

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de  
Telecomunicación

# Análisis de una Red de Sensores en Motos



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: José Javier Martínez González

Director: Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 26 de Junio de 2014



## RESUMEN

Este proyecto se centra en el análisis y comprobación del funcionamiento de una red de sensores con tecnologías inalámbricas como Bluetooth o ZigBee colocada en una moto.

El estudio consistirá en analizar el comportamiento del canal radioeléctrico de dicha red, para lo que se realizarán simulaciones deterministas con un software de trazado de rayos, que nos permitirá tanto estudiar la influencia que tiene un piloto en el funcionamiento de la red, así como averiguar la influencia de la frecuencia de trabajo en el funcionamiento de la red, o la mejor colocación para las distintas antenas que se deberán implantar en la moto, permitiendo de este modo a los conductores de diferentes motos recibir información sobre la humedad de la calzada o la velocidad del viento, o incluso comunicarse entre ellos mientras van conduciendo sobre la moto.

De este modo se conseguirá extraer conclusiones de gran interés para la posterior implantación de la red de sensores en las motos.

## ABSTRACT

This project focuses on the analysis and of operation and performance of sensor networks implemented with wireless technologies such as Bluetooth or ZigBee placed on a motorcycle.

The study aims to analyze the behavior of radio channel of this network, for which deterministic simulations were performed with the aid of a 3D Ray Launching code, thus allowing to study the influence of a person in the operation of the network and determine the influence of the carrier frequency in the operation of the network, or the best placement for the different antennas that must be implemented on the motorbike, thus allowing drivers of different motorbikes to receive information about moisture of the road or the speed of the wind, or even communicate with each other while they are driving on the bike.

## LISTA DE PALABRAS CLAVE

Bluetooth

ZigBee

Moto

Algoritmo de Trazado de Rayos

Potencia Recibida, RSSI

Sensibilidad de Receptor

Perfil de Retardo de Potencia

Radial de Potencia

Piconet

Red de sensores inalámbricos

Componentes multitrayecto

## ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	2
LISTA DE PALABRAS CLAVE.....	3
ÍNDICE.....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1. Motivación del Proyecto .....	6
1.2. Objetivos .....	7
2. ESTADO DEL ARTE .....	8
2.1. Introducción a las Redes de Sensores Inalámbricas [1] .....	8
2.1.1. Nodos .....	9
2.1.2. Gateway .....	9
2.1.3. Estación Base.....	9
2.2. Tecnologías Inalámbricas .....	10
2.2.1. Bluetooth.....	10
2.2.2. ZIGBEE .....	16
2.3. Modelos de Propagación.....	21
2.3.1. Modelos de Propagación Empíricos [10].....	21
2.3.2. Modelos de Propagación Deterministas [13].....	22
2.4. Comunicaciones en Motos [15].....	26
3. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	30
3.1. Metodología .....	30
3.2. Definición de Escenarios .....	31
3.2.1. Escenario 1 con persona y sin ella.....	32
3.2.2. Escenario 2 con personas y sin ellas.....	34
3.2.3. Escenario 3 con persona y sin ella.....	35
3.2.4. Escenario 4 con personas y sin ellas.....	38
3.2.5. Escenarios para analizar problemas de convergencia .....	40
3.3. Análisis de los Resultados.....	41
3.3.1. Influencia de una persona en la distribución de potencia del escenario.....	42
3.3.2. Nivel de Potencia Recibida en Función de la Ubicación de los Diversos Elementos del Escenario .....	52
3.3.3. Nivel de Potencia Recibida en Función de la Frecuencia de Trabajo .....	63

3.3.4 Respuesta del Sistema frente a Sensibilidad.....	71
3.3.5. Consideración de efectos de Convergencia .....	73
4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS .....	81
5. BIBLIOGRAFÍA.....	82

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación del Proyecto

El rápido avance de las tecnologías inalámbricas y la miniaturización de los equipos, hace que las comunicaciones inalámbricas tengan un papel importante en nuestras vidas. Las posibilidades que ofrecen este tipo de tecnologías son muy amplias ya que pueden adaptarse a cualquier tipo de entorno, ya sea interior o exterior.

Uno de los entornos en los que más importancia adquieren estas tecnologías es en los medios de transporte. Dicha importancia surge de la gran cantidad de viajes que todos realizamos a lo largo de nuestra vida, ya sea para acudir al trabajo, para ir de vacaciones u otras muchas situaciones que se podrían citar. Estos viajes a menudo nos resultan pesados, agotadores y en ellos ponemos en peligro nuestra vida.

Dicho esto, es aquí donde surgen la necesidad del empleo de redes de sensores inalámbricas, para conseguir aumentar la seguridad de los conductores, proporcionándoles información en todo momento del estado de la carretera por la que circulan (temperatura, humedad, velocidad del viento, grado de deslizamiento de la carretera, etc.).

Además mediante el empleo de dichas tecnologías conseguiríamos hacer el viaje a los pasajeros mucho más entretenido ya que se pondría a disposición del conductor, numerosos servicios de audio como podrían ser escuchar la radio, o recibir mensajes de un GPS de manera que facilitaría el viaje a un destino desconocido; o incluso recibir llamadas telefónicas sin sufrir distracciones y sin perder de vista la carretera.

Muchos son los sistemas de este tipo desarrollados para coches, que permiten el control del vehículo y el confort y seguridad de los pasajeros durante los diferentes trayectos. Sin embargo poco ha sido el desarrollo alcanzado por estos sistemas para otro de los medios de comunicación más empleados en la actualidad, las motos.

Por ello y por mi interés y conocimiento en motos y en tecnologías inalámbricas he decidido realizar este proyecto para ayudar a aumentar la seguridad y el confort en este tipo de vehículos mediante redes de sensores inalámbricas.

## 1.2. Objetivos

El objetivo del proyecto es el análisis del funcionamiento de un sistema inalámbrico tal como una red de sensores Bluetooth o ZigBee, aplicada al ámbito vehicular y concretamente implantada en una moto.

El estudio consistirá en analizar el comportamiento del canal radioeléctrico de dicha red en el caso en que la moto este parada, en el caso de que nos desplacemos con la misma, o al interaccionar con otra moto.

Para ello se recrearán diferentes escenarios en los que habrá una o dos motos y en los que se incluirán unas veces sí y otras no al conductor de la misma para observar el efecto que este conductor provoca en el funcionamiento del sistema.

Así mismo se realizarán mediante software varias simulaciones deterministas de los distintos escenarios con el método de trazado de rayos 3D, creando distintos mapas de cobertura y a distintas alturas. Con estas simulaciones lo que se pretende es observar el efecto de los diferentes elementos del entorno en el funcionamiento del sistema, así como comparar el funcionamiento de este a las frecuencia de 2,4GHz y 868Mhz, y averiguar cuáles son las mejores zonas de la moto para colocar los diferentes sensores.

Todo esto tiene una finalidad muy clara, desarrollar un trabajo que de una solución viable para aplicar redes de sensores en el entorno de las motos, y mejorar su funcionamiento.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción a las Redes de Sensores Inalámbricas [1]

Actualmente los grandes avances tecnológicos han provocado una expansión importante de las redes inalámbricas. Gracias a la fabricación de chips cada vez más pequeños, con bajo consumo de energía y de menor coste, han surgido los sensores inalámbricos. Estos forman las Redes Inalámbricas de Sensores conocidas en inglés como Wireless Sensor Networks (WSN). Dichas redes juegan un papel fundamental en muchos ámbitos de nuestra vida, ya que se encargan de la percepción, captación, tratamiento y distribución de la información que se obtiene a partir de cualquier parámetro ambiental.

Estas Redes Inalámbricas de Sensores, están formadas por un conjunto de pequeños nodos o también, conocidos como motas, compuestos por diversos tipos de sensores que controlan múltiples parámetros ambientales, como pueden ser la temperatura, la humedad, la luminosidad, o la velocidad del viento. Estos nodos autónomos pueden comunicarse entre sí vía radio, es decir, se trata de redes ad-hoc y ubicuas, con capacidad de transmitir información, de manera inalámbrica, y que pueden ofrecer una serie de servicios en el escenario donde se desplieguen.

Son especialmente útiles en aquellos escenarios en los que resulta imposible o muy incómodo desplegar cables, como pueden ser en entornos vehiculares, en determinados espacios industriales, o para monitorizar diferentes parámetros del medio ambiente (grandes plantaciones de diferentes tipos de cultivos).

En la Figura 2.1 se puede ver la arquitectura de una red compleja de sensores inalámbricos, que realiza las funciones de adquisición y distribución de datos, y que está controlada por un centro de control.

La arquitectura física de una WSN está formada por un conjunto de motas, un punto de acceso llamado Gateway o puerta de enlace, y una estación base. El número de sensores que formen cada una de esas redes dependerá de la aplicación a la que se destinen.

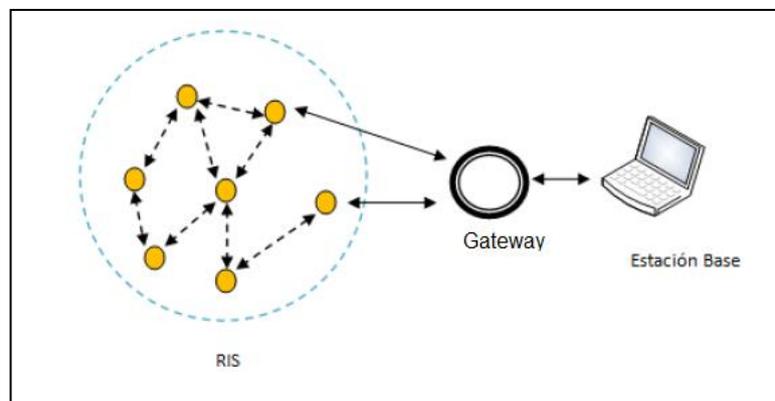


Fig. 2.1. Arquitectura básica de una Red Inalámbrica de Sensores [1]

Como se puede observar en la imagen los elementos que forman parte de la arquitectura de una red de sensores son los nodos, el Gateway, y la estación base.

### 2.1.1. Nodos

Los nodos, también llamados motas, son dispositivos electrónicos que recopilan información a través de sus sensores y se comunican con otros nodos de su misma red.

El hardware básico de un nodo sensor se compone de un transceptor (transmisor/receptor), un procesador, uno o más sensores, memoria y batería o fuente de alimentación.

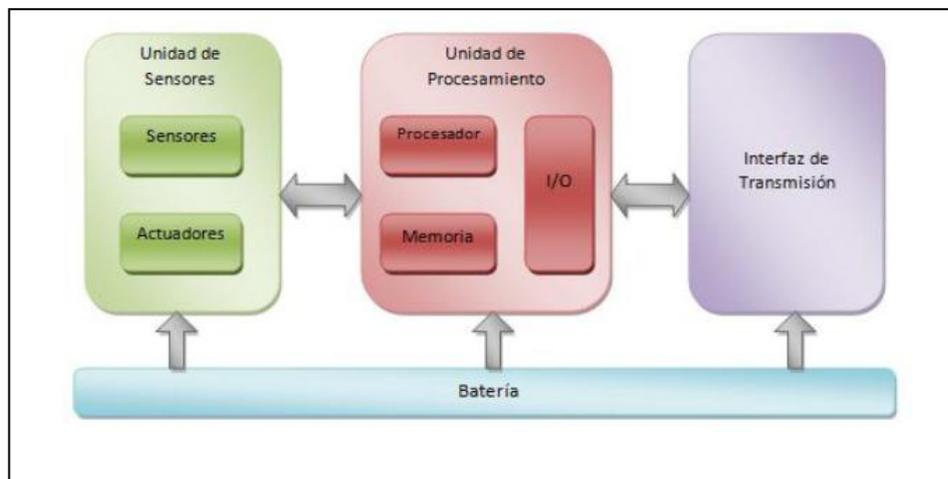


Fig. 2.2 Arquitectura general de un nodo [1]

### 2.1.2. Gateway

La puerta de enlace o Gateway es un nodo que no posee la unidad de sensores, y cuyo objetivo principal es actuar como pasarela entre dos redes de diferente tipo; de modo que recoge los datos de la WSN e interconecta esta red con el mundo exterior.

### 2.1.3. Estación Base

La estación base se encarga de recoger los datos adquiridos por la WSN a través de la puerta de enlace. Se corresponde con un ordenador, donde todos los datos recogidos van a parar a una base de datos desde la cual, los usuarios pueden solicitar toda la información, de manera local o remota.

## 2.2. Tecnologías Inalámbricas

Las tecnologías inalámbricas más empleada a día de hoy en redes de sensores son Bluetooth y ZigBee, las cuales se explicarán de manera detallada a continuación.

### 2.2.1. Bluetooth

#### 2.2.1.1 Descripción del Estándar y Características [2] [3]

Bluetooth es una especificación que define un estándar global de comunicaciones inalámbricas que hace posible la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos, mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda industrial, científica y médica (ISM) de los 2,4 GHz a los 2,485 GHz, en entornos de comunicaciones móviles y estáticas.

Las especificaciones Bluetooth están recogidas por un grupo de trabajo en el estándar 802.15.1 del IEEE.

Los objetivos definidos por este estándar son los siguientes:

- Sistema universal que funciona en todo el mundo.
- Facilitar las comunicaciones entre dispositivos móviles y fijos.
- Eliminar cables y conectores entre los dispositivos.
- Dispositivos con bajo consumo de energía ya que están alimentados por baterías.
- Ofrece la posibilidad de crear redes inalámbricas y transmitir datos entre equipos.
- Coste bajo de los dispositivos

A continuación se explican las características técnicas de Bluetooth.

- La banda de frecuencia a la que trabaja se sitúa en el rango de 2,4 a 2,48GHz de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) disponible a nivel mundial y que no requiere licencia de operador lo que significa una compatibilidad universal entre dispositivos Bluetooth. En esta banda para Bluetooth hay disponibles 79 canales (en España, Francia y Japón 23), separados unos de otros 1MHz. Con el fin de evitar interferencia con otras tecnologías que operen en la misma banda de frecuencias como podrían ser Zigbee o WIFI, Bluetooth emplea un modelo de transmisión basado en el salto en frecuencia (FHSS), y en duplexación por división de tiempo (TDD), en el que el canal es dividido en intervalos de 625µs, llamados slots, donde cada salto de frecuencia es ocupado por un slot. Esto da lugar a una frecuencia de salto de 1600 veces por segundo, en la que un paquete de datos ocupa un slot para la emisión y otro para la recepción y que se pueden usar alternativamente dando lugar a un esquema de tipo TDD. El salto de frecuencia del canal está determinado por la secuencia de la señal, es decir por el orden en que los saltos llegan y por la fase de esta secuencia.
- En cuanto al alcance, destacar que los dispositivos Bluetooth se comunican entre sí siempre que se encuentren dentro de su radio de cobertura. Las comunicaciones se realizan vía radio, de forma que los dispositivos incluso pueden estar separados por

muros u obstáculos, siempre que la potencia de transmisión tenga un valor adecuado y lo permita. Los dispositivos Bluetooth pueden clasificarse en tres clases (Clase 1, Clase 2 y Clase 3) en función de la potencia emitida por cada uno de ellos, de manera que a mayor potencia transmitida mayor es su alcance. Todos los dispositivos de las diferentes clases son totalmente compatibles entre sí. En la siguiente tabla se pueden observar la potencia máxima de transmisión permitida y el alcance aproximado de cada una de las clases de dispositivos Bluetooth. [1]

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Rango (aproximado)
1	100 mW	20 dBm	~ 100 metros
2	2.5 mW	4 dBm	~ 10 metros
3	1 mW	0 dBm	~ 1 metro

Tabla 1. Potencias y alcance de dispositivos Bluetooth. [2]

- Respecto al ancho de banda de transmisión, éste depende de la versión Bluetooth que empleen los dispositivos. En la siguiente tabla se muestra el de algunas versiones.

Versión	Ancho de banda	Mejoras con respecto a la versión anterior
Versión 1.2	1 Mbps	-
Versión 2.0 + EDR	3Mbps	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento duración batería entre 3 y 10 veces.</li> <li>- Alcance hasta 100 metros</li> <li>- Saltos de frecuencia para evitar interferencias</li> <li>- Reducción de velocidad en establecimiento de enlace</li> </ul>
Versión 3.0 + HS	25Mbps	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la duración de la batería</li> <li>- Utilización de una antena de alta velocidad alternativa</li> <li>- Aumento de la seguridad</li> <li>- Descenso del número de las desconexiones</li> </ul>

Figura 2.3. Versiones Bluetooth. [2]

- En lo que se refiere al enlace físico, se definen dos tipos de enlaces que soportan aplicaciones de voz y datos.
  - Enlace síncrono orientado a conexión (SCO): soportan conexiones simétricas punto a punto, usadas normalmente en conexiones de voz. Estos enlaces están definidos en el canal, reservándose dos ranuras consecutivas (envío y retorno) en intervalos fijos. Su velocidad de transmisión son 64Kbps.
  - Enlace asíncrono sin conexión (ACL): soportan conmutaciones punto a multipunto simétricas o asimétricas, usadas normalmente en transmisión de datos, entre maestro y esclavos.
    - No garantizan la entrega de paquetes, aunque los retransmiten.
    - La máxima velocidad de envío es de 721Kbps en una dirección y 57,6Kbps en la otra

Estas serían algunas de las características básicas de la tecnología Bluetooth que nos pueden ser de especial interés para posteriormente saber las especificaciones que ha de cumplir la red de sensores que se va a analizar en el presente proyecto.

### 2.2.1.2. Topología de la red [1] [3]

Una vez explicadas brevemente las características de Bluetooth se va a realizar un breve resumen de la topología de cualquier red formada por dispositivos Bluetooth.

La tecnología Bluetooth proporciona conexiones punto a punto y conexiones punto a multipunto. Dos o más dispositivos que comparten el mismo canal físico forman una red ad-hoc, llamada piconet. Uno de los dispositivos toma el papel de maestro de la piconet, mientras que el resto actúan como esclavos. Además cualquier equipo puede asumir cualquiera de los dos papeles, incluso un equipo puede actuar como maestro en un enlace y como esclavo en otro. El maestro de la piconet es normalmente el encargado de iniciar la conexión.

En una piconet puede haber un máximo de 8 dispositivos (podrá haber hasta 255 pero en estado de espera), de los cuales solo uno de ellos es el encargado de actuar como maestro de la red. El dispositivo que actúa como maestro solo puede realizar dicha función dentro de una piconet y no más. Además será el encargado de sincronizar a todos los demás dispositivos esclavos de la piconet, a partir de su reloj interno que determina la temporización y el patrón de saltos entre canales a seguir.

La unión de múltiples piconet con áreas de cobertura solapadas, forman lo que se denomina Scatternet o Red Dispersa.

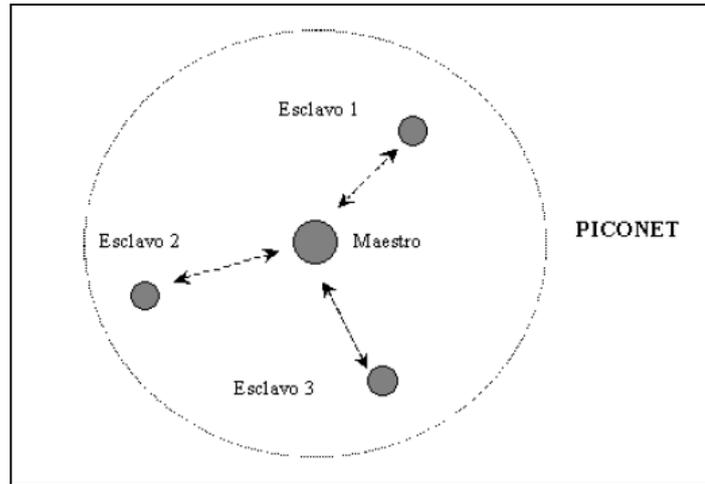


Fig. 2.4. Esquema Piconet conexión maestro-esclavos. [4]

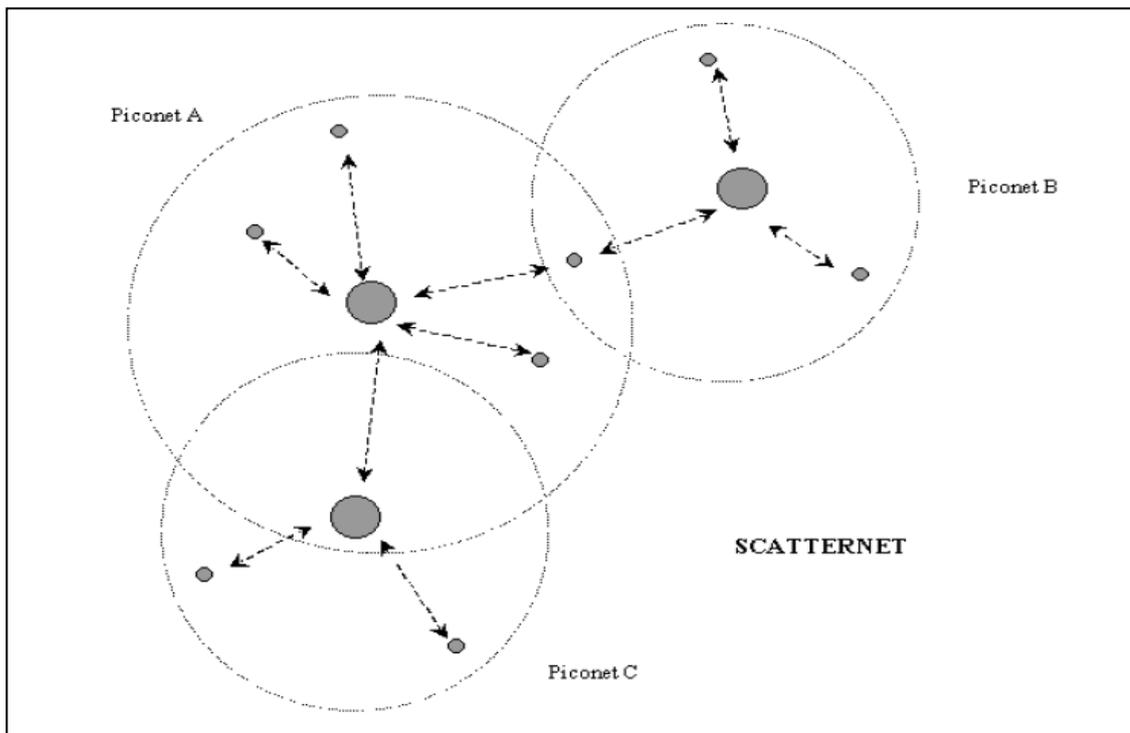


Fig. 2.5. Esquema Scatternet. [4]

En resumen y tal y como se puede observar en la figura 2.5, la topología Bluetooth se puede ver como una estructura de múltiples piconets. Dado que Bluetooth soporta tanto conexiones punto a punto como conexiones punto a multipunto, se pueden establecer conexiones entre varios piconets en forma de Scatternet. Las piconets que forman parte de una misma Scatternet no están coordinadas y los saltos de frecuencia se producen de manera independiente, es decir, todos los dispositivos que pertenecen a la misma piconet se sincronizan con su correspondiente tiempo de reloj y su patrón de saltos determinado. El resto de piconets emplearán diferentes patrones de saltos y frecuencias de relojes distintas, lo que supone distintas velocidades de salto entre canales. Aunque no está permitida la sincronización de varias piconets, cualquier dispositivo puede formar parte de varias piconets gracias a la multiplexación por división de tiempo, aunque solo podrá estar activo en una de ellas cada vez.

### 2.2.1.3. Dispositivos Bluetooth [3]

Hoy en día, la tecnología Bluetooth permite la comunicación inalámbrica y el intercambio de información entre gran cantidad de dispositivos de todo tipo que cumplen con las especificaciones del estándar. Algunos de esos dispositivos de uso cotidiano, que incorporan tecnología Bluetooth y que servirán para implantar los servicios que queremos ofrecer colocando una red de sensores Bluetooth en una moto son los siguientes:

Para el caso de servicios de audio proporcionados en la moto ya existen gran cantidad de auriculares con tecnología Bluetooth. Del mismo modo el mercado de las telecomunicaciones, ofrece sistemas de manos libres o GPS para implantar en ciertos vehículos. Por otro lado, a día de hoy gran cantidad de teléfonos móviles, smartphones o PDAs soportan tecnología Bluetooth de modo que podremos conectarlos a nuestro vehículo, en este caso a la moto.

Actualmente ya se han desarrollado sistemas manos libres con tecnología Bluetooth para automóviles, y se están comenzando a desarrollar para otro tipo de vehículos como motos.

Existen auriculares o sistemas integrados en los vehículos, que hacen posible conversar por teléfono móvil sin necesidad de utilizar las manos para sujetar el terminal cerca del oído. Los auriculares Bluetooth actúan como interfaz de entrada y salida de voz y permiten libertad de movimiento con las manos, al tiempo que garantizan la confidencialidad de la llamada.

De este modo cuando el móvil recibe una llamada telefónica, el sistema deja de ofrecer el servicio que estaba dando hasta ese momento, como por ejemplo apaga la radio, y pasa a proyectar por los auriculares la conversación, asegurando que el conductor de la moto no tenga que apartar las manos del manillar de la misma.

De la misma manera, Bluetooth ofrece un medio de comunicación inalámbrico de corto alcance ideal para el envío de coordenadas NMEA geosicionales entre los módulos receptores GPS y equipos visualizados de mapas como PDAs, teléfonos móviles o la propia interfaz de usuario que se implantará en nuestra moto.

A continuación podemos ver algunos de este tipo de dispositivos que se acaban de comentar. Por un lado como se aprecia en la figura 2.6 existen auriculares y micrófonos con tecnología Bluetooth aptos para instalarse en los cascos de las motos.

Por otro lado y tal y como se observa en la figura 2.6 se venden cascos que ya traen incorporados el sistema Bluetooth con los auriculares y micrófono en el mismo.



(a)[5]



(b) [6]



(c)[7]

Fig.2.6. Auriculares y micrófonos con Bluetooth(a) y cascos con tecnología Bluetooth y con los auriculares y el micrófono ya incorporados en el mismo de fábrica. (b) y (c).

También existen sistemas GPS como el siguiente.



Fig.2.7. Sistema GPS [8]

En definitiva todo parece indicar que Bluetooth sería una tecnología muy adecuada para implantar la red de sensores en la moto dada la gran cantidad de servicios que nos puede ofrecer, la poca cantidad de energía que necesitan este tipo de dispositivos para su funcionamiento, y la seguridad en cuanto a la privacidad de nuestras llamadas que garantiza dicha tecnología.

2.2.2. ZIGBEE

2.2.2.1 Descripción del estándar y características [9] [10] [11]

Es una especificación del estándar IEEE 802.15.4 que define un conjunto de protocolos de comunicación de baja velocidad de transmisión que usan transceptores digitales de pequeño tamaño y baja potencia para redes inalámbricas. Se trata de una tecnología que se aplica en redes que necesiten comunicaciones seguras, poca tasa de envío de datos, y larga vida de la batería de los dispositivos. Es una tecnología más barata y simple que Bluetooth aunque su velocidad de envío de datos es menor.

Debido a la existencia de un grupo llamado ZigBee Alliance formado por diferentes empresas que mantienen y publican el estándar, todos los dispositivos sean de un fabricante o de otro deben cumplir con ese estándar y son compatibles entre sí, reduciendo así el coste de implementación a consecuencia de simplificar los protocolos de comunicación y disminuir la velocidad de datos de todos los transceptores ZigBee.

Las principales características de ZigBee son las siguientes:

- ZigBee opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2.4 GHz, 868MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).

Frecuencia	Banda	Cobertura	Nº de Canales	Sensibilidad RX(dBm)	Modulación
2,4GHz	ISM	Mundial	16	-85	O-QPSK
868MHz		Europa	1	-92	BPSK
915MHz	ISM	América	10	-92	BPSK

Fig. 2.8. Características radio del estándar IEEE 802.15.4.

- Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros.
- A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto debido a su baja tasa de transmisión y, a características propias del estándar IEEE 802.15.4.
- Emplea CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) para permitir a múltiples dispositivos utilizar el mismo canal de frecuencias para comunicarse. ZigBee es asíncrono, es decir, cualquier nodo puede transmitir en cualquier instante. Sin embargo gracias a CSMA/CA se evitan que los mensajes enviados entre los distintos nodos colisionen. Para ello lo que hace cualquier dispositivo antes de transmitir es asegurarse que el canal que va a usar no está siendo usado por otro dispositivo. En caso de que el canal esté libre, transmite su mensaje. De

lo contrario, el dispositivo espera un tiempo definido con anterioridad y lo intenta de nuevo. Este proceso se repite hasta que el canal esté libre o hasta alcanzar el máximo número de intentos definido por el usuario.

- Permite el uso de ranuras de tiempo (time slots) para posibilitar aplicaciones de baja latencia.
- Emplea indicadores de calidad en el enlace, así como de conmutación de canales para recibir paquetes (LQI).
- Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permita que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Teóricamente pueden existir hasta 16000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65000 nodos, obviamente estos límites se ven alterados por algunas restricciones físicas (memoria disponible, ancho de banda, etc.).
- Tiene dos modos de direccionamiento, direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64bits.
- Es un protocolo de comunicación multisalto, 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, de esta manera, se incrementa el área de cobertura de la red.

Tras haber analizado ya las características básica de ambas tecnologías podemos comprobar que existen muchas semejanzas entre ambas, aunque también hay pequeñas diferencias que hacen que alguna de ellas sea más adecuada que la otra dependiendo de la aplicación y el escenario en el que se quieran implementar.

En nuestro caso aunque como ya hemos visto ZigBee tiene un consumo algo menor que Bluetooth, pues ZigBee consume 30mA transmitiendo y 0,3 $\mu$ A en reposo frente a los 40mA transmitiendo y los 0,3mA en reposo de Bluetooth. Esto es debido a que en ZigBee los dispositivos están dormidos la mayor parte del tiempo, mientras que en Bluetooth esto no es así.

Por otro lado mediante ZigBee se pueden tener un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred Bluetooth.

Sin embargo y a pesar de estas pequeñas ventajas que presenta ZigBee frente a Bluetooth, existe un gran hándicap como es la baja tasa de envío de datos que ofrece ZigBee, lo que provocará que a pesar de poder emplear ZigBee para la implementación de nuestra red de sensores en la moto, Bluetooth sea la tecnología más óptima para la creación de dicha red.

### 2.2.2.2. Tipos de Dispositivos [10]

Una vez comentada las características de esta tecnología podemos pasar a hablar de los dispositivos de los que consta cualquier red ZigBee.

**Coordinador ZigBee:** es el dispositivo más completo, y el responsable de establecer el canal de comunicaciones y el identificador para toda la red. Tras establecer estos parámetros, el coordinador puede formar una red, ya que a él pueden conectarse routers y dispositivos finales. Cuando la red ha sido creada, el coordinador actúa como router, es decir, se encarga del enrutado de paquetes y puede transmitir o recibir información.

Además, puede tanto realizar las funciones de gestión y dirección de una red en árbol, como actuar de enlace hacia otras redes. Es el dispositivo que al principio inicia la red, por lo que solo existe uno por cada red. También puede almacenar información sobre la red, y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.

**Router ZigBee:** se trata de un dispositivo que se conecta a la red para poder retransmitir paquetes de otros routers o dispositivos finales. Además se encarga de interconectar dispositivos separados en la red y limitados debido a su alcance.

Por otro lado, se trata de un nodo que crea y mantiene información sobre la red y determina la mejor ruta para enviar un paquete de información a un destino en concreto. También es capaz de almacenar temporalmente en una tabla interna, las tramas que le llegan para los distintos dispositivos asociados a él. Así cuando un dispositivo final se despierta y le pregunte si hay algún paquete de datos para él, el router le envía las tramas que tenía almacenadas para ese dispositivo.

**Dispositivo final o end-device:** puede comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos ni realizar funciones de enrutamiento. Así, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Posee requerimientos mínimos de memoria y es bastante más barato que los dos dispositivos explicados anteriormente.

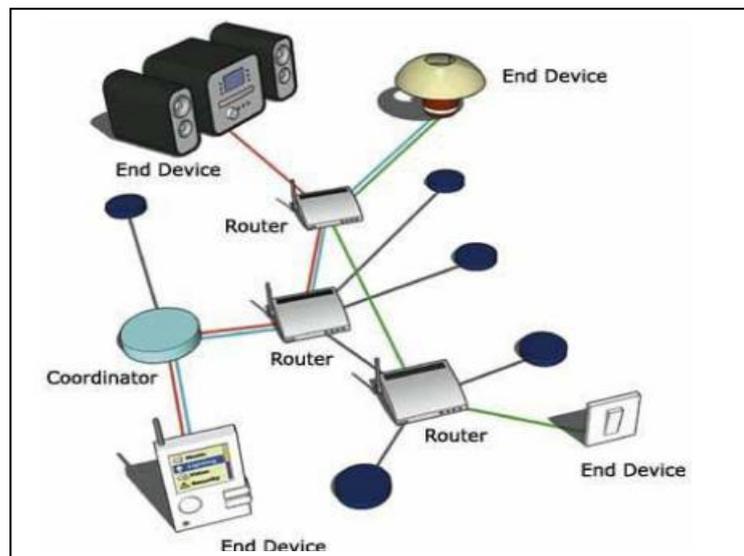


Fig.2.9. Red de dispositivos ZigBee. [11]

Existe otro modo de clasificar los dispositivos de una red ZigBee según su funcionalidad.

