



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

DISPOSITIVO HRM Y RED AD-HOC PARA COMPARTIR Y GEOLOCALIZAR A UN GRUPO DE CORREDORES DE RUNNING

Daniel Remiro Aramendia

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 24 de Julio de 2014

Contenido

1. Introducción	6
2. Objetivos	7
3. Estado del arte	8
3.1 Situación actual	8
3.2 Redes inalámbricas de área personal (WPAN).....	8
3.3 Redes inalámbricas de área corporal (WPAN)	22
3.4 Tecnología ZigBee / 802.15.4	34
3.4.1 Introducción	34
3.4.2 Arquitectura	35
4. Propagación Radioeléctrica.....	42
4.1. Modelo de propagación en espacio libre.....	42
4.2. Fenómenos de propagación.....	43
4.2.1. Atenuación y absorción.....	43
4.2.2. Reflexión y refracción.....	47
4.2.3. Difracción	48
4.2.4. Dispersión.....	49
4.2.5. Multitrayecto (Multipath)	50
5. Análisis de los resultados	52
5.1 Introducción	52
5.2 Metodología y parámetros.....	52
5.2.1 Simulación	52
5.2.2 Medidas.....	55
5.2.3 Medidas RSSI	57
5.3 Definición de los escenarios.....	58
5.3.1 Escenario 1	58
5.3.2 Escenario 2	60
5.3.3 Escenario 3	61
5.3.4 Escenario 4	63
5.4 Resultados	64
5.4.1 Escenario 1	64
5.4.2 Escenario 2	66

5.4.3 Escenario 3	68
5.5.4 Escenario 4	75
6. Conclusiones.....	81
7. Líneas futuras	82
8. Anexos	83
8.1 Configuraciones adicionales.....	83
8.1.1 Escenario 1 con cuatro personas	83
8.1.2 Escenario 1 con cinco personas	84
8.2 Mapas de cobertura de todas las simulaciones realizadas	85
8.3 Fotos reales de los escenarios.....	127
Escenario 1/2.....	127
Escenario 3	128
Escenario 4	129
8.4. Herramientas utilizadas	131
8.4.1. Hardware.....	131
8.4.2. Software	153

1. Introducción

En los últimos años los sistemas de comunicaciones inalámbricos de corto alcance y alta frecuencia han experimentado un gran desarrollo comercial, originado todo ello por el aumento de aplicaciones y de la calidad de estas.

En la actualidad en el *running* se utiliza el RFID para el cronometraje y el GPS para la geolocalización, con este trabajo se busca crear una red WPAN para la práctica deportiva del *running*; de manera que todos los integrantes de la red puedan compartir su información.

La práctica de *running* va a conllevar que nuestro escenario sea *outdoor*, que el cuerpo dónde se encuentra la antena absorba energía, que el entorno interfiera en la señal y que los sujetos se muevan con una cierta velocidad.

Con este proyecto se busca desarrollar una tecnología que pueda mejorar y reemplazar sistemas existentes en el mercado y con ello se puedan mejorar los métodos de entrenamiento y la conectividad entre los participantes.

2. Objetivos

El objetivo del proyecto es el análisis del funcionamiento de sistemas inalámbricos aplicado a la práctica deportiva del Running.

El empleo de sistemas inalámbricos puede aportar información relevante tanto en las etapas de entrenamiento de los deportistas que practican Running como en el caso de realizar competiciones deportivas. De esta manera, es factible poder contar tanto con datos de carácter biomédico, relacionados con el adecuado desarrollo de la actividad física, como de parámetros de localización, que pueden ser determinantes a la hora de poder analizar desde un punto de vista de competición el desarrollo del deporte.

Dicho tipo de sistemas encuentran gran aceptación por su bajo coste, su reducido consumo energético y su gran flexibilidad para la definición de redes de elementos que desean intercambiar información entre sí.

Debido a las características complejas del canal de RF, es necesario estudiar el efecto del entorno, interferencia y posición de los transceptores. Para ello, se cuenta con los siguientes elementos:

- Medidas empíricas de RF
- Simulaciones sobre modelos empíricos
- Simulaciones sobre trazado de rayos 3D deterministas
- Análisis de impacto sobre sistemas de posible implantación en el entorno de la práctica deportiva de Judo, tales como RFID, ZigBee o Bluetooth.

