12: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 3.....</i>		<i>78</i>
<i>Figura 6.13: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 3.....</i>		<i>78</i>

<i>Figura 6.14: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 4.....</i>	79
<i>Figura 6.15: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 4.....</i>	79
<i>Figura 6.16: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 4.....</i>	79
<i>Figura 6.17: mapa de potencia con transmisor de 20 dBm en punto 5.....</i>	79
<i>Figura 6.18: mapa de potencia con transmisor de 1 dBm en punto 5.....</i>	79
<i>Figura 6.19: mapa de potencia con transmisor de -20 dBm en punto 5.....</i>	79
<i>Figura 6.20: esquema de análisis de cobertura según diferentes dispositivos ZigBee.....</i>	84

Índice de Tablas:

<i>Tabla 3.1: SOCs a nivel nacional. Fuente [13].....</i>	11
<i>Tabla 3.2: tecnologías de comunicación inalámbrica. Fuente [13].....</i>	17
<i>Tabla 3.3: comparativa de tecnologías inalámbricas. Fuente [13]......</i>	19
<i>Tabla 3.4: Características de radio ZigBee. Fuente [13]......</i>	21
<i>Tabla 4.1: Medidas para creación de un cubo en entorno Matlab.....</i>	44
<i>Tabla 5.1: Comparación de regresión lineal entre modelos simulados.....</i>	72
<i>Tabla 6.1: Características de transeptores ZigBee para redes de sensores WSN.....</i>	75

Índice de Gráficos:

<i>Gráfico 5.1: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1]......</i>	59
<i>Gráfico 5.2: medida en simulación NLOS y análisis de regresión lineal. 'd' es distancia en metros entre antena transmisora y receptora.....</i>	63
<i>Gráfico 5.3: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1]......</i>	63
<i>Gráfico 5.4: Coeficiente de reflexión con Scattering a diferentes alturas medias de las olas del mar.....</i>	66
<i>Gráfico 5.5: Medidas en simulación NLOS con diferentes alturas medias de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el agua.....</i>	67
<i>Gráfico 5.6: Comparación de medida en simulación NLOS con diferentes alturas medias de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el agua.....</i>	68
<i>Gráfico 5.7: medida en simulación NLOS con altura media de ola de 0.5 m teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface en el suelo.....</i>	71
<i>Gráfico 5.8: Comparación de medida en simulación NLOS a diferentes alturas de ola teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface.....</i>	72
<i>Gráfico 5.9: medida real NLOS y análisis de regresión lineal. Fuente [1]......</i>	73
<i>Gráfico 5.10: medida en simulación NLOS y análisis de regresión lineal para olas de 0.7 m teniendo en cuenta el Scattering Sea Surface.....</i>	73
<i>Gráfico 6.1: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.....</i>	80

Gráfico 6.2: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	80
Gráfico 6.3: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	80
Gráfico 6.4: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	80
Gráfico 6.5: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	80
Gráfico 6.6: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	80
Gráfico 6.7: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	81
Gráfico 6.8: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	81
Gráfico 6.9: Corte radial eje 'x' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	81
Gráfico 6.10: Corte radial eje 'y' en punto 1 para 3 tipos de transmisores ZigBee.	81
Gráfico 6.11: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 100 dB$	83
Gráfico 6.12: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 1dBm$ y 250 kbps con $N0 = 100 dB$	83
Gráfico 6.13: Mapa de probabilidad de error para $PTx = -20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 100 dB$	83
Gráfico 6.14: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 110 dB$	83
Gráfico 6.15: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 1dBm$ y 250 kbps con $N0 = 110 dB$	83
Gráfico 6.16: Mapa de probabilidad de error para $PTx = -20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 110 dB$	83
Gráfico 6.17: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 120 dB$	83
Gráfico 6.18: Mapa de probabilidad de error para $PTx = 1dBm$ y 250 kbps con $N0 = 120 dB$	83
Gráfico 6.19: Mapa de probabilidad de error para $PTx = -20dBm$ y 250 kbps con $N0 = 120 dB$	83