**Dispositivos de funcionalidad completa (FFD):** también llamados nodos activos. Son capaces de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4 y funcionar como coordinador o router, o ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaz con los usuarios.

**Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD):** conocidos como nodos pasivos. Se trata de dispositivos que poseen capacidad y funcionalidad reducidas con el objetivo de conseguir el menor coste y la mayor simplicidad posibles. Están pensados para realizar tareas extremadamente simples en las que se envíen pequeñas cantidades de datos y solo pueden estar conectados a un FFD. Solo funcionan como dispositivos finales.

### 2.2.2.3. Topologías de Red [10]

Las diferentes posibilidades de unión que ofrecen la gran cantidad de dispositivos descritos anteriormente, da lugar a redes con topologías muy distintas unas de otras. Algunas de las topologías de red soportadas por ZigBee son la topología en estrella, en árbol o en malla que se explican detalladamente a continuación.

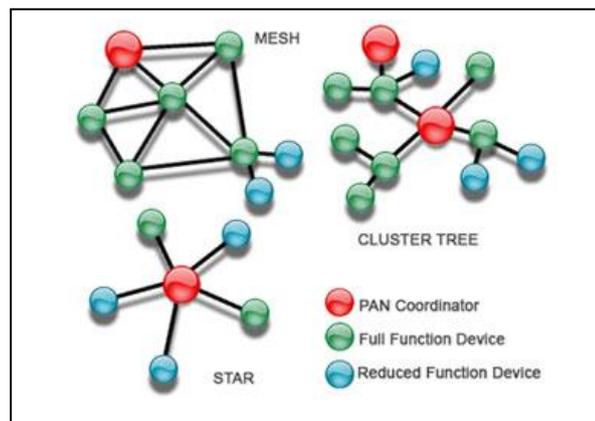


Fig. 2.10. Topologías de red ZigBee. [12]

#### 2.2.2.3.1. Topología en estrella

El coordinador de red se sitúa en el centro, y todas las conexiones entre los diferentes nodos pasan por él. Este coordinador dispone de todos los medios necesarios para prevenir distintos problemas que se puedan producir en el envío de paquetes por la red.

Algunas de las ventajas que ofrece este tipo de topología son su facilidad de implementación, que se evitan las colisiones de datos ya que cada nodo tiene su propia conexión con el coordinador, y que la caída de un nodo periférico no afecta al resto del funcionamiento de la red.

Sin embargo presenta algunos inconvenientes como son que el coordinador deberá estar conectado a la red eléctrica ya que su consumo es mayor que el de los dispositivos finales que son alimentados por baterías; o que el rango de alcance del coordinador es el que define el tamaño de la red, lo que supone una gran limitación para la expansión de la red.

Debido a todo esto podemos decir que una red en estrella resulta poco fiable para transmitir información

### *2.2.2.3.2. Topología en árbol*

Se trata de una topología de red en la que los nodos están distribuidos en forma de árbol, donde el coordinador es la raíz del árbol. Como se puede observar en la figura x la conexión en árbol es parecida a una serie de redes en estrella interconectadas, con la excepción de que no tiene un nodo central, sino un nodo de enlace troncal, desde el que se ramifican los demás nodos.

En este tipo de redes se emplean routers ZigBee para interconectar los distintos nodos de la red.

Uno de los problemas que presenta esta topología es que los datos son recibidos por todas las estaciones sin importar para quien vayan dirigidos, por lo que es necesario dotar a la red de un mecanismo que permita identificar al destinatario de los mensajes.

Además, pueden producirse interferencias entre las distintas señales cuando dos o más dispositivos transmitan al mismo tiempo. Para evitar esto, hay que mantener coordinados a todos los nodos mediante el empleo de información de control en las tramas que controlan quien transmite en cada momento mediante el uso de tramas baliza.

### *2.2.2.3.3. Topología en malla*

Se trata de la topología más empleada en redes de sensores ZigBee. Consiste en que al menos uno de los nodos deberá tener más de dos conexiones.

Así en una red en malla existen múltiples caminos para enviar la información de un nodo a otro, por lo que si una conexión falla, no resultará un problema, ya que el tráfico llegará al destino por otro camino diferente.

Esta red a diferencia de los anteriores no necesita un nodo central, reduciendo así las labores de mantenimiento de la misma.

Dichas redes pueden funcionar incluso cuando un nodo desaparece o la conexión falla, ya que el resto de nodos evitan el paso por ese punto, dando así lugar a una red muy confiable, segura y adecuada para emplear en múltiples entornos.

### **2.2.2.4. Dispositivos ZigBee**

Finalmente destacar que a día de hoy existen varias empresas encargadas de la fabricación de módulos ZigBee que pueden actuar como coordinadores, routers o como dispositivos finales en las distintas topologías de red descritas anteriormente.

Todos y cada uno de esos módulos constan de las partes que se definen a continuación y que permiten un funcionamiento adecuado de cada uno de los dispositivos de la red.

- Módulo de sensores: posee los sensores o los actuadores conectados a las múltiples entradas y salidas del microcontrolador.
- Módulo de control: formado por un microcontrolador, encargado de controlar todas las funciones del dispositivo.
- Módulo de comunicaciones: formado por transceptor de RF, que se encarga de recibir y transmitir información.
- Batería: se encarga de alimentar el dispositivo.

### 2.3. Modelos de Propagación

Poco a poco, cobra especial importancia la comprensión y el desarrollo de distintos modelos de propagación tanto en entornos interiores como exteriores, debido al rápido avance de las tecnologías descritas anteriormente y a su implantación en todo tipo de entornos.

Estos modelos son la base de diferentes herramientas como software de simulación, que permiten llevar a cabo la planificación de un sistema de comunicación inalámbrico en cualquier escenario. De esta manera se consigue evitar una tarea tan pesada como es la realización de “prueba y error” para determinar la mejor ubicación para cada uno de los nodos del sistema inalámbrico.

Estos modelos permiten predecir el comportamiento de las señales electromagnéticas en distintos ambientes, resultando así fundamentales para la planificación de redes inalámbricas o cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas. Existen dos tipos de modelos:

#### 2.3.1. Modelos de Propagación Empíricos [10]

Consisten en extraer resultados y conclusiones a partir de medidas reales realizadas sobre el terreno. En estos modelos no se estudia la influencia que tienen en los resultados cada uno de los elementos del entorno por separado, sino la influencia de todos ellos en conjunto.

Su precisión depende tanto de la precisión con la que se toman las medidas como la semejanza entre el entorno en el cual se toman las medidas, y el escenario que se desea analizar. Además este tipo de modelos tiene una muy buena eficiencia computacional.

Entre estos modelos podemos citar algunos como el modelo de propagación en el espacio libre, el modelo de Okumura-Hata, el modelo COST-231, o el modelo ITU-R.

### 2.3.2. Modelos de Propagación Deterministas [13]

Los modelos deterministas están basados en el empleo de principios matemáticos y físicos sobre la propagación de ondas, y necesitan conocer con bastante precisión todos los elementos y variables del escenario en cuestión para poder estimar la propagación exacta de la señal.

Se trata de métodos que proporcionan una visión bastante exacta de la realidad aunque para ello necesiten realizar gran cantidad de cálculos, lo que les hace ser unos algoritmos poco eficientes y que tienen gran coste computacional.

#### 2.3.2.1. Técnicas de Trazado de Rayos

##### 2.3.2.1.1 Algoritmo de Lanzado de Rayos [9] [10] [13] [14]

Estas técnicas se basan en que las ondas electromagnéticas pueden tratarse igual que rayos ópticos que se propagan en línea recta por el medio de propagación en el que nos encontremos.

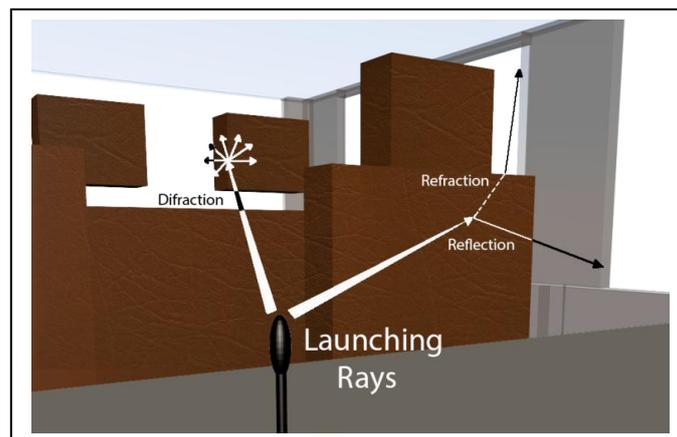


Fig. 2.11. Trazado de rayos

Dichos rayos son lanzados desde una antena transmisora de manera uniforme en todas las direcciones del espacio, después este número finito de rayos chocará con alguno de los elementos del escenario, produciéndose en ese momento alguno de los fenómenos de la propagación como la transmisión, reflexión, difracción o el scattering, dependiendo todo ello de la geometría del medio y de las propiedades eléctricas de todos los objetos presentes en el escenario.

De este modo cuando el rayo llega a la antena receptora, se pueden calcular parámetros como la potencia recibida en un determinado punto del espacio, o las pérdidas que se producen en el trayecto transmisor-receptor.

Algunas de las características básicas de las técnicas de trazado de rayos en tres dimensiones son las siguientes [9]:

- Recreación de una propagación multirrayo realista.

- Modelado en tres dimensiones de todo tipo de entornos complejos con habitaciones, con vehículos como coches, motos, aviones o incluso escenarios como parques o la bahía de Cádiz.
- Caracterización de objetos o personas en movimiento.
- Caracterización y modelado de cualquier tipo de objeto mediante su forma tridimensional y su constante dieléctrica.
- Implementación de fenómenos como difracción, refracción, reflexión y scattering.
- Cálculo de las interacciones entre los rayos y los objetos teniendo en cuenta la polarización de la onda.
- Modelado de cualquier tipo de antena transmisora o receptora.
- Caracterizar la duración de la simulación de un rayo determinado mediante número de rebotes, retardo máximo, magnitud de campo eléctrico mínima, etc., que nos permitirá definir hasta que momento la contribución de un rayo puede ser considerada como significativa.

En este proyecto, para la realización de las simulaciones y obtención de los resultados correspondientes, se ha empleado este modelo de trazado de rayos ya que está demostrado que se trata de una técnica mejor que el método de las imágenes ya que la precisión que se consigue especialmente a frecuencias elevadas es mayor que la alcanzada con el método de las imágenes.

### *2.3.2.1.2. Método de las Imágenes [13]*

La presencia de un obstáculo, especialmente si se encuentra cerca del elemento radiante, puede alterar significativamente las propiedades radiantes del sistema en sí. Por este motivo, esta técnica consiste en calcular las imágenes del receptor con los objetos más importantes, es decir, los más cercanos y calcular la trayectoria del rayo entre el transmisor y cada una de las imágenes.

En la práctica uno de los obstáculos que siempre nos encontramos es el suelo, de modo que la energía que se refleja en el mismo dependerá de los parámetros tales como la conductividad del mismo. En este caso además nos encontraremos con la persona o con la moto, de modo que la cantidad de energía que reflejen dichos elementos dependerá igualmente de sus parámetros característicos.

Dicho esto, para analizar el comportamiento de una antena próxima a un objeto conductor (plano conductor), lo que se hace es introducir antenas virtuales, llamadas imágenes que tienen efecto sobre la reflexión, y que junto con las antenas reales forman un

sistema equivalente al de antena-plano conductor, de modo que nos permiten analizar el escenario real.

Asumamos que un dipolo vertical (elemento radiante) está situado a una distancia 'h' sobre un conductor perfecto, plano e infinito, como mostramos a continuación:

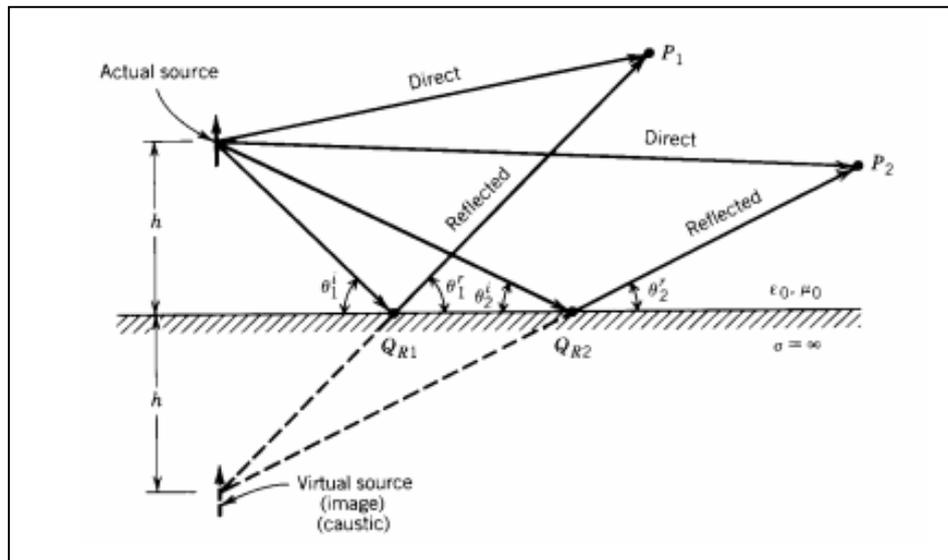


Fig.2.12. Método de las Imágenes [13]

Asumiendo que no hay acoplamiento mutuo y que la energía es radiada en todas direcciones, para el observador P1 habrá un rayo directo y además uno reflejado procedente del punto QR1 en la interfaz creada por el conductor y que obedece a la ley de la reflexión que establece que  $\theta_{1r} = \theta_{1i}$  como se puede apreciar en la figura 2.12. De aquí se deduce que la energía describe trayectorias rectas describiendo los caminos más cortos.

La onda que llega entonces al punto de observación P1 mediante la reflexión parece originada por la imagen de la fuente a una distancia "h" por debajo del conductor. Si atendemos al transmisor situado en P2 el punto de reflexión es QR2 pero la imagen sigue siendo la misma que antes. Este comportamiento se extiende a cualquier otro punto por encima del plano conductor.

Como conclusión destacar que mediante esta teoría se generan imágenes de cada una de las fuentes del escenario con respecto a cada uno de los objetos o planos que tengamos en nuestro escenario, de modo que si hay N planos se formaran N imágenes por cada una de las antenas que tengamos. Sin embargo esto no acaba aquí ya que luego se realizaría la imagen de la imagen anterior con respecto a cada uno de los planos y así sucesivamente, hasta que la cantidad de energía que genere una imagen se pueda considerar como despreciable; obteniendo de este modo una gran cantidad de imágenes en cada escenario que nos permitirán describir las múltiples trayectorias de cada uno de los rayos y analizar de este modo su comportamiento, siendo la potencia total recibida por el observador la suma de las contribuciones de cada uno de los rayos generados por las diferentes antenas y por todas las imágenes.

### 2.3.2.2. Método de los Momentos [13]

A diferencia del método de trazado de rayos que se empleaba para calcular los diferentes niveles de cobertura con bastante precisión en cada uno de los puntos del espacio de aquellos escenarios grandes con gran número de obstáculos entre el transmisor y el receptor; el método de los momentos se emplea en el caso contrario, es decir, cuando queramos obtener gran precisión en escenarios pequeños. Claro está que se pueden combinar ambos métodos, logrando así unir las ventajas de ambos para poder aplicarlos en los entornos más adecuados.

Para poder obtener unos datos precisos necesitamos que los parámetros de los elementos del escenario a estudio estén definidos con mucha exactitud. Dicho método se emplea en escenarios pequeños con pequeños elementos, debido a su gran carga computacional, debido a que en escenarios grandes puede que los ordenadores no tuvieran memoria suficiente, y a que si los objetos son de tamaño pequeño, las técnicas de trazado de rayos no generarían unos resultados precisos.

### 2.3.2.3. Método FDTD [13]

En aquellos escenarios que tengan dimensiones finitas y en los que se producen pérdidas, la técnica de trazado de rayos no es la mejor. Esto adquiere más importancia en sistemas de comunicaciones complejos, en los que las antenas transmisoras y receptoras se colocan cerca de los distintos elementos que forman parte de nuestro escenario. Estos problemas se solucionan a partir de las ecuaciones de Maxwell.

Concretamente se aplica el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (Finite-Difference Time-Domain, FDTD). Este método posee algunas ventajas como son su exactitud y que ofrece una solución completa para todos los puntos del espacio, lo que nos proporciona información sobre el nivel de cobertura de la señal en todo el escenario en estudio.

Por el contrario una de las principales desventajas de este método, es que al tratarse de un método numérico necesita mucha memoria para almacenar la solución de todos los puntos del mapa de potencias, por lo que se convierte en inadecuado para grandes escenarios.

Sin embargo, el interés de esta técnica aparece al combinarla con el trazado de rayos para formar un modelo de propagación adecuado que combine exactitud y bajo coste computacional. La idea básica consistiría en usar el trazado de rayo para áreas grandes, y el método FDTD para el estudio de áreas donde el trazado de rayos no sea suficientemente exacto.

## 2.4. Comunicaciones en Motos [15]

El ámbito en el que se centra este proyecto requiere una breve descripción del funcionamiento de los sistemas de comunicaciones en motos, para entender mejor en que se basan dichos sistemas.

Muchos son los sistemas electrónicos colocados en los coches que ofrecen seguridad y confort a los pasajeros durante los trayectos a diferentes lugares. Sin embargo y a pesar de que en las motos estos sistemas no están tan desarrollados, los conductores de este tipo de vehículos estarán igualmente interesados en sistemas de manos libres, GPS o sistemas que les permitan comunicarse con sus acompañantes. Es aquí donde nace la necesidad de crear un interfaz de comunicación vehículo-persona que permita a los conductores disfrutar de los servicios anteriormente citados.

A día de hoy la manera más segura de proporcionar información a los conductores sin causarles ningún tipo de distracción son las señales de audio. Actualmente, gran cantidad de moteros disponen de cascos equipados con auriculares y micrófonos que les permiten comunicarse mientras conducen.

Ahora bien, estos sistemas pueden resultar incómodos por la gran cantidad de cables que requieren para conectarse a la moto. Sin embargo con el desarrollo de la tecnología inalámbrica se ha conseguido mejorar dicho sistema sin necesidad del empleo de cables que incomoden al conductor, de manera que se crea un interfaz de comunicación vehículo-persona a través de un enlace inalámbrico por el que se envían señales de audio.

La tecnología inalámbrica que mejor se adapta a la implementación de este tipo de sistemas de comunicaciones es Bluetooth. Esto es debido tanto a las características de bajo consumo y bajo coste, como a las mínimas dimensiones del hardware de esta tecnología disponible en el mercado, que la han convertido en la más óptima para el diseño de la Unidad de Comunicación Audio (ACU) que se implantará en las motos.

El sistema de comunicación que se crea, consiste en una ACU que forma una red de comunicación audio, multipunto e inalámbrica y representa un punto de acceso de información de audio, al cual se conectan los usuarios de la moto equipados con Bluetooth Headsets (BH).

Con este sistema además de mantener conversaciones por el móvil mientras conducimos, podemos disfrutar de otro tipo de servicios de manera que el conductor de la moto podrá seleccionar que señales de audio desea escuchar, ya sean las que generan otros usuarios que estén hablando con él, o de otras fuentes directamente conectadas a la ACU como la radio FM o indicaciones de voz GPS, etc.

Dicho de otro modo los usuarios de este sistema de comunicaciones pueden disfrutar de una gran cantidad de servicios de audio, disponibles al mismo tiempo y de manera independiente para el conductor y el acompañante, de tal forma que a través de una interfaz de usuario colocada en la moto, pueden seleccionar el audio deseado en cada momento.

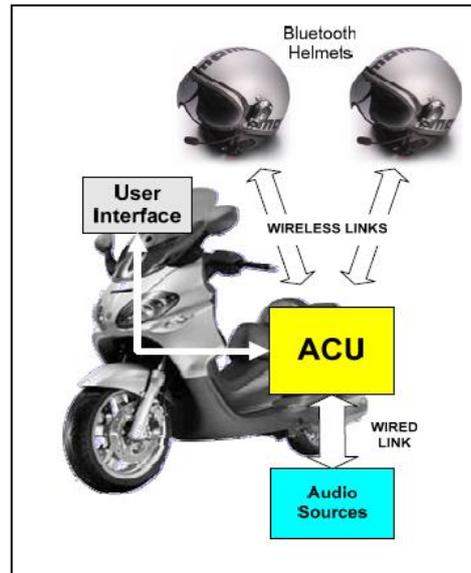


Fig. 2.13. Vista del sistema de comunicaciones inalámbrico con de las distintas fuentes de audio a implantar en la moto. [15]

El sistema de comunicación que estamos tratando y que podemos observar en la figura 2.13, consiste en una red Bluetooth formada por la ACU que actúa como maestro y los dos cascos del conductor y del pasajero que serían los esclavos en esa red.

La ACU realiza las funciones de puerta de enlace para el conductor y el pasajero, equipados ambos con Bluetooth Headsets, distribuyendo los servicios de audio que estos soliciten tales como la radio o indicaciones GPS.

El funcionamiento clave para este sistema consiste tal y como podemos ver en la figura 2.14, en que los dos enlaces de audio están activados al mismo tiempo en la piconet, conectando en uno de ellos la ACU al casco del conductor, y en el otro al del pasajero, y no directamente ambos cascos entre sí. De esta manera, la ACU controla los dos flujos de audio y se puede enviar cualquier combinación de señales a los BHs de cada usuario de manera independiente para cada uno, es decir no tienen porqué estar recibiendo la misma señal si es que no lo desean.

Desde el punto de vista del diseño de este sistema Bluetooth, la ACU implementa dos piconets de audio. Una de ellas, la piconet A conectando los cascos a la ACU. Esta red soporta los enlaces de audio entre cada casco y la ACU, proporcionando una estructura eficiente para la transmisión de señales de audio.

Sin embargo esta estructura puede parecer inadecuada ya que los dos usuarios principales del sistema como son conductor y pasajero y que actúan como esclavos, no están directamente conectados. De hecho la conexión directa entre dos esclavos en una red Bluetooth resulta imposible a no ser que cambie su topología creando una piconet entre los dos cascos en la que uno de ellos actúe como maestro. Sin embargo, de este modo no podría emplear los servicios de audio del vehículo y el micrófono al mismo tiempo, y se generaría un gran retardo cada vez que la red tiene que configurarse para ofrecer un servicio u otro.

La solución para esto es tener una red de un maestro y dos esclavos, de modo que en el maestro, en este caso la ACU tengamos funcionando un software que establezca los piconets y se encargue tanto de gestionar los flujos de audio que se intercambian los cascos (esclavos), como de distribuir las señales de audio procedentes de la moto a cada pasajero.

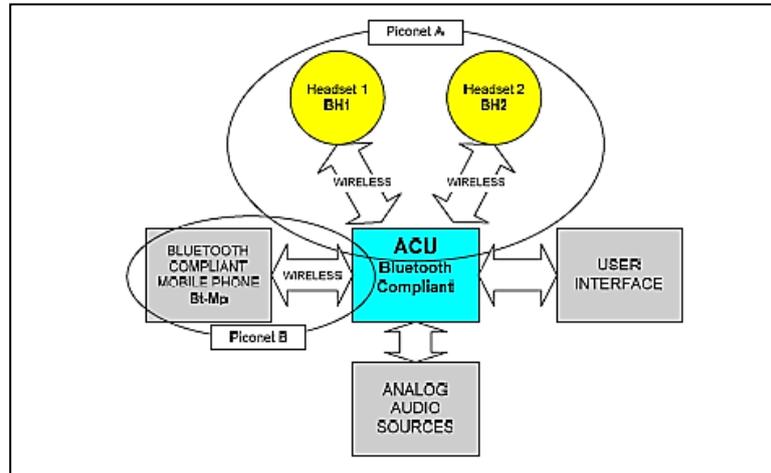


Fig.2.14. Arquitectura del sistema de comunicación inalámbrico de la moto. [15]

La segunda piconet, la piconet B consistiría en añadir un teléfono móvil con Bluetooth al sistema. Esta piconet se creó, dado que de lo contrario el teléfono con Bluetooth hubiera actuado como esclavo en la piconet A, y normalmente estos dispositivos actúan como maestros de una red, conectados a un Bluetooth Headset. Así el teléfono con Bluetooth actuará como maestro de la piconet y además tendríamos a nuestra disposición en la ACU, un flujo de audio procedente del teléfono.

Todas las tareas llevadas a cabo en la ACU se dividen en dos plataformas hardware diferentes que hacen que este sistema sea mucho más flexible. De este modo todas las funciones relacionadas con la red Bluetooth se ejecuta en el Host Controller y las relacionadas con el control de las fuentes de audio, se realizan en el Host al mismo tiempo que se ejecutan las del Host Controller. Estas dos plataformas hardware se conectarían entre sí a través de un enlace serie tal y como se puede apreciar en la figura 2.15.

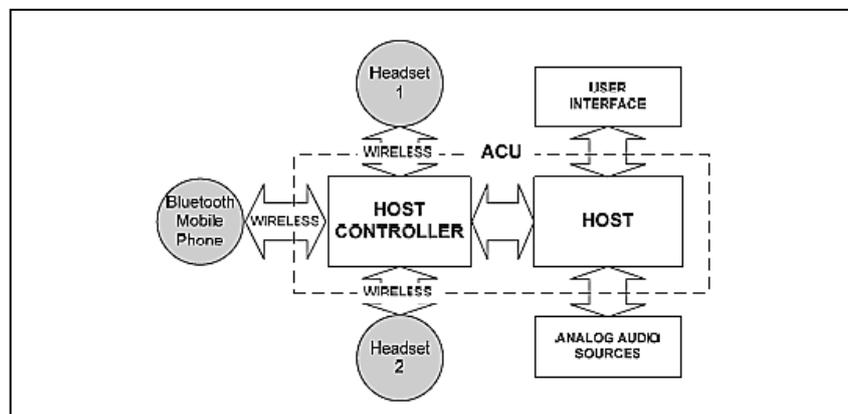


Fig.2.15. Arquitectura de la ACU. [15]

El escenario descrito anteriormente presente algunas limitaciones como son los 100m de alcance de la tecnología Bluetooth, y el número máximo de 8 nodos en una piconet. Para superar dichas limitaciones surge la necesidad del empleo de las redes Bluetooth múltiples (Bluetooth Scatternet) que se han comentado al explicar dicha tecnología.

Llegados a este punto, merece una explicación especial el elemento central del sistema, la ACU, ya que es la encargada tanto de controlar y distribuir los diferentes flujos de audio disponibles en el sistema, como de gestionar los enlaces inalámbricos y las diferentes funciones del interfaz de usuario.

De este modo se permite a los usuarios escoger cualquier combinación de señales de audio pudiendo por ejemplo en el mismo momento escuchar el conductor las indicaciones del GPS y el pasajero hablar por teléfono.

Por otro lado, el Host está integrado por un procesador digital de señal de alto rendimiento que se encarga de mezclar los diferentes flujos de audio procedentes tanto de los BH como del teléfono móvil.

El Host Controller está formado por dos módulos Bluetooth, en los que se implementan todos los servicios que va a ofrecer la red. En uno de ellos los servicios correspondientes a la piconet A formada por los BHs y la ACU, y en el otro la interacción entre el móvil y el BH.

Además de todas las funcionalidades citadas, no podemos olvidarnos del sistema de reconocimiento de voz que permite al conductor controlar el interfaz de usuario a partir de la voz y preguntar por el estado de la carretera o del vehículo a través de la voz, es decir no sería necesario que observase si se muestran luces en el interfaz de usuario en caso de avería por ejemplo, le sería suficiente con escucharlo.

En definitiva estamos ante un sistema de comunicaciones bidireccional en el que se crea una red inalámbrica y multipunto de sensores Bluetooth completamente compatible con cualquier dispositivo que cumpla con el estándar de esta tecnología y en el que se produce una gran interacción entre la moto y los usuarios de la misma, que nos permite disfrutar de gran cantidad de funcionalidades y servicios de audio que no tendríamos sin este sistema.

## 3. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1. Metodología

Una de las herramientas básicas que se ha empleado para la realización de este trabajo ha sido un software de trazado de rayos en 3D. Dicho software nos ha permitido la recreación de los diferentes escenarios y la realización de las correspondientes simulaciones que nos permitiesen obtener resultados concretos para su posterior análisis, y para poder así estudiar la viabilidad de la implantación de un sistema de comunicaciones en motos.

Dicho software había sido realizado en Matlab por la Universidad Pública de Navarra, con la finalidad de ser empleado como simulador de propagación de ondas.

El método de trazado de rayos 3D que se emplea está basado en el algoritmo Ray Launching, que consiste en la distribución de manera uniforme de una cantidad finita de rayos enviados todos ellos desde una antena transmisora, de modo que se asemeje a la propagación del frente de ondas, y a la interacción con el entorno, de manera que simule efectos como la difracción o la propagación multitrayecto que se producen al impactar los rayos con los diferentes elementos del escenario.

Todos esos elementos del escenario fueron recreados con cuboides, incluso el mismo escenario es un cuboide ya que el software no permite hacer otro tipo de figuras.

Aunque dichos escenarios corresponderían a un entorno exterior y dicho software fue realizado para realizar simulaciones en interiores, esto no resulta ningún problema ya que en el fondo en el exterior nos rodearían cuboides de aire, por lo que resulta muy sencillo indicar que las caras del cuboide o paredes de nuestro escenario tienen las propiedades del aire, lo que generara una gran aproximación a un escenario exterior como es nuestro caso.

Para la realización de los elementos principales de nuestros escenarios, como son la moto y la persona que la conduce, también hemos empleado cuboides de manera que a cada cuboide se le han asignado las características de conductividad y constante dieléctrica del material que queremos que represente. Por ejemplo a los cuboides que conforman los neumáticos de la moto se les ha asignado la conductividad y constante dieléctrica del caucho, al motor de la moto los parámetros del hierro y lo mismo para todos los cuboides presentes en nuestro escenario.

Una vez configurados los diferentes escenarios con características y especificaciones deseadas en cada uno de ellos y tras la realización de las correspondientes simulaciones, obtenemos datos de la potencia recibida en cada cuboide del espacio y por lo tanto dicha cantidad de datos dependerá de los cuboides que conformen las dimensiones de nuestro escenario y por consiguiente de su tamaño, es decir de la resolución que hayamos empleado.

En este caso todas las simulaciones realizadas tenían como resolución cuboides de 0,1m de lado para obtener unos datos bastante precisos aunque ello suponga un aumento en el tiempo de cálculo y de simulación, así como del coste computacional.

Al igual que la resolución, otros parámetros como las dimensiones del escenario que en este caso no son un problema al tratarse de escenarios bastante sencillos, o el número de rayos lanzados desde el transmisor (en todas las simulaciones con diferencia de un grado entre un rayo y otro), o el número de rebotes permitidos para cada rayo; en nuestros escenarios cada rayo realizará un máximo de 6 rebotes, afectarán a la precisión de los resultados obtenidos.

Así pues es necesario alcanzar una solución de compromiso entre la resolución deseada, el número de rayos lanzados y el número de rebotes permitidos a cada uno para conseguir que nuestros resultados se asemejen todo lo posible a la realidad.

Por otro lado, otro de los elementos del escenario que nos permite configurar este software es el tipo de antena a emplear y los diferentes parámetros de la misma como por ejemplo su frecuencia de trabajo, su directividad, o la potencia que transmiten. En este trabajo, se van a emplear antenas omnidireccionales a las frecuencias de 2,4 Ghz y 868Mhz, y todas las antenas transmitirán 0,1mW de potencia (-10dBm).

De este modo y con todos los parámetros del código descritos anteriormente bien configurados, se consigue una buena aproximación de la realidad con un coste computacional relativamente bajo, ya que se calcula la potencia recibida en cada punto del espacio, pudiendo así obtener tanto mapas de cobertura de potencia a diferentes alturas, como perfiles de retardo en potencia ya que con este código también se calcula el tiempo de propagación.

### 3.2. Definición de Escenarios

Durante la realización de este proyecto, se recrearon diferentes escenarios con distintas características y dimensiones con el fin de determinar la propagación de las señales procedentes de las antenas Bluetooth del sistema, con distintas casuísticas, y determinar de ésta forma la cobertura en los distintos puntos de los escenarios, para poder colocar de este modo los sensores Bluetooth en aquellos lugares de la moto o del conductor en los que la cobertura vaya a ser buena y estable.

De entre todos los escenarios que se recrearon, podemos citar alguno como una moto en una carretera, y una antena colocada en la cuneta, o el mismo escenario pero con dos motos para observar cómo afecta la presencia de otro vehículo al funcionamiento del sistema. También se simuló un escenario con dos motos, una detrás de la otra y una antena colocada en la parte trasera de la misma para comprobar la interacción entre los dos vehículos.

Todos estos escenarios fueron simulados tanto con personas encima de la moto como sin ellas para comprobar el efecto que tenía el cuerpo humano en el funcionamiento de este sistema de comunicaciones.

Del mismo modo se realizaron las simulaciones tanto a 2,4Ghz como a 868Mhz, banda de frecuencias en la que también podría funcionar ZigBee, para observar la diferencia de funcionamiento de la red de sensores en una y otra banda, e intentar establecer en cuál de las dos bandas funcionará mejor el sistema.

A continuación se explican de manera más detallada estos escenarios que hemos citado.

### 3.2.1. Escenario 1 con persona y sin ella

En estas primeras simulaciones, en las que la antena transmisora es una fuente omnidireccional que emite a 2,4GHz y a 0,1mW de potencia, colocada justo frente a la moto, lo que se pretende es ver el comportamiento inicial de la red implantada en la moto cuando ésta está parada, y buscar la convergencia del código. Esto consiste en buscar una correcta interpretación de los resultados, ya que es posible que por diferentes motivos o errores no obtengamos los resultados deseados que se asemejen al escenario real, es decir, en esta primera fase además de obtener los primeros resultados lo que se pretende es calibrar el algoritmo de trazado de rayos con el que vamos a trabajar. Una clara muestra de la necesidad de calibrar dicho código son la gran cantidad de errores que aparecieron al inicio de este proyecto, como por ejemplo que al colocar una antena demasiado cerca de la moto, no se le daba al frente de onda el espacio suficiente para poder expandirse y por lo tanto no se notaban los efectos que se producían en la moto o en su conductor.

Dicho esto, a continuación se describen los dos escenarios:

En ambos escenarios se han empleado los mismos parámetros de simulación y las mismas dimensiones. Por lo tanto la única, aunque gran diferencia entre ellos es que en el segundo se ha introducido una persona sobre la moto, lo que provoca algunas diferencias en los resultados obtenidos en uno y en otro.

En las siguientes imágenes se pueden observar la estructura de ambos escenarios.

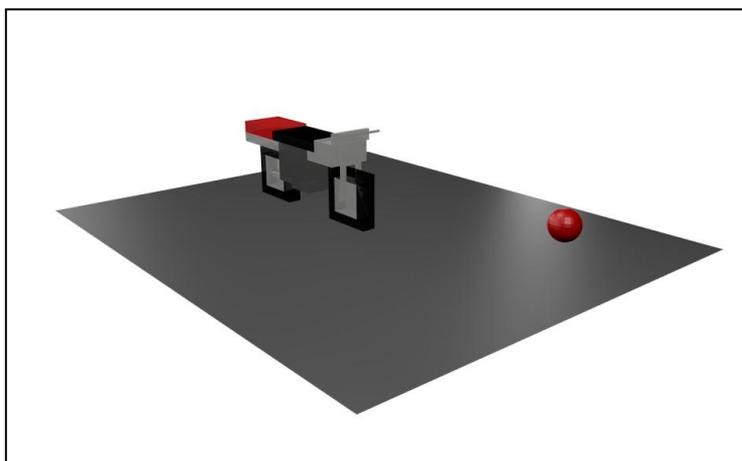


Fig.3.1. Escenario 1 sin persona

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	6	5	3
Posición Moto	4	2.5	0
Posición Antena	0.25	2.5	0.75

Tabla.3.1. Dimensiones y posición de elementos del escenario 1 sin persona

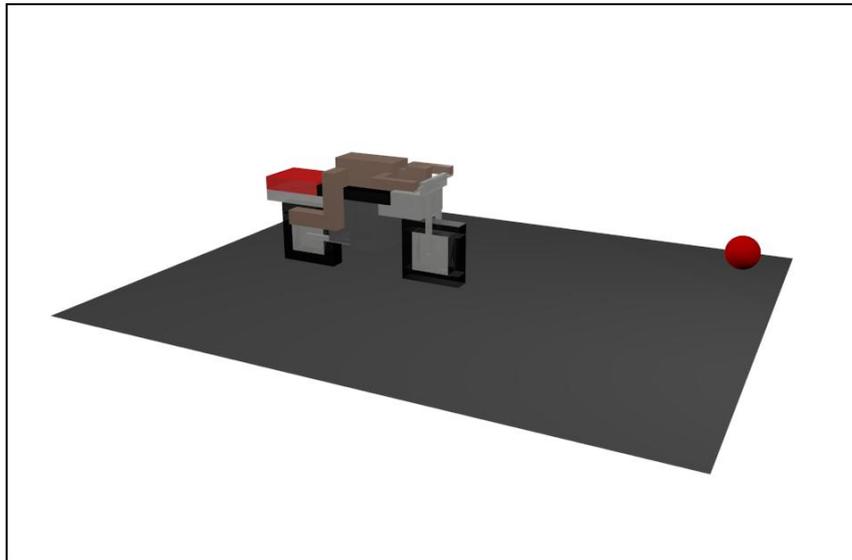


Fig.3.2. Escenario 1 con persona

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	6	5	3
Posición Moto (m)	4	2,5	0
Posición Antena (m)	0,25	2,5	0,75
Posición Persona (m)	5.1	2.5	1.45

Tabla.3.2. Dimensiones y posición de elementos del escenario 1 con persona

Tanto las dimensiones de los escenarios como la posición de la moto y la antena o la persona en cada uno de ellos corresponden a las que podemos apreciar en las tablas 3.1 y 3.2, estando todas estas posiciones dadas en metros. Como se puede observar la moto está centrada a 4 metros en el eje X, a 2,5 metros en el eje Y, y situada sobre el suelo como es lo normal.

Se han configurado los siguientes parámetros de simulación:

- Escenario dividido en cuboides de 0,1m.
- Antena omnidireccional con polarización lineal vertical.
- Potencia de transmisión 0,1mW.
- Incremento de lanzamiento de rayos de la antena: incremento en phi y en theta de  $\pi/180$ .
- Número de rebotes 6.
- Frecuencia de operación 2.4 GHz
- Tasa de transmisión 250Kbps.

Como ya hemos dicho estos parámetros son los empleados para las simulaciones de los primeros escenarios, con la única diferencia de que se introduce una persona en uno de ellos como se ha podido apreciar en las imágenes anteriores.

### 3.2.2. Escenario 2 con personas y sin ellas

Para poder continuar con la calibración del código y al mismo tiempo comenzar a estudiar alguna situación real (moto en carretera con una antena en la cuneta) del funcionamiento del sistema implantado en la moto, se definieron dos nuevos escenarios cuya única diferencia entre ambos tal y como ocurría en el caso anterior, es que en uno va una persona sobre la moto y en el otro no.

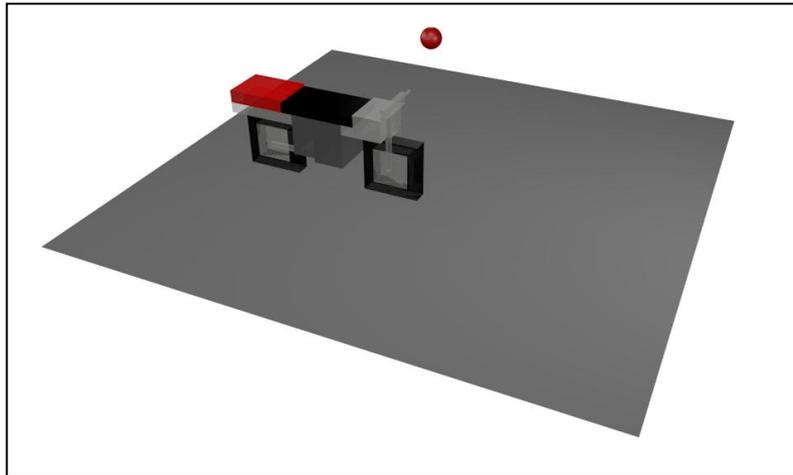


Fig.3.3. Escenario 2 sin persona

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	6	6	3
Posición Moto (m)	4	3.5	0
Posición Antena (m)	4	0.75	0.75

Tabla.3.3. Dimensiones y posición de elementos del escenario 2 sin persona

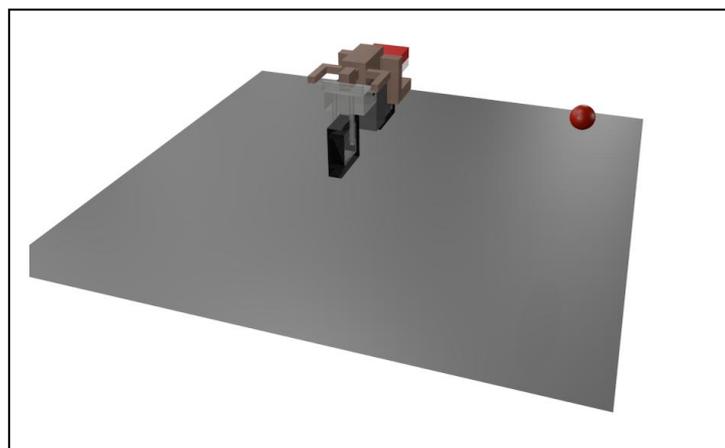


Fig.3.4. Escenario 2 con persona

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	6	6	3
Posición Moto (m)	4	3,5	0
Posición Antena (m)	4	0,75	0,75
Posición Persona (m)	5.1	3.5	1.45

Tabla.3.4. Dimensiones y posición de elementos del escenario 2 con persona

Tanto las dimensiones del escenario como la posición de los distintos elementos como la moto la antena o la persona en el caso en el que está presente, corresponden a las que podemos apreciar en las tablas 3.3 y 3.4 para el escenario sin persona y con persona respectivamente, estando todas estas posiciones dadas en metros. Como se puede observar la moto está centrada a 4 metros en el eje X, a 3,5 metros en el eje Y, y situada sobre el suelo.

Los parámetros de simulación que se han configurado han sido los mismos que para el escenario 1, empleando los mismos valores para los distintos parámetros como número de rebotes, frecuencia, etc., es decir, con respecto al escenario 1 lo que ha cambiado han sido las dimensiones del escenario y la ubicación de los elementos que forman parte del mismo como son la antena y la moto.

### 3.2.3. Escenario 3 con persona y sin ella

Tras haber definido los escenarios anteriores y haber calibrado de manera correcta el software de trazado de rayos con el que estamos trabajando, se procedió a definir nuevos escenarios pero en este caso más complejos. Con esto lo que se pretende es analizar el comportamiento de la red de sensores implantada en la moto, en el caso de que haya otra moto cerca con el mismo sistema de comunicaciones implantado, así como analizar la forma en que afecta la propagación multirayecto al funcionamiento de la red.

De este modo, se creó un escenario formado por dos motos, las cuales podrían estar en una carretera, y una antena situada en la cuneta de la misma a una altura de 1,5m, con lo que las dos motos podrían recibir la potencia transmitida por la antena, y por lo tanto los datos que dicha antena transmita.

En la siguiente tabla se especifican las dimensiones del escenario así como la colocación de los diferentes elementos como las motos y la antena para el caso en el que no hay ninguna persona sobre la moto.

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	14	8	3
Posición Moto 1 (m)	2	4	0
Posición Moto 2 (m)	10	4	0
Posición Antena (m)	6	0,75	1,5

Tabla.3.5. Dimensiones y posición de elementos del escenario 3 sin persona

Como se puede observar se trata de un escenario más grande, en el que interviene dos motos colocadas una detrás de otra, dejando una distancia de unos 5 o 6 metros entre la rueda trasera de la primera y la rueda delantera de la segunda, y un antena colocada en la cuneta a una altura de 1,5 m y aproximadamente entre las dos motos.

Los parámetros de simulación que se han configurado (frecuencia de trabajo, número de rebotes, potencia transmitida...) han sido los mismos que en los casos anteriores, cambiando solo las dimensiones y elementos que intervienen en el escenario.

De manera más gráfica se puede observar en la siguiente figura el escenario que se ha explicado.

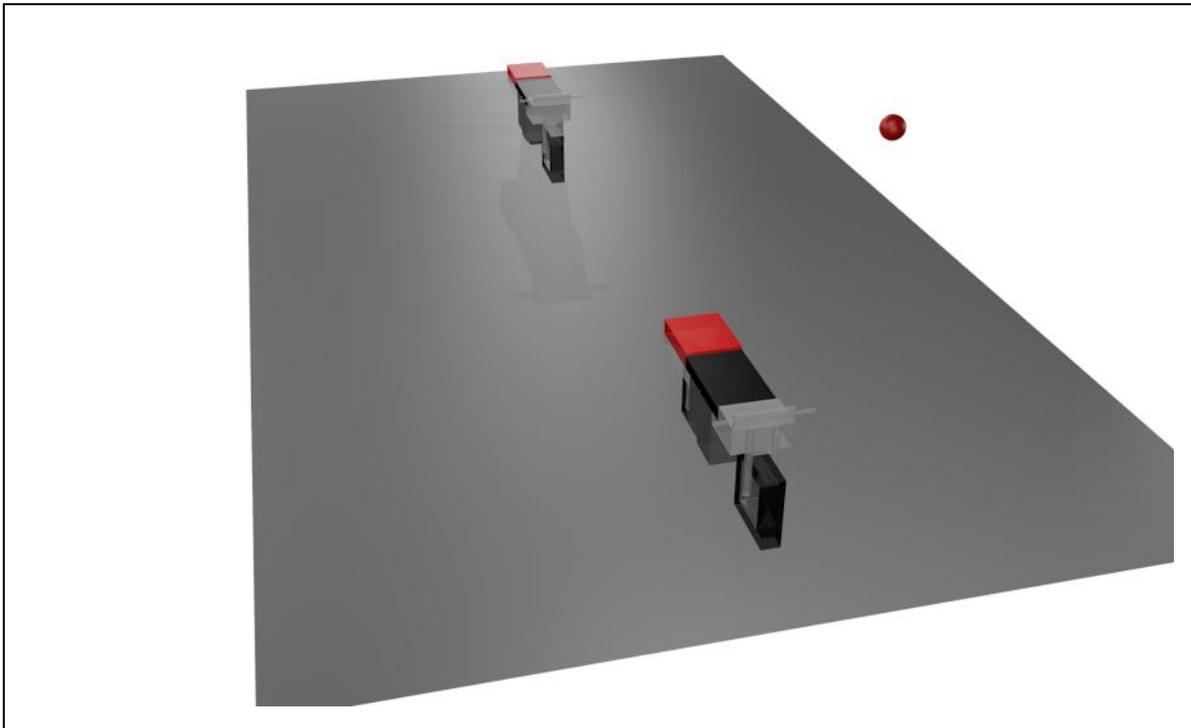


Fig.3.5. Escenario 3 sin personas

Una vez obtenidos los resultados de este escenario, para poder analizar la influencia del cuerpo humano en el funcionamiento del sistema de comunicaciones, se introdujeron dos personas encima de ambas motos, dando así lugar a un nuevo escenario con los mismos parámetros y dimensiones que el anterior, a excepción de las dos personas que se han colocado sobre las motos.

En la siguiente tabla y en las siguientes figuras se observa de manera muy clara como quedaría dicho escenario.

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	14	8	3
Posición Moto 1 (m)	2	4	0
Posición Moto 2 (m)	10	4	0
Posición Persona 1 (m)	3,1	4	1,45
Posición Persona 2 (m)	11,1	4	1,45
Posición Antena (m)	6	0,75	1,5

Tabla.3.6. Dimensiones y posición de elementos del escenario 3 con personas

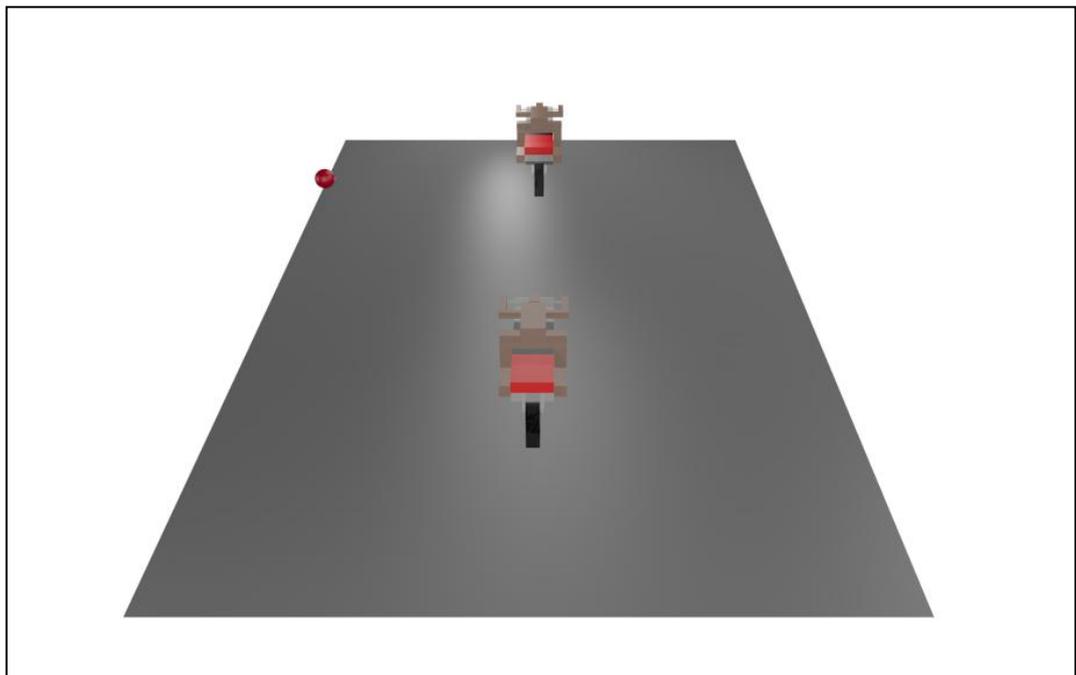


Fig.3.6. Escenario 3 con personas

### 3.2.4. Escenario 4 con personas y sin ellas

Otro de los casos o de los escenarios que se estudio en el presente proyecto, fue la interacción entre dos motos directamente entre ellas, de modo que el conductor de uno de los vehículos de dos ruedas pueda hablar con el otro y viceversa, creando así una comunicación bidireccional entre ambas.

Para ello se recreó un escenario con dos motos en una carretera, una moto detrás de la otra a unos 5 o 6 metros de distancia, pero esta vez en lugar de estar la antena colocada en la cuneta de la carretera, la antena estará colocada en la moto en sí, concretamente en la parte trasera de la moto que va en primer lugar.

Este caso y el caso anterior con las dos motos y la antena en la cuneta, quizás sean los más interesantes ya que son casos reales que se van a producir en el momento de implantar la red de sensores en la moto. Concretamente este último puede ser de especial interés ya que hasta el momento no se había colocado ninguna de las antenas sobre la misma moto y en la realidad se tendrán que colocar gran cantidad de ellas en la moto si deseamos que nuestro sistema funcione correctamente. Tras realizar las correspondientes simulaciones que posteriormente explicaremos, observaremos cómo es posible la implantación del sistema para que los conductores de ambas motos puedan interactuar entre sí.

Los parámetros de simulación (número de rebotes, frecuencia, etc.) que se han configurado en este escenario son comunes a los anteriores.

A continuación podemos ver de manera más detalla en qué consiste el escenario que se ha recreado.

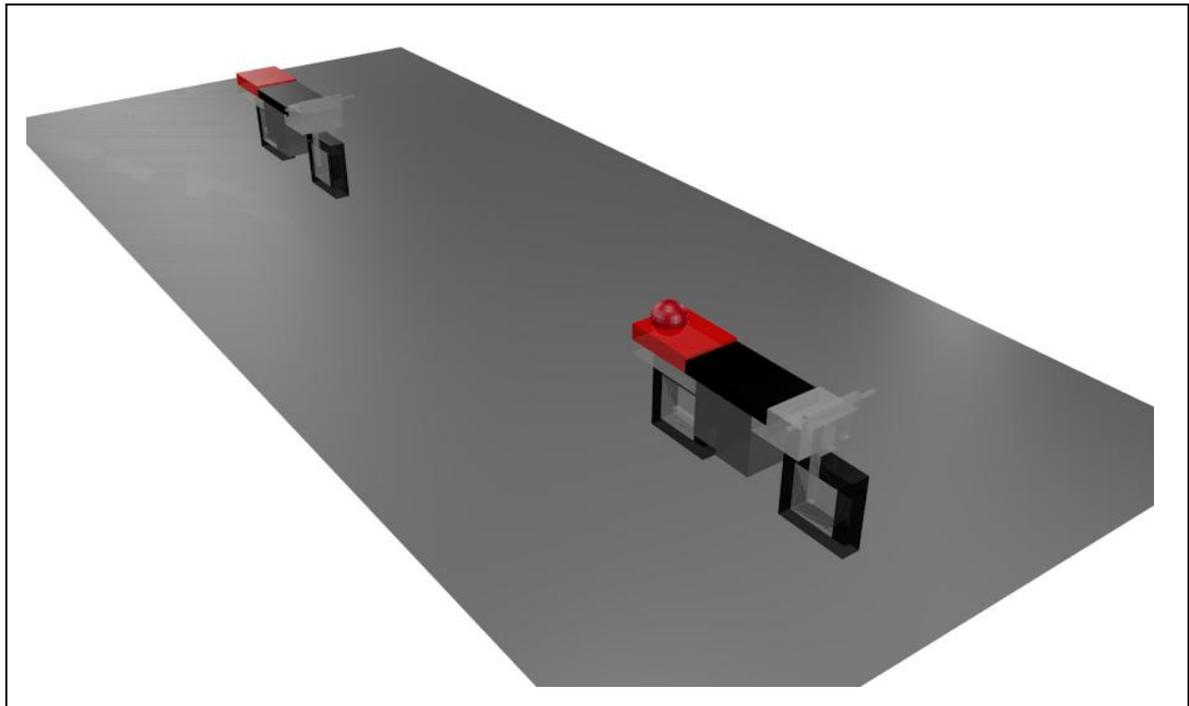


Fig.3.7. Escenario 4 sin personas

Las dimensiones de este escenario y la posición de los distintos elementos que aparecen en él se describen en la siguiente tabla:

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	14	6	3
Posición Moto 1 (m)	2	3,5	0
Posición Moto 2 (m)	10	3,5	0
Posición Antena (m)	3	3,5	1

Tabla.3.7. Dimensiones y posición de elementos del escenario 4 sin personas

Posteriormente y dado que lo normal será que las motos tengan conductor, se introdujeron dos personas, una sobre cada una de las motos dando lugar al nuevo escenario que podemos ver en la siguiente imagen.

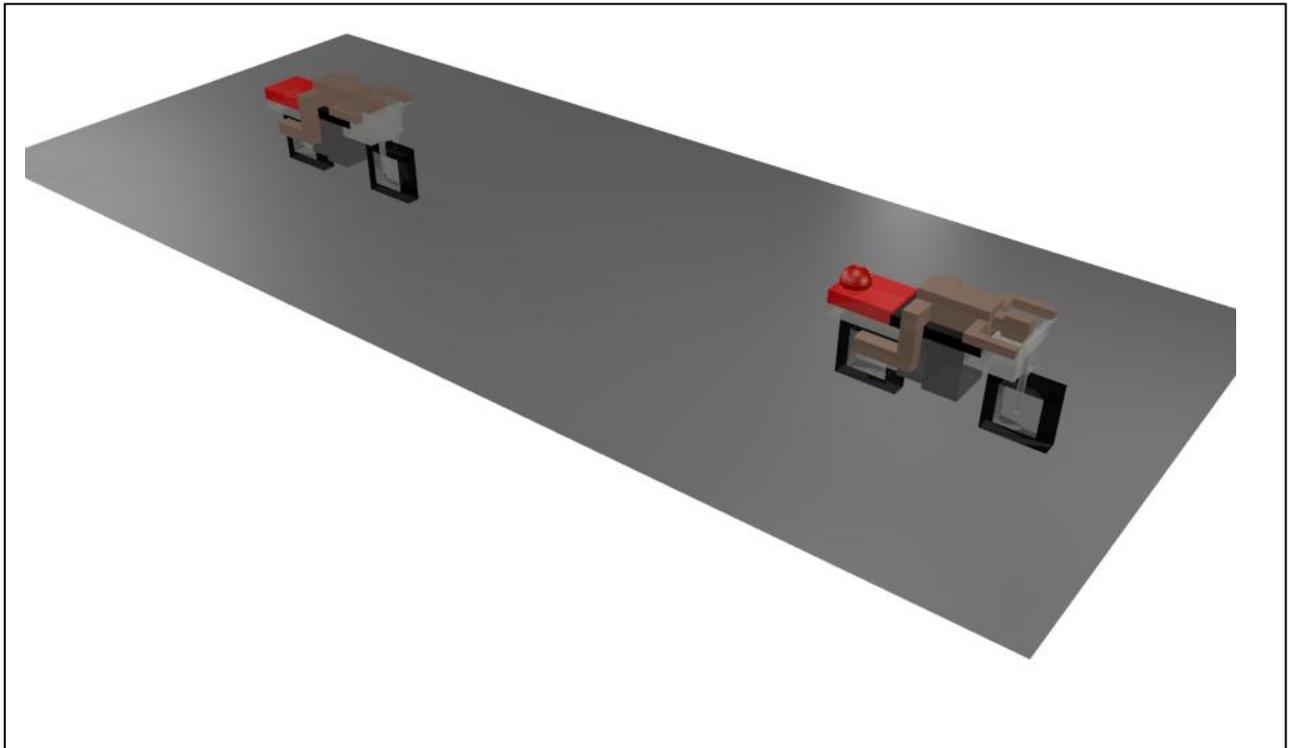


Tabla.3.8. Dimensiones y posición de elementos del escenario 4 con personas

Las dimensiones y posición exacta de los elementos de este escenario (antena, motos y personas) se muestran en la siguiente tabla:

	Eje x	Eje y	Eje z
Dimensiones Escenario (m)	14	8	3
Posición Moto 1 (m)	2	4	0
Posición Moto 2 (m)	10	4	0
Posición Persona 1 (m)	3,1	4	1,45
Posición Persona 2 (m)	11,1	4	1,45
Posición Antena (m)	6	0,75	1,5

Tabla.3.8. Dimensiones y posición de elementos del escenario 4 con personas

Destacar que las simulaciones para todos los escenarios descritos anteriormente, se realizaron a la frecuencia de 2,4 GHz, y a la frecuencia de 868MHz para observar las diferencias en el funcionamiento del sistema a una y otra frecuencia, y estudiar si es posible su implantación con otra tecnología inalámbrica que no sea Bluetooth, como podría ser el caso de ZigBee en la frecuencia de 868MHz.

### 3.2.5. Escenarios para analizar problemas de convergencia

Finalmente se definieron escenarios mucho más próximos a la realidad, es decir, lo más probable es que la distancia entre las dos motos en un trayecto sea mayor que la planteada hasta el momento, ya que hasta ahora no se han definido escenarios de grandes dimensiones, y aunque el estudio de los casos anteriores resulta válido, cuanto más se asemeje el escenario definido a la realidad, mejores resultados se conseguirán extraer del estudio.

Por ello se creó un escenario con las dos motos y las personas y la antena en la parte trasera de la primera moto, al igual que en el caso anterior aunque de mayores dimensiones, y otro escenario, en el que en lugar de estar la antena en la primera moto, se colocó en la parte delantera de la segunda moto, ya que de este modo con una antena en cada moto se podría crear un enlace de comunicación bidireccional entre ambas.

Las dimensiones de los escenarios y la posición de los distintos elementos que intervienen en ellos se muestran en las siguientes tablas.

	Eje X	Eje Y	Eje X
<b>Dimensiones Escenario (m)</b>	50	6	3
<b>Posición Moto 1 (m)</b>	2	3,5	0
<b>Posición Moto 2 (m)</b>	46	3,5	0
<b>Posición Persona 1 (m)</b>	3,1	3,5	1,45
<b>Posición Persona 2 (m)</b>	47,1	3,5	1,45
<b>Posición Antena (m)</b>	3	3,5	1

Tabla.3.9. Dimensiones y posición de elementos del escenario grande con antena en moto 1

	Eje X	Eje Y	Eje X
<b>Dimensiones Escenario (m)</b>	50	6	3
<b>Posición Moto 1 (m)</b>	2	3,5	0
<b>Posición Moto 2 (m)</b>	46	3,5	0
<b>Posición Persona 1 (m)</b>	3,1	3,5	1,45
<b>Posición Persona 2 (m)</b>	47,1	3,5	1,45
<b>Posición Antena (m)</b>	45	3,5	1

Tabla.3.10. Dimensiones y posición de elementos del escenario grande con antena en moto 2

Los parámetros escogidos para realizar las simulaciones de estos dos escenarios en cuanto a frecuencia de trabajo (2,4GHz), número de rebotes (6) o potencia transmitida (0,1mW), fueron los mismos que en los cuatro escenarios anteriores, con la excepción de la resolución. Anteriormente al tratarse de escenarios de pequeñas dimensiones se empleó una resolución de 0,1m, sin embargo en este caso se emplearán cuboides de 0,2 metros, 0,5 metros y 1 metro dado que al tratarse de escenarios de mayor tamaño, se produce divergencia, es decir, llega un momento en el que la distancia de separación entre un rayo y otro es mayor que el tamaño de un cuboide, y en ese caso dicho cuboide no captura ningún rayo de potencia, o no captura todos los rayos que debería y entonces los resultados no serán válidos. Este fenómeno se observará en el apartado de análisis de resultados, al estudiar los resultados obtenidos de estas simulaciones.

### 3.3. Análisis de los Resultados

Como ya se ha podido comprobar, muchos han sido los escenarios que se han definido para la realización de este proyecto, y por lo tanto también se han podido obtener gran cantidad de resultados como se podrá observar a continuación.

Dicho esto, en este apartado lo que se pretende es realizar un resumen en el que se pueda extraer una serie de conclusiones a partir de alguno de los escenarios definidos

anteriormente, que nos permitan validar el funcionamiento del sistema de comunicaciones que se pretende implantar.

Para realizar este estudio se han tenido en cuenta principalmente tres factores que nos permitirán observar las diferentes distribuciones de potencia, dependiendo de la configuración de cada uno de ellos. Estos factores son los siguientes:

- Dimensiones del escenario y ubicación de los diferentes elementos que en el intervienen como son la moto, la persona y la antena, y la distancia de cada uno de estos elementos a la antena transmisora.
- Influencia de una persona en el funcionamiento del sistema.
- Frecuencia de trabajo.

Para poder demostrar que las conclusiones son ciertas, se incluirán planos bidimensionales de potencia, radiales de potencia, y perfiles de retardo en potencia de las diferentes situaciones.

### 3.3.1. Influencia de una persona en la distribución de potencia del escenario

En primer lugar se va a analizar la influencia que tendría una persona en el funcionamiento del sistema.

Para ello a continuación se van a mostrar los resultados obtenidos tras simular el escenario 2 con persona y sin persona, y se realizará una comparación entre ambos.

#### 3.3.1.1. Mapas bidimensionales de potencia

En primer lugar se muestra una representación en 3D de la moto y el plano de potencia para poder comprender de manera más fácil los planos de potencia mostrados posteriormente.

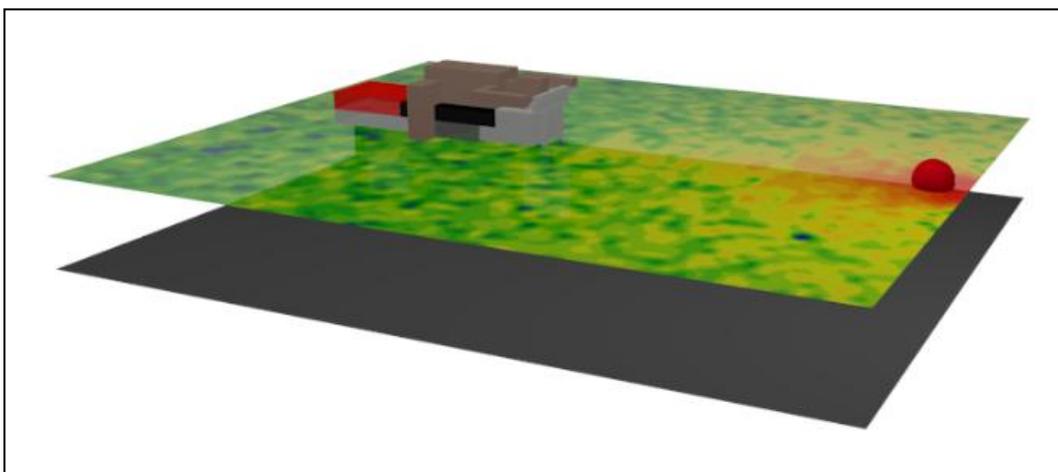
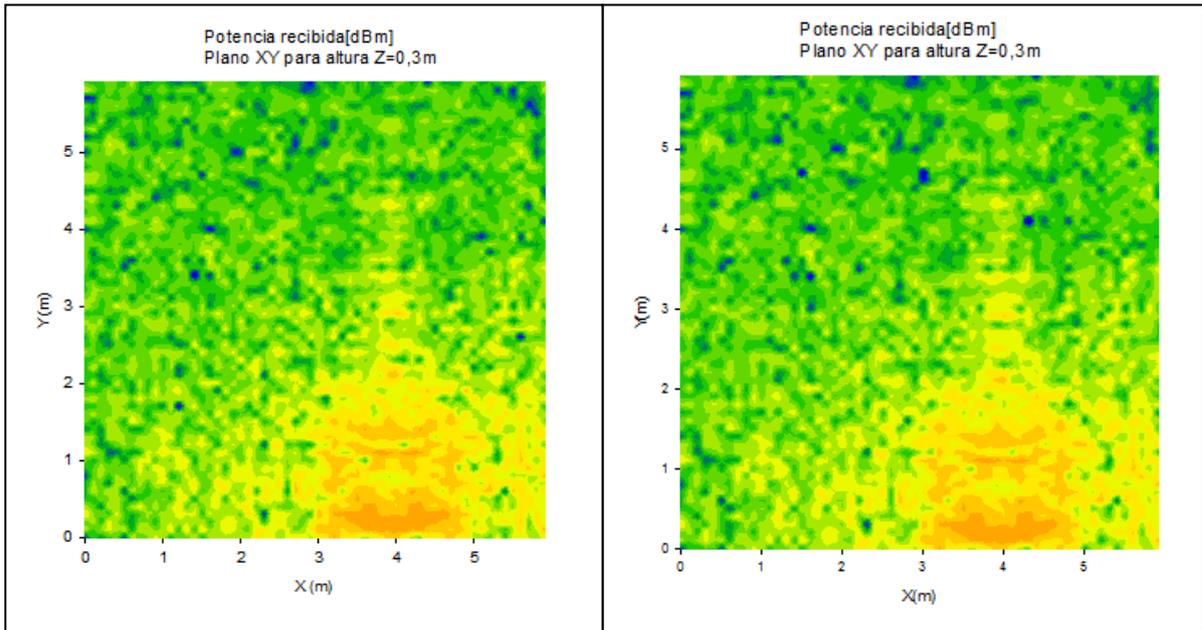
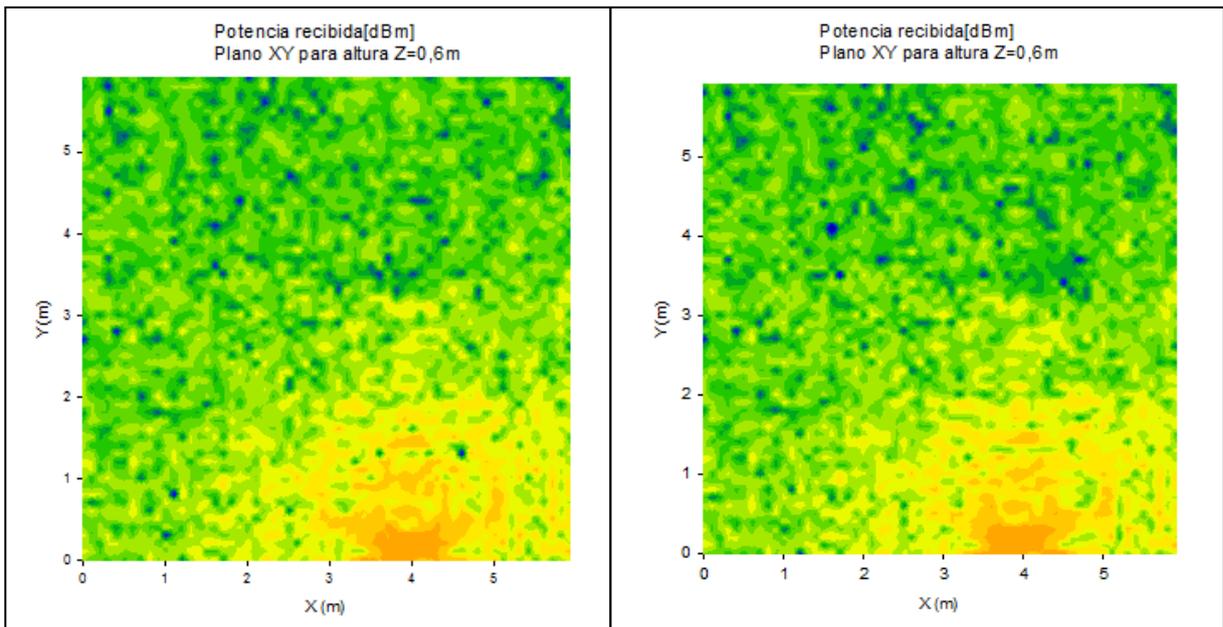


Fig.3.9. Representación 3D de la moto y el plano de potencia a la altura de 0,7m



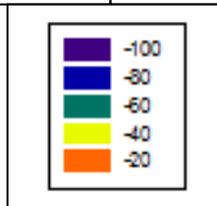
(a) Escenario 2 sin persona

(a) Escenario 2 con persona

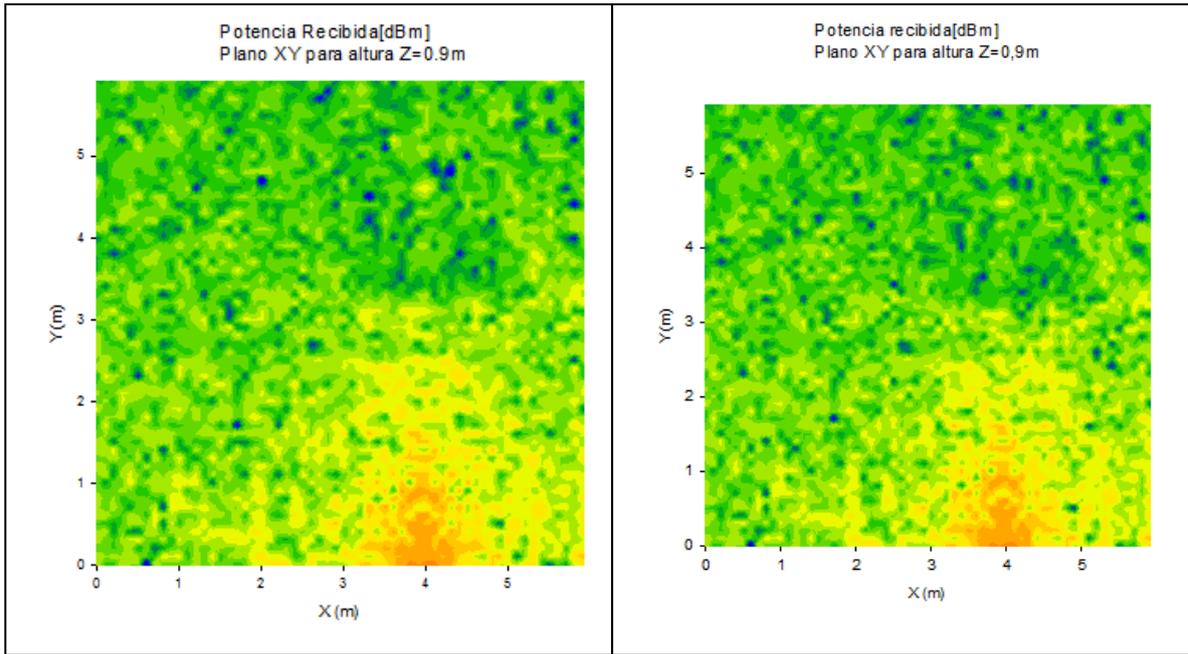


(b) Escenario 2 sin persona

(b) Escenario 2 con persona

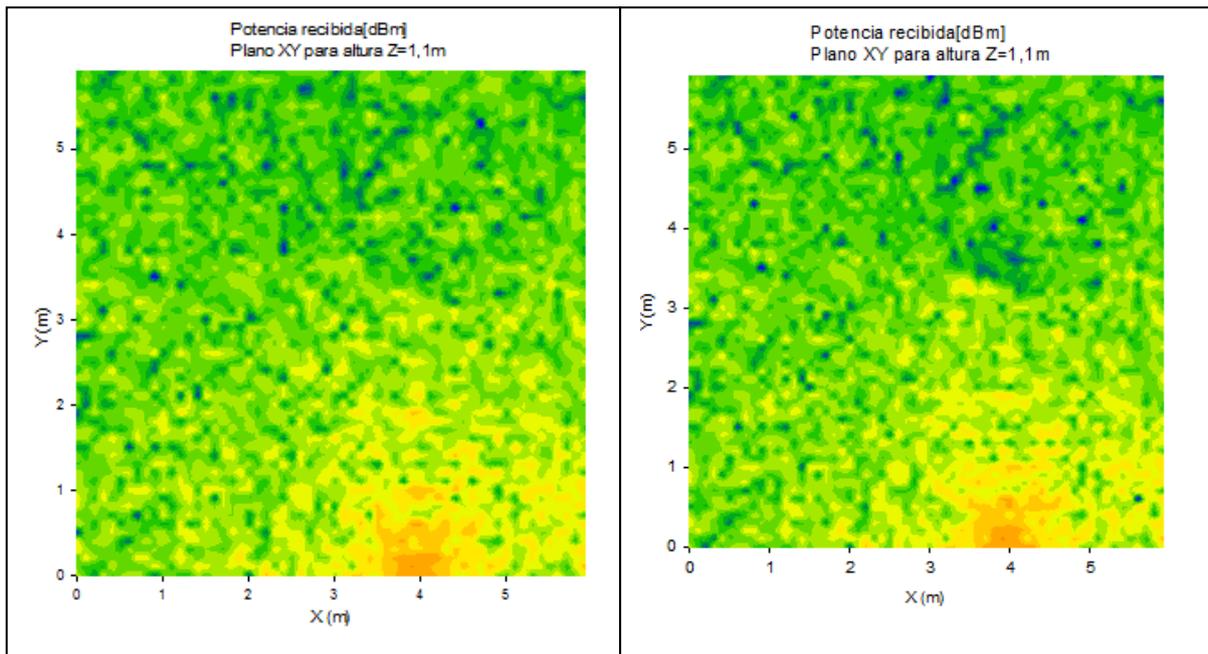


Leyenda



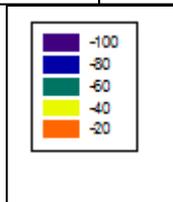
(c) Escenario 2 sin persona

(c) Escenario 2 con persona



(d) Escenario 2 sin persona

(d) Escenario 2 con persona



Leyenda

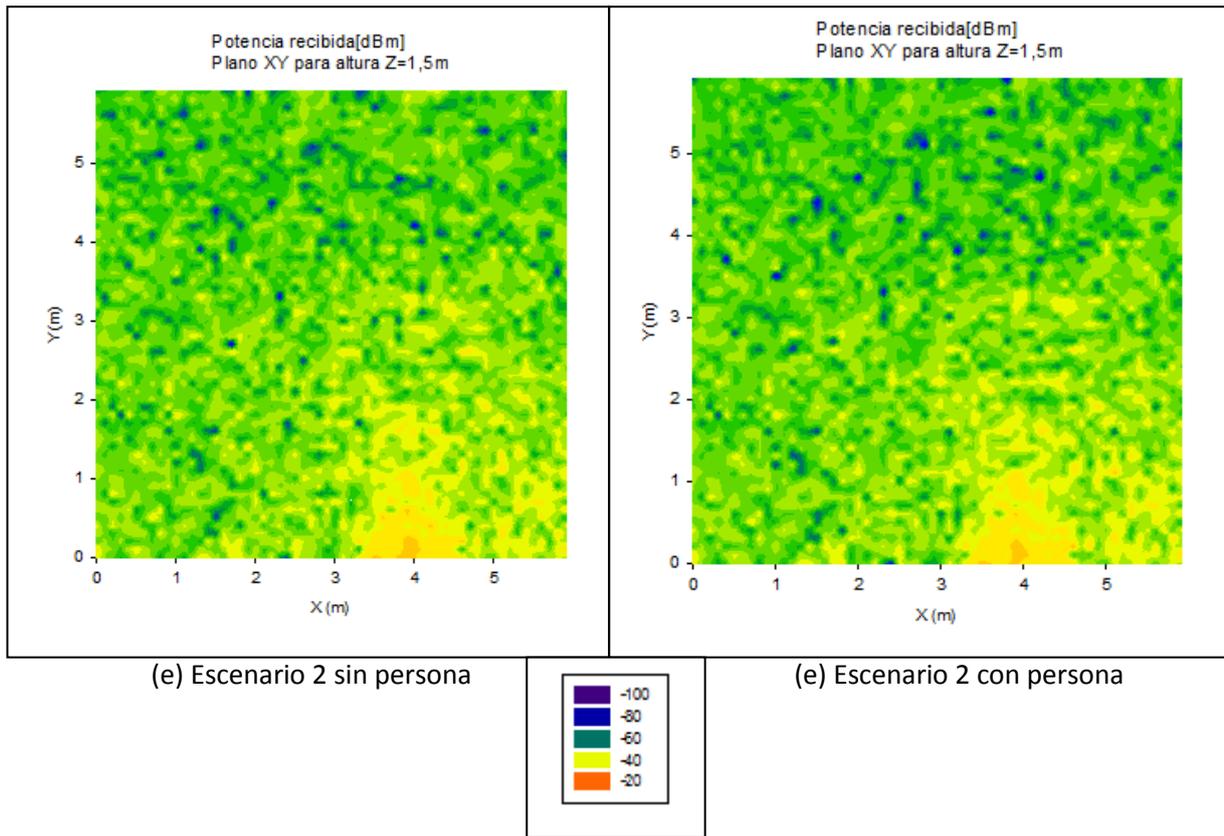


Fig.3.10. Mapas bidimensionales de potencia para el escenario con persona y sin persona, para distintos cortes del plano XY: (a) 0,3metros, (b) 0,6metros, (c) 0,9metros, (d) 1,1metros, (e) 1,5m.

En las imágenes de la figura 3.10 se muestran los datos correspondientes a la distribución de potencia recibida (dBm). En este caso se toman los valores de potencia recibida a diferentes alturas de interés, correspondientes a las diferentes alturas de la moto que nos puede interesar analizar para colocar alguno de los sensores que queremos implantar.

También podemos decir que los niveles de mayor potencia recibida se observan en todos los planos en la zona cercana a la antena transmisora, mientras que en los alrededores de la zona en la que se encuentra la moto(X=4, Y=3,5) tal y como se observa en el plano a la altura de 1,1m, se reducen los niveles de potencia, debido a la influencia que tanto la moto como el cuerpo humano ejercen en la propagación de la señal como por ejemplo su absorción.

Además se muestra la distribución de potencia recibida tanto en el caso del escenario con persona, como del de sin persona, y aunque prácticamente no se observen diferencias a simple vista, si nos fijamos de manera detallada especialmente en los planos a las alturas de 0,9m y de 1,1m que van a ser los planos en los que más intervenga el conductor, se pueden apreciar algunas diferencias en los niveles de potencia recibida, que a continuación se observaran de manera más clara calculando las radiales.

3.3.1.2. Radiales de potencia

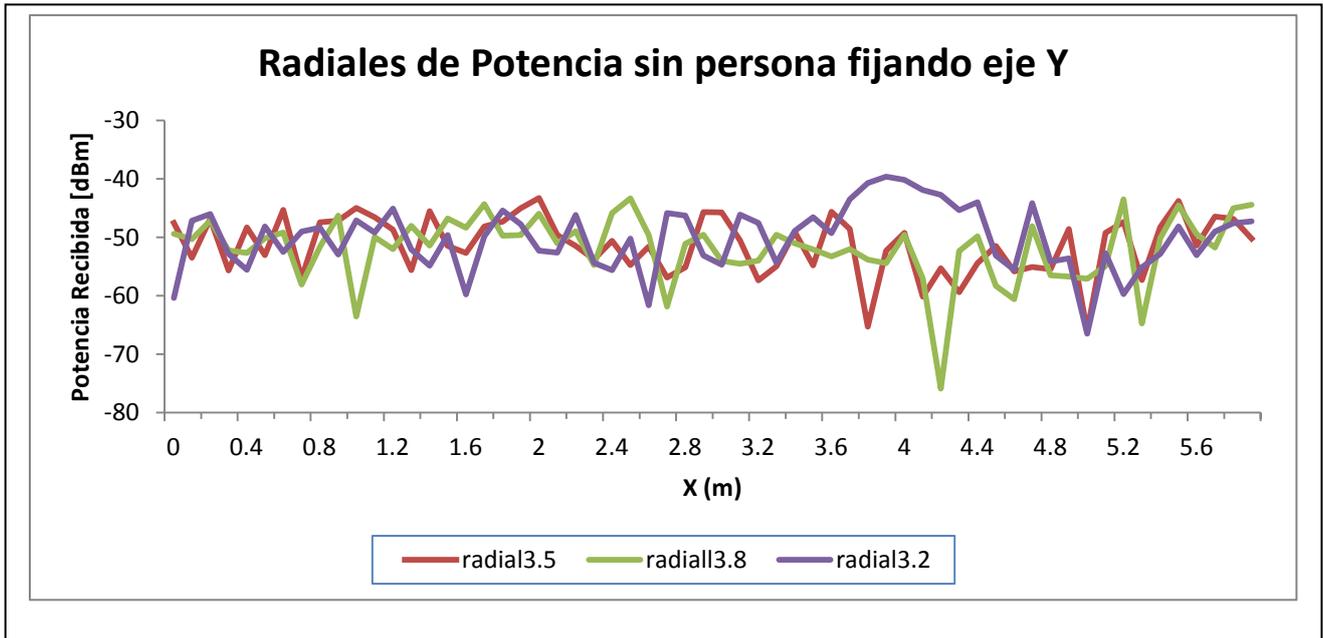


Fig.3.11. Comparativa radiales de potencia para distintos valores de Y en el caso sin persona.

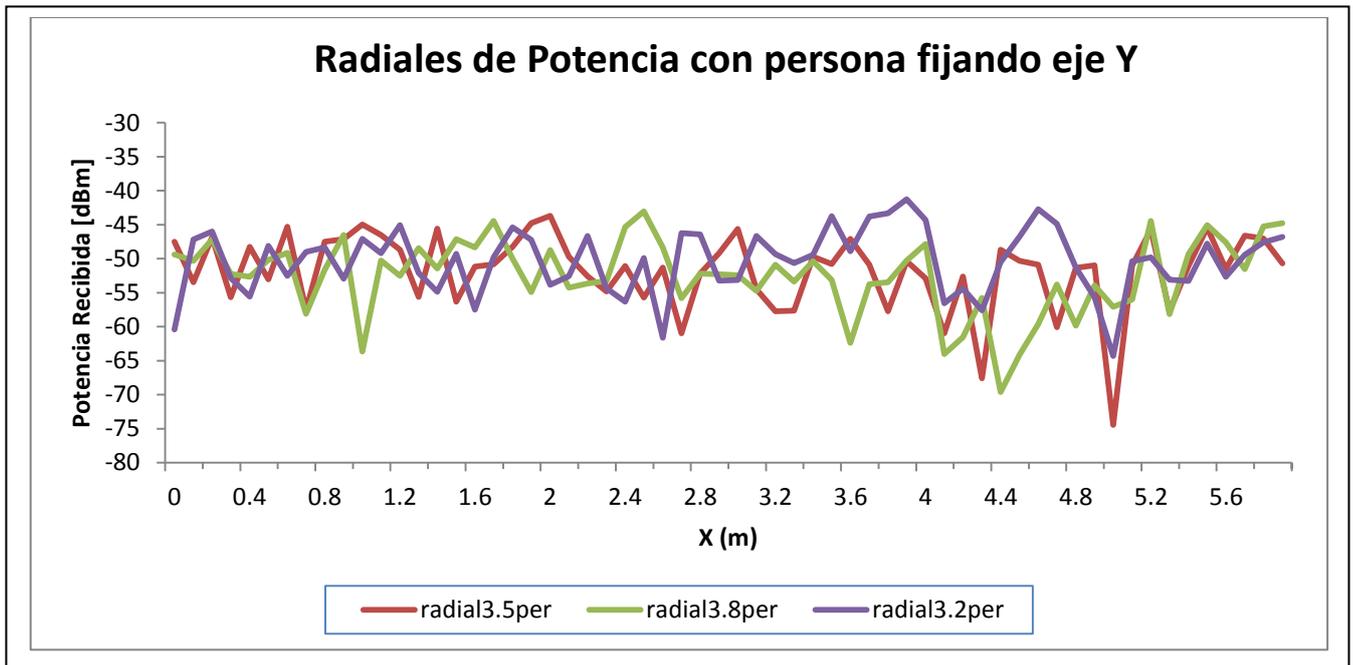


Fig.3.12. Comparativa radiales de potencia para distintos valores de Y en el caso con persona.

En las figuras anteriores se observan las diferentes radiales de los escenarios sin persona y con persona respectivamente, a una altura en la que prácticamente con total seguridad se colocará algún sensor Bluetooth o ZigBee (0,7m), en las inmediaciones de la moto.

Podemos ver como el mínimo de potencia recibida es menor en el caso del escenario con persona, dada la negativa influencia que tendrá en el nivel de potencia recibida, debido a la gran cantidad de rayos que este elemento absorbe.

Por otro lado se observa que aunque a lo largo de todas las radiales de ambos escenarios se producen diferencias, es en las inmediaciones de la zona donde se encuentran los elementos involucrados en este escenario (centrados en  $X=4\text{m}$ ), donde se reciben los niveles de potencia más bajos. Concretamente en el escenario con persona, la potencia recibida cae de manera brutal, dando lugar a zonas en las que se recibe muy poca señal.

Además merece la pena destacar el efecto negativo que tiene tanto la moto como la persona para la propagación de la señal, ya que si comparamos en cualquiera de las dos gráficas el nivel de potencia recibida entre la radial en  $Y=3,2\text{m}$  (radial justo antes de llegar a la moto desde la antena), y la radial en  $Y=3,8\text{m}$  (radial una vez pasada la moto desde la antena), podemos ver como la caída en el nivel de potencia es considerable.

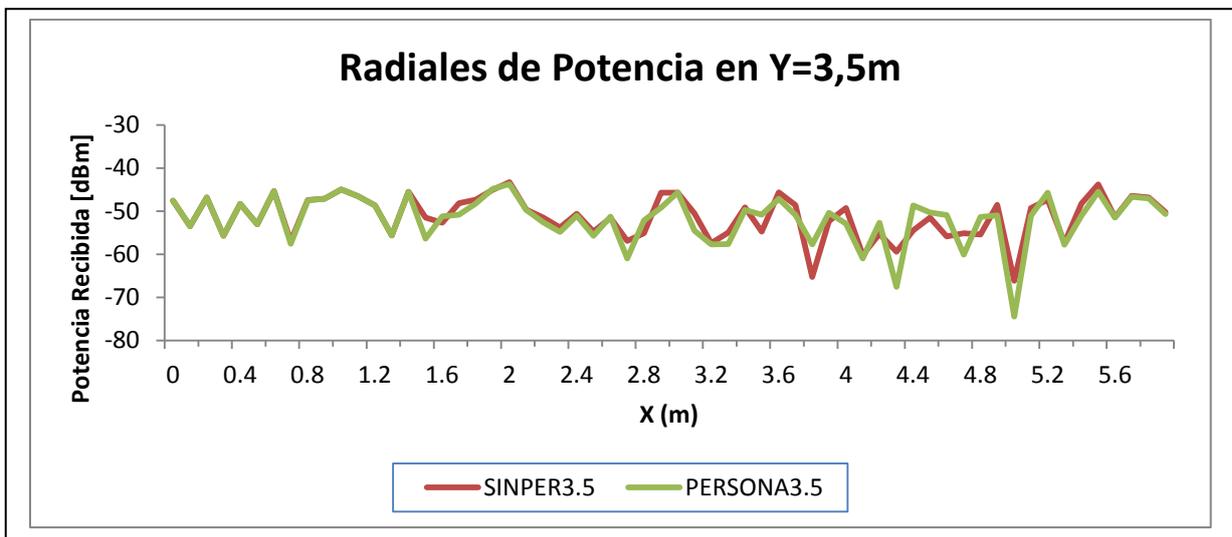


Fig.3.13. Comparativa radiales de potencia para  $Y=3,5\text{m}$  del caso con persona y sin ella.

En la figura 3.13 se muestra una comparativa entre la radial obtenida en el escenario sin persona y la obtenida en el escenario con persona. Estas dos radiales atraviesan la moto de la parte delantera a la parte trasera, justo por la mitad.

Como se puede ver en la figura 3.14 si nos alejamos de la zona donde se encuentran situadas la moto, y la moto y la persona, no hay diferencia entre los dos escenarios. Sin embargo, en las inmediaciones de la moto se observa una diferencia que oscila entre unos 8 y -8 dB aproximadamente.

Los valores de diferencia positiva nos indican que la potencia recibida en el escenario con persona es menor que la potencia recibida en el escenario sin persona en ese punto en concreto; mientras que los valores de diferencia negativa nos dicen que la potencia recibida en un punto en concreto, es mayor en el escenario con persona que en el de sin persona.

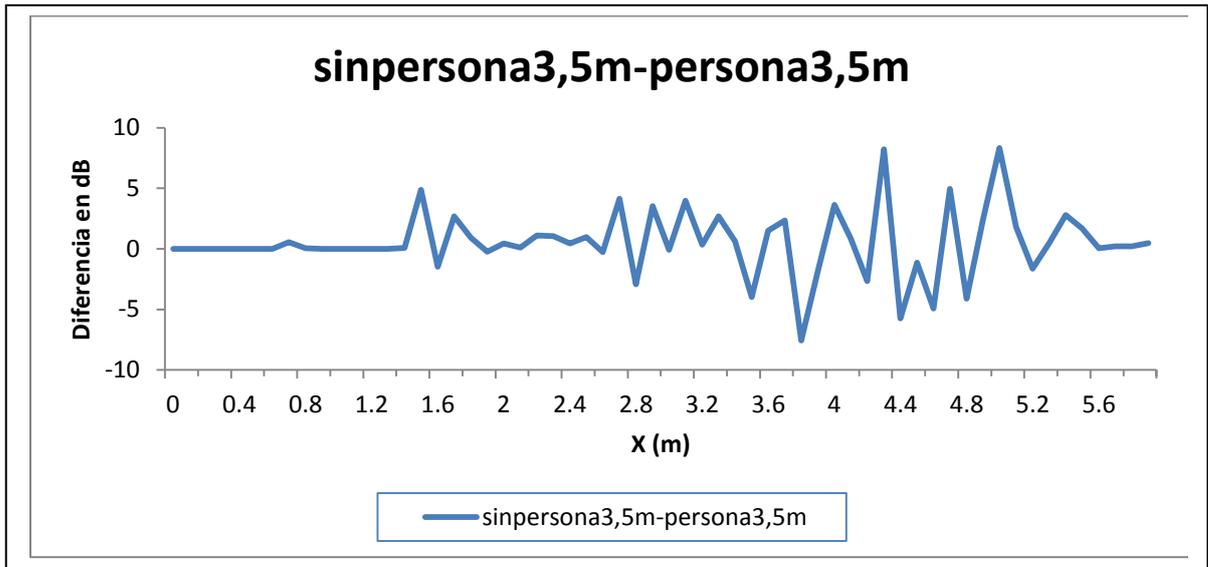


Fig.3.14. Diferencia entre la radial a 3,5m del escenario sin persona y la del escenario con persona

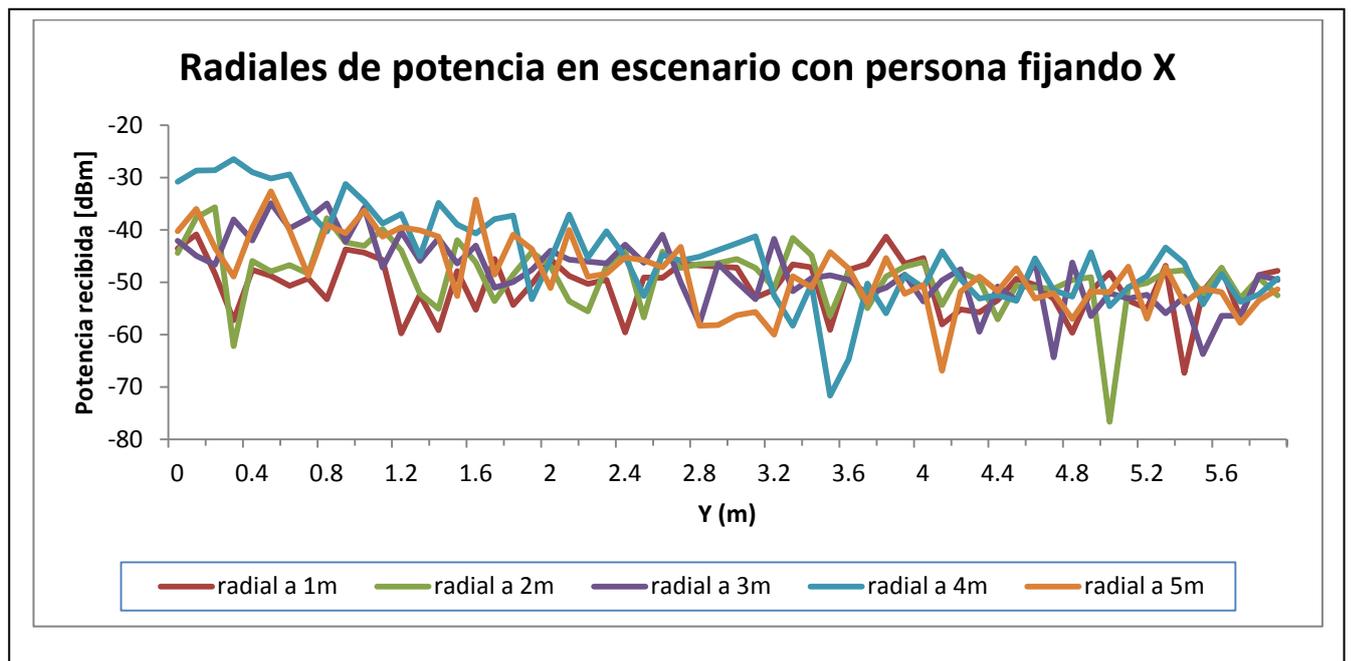


Fig.3.15. Comparativa radiales de potencia para distintos valores de X en el caso con persona.

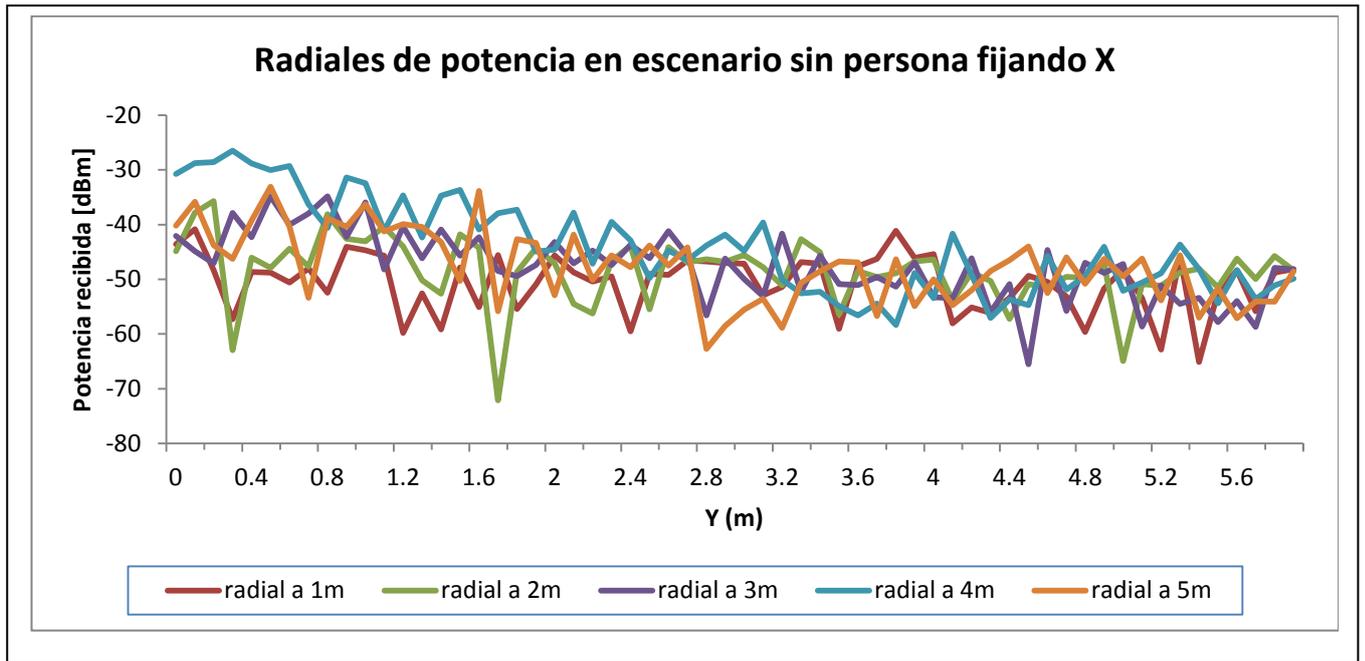


Fig.3.16. Comparativa radiales de potencia para distintos valores de X en el caso sin persona

En las figuras 3.15 y 3.16 podemos ver las radiales de potencia obtenidas de los escenarios sin persona y con persona respectivamente, calculadas a una altura de 0,7m, para diferentes distancias del eje X, es decir en este caso las radiales cortaran la moto en sentido perpendicular a la misma.

En la figura 3.17 podemos observar la radial obtenida a una distancia de 4 metros en el eje X para una altura de 0,7m. Como se puede ver el nivel de potencia recibida en los alrededores de la moto disminuye, especialmente en el escenario en el que tenemos a la persona, con respecto al resto de zonas del espacio.

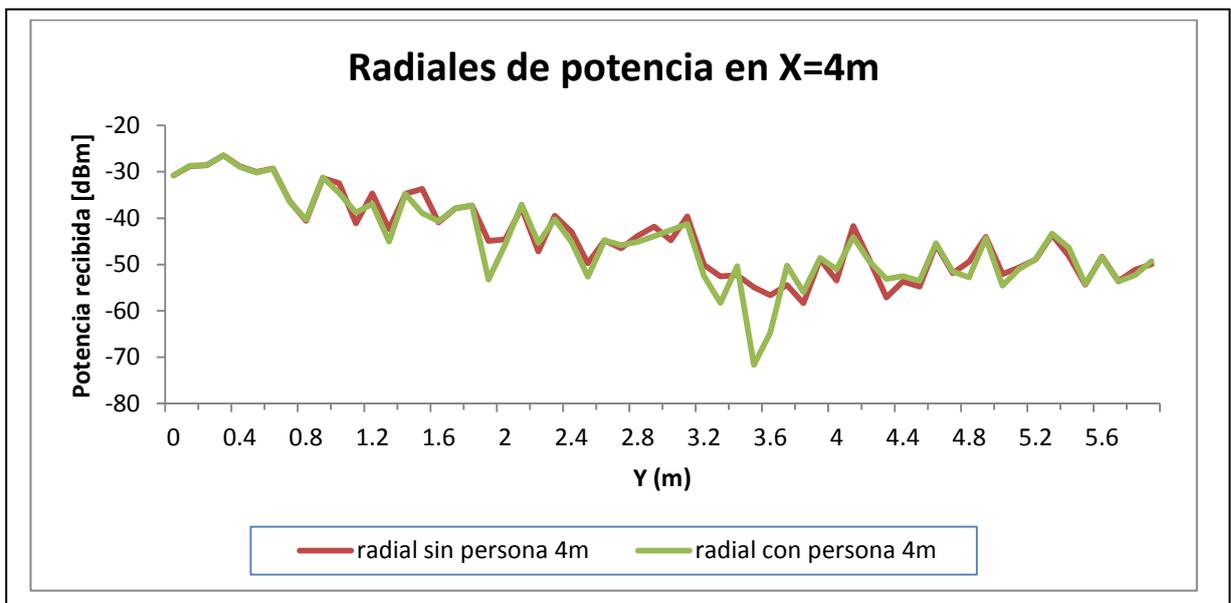


Fig.3.17. Comparativa radiales de potencia para X=4m del caso con persona y sin ella.

A continuación se muestra la diferencia entre estas dos radiales anteriores, resultado de restar a los niveles de potencia obtenidos sin persona, los que obtenemos con persona.

Debemos destacar la gran diferencia que se produce a 3,6m aproximadamente, ya que como podemos ver el nivel de potencia recibida en ese punto en el escenario con persona es mucho menor que en el escenario sin persona debido al fenómeno de la absorción de la señal provocada por parte de la persona. Es necesario a la hora de colocar los sensores tener especial cuidado con esas zonas en las que la potencia cae drásticamente como es este caso.

En general, de esta imagen podemos deducir el efecto negativo que provoca la persona en la propagación de la señal, dado que se observa una mayor cantidad de valores positivos que negativos, lo que implica que la potencia recibida en el caso de incluir una persona en nuestro escenario es menor.

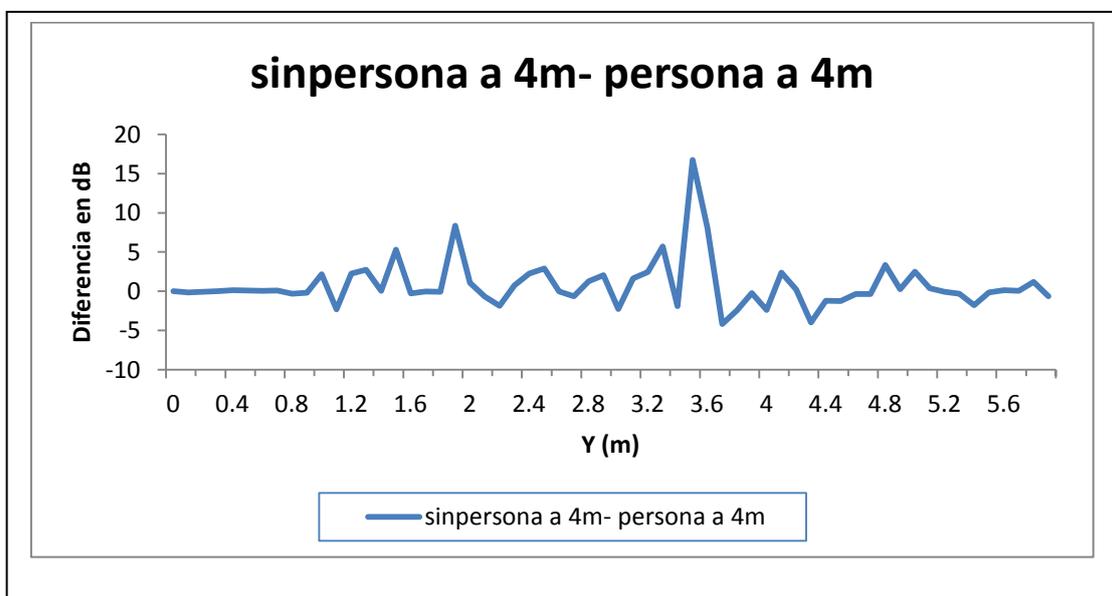


Fig.3.18. Diferencia entre la radial a 4m del escenario sin persona y la del escenario con persona

### 3.3.1.3. Perfil de Retardo Potencia

Uno de los elementos que presenta nuestro escenario y que hasta el momento no hemos nombrado, es el suelo. En el suelo, o en otro tipo de elemento como el motor de la moto, ya que es un elemento metálico, rebotan gran cantidad de los rayos lanzados, generando así la presencia de importantes componentes multitrayectos, dificultando de esta manera la planificación radioeléctrica para poder implantar nuestro sistema de comunicaciones en la moto.

Para poder explicar los efectos que provoca la propagación multitrayecto, con el fin de poder analizar el comportamiento de sus diferentes componentes, se ha calculado mediante el simulador de lanzamiento de rayos 3D, el valor de perfil de retardo potencia en diferentes puntos

del espacio, concretamente en los puntos donde teníamos máximos de potencia recibida y en los que había mínimos.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Punto 1	4	3,2	0,7
Punto 2	4,2	3,8	0,7

Tabla 3.11. Puntos en los que se ha calculado el retardo de potencia

Los puntos descritos en la tabla están cogidos de la figura 3.11 y se corresponden con los puntos máximo y mínimo de esa figura.

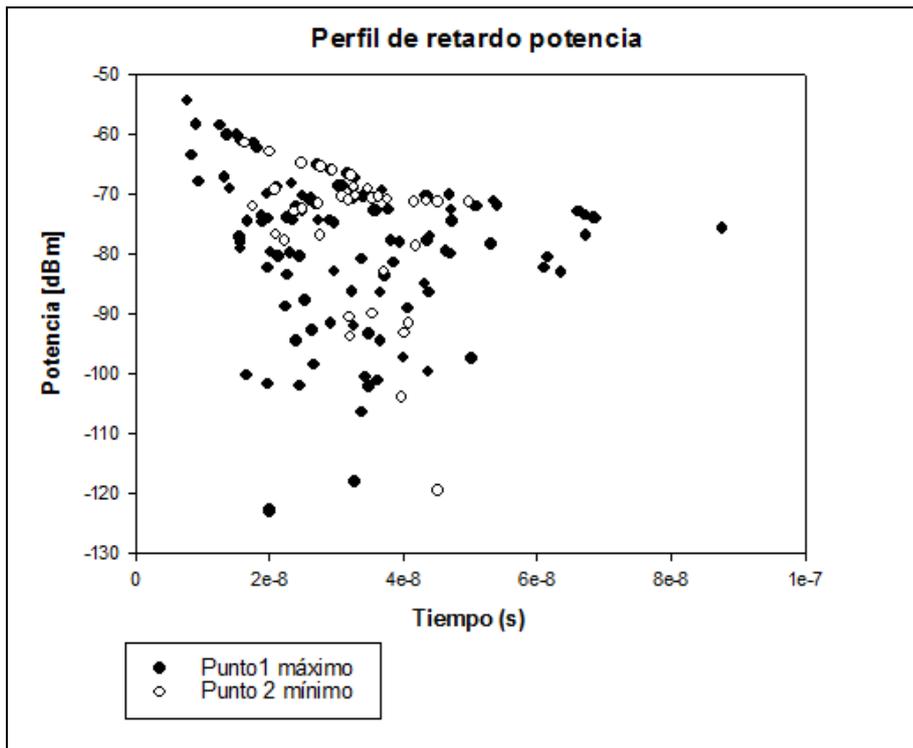


Fig.3.19. Perfil de retardo potencia para los puntos determinados en la tabla anterior.

Los puntos descritos en la tabla 3.12 están cogidos de la figura 3.16 y se corresponden con los puntos máximo y mínimo de esa figura.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Punto 3	4	0,4	0,7
Punto 4	2	1,7	0,7

Tabla 3.12. Puntos en los que se ha calculado el retardo de potencia

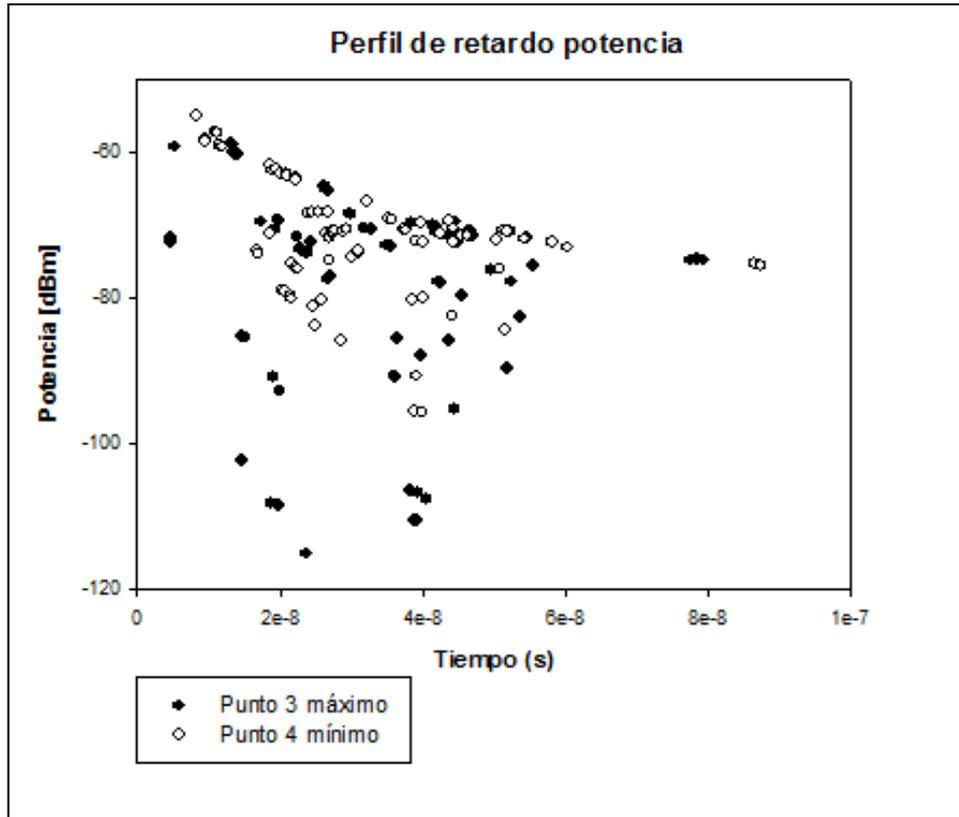


Fig.3.20. Perfil de retardo potencia para los puntos determinados en la tabla anterior.

Como podemos ver en las figuras 3.19 y 3.20, para cada punto evaluado puede haber mayor o menor número de componentes multitrayecto, por lo que no es casualidad la diferencia de los niveles de potencia recibidos en cada uno de los puntos. Además a medida que pasa el tiempo, la potencia con la que llega cada una de las componentes multitrayecto al punto en cuestión, se ve disminuida debido a que los diferentes rayos cada vez que rebotan con los distintos elementos, pierden potencia.

### 3.3.2. Nivel de Potencia Recibida en Función de la Ubicación de los Diversos Elementos del Escenario

Como ya se mencionó anteriormente, existe una gran dependencia entre el nivel de potencia recibida en un punto, tanto con las dimensiones del escenario y los elementos que en el mismo intervienen (persona, moto), como con la distancia de cada uno de los puntos a la antena transmisora, es decir el nivel de potencia decrece a medida que aumenta la distancia a la antena.

Para ilustrar este fenómeno se han obtenido diferentes mapas bidimensionales y radiales de potencia a diferentes alturas, para los escenarios 3 y 4, ambos sin persona, descritos anteriormente.

A continuación se muestran algunos de esos resultados.

**3.3.2.1. Mapas bidimensionales de potencia**

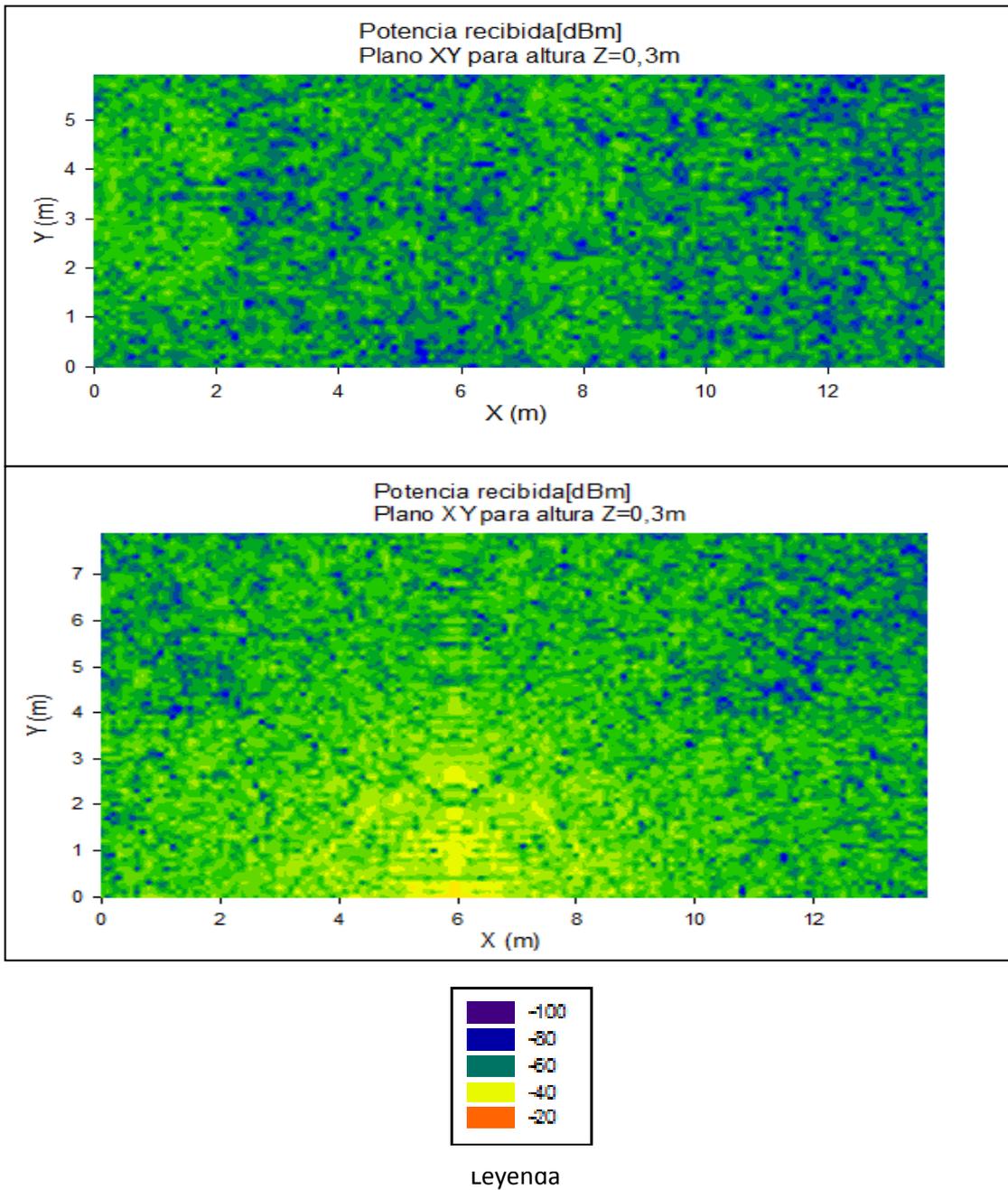


Fig.3.21. Mapas bidimensionales de potencia a 0,3m de altura para el escenario 4 sin persona y para el escenario 3 sin persona respectivamente

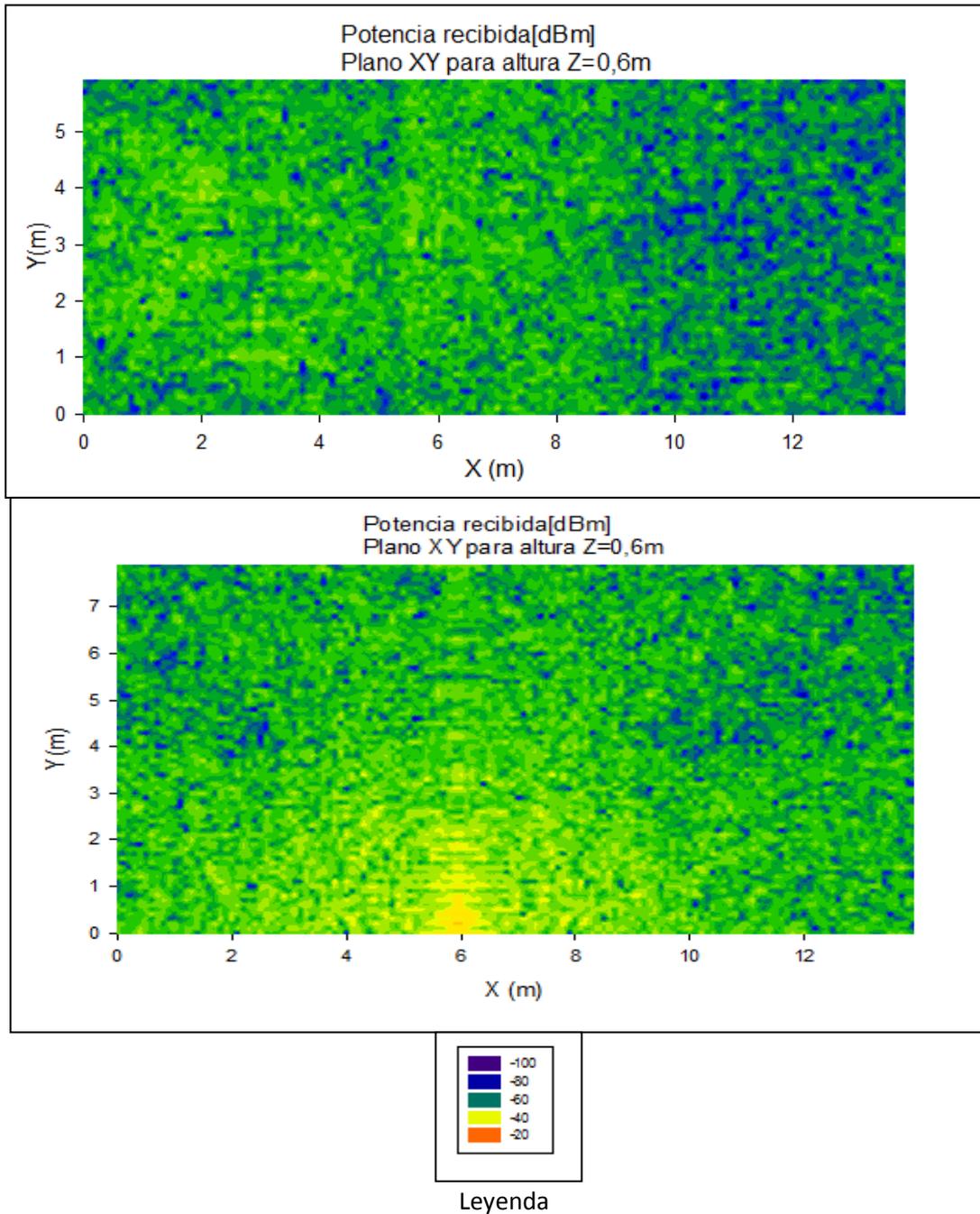


Fig.3.22. Mapas bidimensionales de potencia a 0,6m de altura para el escenario 4 sin persona y para el escenario 3 sin persona respectivamente.

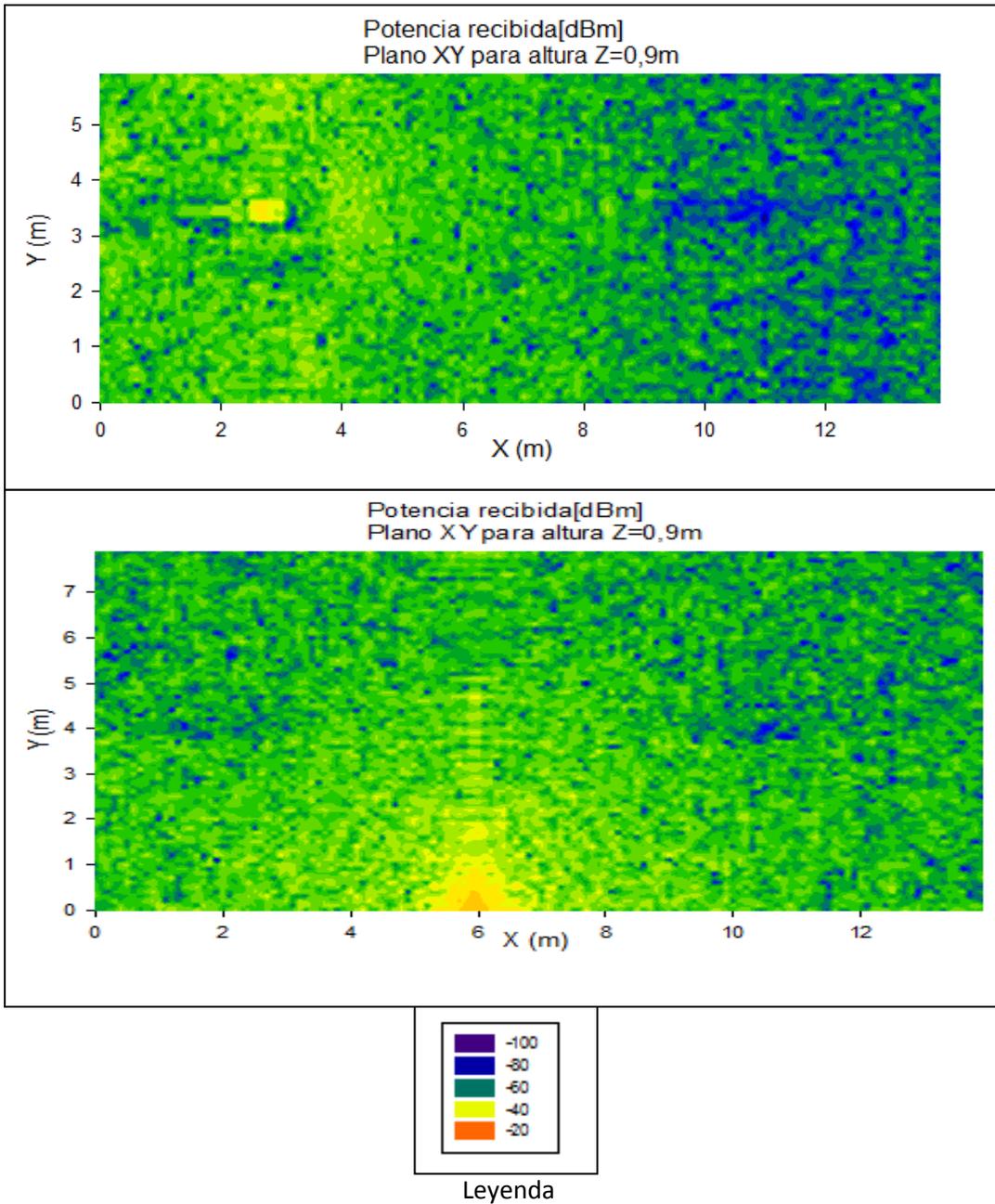


Fig.3.23. Mapas bidimensionales de potencia a 0,9m de altura para el escenario 4 sin persona y para el escenario 3 sin persona respectivamente.

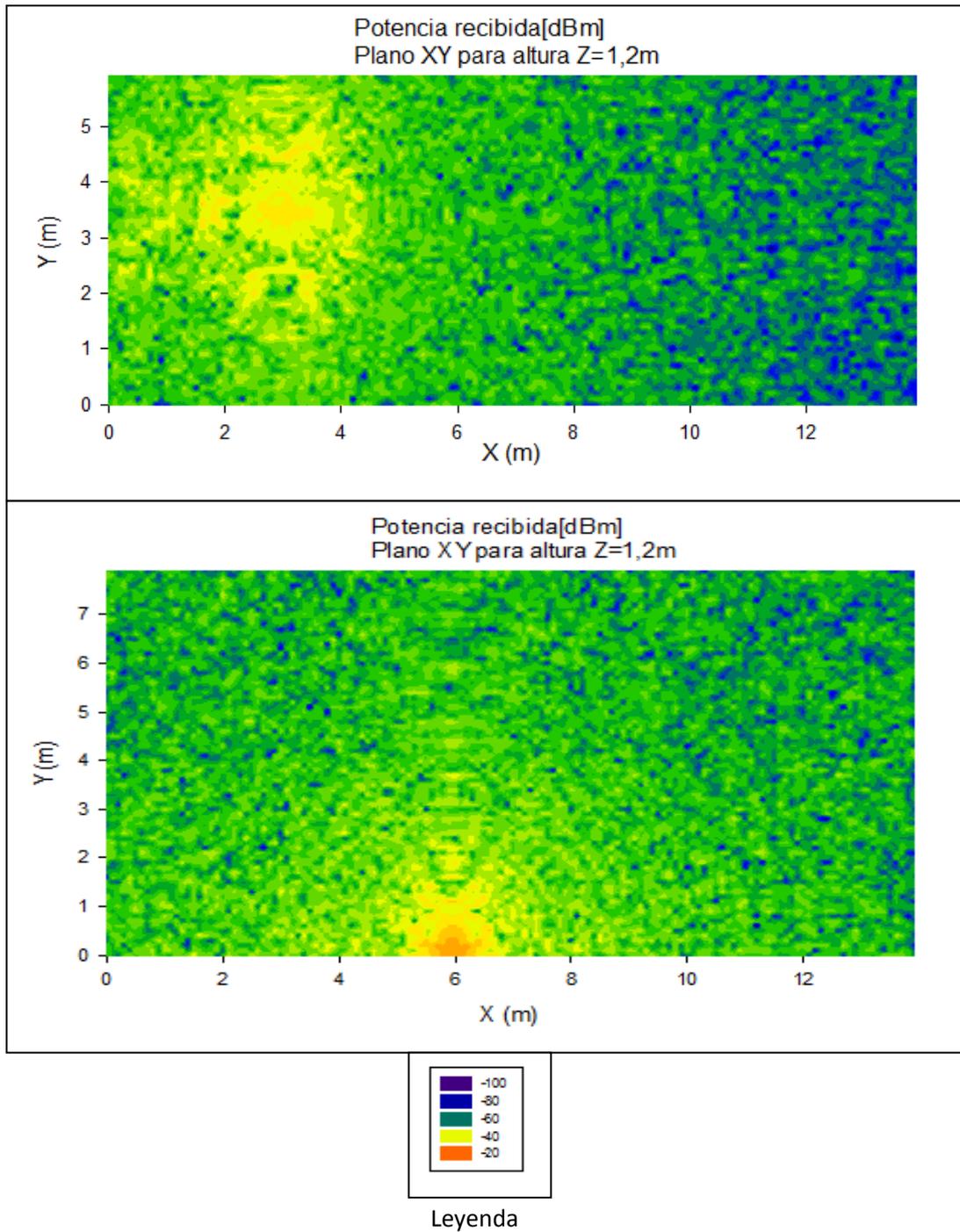


Fig.3.24. Mapas bidimensionales de potencia a 1,2m de altura para el escenario 4 sin persona y para el escenario 3 sin persona respectivamente.

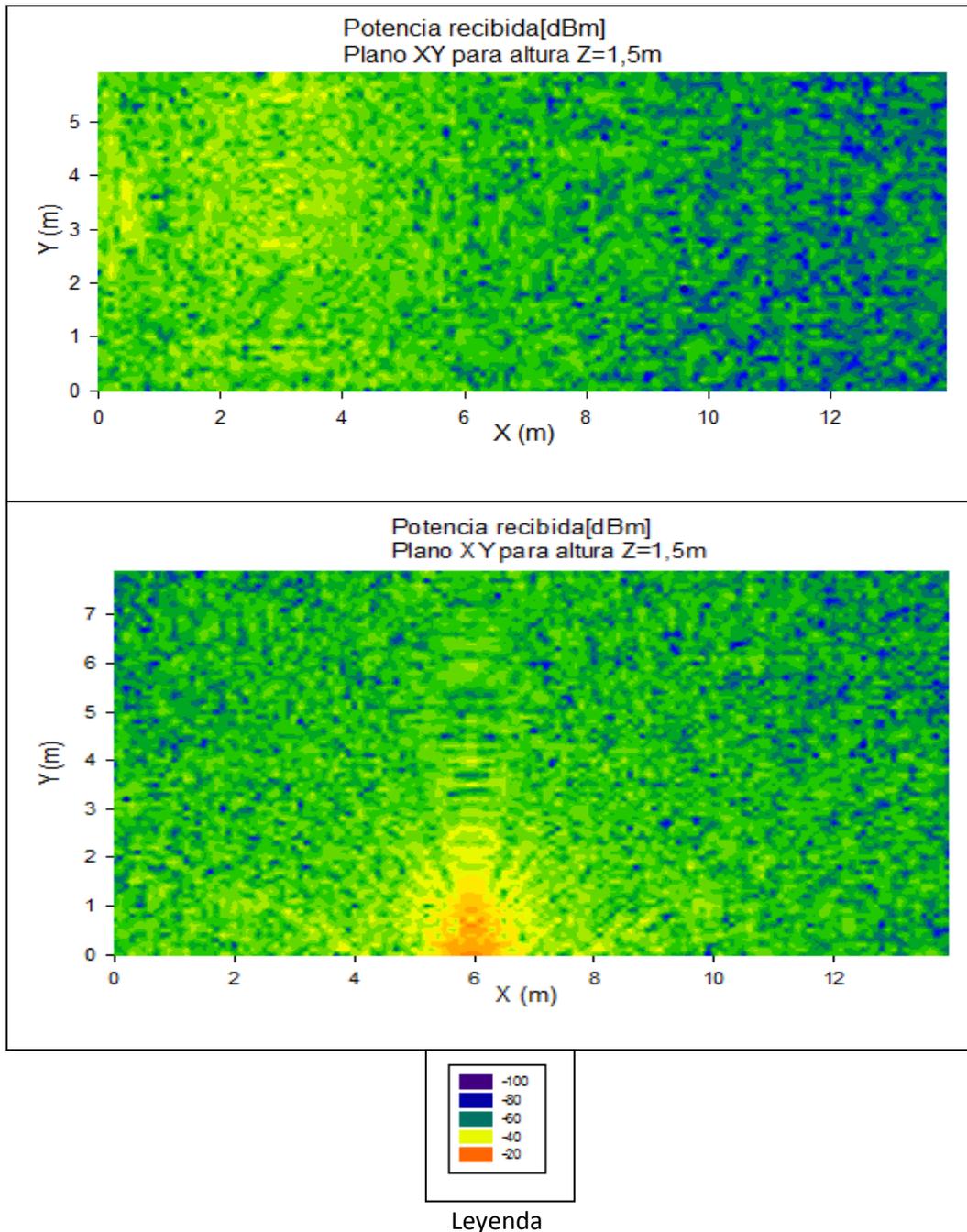


Fig.3.25. Mapas bidimensionales de potencia a 1,5m de altura para el escenario 4 sin persona y para el escenario 3 sin persona respectivamente.

A la vista de los resultados obtenidos en cada uno de los planos, podemos ver la dependencia del nivel de potencia en función de la distancia. Vemos como las zonas más cercanas a la antena presenta un color más amarillento o anaranjado, indicando altos niveles de potencia, mientras que si nos alejamos de la antena, esas tonalidades son más verdosa o azuladas, indicando un menor nivel de potencia recibida en esos puntos.

También podemos observar, especialmente en los planos a 0,3 y 0,6m del escenario 4 sin persona, en el que la antena está colocada justo encima de la moto, como la moto actuaría como un gran obstáculo que evita la propagación de la señal hacia alturas inferiores a la de la antena, obteniendo así planos con niveles de potencia bajos.

Además se observa como dependiendo de donde esté colocada la antena, los niveles de potencia recibida más altos cambian dependiendo de la misma.

Por lo general también podemos ver que en el escenario con la antena colocada sobre la moto, se reciben menores niveles de potencia en las inmediaciones de la otra moto, que en el escenario con la antena colocada en la cuneta; debido a que la distancia desde la antena a esa segunda moto es menor con la antena colocada en la cuneta, y a que la señal se propaga mejor cuanto más alejados de los obstáculos se coloque la antena.

### ***3.3.2.2. Radiales de potencia***

Al igual que se hizo anteriormente en el caso en que se comparó los escenarios con persona y sin persona, apartado 3.3.1, otra manera de ver la distribución de potencia es mediante las radiales de potencia

A continuación se presentan las radiales de potencia del escenario con la antena colocada en la moto, a diferentes alturas, tanto por encima como por debajo de la altura de la antena.

En ellas podemos observar como la potencia recibida a la altura de 1m en los alrededores de la moto en la que está colocada la antena, es mayor, ya que la distancia a la antena es menor.

Destacar también, que así como en la segunda moto, el nivel de potencia recibida no es mucho menor en el caso de alturas inferiores a la antena con respecto a las alturas por encima de la antena; en el caso de la primera moto esta diferencia de potencia es mucho mayor ya que la propia moto no deja propagarse a la señal hacia alturas inferiores a la de la antena debido a la proximidad entre antena y moto.

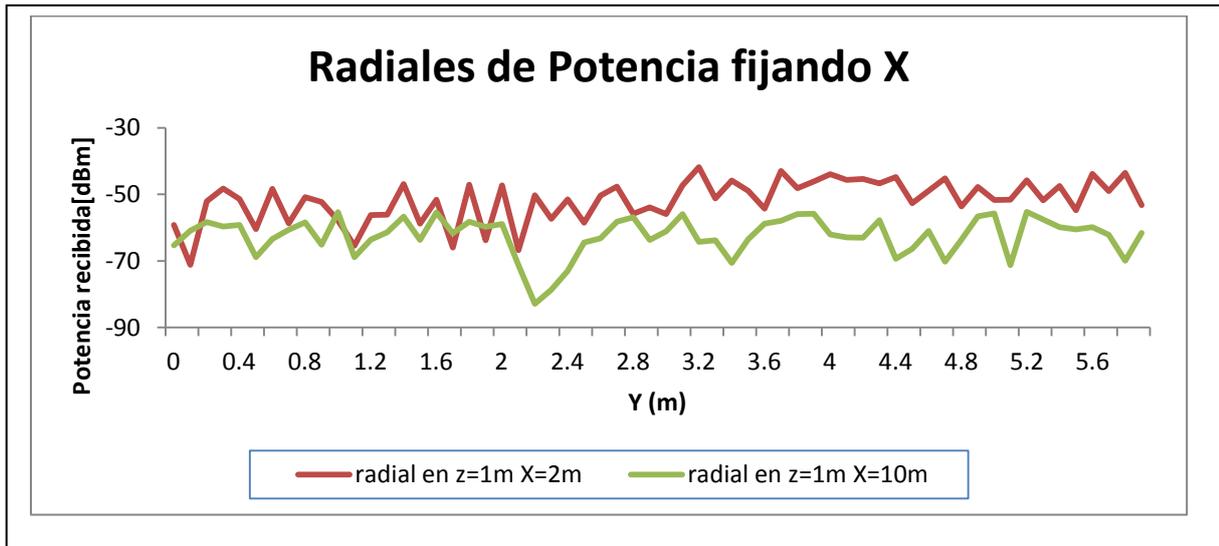


Fig.3.26. Radiales de potencia para distintos valores de X en escenario 4 sin persona (antena en moto)

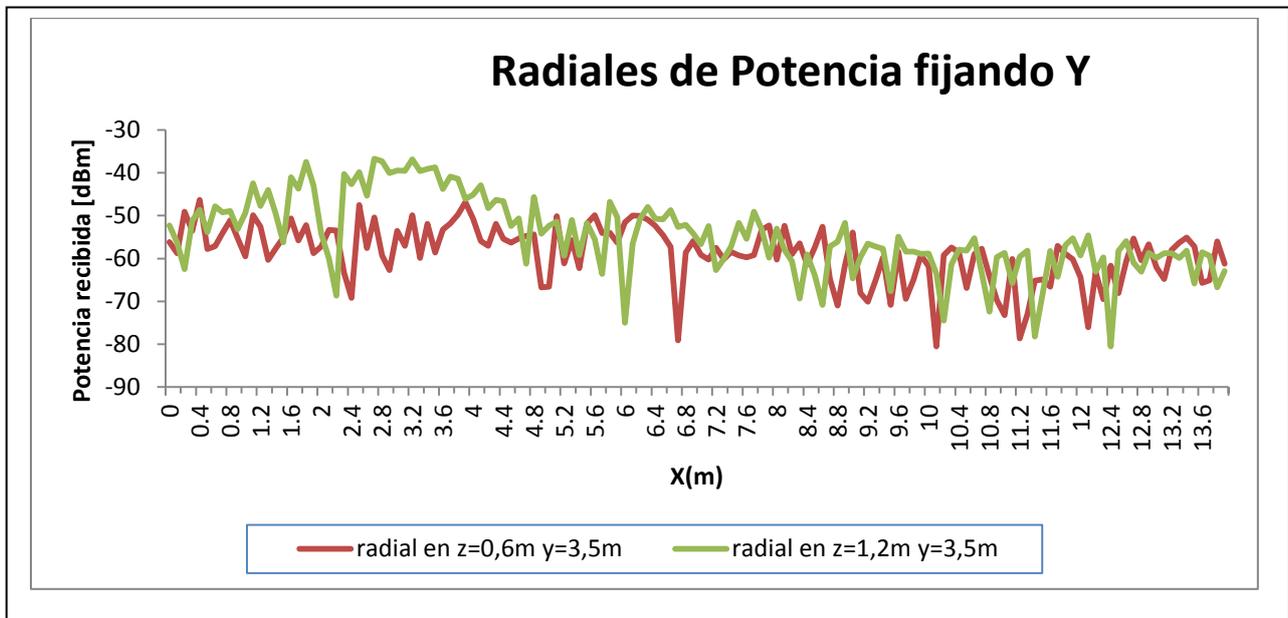


Fig.3.27. Radiales de potencia para distintos  $y=3,5m$  a distintas alturas en escenario 4 sin persona (antena en moto)

En las siguientes imágenes se muestran las radiales de potencia del escenario con la antena colocada en la cuneta de la carretera.

Podemos apreciar como la diferencia de potencia recibida en cualquiera de las dos motos o a cualquiera de las dos alturas escogidas (0,6 y 1,2m) no es muy grande, dado que la antena esta a la misma distancia aproximadamente de cada una de las dos motos, y además está colocada en un punto del espacio más alto que la moto.

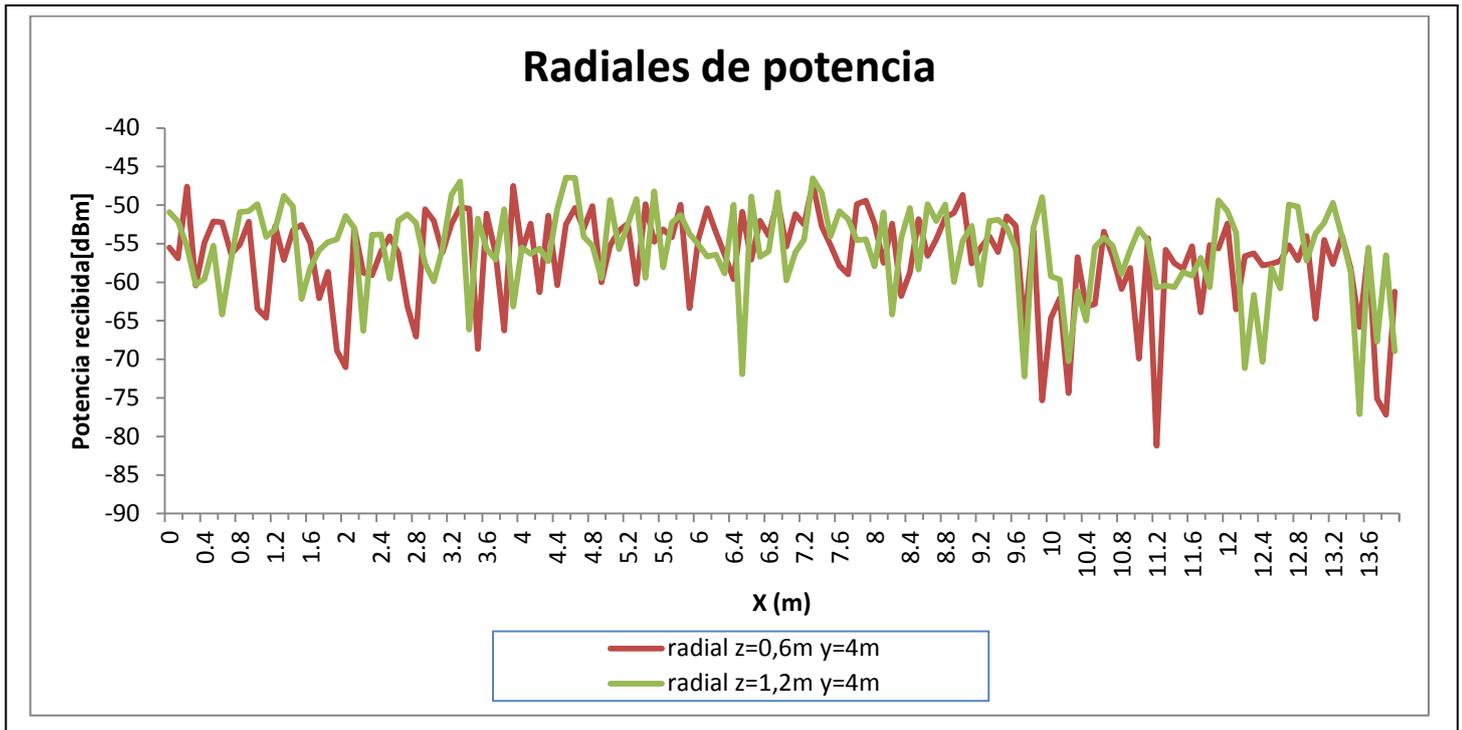


Fig.3.28. Radiales de potencia para distintos  $y=4m$  a distinta altura en escenario 3 sin persona (antena en la cuneta de la carretera)

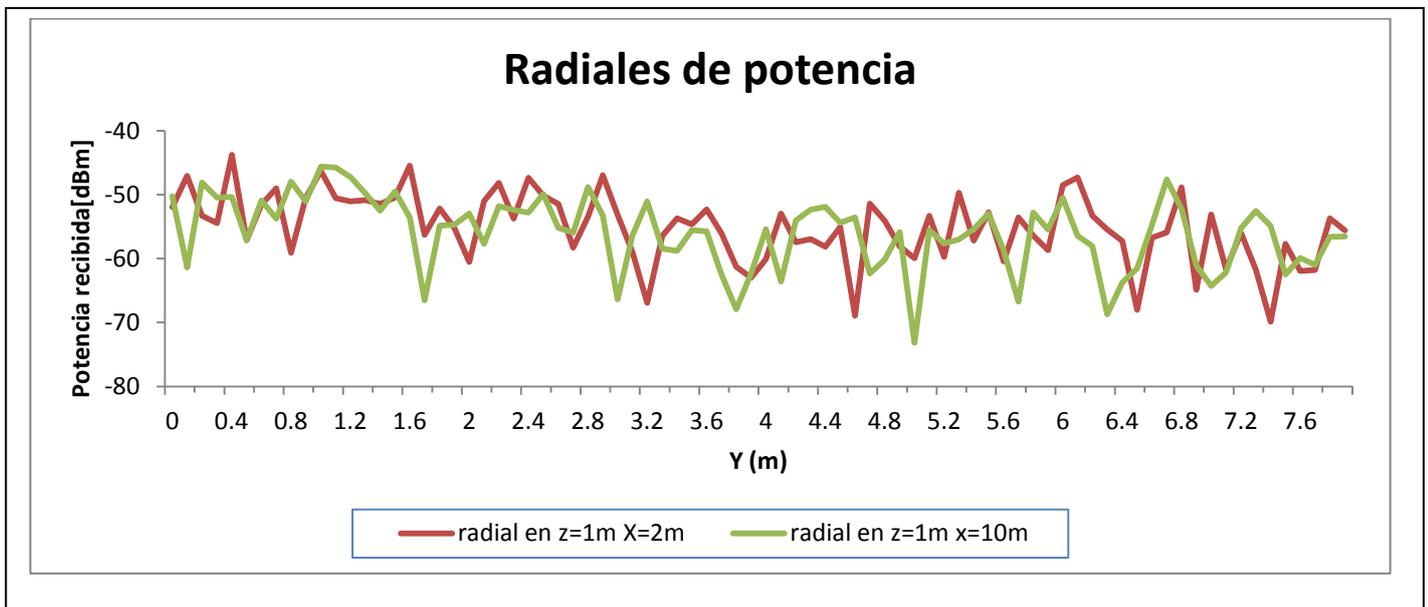


Fig.3.29. Radiales de potencia para distintos valores de X en escenario 3 sin persona (antena en la cuneta de la carretera)

3.3.2.3. Perfil de Retardo Potencia

Como ya habíamos mencionado anteriormente, uno de los elementos que influye en el funcionamiento de nuestro sistema, especialmente en el caso de que se desee establecer comunicación con otra moto, es el suelo, ya que la gran cantidad de rayos que se lanzan desde la antena, rebotan en este dando lugar a un elevado número de componentes multirrayecto.

En el siguiente perfil de retardo de potencia se observa este fenómeno, donde se comprueba que en diferentes instantes de tiempo llegan componentes con distintos niveles de potencia, generadas por los sucesivos rebotes de los rayos lanzados desde la antena colocada en la moto de la parte delantera de nuestro escenario.

A continuación se muestra una tabla con los puntos del escenario para los cuales se han obtenido los perfiles de retardo de potencia. Estos puntos se corresponden al máximo y mínimo de las radiales mostradas en la figura 3.26.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Punto 1	10	2,2	1
Punto 2	2,7	3,5	1,2

Tabla 3.13. Puntos en los que se ha calculado el retardo de potencia en el escenario 4 sin persona.

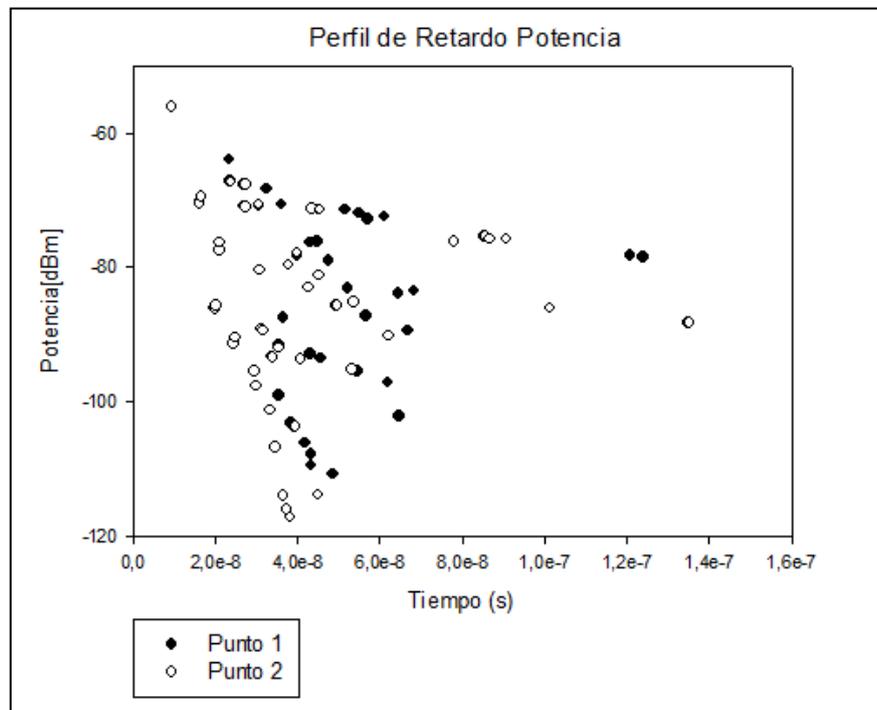


Fig.3.30. Perfil de retardo potencia para los puntos determinados en la tabla 3.13.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Punto 3	10,1	3,5	0,6
Punto 4	2,7	3,5	1,2

Tabla 3.14. Puntos en los que se ha calculado el retardo de potencia en el escenario 4 sin persona (corresponden al mínimo y máximo valor de potencia reflejados en la figura 3.27).

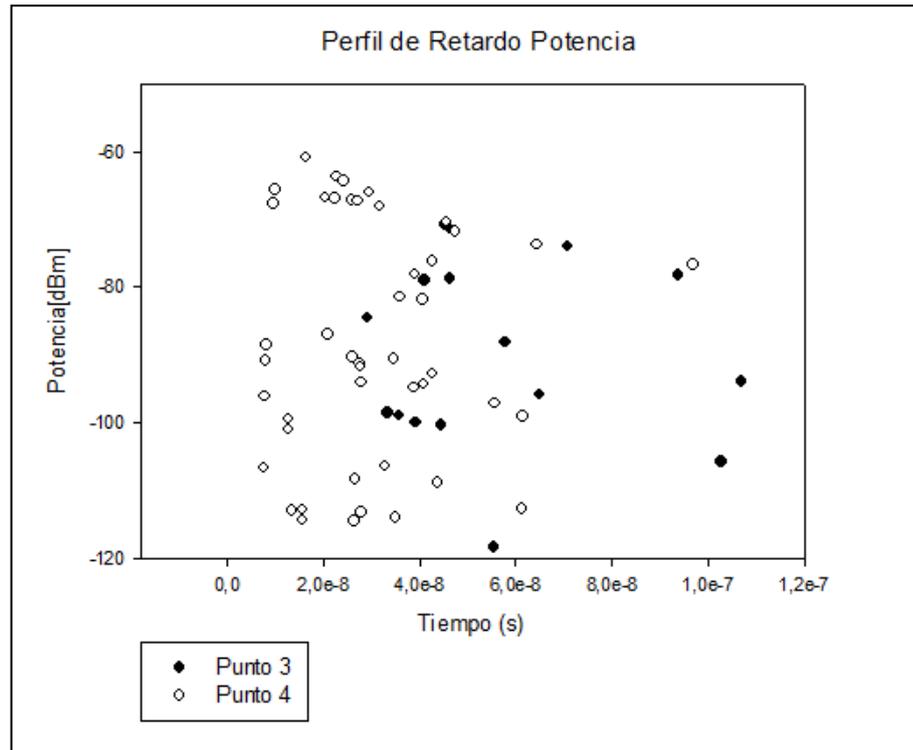


Fig.3.31. Perfil de retardo potencia para los puntos determinados en la tabla 3.14.

### 3.3.3. Nivel de Potencia Recibida en Función de la Frecuencia de Trabajo

Otro de los factores que debemos tener en cuenta para caracterizar el canal radioeléctrico a través del cual se enviarán las señales por la red de sensores colocada en una moto, es la frecuencia a la que van a funcionar esos sensores.

Teniendo en cuenta las tecnologías que hemos descrito en el apartado del estado del arte (Bluetooth y ZigBee), y las diferentes frecuencias a las que trabajan dichas tecnologías, se ha decidido realizar simulaciones tanto a 2,4GHz como a 868MHz para analizar el comportamiento de la red a las diferentes frecuencias, y como afecta la frecuencia al nivel de potencia recibida en las diferentes zonas de nuestro escenario.

#### 3.3.3.1. Mapas bidimensionales de potencia

A continuación se muestran los distintos mapas de potencia recibida para las dos frecuencias analizadas y para diferentes alturas. Se puede apreciar a simple vista la diferencia en los niveles de potencia recibida entre una y otra frecuencia.

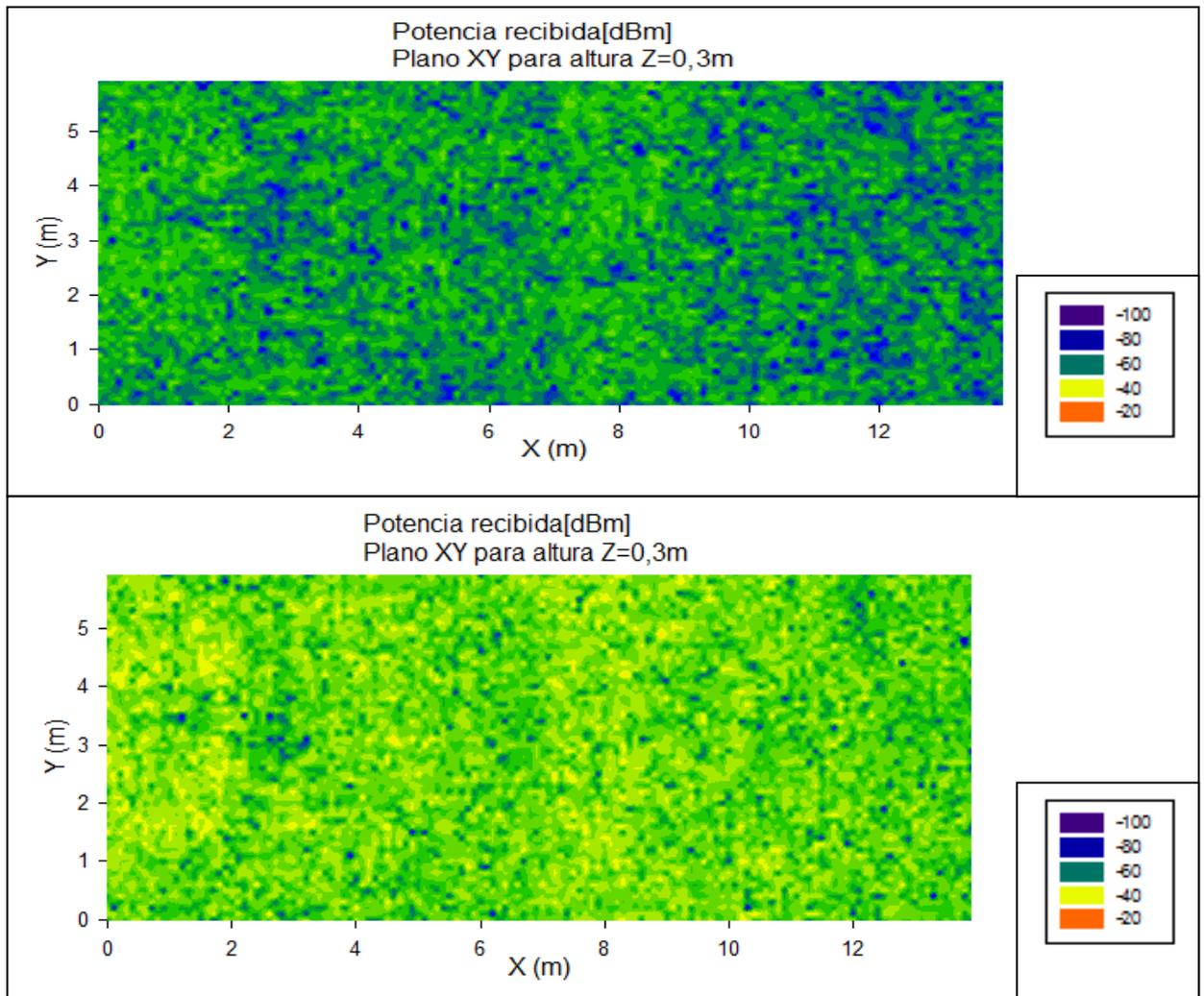


Fig.3.32. Mapas bidimensionales de potencia a 0,3m de altura para el escenario 4 con personas a 2,4GHz (imagen superior) a 868MHz (imagen inferior).

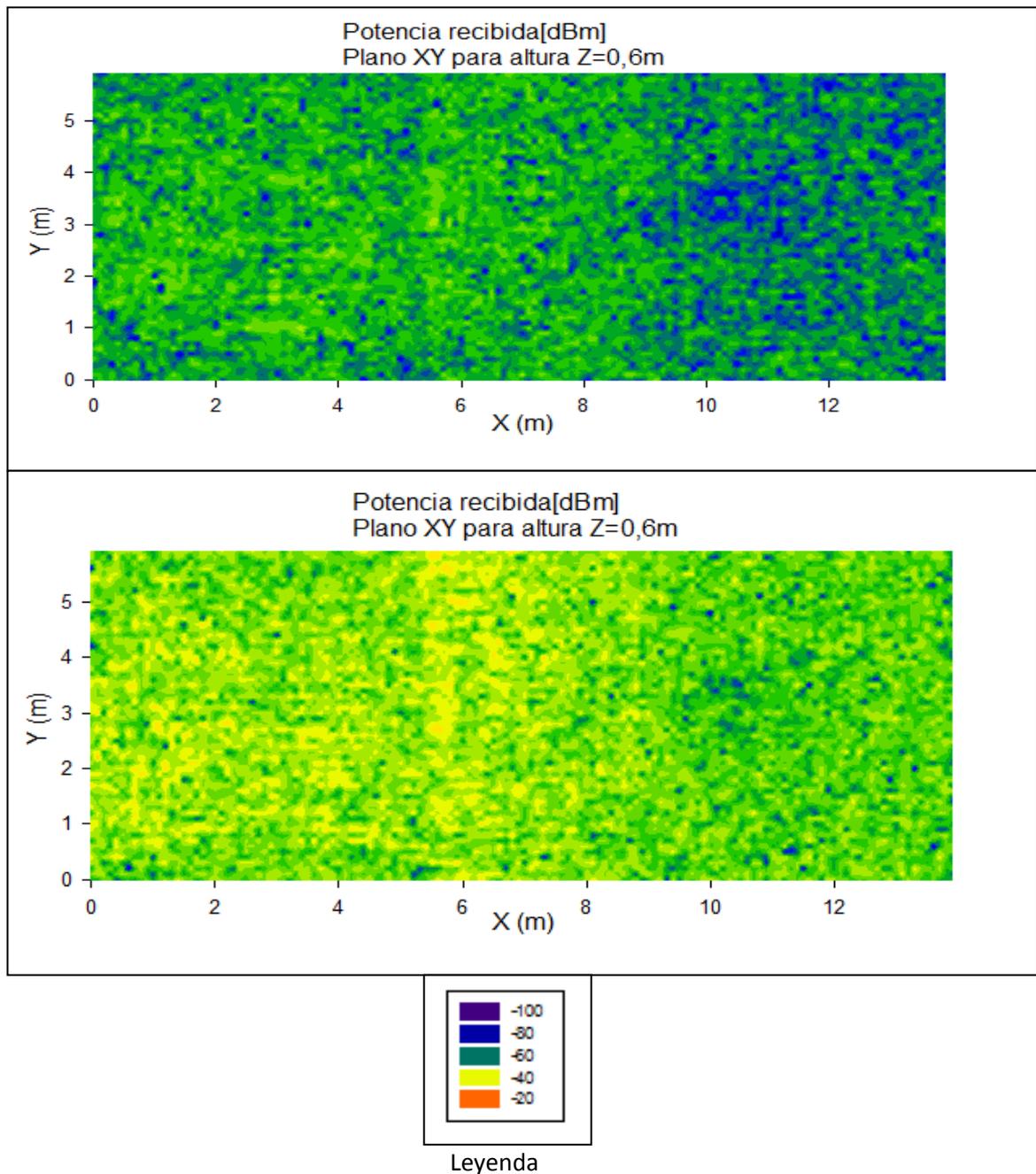


Fig.3.33. Mapas bidimensionales de potencia a 0,6m de altura para el escenario 4 con personas a 2,4GHz (gráfica superior) a 868MHz (gráfica inferior).

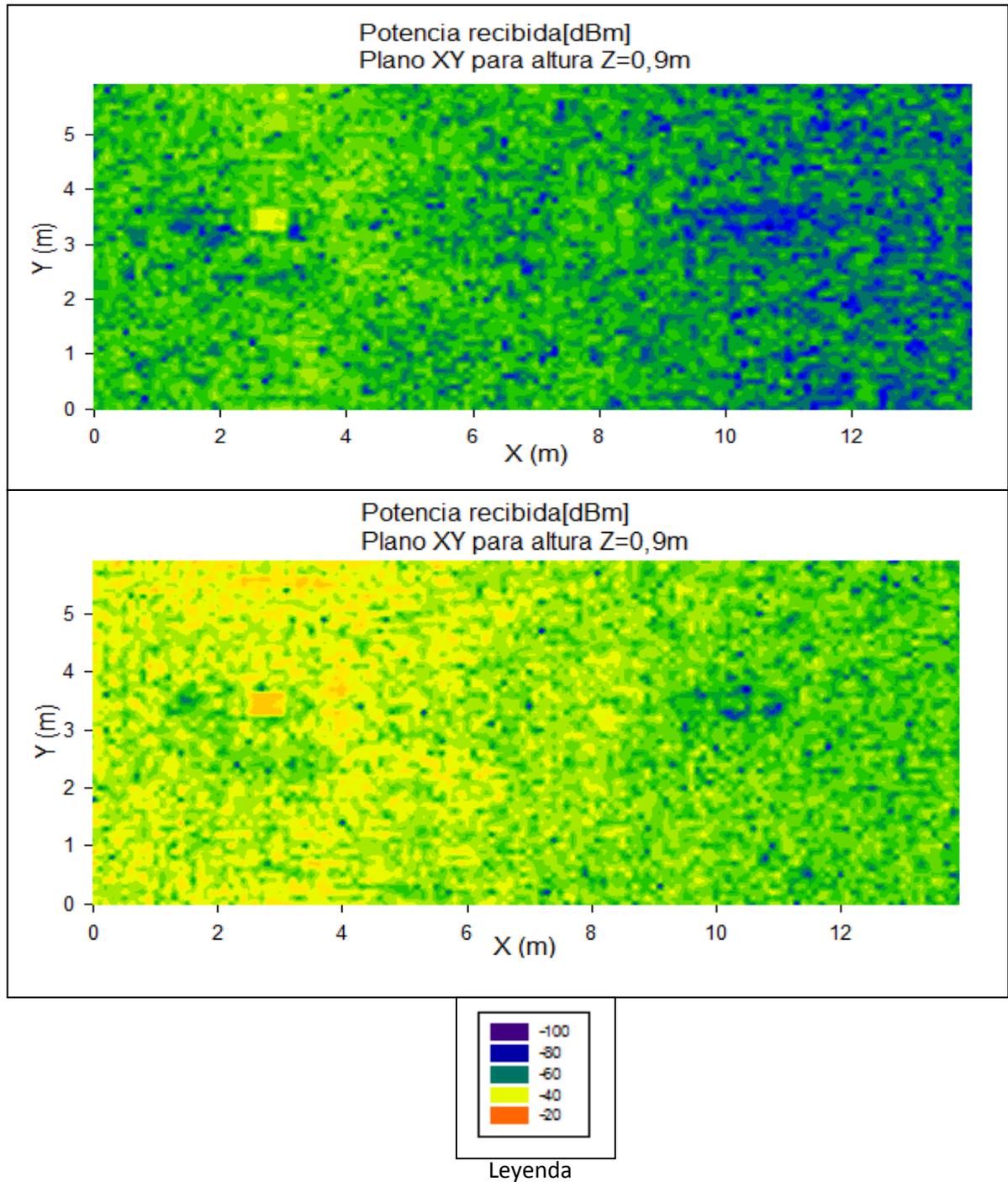


Fig.3.34. Mapas bidimensionales de potencia a 0,9m de altura para el escenario 4 con personas a 2,4GHz (gráfica superior) a 868MHz (gráfica inferior).

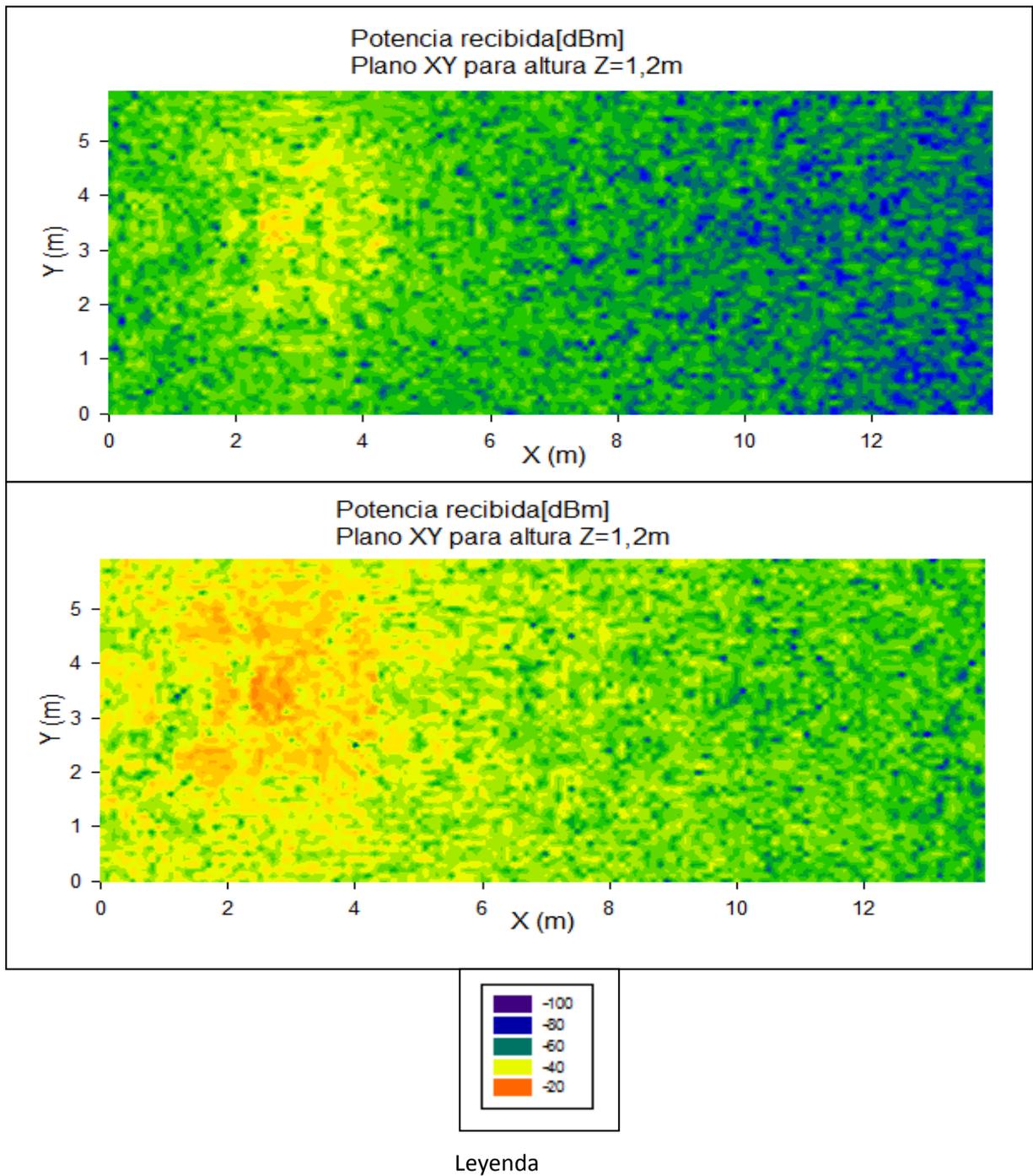


Fig.3.35. Mapas bidimensionales de potencia a 1,2 de altura para el escenario 4 con personas a 2,4GHz (gráfica superior) a 868MHz (gráfica inferior).

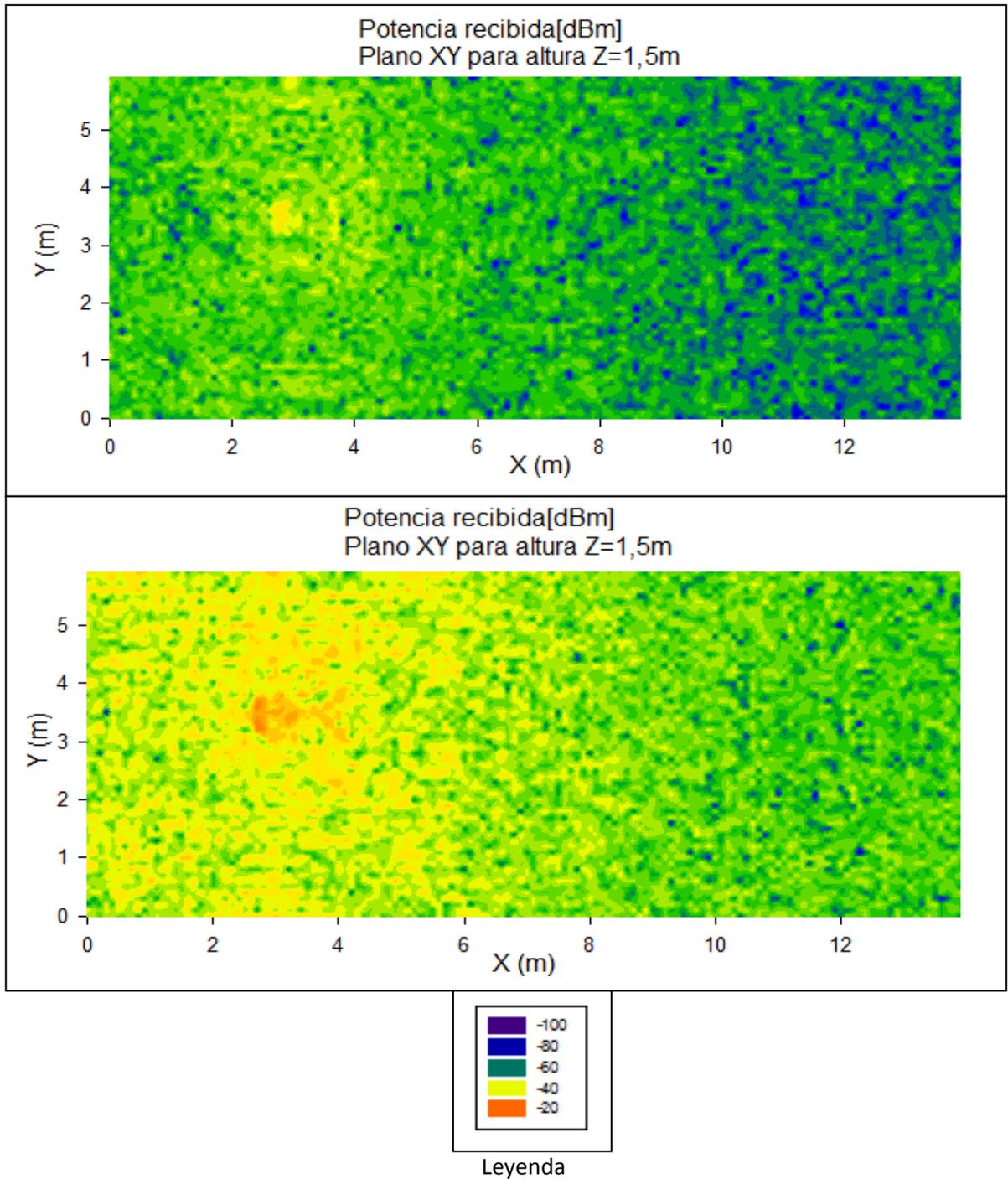


Fig.3.36. Mapas bidimensionales de potencia a 1,5 de altura para el escenario 4 con personas a 2,4GHz (gráfica superior) a 868MHz (gráfica inferior).

Como se puede observar comparando los planos bidimensionales de potencia a las diferentes alturas para 868MHz y 2,4GHz, el nivel de potencia recibida es bastante menor en la banda de 2,4GHz que en la banda de 868MHz.

Esto se debe a que cuanto mayor es la frecuencia de la antena transmisora, mayores son las pérdidas que se producen por atenuación de la señal. Esto es, observando los mapas anteriores se muestra como la disminución en el nivel de potencia a 2,4GHz con respecto a 868MHz, es mayor a medida que nos alejamos de la antena transmisora, ya que las pérdidas por atenuación aumentan según se aumenta la frecuencia empleada para el funcionamiento del sistema.

### 3.3.3.2. Radiales de potencia

Otro modo de comprobar esta diferencia en el nivel de potencia recibida en los distintos puntos de nuestro escenario a 2,4GHz y a 868MHz es a partir de radiales de potencia.

A continuación se presentan algunas de las que se han obtenido.

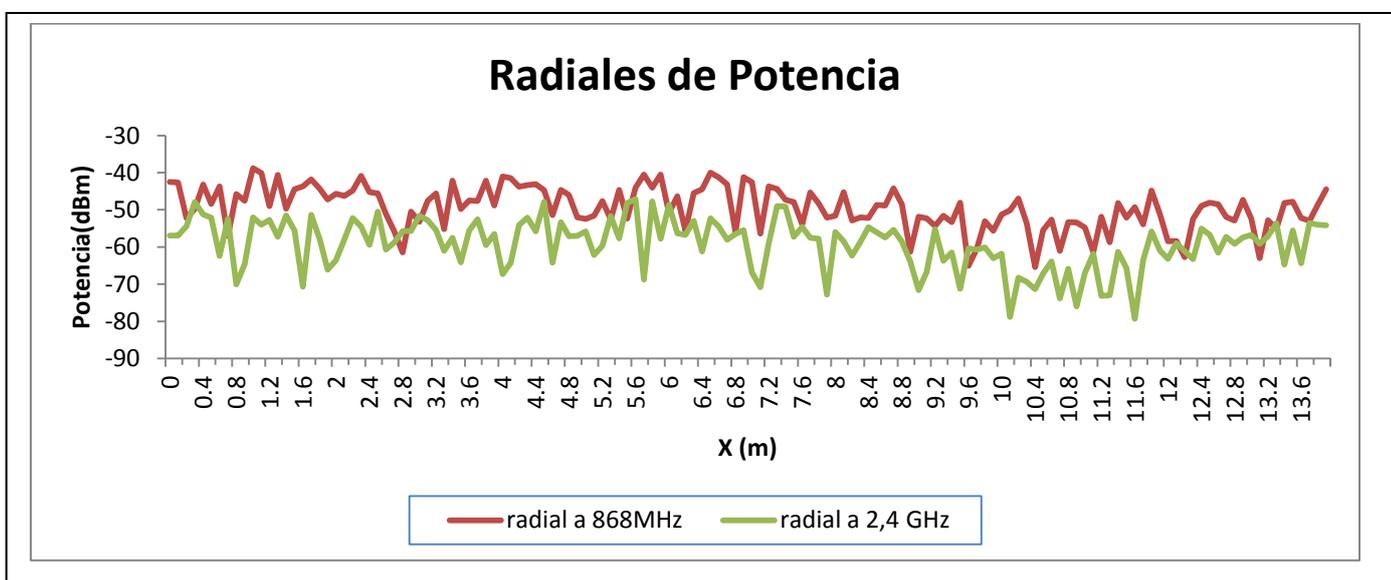


Fig.3.37. Radiales potencia para  $z=0,6m$   $y=3m$ , en escenario 4 con persona (antena en moto)

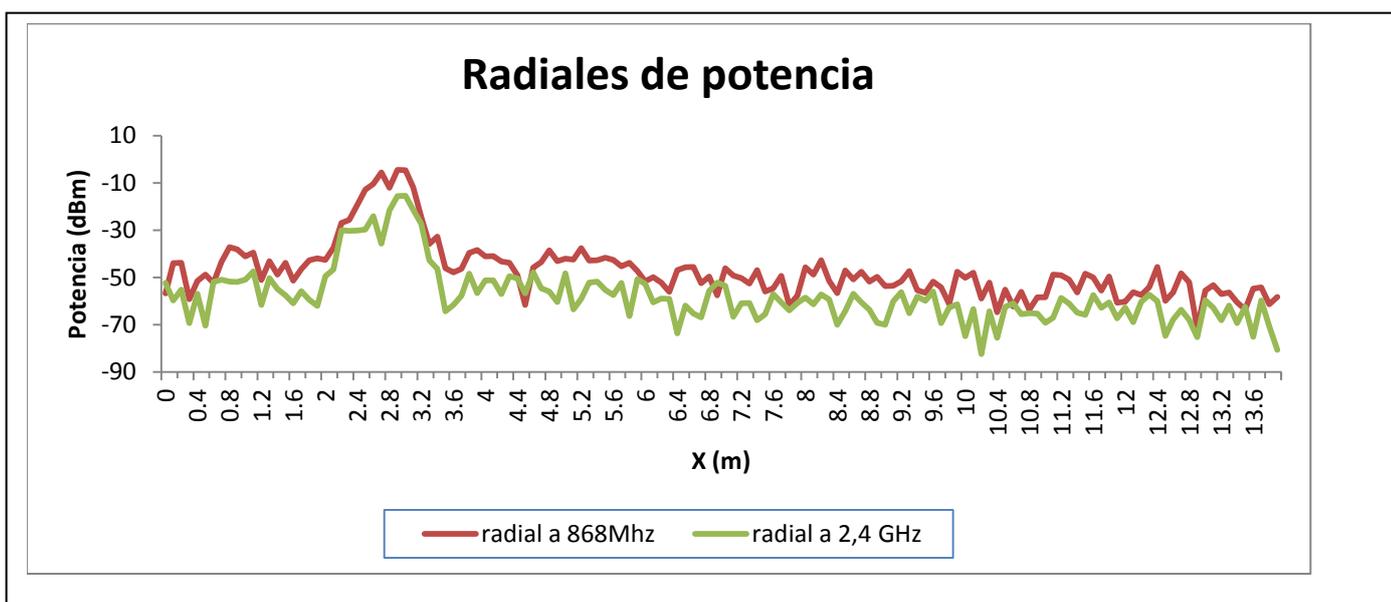


Fig.3.38. Radiales potencia para  $z=1m$   $y=3,8m$  en escenario 4 con persona (antena en moto)

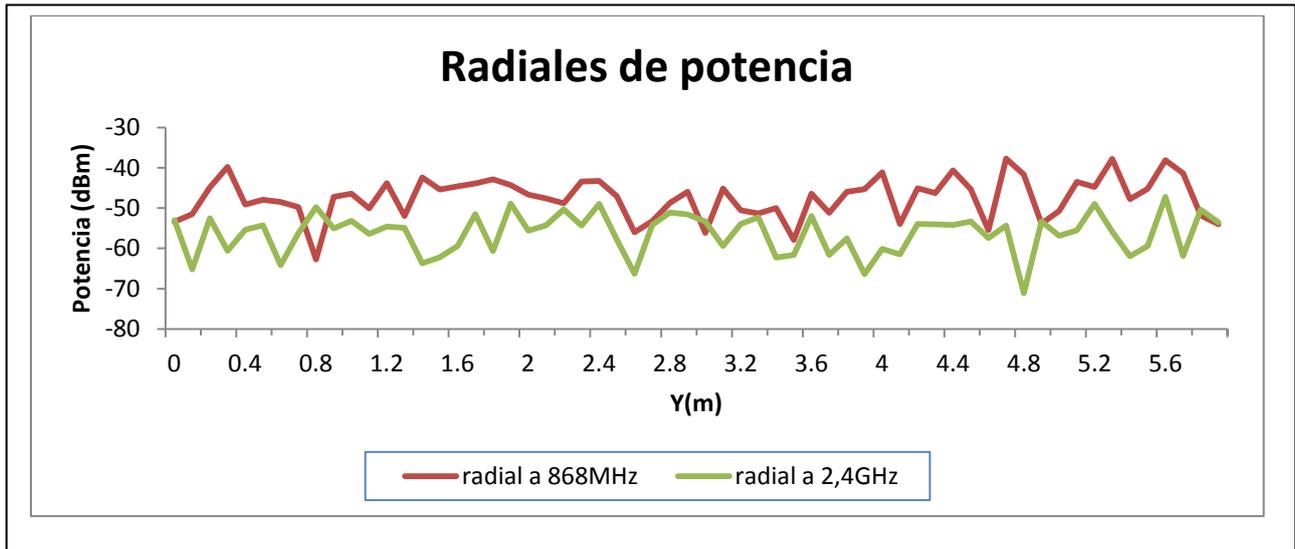


Fig.3.39. Radiales de potencia para  $z=1$   $x=1,3$  en escenario 4 con persona (antena en moto)

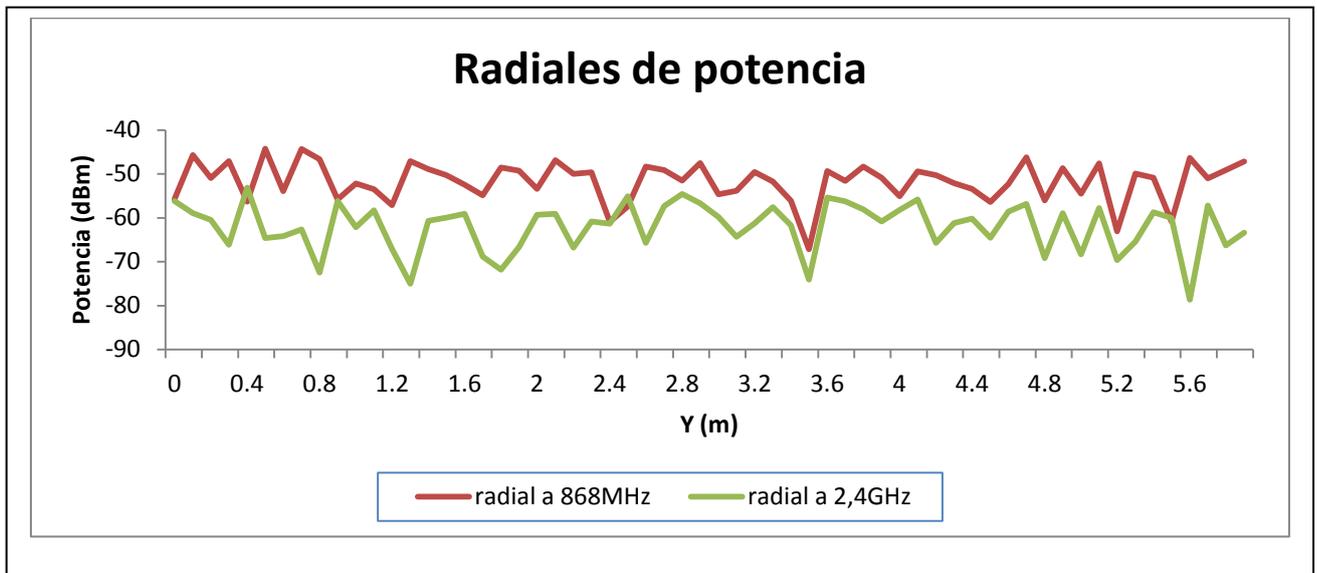


Fig.3.40. Radiales de potencia para  $z=1$   $x=9,3$  en escenario 4 con persona (antena en moto)

A la vista de los resultados obtenidos y tal y como se pretendía comprobar, se observa como el nivel de potencia recibida al trabajar a 868MHz es superior (entre unos 10 y 20dB) al nivel de potencia recibida a 2,4GHz en prácticamente todos los puntos del espacio.

Además al igual que en otros casos estudiados anteriormente, se observan los efectos provocados por las distintas componentes multirayecto, es decir, se pueden ver las variaciones de potencia entre puntos consecutivos o muy próximos de nuestro escenario.

3.3.3.3. Perfil de Retardo Potencia

A continuación se muestra el perfil de retardo en potencia en un punto en concreto de nuestro escenario, para la banda de 868MHz y la banda de 2,4GHz, que nos permitirá de nuevo comprobar que el nivel de potencia recibido funcionando a 868MHz es superior al obtenido a 2,4GHz, así como saber el número de rayos que llegan a un punto, con que potencia lo hacen y en que instante de tiempo concretamente.

Se ha calculado el retardo tanto para 868Mhz como para 2,4Ghz para el escenario 4 con persona en el punto de coordenadas z=1m, x=9,3m, y=1,4m.

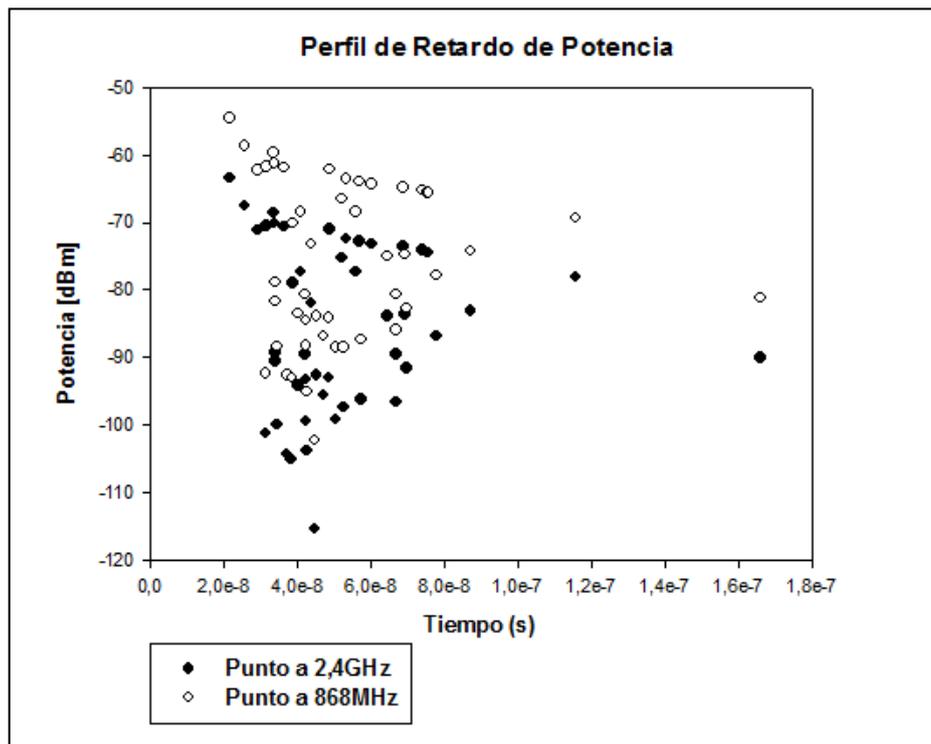


Fig.3.41. Perfil de retardo potencia para el punto x=9,3m y=1,4m z=1m

Como se muestra en la figura 3.41, podemos afirmar que el número de rayos que llegan al punto que se está estudiando y el instante en que lo hacen, es el mismo para las dos bandas de frecuencia que se han analizado.

Por lo tanto se puede determinar que el recibir un mayor nivel de potencia en la banda de 868MHz no se debe a que haya una mayor cantidad de componentes multirayecto, ya que esto no es así, sino que lo que ocurre es que el nivel de potencia de las componentes multirayecto a 868Mhz es superior al de las componentes a 2,4Ghz tal y como se observa en la imagen.

De este modo y a partir de mapas bidimensionales, radiales de potencia y perfiles de retardo en potencia se ha conseguido analizar el comportamiento del funcionamiento de nuestra red de sensores desde el punto de vista radioeléctrico, para poder realizar así una correcta planificación radioeléctrica del sistema, en cuanto a los puntos más adecuados para la colocación de los diferentes sensores, y la elección de la frecuencia más adecuada para conseguir el mejor funcionamiento posible para nuestra red.

### 3.3.4 Respuesta del Sistema frente a Sensibilidad

Una vez analizados los resultados obtenidos en cuanto a los niveles de potencia recibida en función de la ubicación de los elementos, en función de la frecuencia de trabajo y la influencia de la persona en esos niveles de potencia, es importante saber si para los distintos escenarios que se han propuesto, los niveles de potencia recibida serán superiores a los valores de sensibilidad de módulos Bluetooth o ZigBee.

Para ello se ha observado las hojas de características de diferentes módulos Bluetooth y ZigBee de diferentes versiones y de distintos fabricantes como Bluegiga o Libelium, y la gran mayoría tenían valores de sensibilidad entre -85dBm y -90dBm.

Por lo tanto en este caso para comprobar que el sistema pueda funcionar correctamente y comparar ese valor de sensibilidad con los niveles de potencia recibida, escogeremos un valor muy común de sensibilidad en la gran mayoría de módulos concretamente, -85dBm.

Dicho esto se demostrará gráficamente que el sistema funciona correctamente para los diferentes escenarios definidos anteriormente con personas dado que en la realidad la moto será pilotada por alguien, y como sería posible aumentar ese nivel de potencia recibida basándonos en los resultados obtenidos, simplemente aumentando la potencia transmitida por el transmisor, o la ganancia de las antenas colocadas en el sistema.

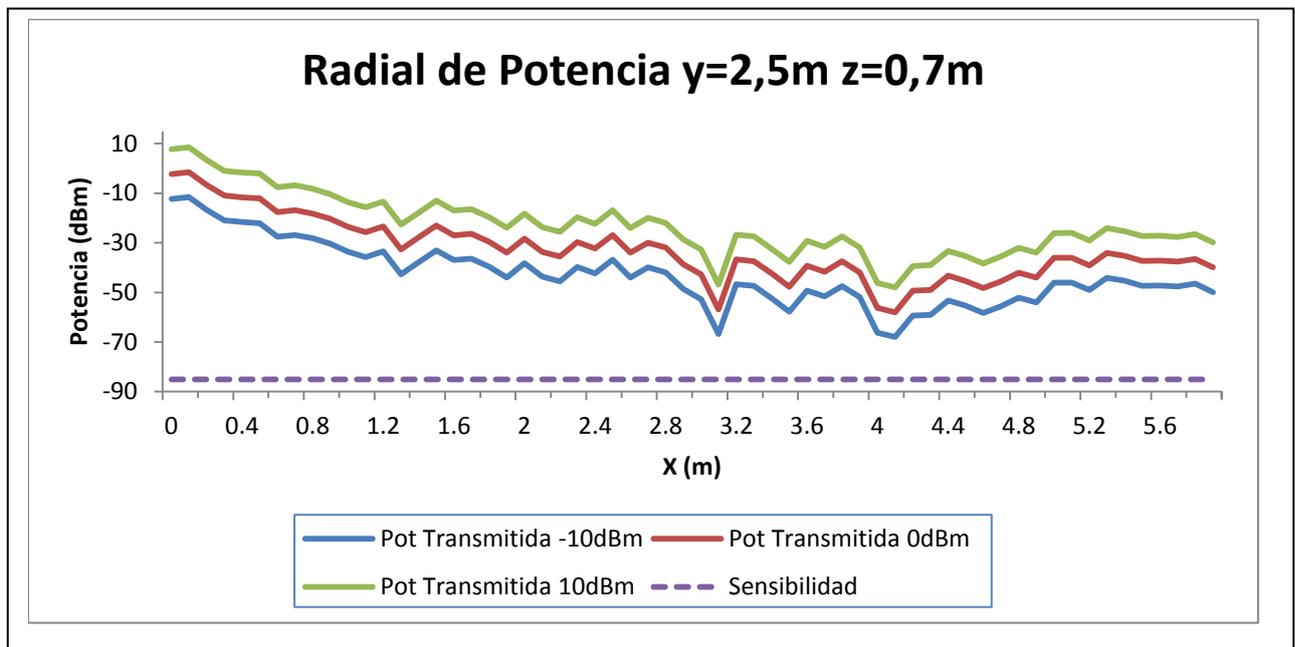


Fig.3.42. Radial de potencia del escenario 1 con persona en y=2,5m z=0,7m

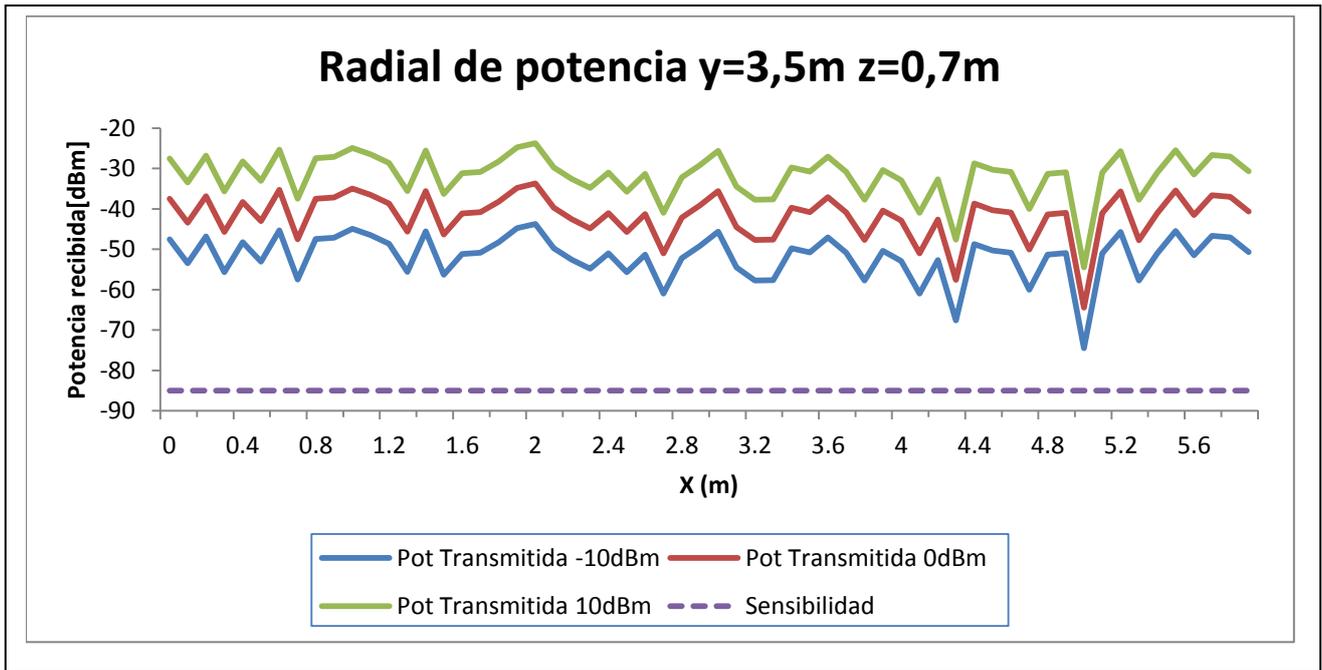


Fig.3.42. Radial de potencia del escenario 2 con persona en y=3,5m z=0,7m

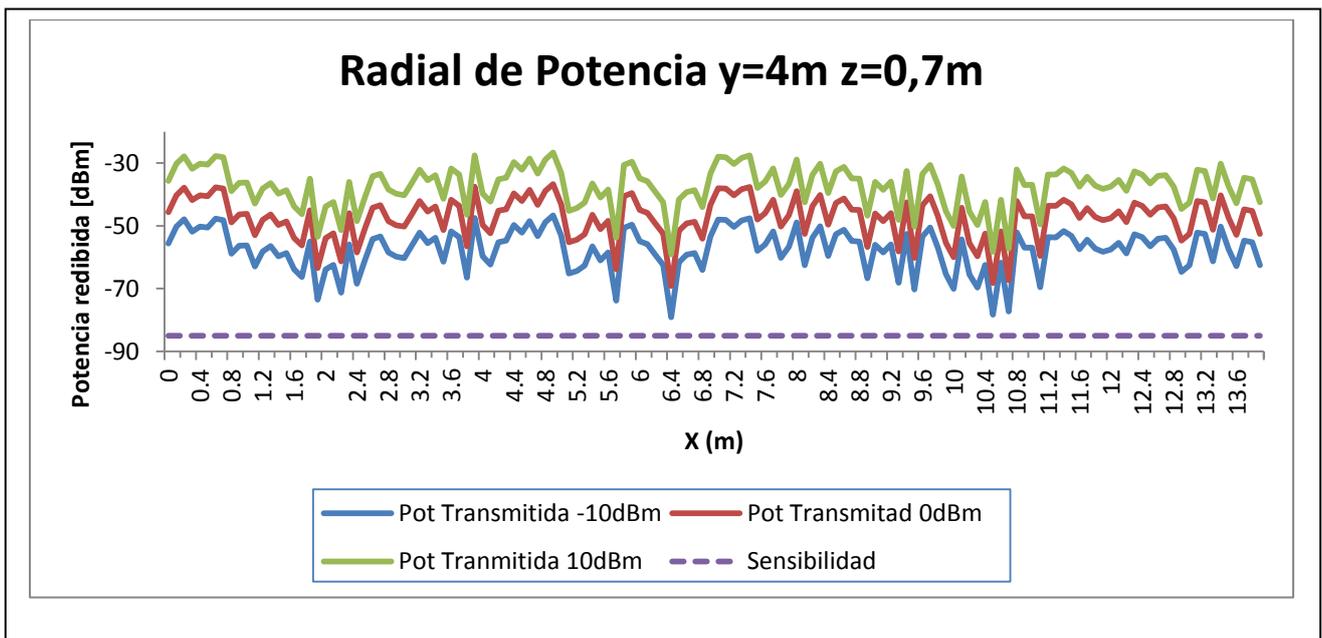


Fig.3.43. Radial de potencia del escenario 3 con persona en y=4m z=0,7m

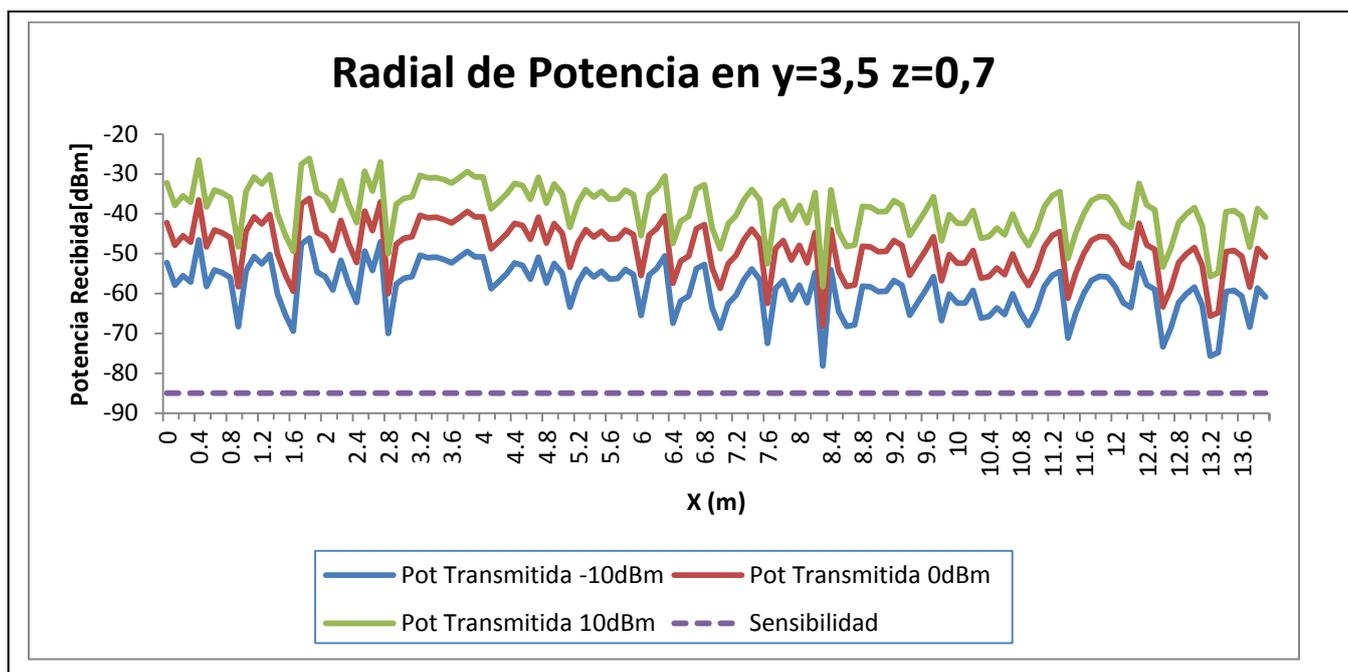


Fig.3.44. Radial de potencia del escenario 4 con persona en  $y=3,5m$   $z=0,7m$

Teniendo en cuenta las gráficas anteriores, que representan las radiales desde la parte inicial del escenario hasta la parte final, atravesando las motos justo por la mitad a una altura de 0,7m en cada uno de los escenarios descritos, podemos decir que el sistema funcionará correctamente dado que los niveles de potencia recibidos son mayores que el valor de sensibilidad. De todos modos, en el caso de que esto no ocurriese así sería posible tal y como se puede ver también en las gráficas, aumentar el nivel de potencia transmitida para conseguir tener mayor potencia recibida en la zona que nos interese.

Además hay que destacar que en la realidad se colocará más de una antena en la moto, lo que nos permite decir aún con más seguridad que no habrá problemas para el funcionamiento del sistema tanto a la frecuencia de 2,4 GHz a la que se han obtenido las gráficas anteriores, ni a la de 868MHz, dado que como ya se demostró en apartados anteriores, a la frecuencia de 868Mhz, los niveles de potencia recibida serán aún mayores.

### 3.3.5. Consideración de efectos de Convergencia

A continuación se van a analizar los resultados obtenidos tras aumentar la distancia entre ambas motos, ya que hasta ahora solo se había analizado una separación de unos 10 metros aproximadamente, cuando lo normal será que por lo menos haya una distancia de 50 metros entre ambas motos. Para ello se han realizado simulaciones con diferente tamaño de los cuboides para el caso de tener una antena colocada en la moto que va primero, y para el caso en que la antena esté colocada en la moto que va detrás. Para poder obtener algunas conclusiones de los resultados obtenidos, así como para demostrar que las conclusiones obtenidas anteriormente para los casos de distancias pequeñas entre motos son igual de aplicables para el caso de una distancia mayor y que el sistema funcionará correctamente aunque la distancia entre las motos sea mayor, se mostraran mapas bidimensionales de potencia y radiales de potencia de esos dos escenarios.

3.3.5.1. Mapas bidimensionales de potencia

En primer lugar se muestran los mapas bidimensionales de potencia del escenario con la antena en la moto 1, es decir, en la que va primero a las distintas resoluciones.

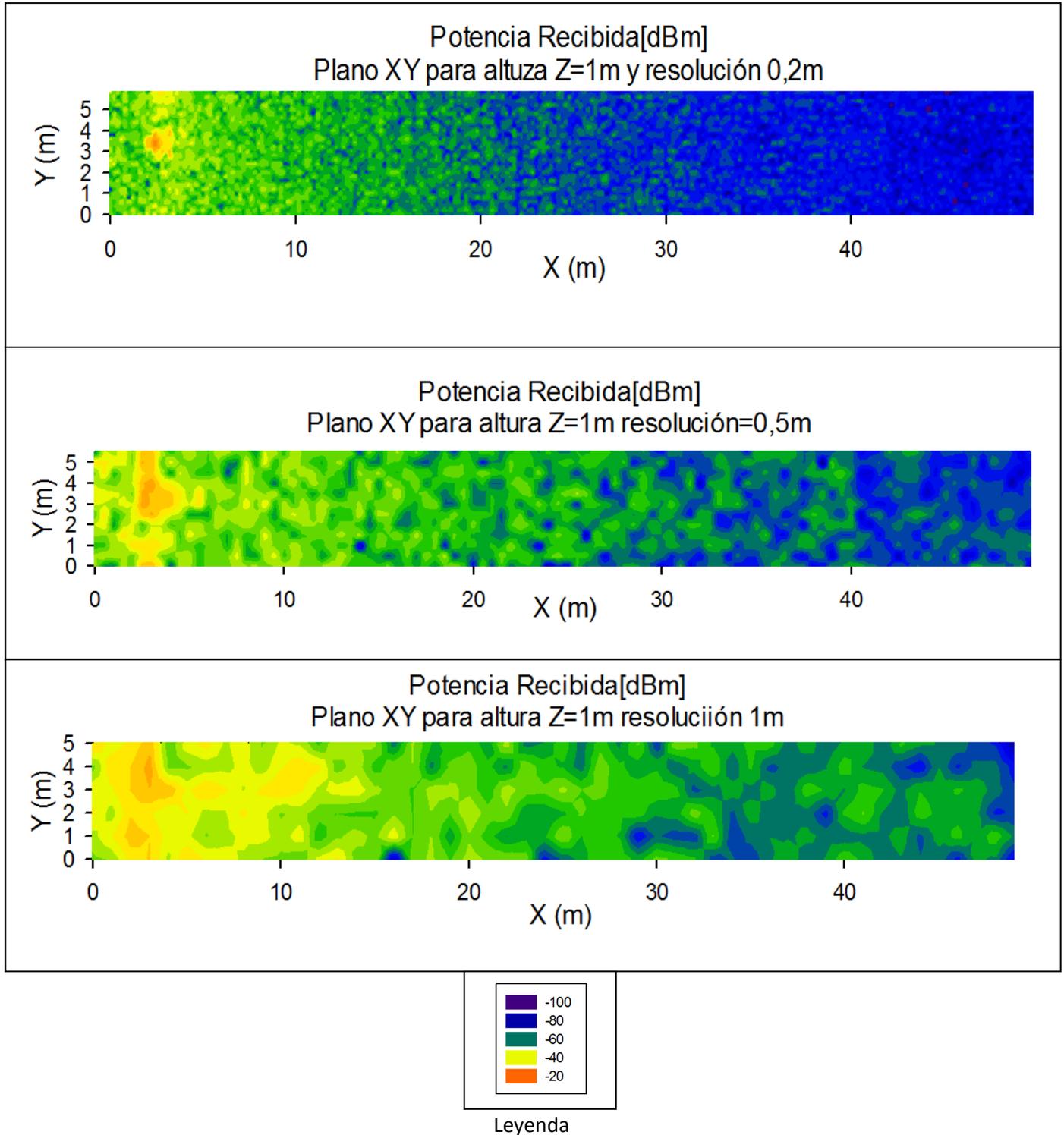


Fig.3.45. Mapas bidimensionales de potencia a 1m de altura para el escenario de grandes dimensiones con antena en moto 1 con resoluciones de 0,2m 0,5 m y 1m respectivamente

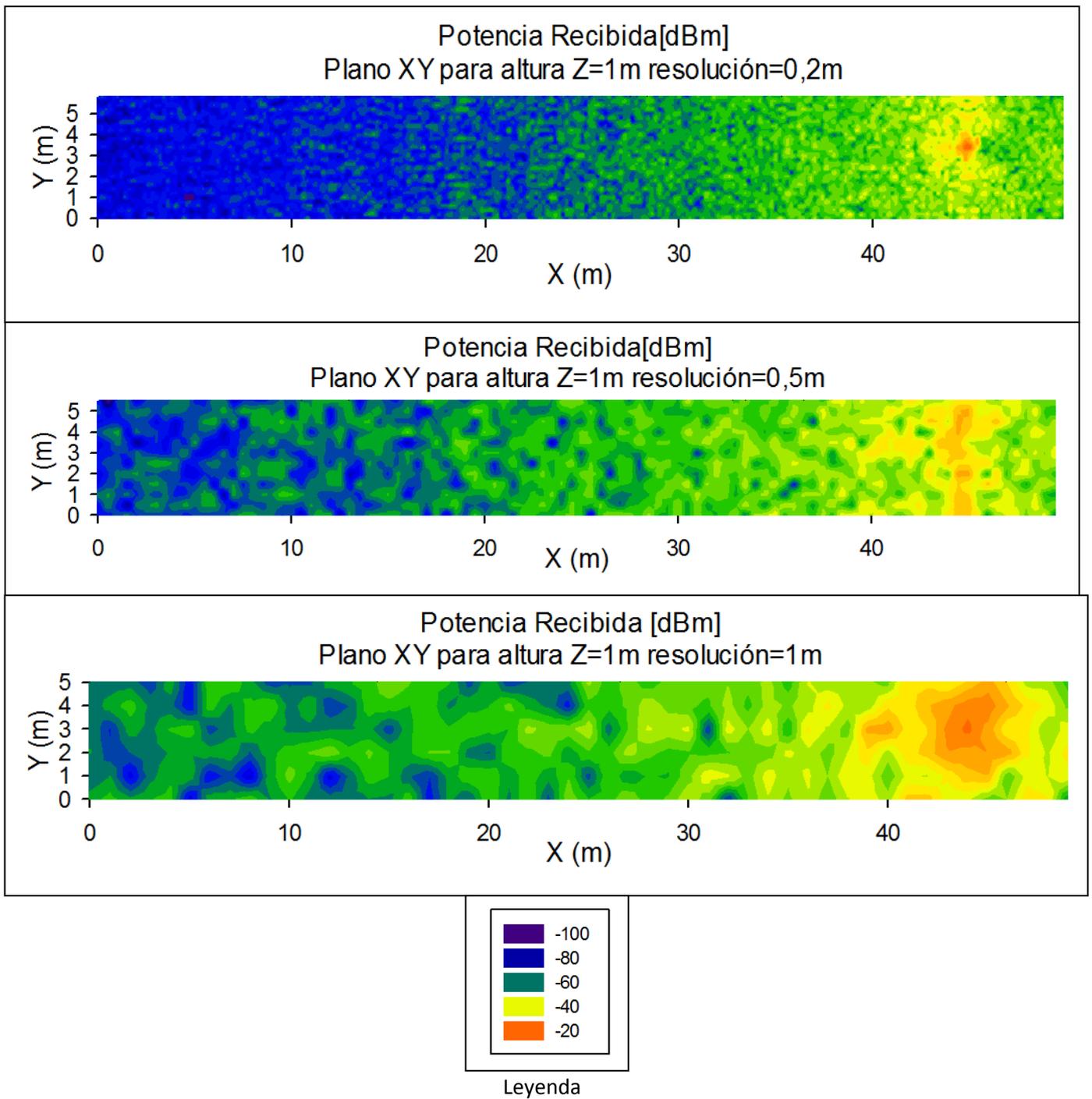


Fig.3.46. Mapas bidimensionales de potencia a 1m de altura para el escenario de grandes dimensiones con antena en moto 2 con resoluciones de 0,2m 0,5 m y 1m respectivamente

A la vista de los resultados podemos decir que con una resolución de 0,2m los resultados obtenidos no serán validos a partir de una cierta distancia a la antena ya que como se puede ver tanto para uno como para otro escenario, los valores de potencia recibida son muy pequeños, esto es debido a que las dimensiones de los cubos son tan pequeñas que no pueden captar ningún rayo y por lo tanto no tiene sentido los resultados obtenidos cuando nos alejamos de la antena una distancia considerable. Sin embargo para las distancias próximas a la antena, estos resultados serán muy validos y muy precisos dada la gran cantidad de cuboides en esa zona, y debido a que la distancia de separación entre los rayos no es mayor que las dimensiones de un cuboide.

Podemos ver como en los otros dos planos esto no ocurre dado que las dimensiones de los cuboides son mayores y por tanto siempre habrá una mayor o menor cantidad de rayos que los atraviesan. Sin embargo en los escenarios con resoluciones 0,5m ya se observa como en las distancias más alejadas de la antena (48-50m), el fenómeno comentado anteriormente ya se empieza a producir por lo que tendremos que tener especial cuidado con los resultados que se consideran válidos para el análisis del sistema, dado que como se puede apreciar el tamaño de los cuboides es un resultado muy importante para obtener buenos resultados.

3.3.5.2. Radiales de potencia

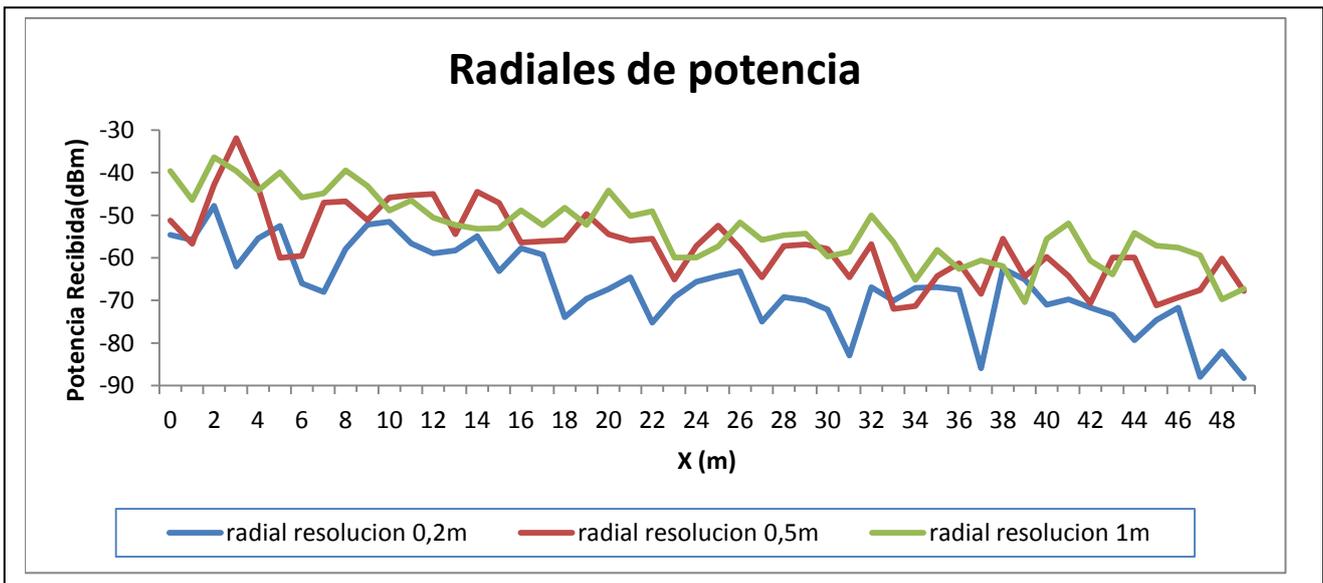


Fig.3.47. Radiales de potencia para z=1m y=3m en escenario grande con antena en moto 1 para distintas resoluciones

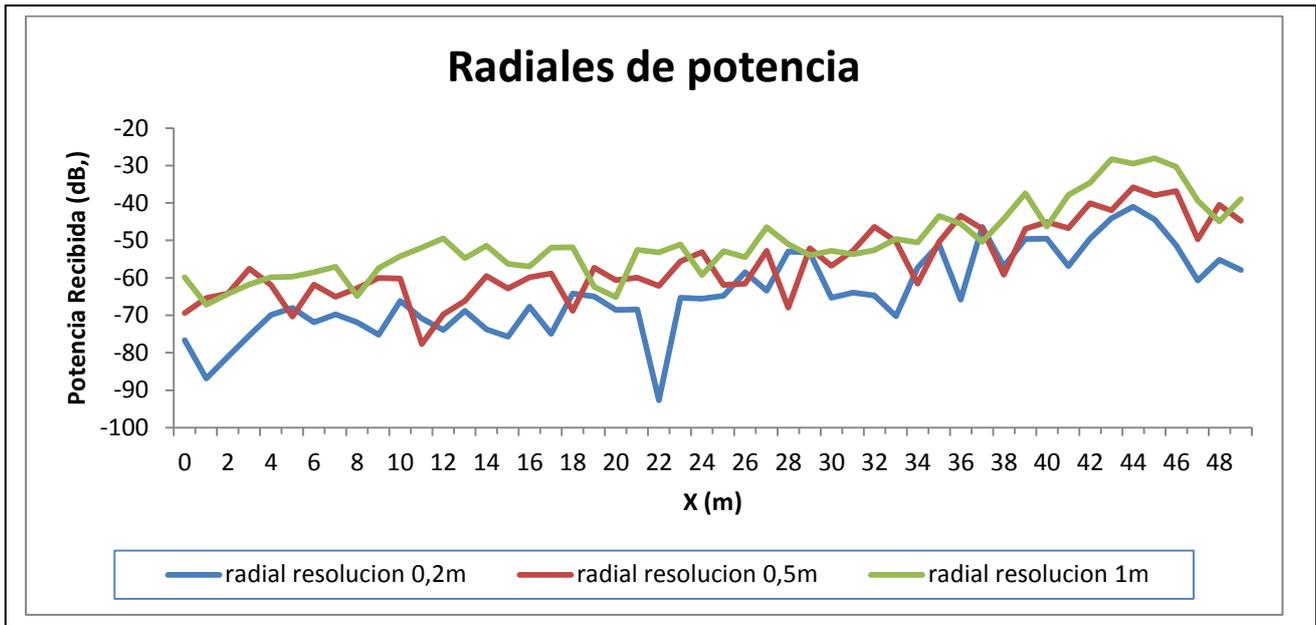


Fig.3.48. Radiales de potencia para  $z=1m$   $y=3m$  en escenario grande con antena en moto 2 para distintas resoluciones.

Como podemos ver en las figuras 3.47 y 3.48, el nivel de potencia recibida que obtenemos con el algoritmo de trazado de rayos también depende del tamaño de los cuboides, por lo tanto podemos decir que tal y como se observa, el nivel de potencia recibida será menor cuanto menor sea el tamaño del cuboide dado que menor cantidad de rayos atravesaran el cuboide cuanto más pequeño sea este. Sin embargo cuanto menor sea el cuboide, habrá una mayor precisión a la hora de obtener resultados.

Pero esto no es del todo cierto, ya que puede darse el caso de tener cuboides más pequeños que la distancia de separación entre rayos, la cual aumenta al aumentar las dimensiones del escenario; lo que provoca que un cuboide no sea capaz de captar rayos dando lugar así a una potencia recibida prácticamente nula en ese punto y generando así resultados inválidos para el análisis del escenario.

Por ello para conseguir estudiar adecuadamente el funcionamiento del sistema, se deberán realizar medidas a diferentes distancias de la antena transmisora y posteriormente comparar esas medidas con los resultados obtenidos a las distintas resoluciones, ya que para distancias próximas a la antena la resolución más pequeña, en este caso 0,2m será la mejor, pero a medida que nos alejamos esos resultados ya no serán validos por el hecho de que los cuboides no son capaces de captar rayos cuando la distancia de separación entre estos es mayor que las dimensiones del cuboide, por lo que en ese momento es muy probable que los resultados válidos serían los obtenidos a la resolución de 0,5m y lo mismo ocurrirá cuando la distancia de separación entre los rayos sea aún mayor, de modo que en ese momento los resultados válidos serían los obtenidos a la resolución de 1m.

Así es como posteriormente se deberían comparar las medidas que se realicen, con los correspondientes resultados obtenidos de las simulaciones para conseguir que el sistema funcione correctamente.

### 3.3.5.3. Perfil de Retardo Potencia

La influencia del tamaño del cuboide en el número de rayos que este es capaz de captar; si sus dimensiones son menores que la separación de los rayos no podrá captar ningún rayo, se puede comprobar de manera muy clara a través del perfil de retardo de potencia para un mismo punto del escenario con diferentes dimensiones de cuboide.

A continuación se muestran los perfiles de retardo de potencia para el cuboide  $x=15m$   $y=3m$   $z=1m$  para las resoluciones de 0,2m 0,5m y 1m en el escenario con la antena colocada en la moto 2.

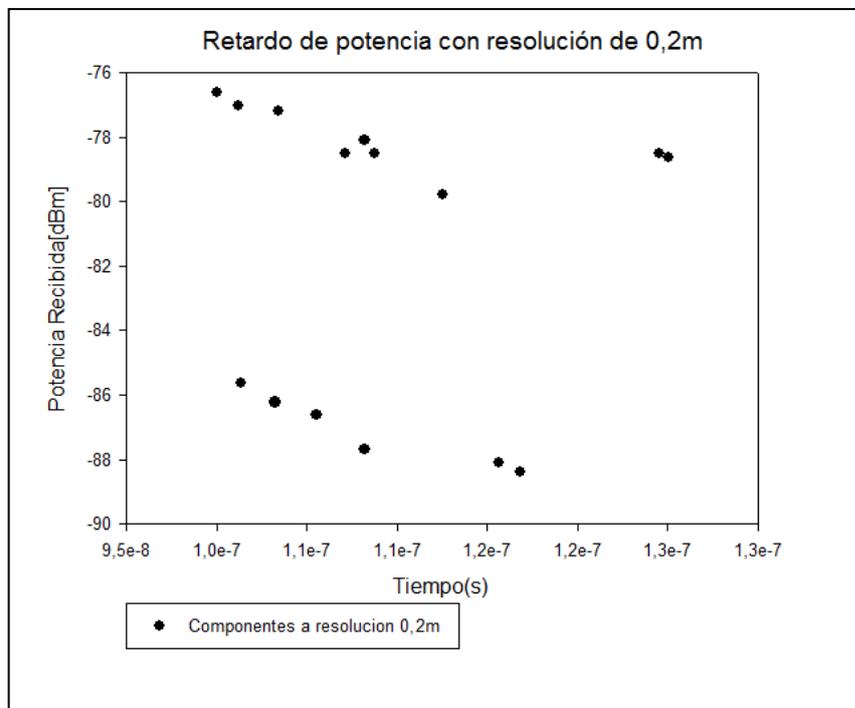


Fig.3.49. Perfil de retardo potencia para el cuboide  $x=15$   $y=3m$   $z=1m$  para el escenario grande con la antena en la moto 2 y resolución de 0,2m.

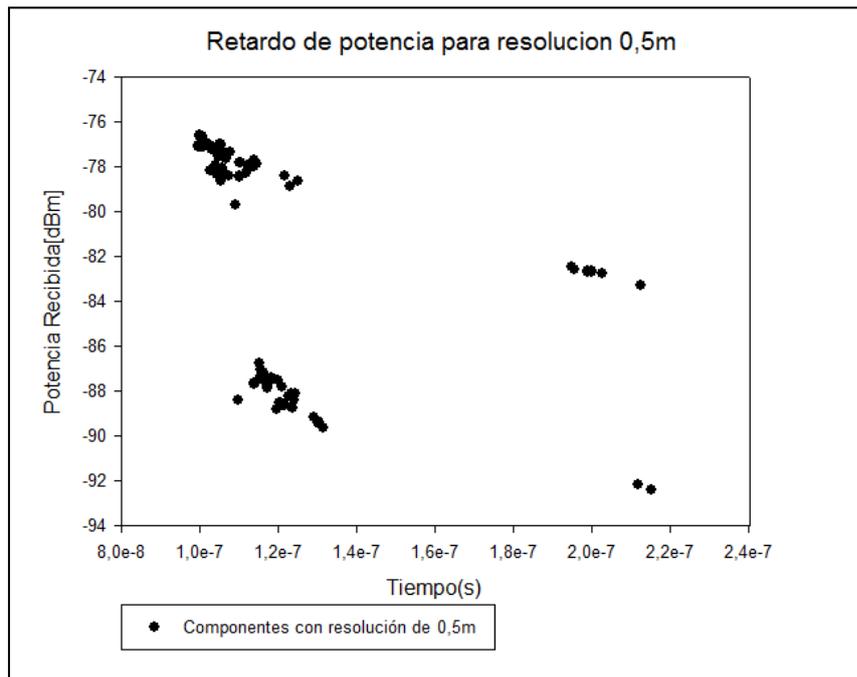


Fig.3.50. Perfil de retardo potencia para el cuboide x=15 y=3m z=1m para el escenario grande con la antena en la moto 2 y resolución de 0,5m.

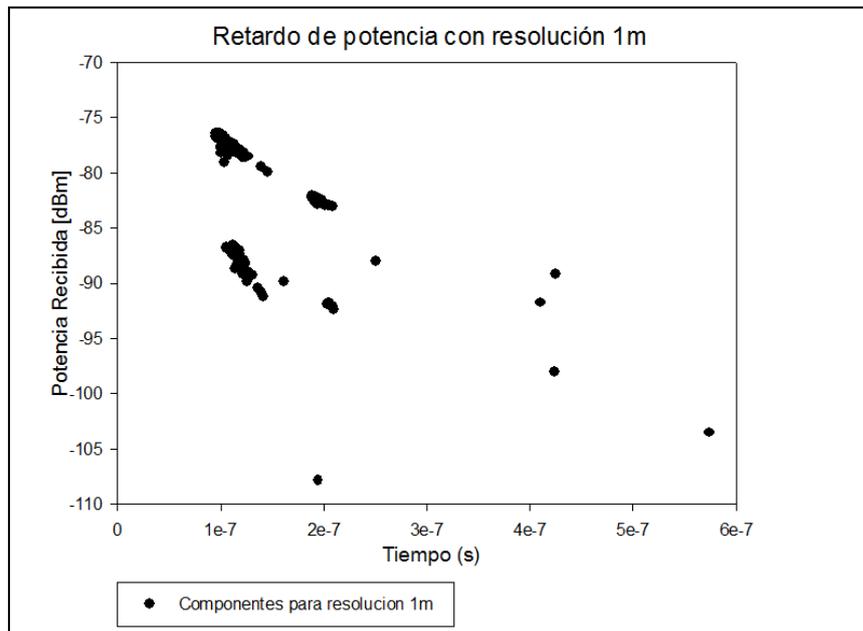


Fig.3.50. Perfil de retardo potencia para el cuboide x=15 y=3m z=1m para el escenario grande con la antena en la moto 2 y resolución de 0,5m.

En los perfiles de retardo anteriores se puede observar claramente como el número de componentes multitrayecto que capta el cuboide con resolución 0,2m es mucho menor que para el caso de 0,5m y 1m lo que demuestra el hecho que hemos comentando anteriormente y que puede dar lugar a que un cuboide no capte rayos. Sin embargo la diferencia entre el perfil de retardo con resolución de 0,5m y el perfil de retardo con resolución de 1m no es muy elevada y en ambos casos existe un número de componentes multitrayecto bastante grande, debido a que una distancia a la antena de 40m no es demasiado grande como para que la diferencia entre una resolución de 0,5m y una resolución de 1m se pueda apreciar con claridad, aunque la diferencia sí que exista.

En definitiva ha quedado demostrado que es importante tener en cuenta la resolución del escenario, tanto para evitar problemas de convergencia, como por la forma en que varían los resultados dependiendo de dicha resolución.

## 4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Como ha quedado demostrado en este proyecto, la distribución de los niveles de potencia recibida en una moto, depende en gran medida tanto del conductor que vaya sobre la moto, como de la situación de los diferentes elementos que intervienen en el entorno, entre ellos la antena, ya que el nivel de potencia recibida cambia considerablemente dependiendo de la distancia a la misma.

Otro de los aspectos que influyen en gran medida en el funcionamiento de la red es la frecuencia a la que trabajan los dispositivos que la forman, de tal forma que en mi opinión para obtención de datos de telemetría como humedad de la carretera, temperatura, o velocidad del viento sería totalmente posible el empleo de la tecnología ZigBee, mientras que para la comunicación entre las personas o la conexión con el teléfono móvil emplearía tecnología Bluetooth dado que proporciona una mayor velocidad de transferencia, necesario para ese tipo de comunicaciones.

Como líneas futuras se deberán de realizar medidas en un escenario real para poder compararlas con las obtenidas de las simulaciones y extraer así conclusiones más claras sobre el comportamiento del sistema a las diferentes distancias entre las motos, para realizar un sistema de comunicaciones que funcione de la manera más óptima posible.

En definitiva hay que tener en cuenta todos los factores explicados en este proyecto si se quiere conseguir una planificación adecuada del canal radioeléctrico de una red de sensores implantada en una moto, y realizar las simulaciones correspondientes que nos facilitaran posteriormente la toma de medidas, y comparar ambos resultados tanto los empíricos como los deterministas para lograr el mejor sistema de comunicaciones posible.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PFC de Alexandra Cuerva García titulado “Redes y Servicios Ubicuos Para Internet de las Cosas en Dispositivos Llevables”. Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] PFC de Inmaculada Arévalo Escudero titulado “Estudio del Tráfico Bluetooth en Entornos Reales de Simulación”. Universidad Pontificia Comillas.
- [3] PFC de Alberto Moreno Tablado titulado “Seguridad en Bluetooth”. Universidad Pontificia Comillas.
- [4] PFC de Pablo Jiménez Rived titulado “Evaluación Radioeléctrica de Sensores Basados en Tecnología Bluetooth para Entornos Interiores”. Universidad Pública de Navarra.
- [5]<http://www.blauden.com/scala-rider-teamset-mp3-intercomunicador-bluetooth-para-moto-piloto-pasajero>
- [6] [https://lh4.ggpht.com/KDvDDiD6O\\_1BJTEdWnyXKnxLosZfLtl\\_OReleHjMh0l0zfX2v5FRUx-zm1PHjx6lAnWjeg=s96](https://lh4.ggpht.com/KDvDDiD6O_1BJTEdWnyXKnxLosZfLtl_OReleHjMh0l0zfX2v5FRUx-zm1PHjx6lAnWjeg=s96)
- [7][http://www.motosprint-shop.com/es/schuberth-intercom-c3-pro-src-system/7127\\_2006.html](http://www.motosprint-shop.com/es/schuberth-intercom-c3-pro-src-system/7127_2006.html)
- [8] <http://www.motorpasion.com/gadgets/gps-garmin-para-motos>
- [9] PFC de Tomás Cantabrana Martínez titulado “Caracterización del Canal Radioeléctrico en el Interior de Vagones de Transporte en el Sector Ferroviario”. Universidad Pública de Navarra.
- [10] PFC de Ángel Armendáriz Mateos titulado “Análisis de la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de propagación para entornos interiores”. Universidad Pública de Navarra.
- [11] ZigBee y sus aplicaciones por Ignacio Vidri Salgado. Universidad Pontificia Comillas.
- [12]<http://www.microgenios.com.br/website/index.php/curso-presencial-zigbee-automacao-wireless>
- [13] PFC de Valeriano Campillo Torrecillas titulado “Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD”. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [14] PFC de Carmen Rivarés Garasa titulado “Análisis de prestaciones de redes inalámbricas de área personal on-body en un entorno interior”. Universidad Pública de Navarra.
- [15] IEEE: Wireless Audio Communication Network for In-Vehicle Access of Infotainment Services in Motorcycles.