3. Estado del arte

3.1 Situación actual

En la actualidad el atletismo está teniendo un gran auge en su vertiente popular y por ello multitud de empresas se han dedicado a desarrollar multitud de aparatos de geolocalización (pulsómetros con GPS) o aplicaciones de móvil y con la posibilidad de compartir dichos datos en redes sociales (endomondo, runtastic, Garmin connect,...); pero ninguna da la posibilidad de realizar estas acciones en directo.

Mientras, en el atletismo profesional todos los esfuerzos en evolución han ido a parar en la mejora de los controles anti dopaje y en la mejora de los tapetes móviles para nuevos métodos de entrenamiento como en el Oregon Project de Nike.

Puesto que de momento no hay nada que se asemeje a lo que abordamos en este proyecto a continuación expondré los estudios más cercanos que encontrado en cuanto a redes inalámbricas de área personal (WPAN) y corporales (WBAN).

3.2 Redes inalámbricas de área personal (WPAN)

Una red de área personal es aquella que puede interconectar en un radio de unos 10 metros aproximadamente.

Estas redes nacieron en el año 1999, cuando el IEEE creó el grupo de trabajo 802.15, cuyo propósito es el estudio de las redes de área personal. Los objetivos del grupo 802.15 son:

1. Equipos con un consumo de potencia mínimo para facilitar su uso con baterías.
2. Equipos ligeros y manejables para que se puedan mover fácilmente dentro de la WPAN.
3. Obtener una tecnología con bajos costes para que resulte competitiva en el mercado.
4. Resolver el problema de interferencias en la banda ISM (Industrial Scientific Medical) de 2,4 GHz, muy utilizada por ser una banda de uso sin licencia en esta y otras aplicaciones de este tipo.

En el estándar 802.15 existen diferentes grupos de trabajo, dedicado cada uno de ellos a diferentes objetivos; a continuación daremos una breve visión de cada uno de ellos.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.1:**

Fue aprobado como nuevo estándar el 15 de abril de 2002 y se publicó el 14 de junio del mismo año. A menudo se le confunde con el estándar Bluetooth, pero es Bluetooth el que basa sus capas inferiores en esta especificación. Este estándar está orientado a interconectar dispositivos electrónicos (teléfonos móviles, ordenadores, PDA's, periféricos de ordenadores,...) y permite la transmisión de voz y datos.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.2:**

En él se aborda la coexistencia de diferentes sistemas inalámbricos que trabajan en bandas de frecuencia que no necesitan licencia. Se proponen dos mecanismos de coexistencia; existe el mecanismo colaborativo, cuando hay protocolos establecidos entre las diferentes redes estas negocian el mínimo de interferencia mutua; y existe el mecanismo no colaborativo, cuando no hay ningún tipo de protocolo entre ellas.

Dependiendo del entorno en el que se esté trabajando será conveniente el uso de uno u otro mecanismo.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.3:**

Estándar creado para diseñar WPAN's capaces de transmitir la información a mayor velocidad y con más eficiencia.

Sus principales características son:

- Multitud de velocidades de transmisión de datos: 11, 22, 33, 44 y 55 Mbps.
- Bajo consumo de potencia, entorno a una potencia de transmisión de 8 dBm para unas distancias de 30 a 50 metros.
- Bajo costo debido a la baja complejidad del estándar.
- Comunicación entre dispositivos punto a punto.
- Utilización del algoritmo de encriptación *Advanced Encryption Standard*, lo que proporciona robustez en cuanto a la seguridad. El nivel de seguridad puede variar según las necesidades del usuario.

Además, encontramos algunas ampliaciones a este estándar:

- **El estándar IEEE 802.15.3a o UWB:**

UWB es una tecnología que comenzó a ser desarrollada en la década los 60 para transmisiones de datos alta velocidad. Las velocidades conseguidas son 110 Mbps a 10 metros y de 480 Mbps en distancias inferiores a un metro. Su aplicación es similar a la del Bluetooth, pero es usada para transmisiones de datos que necesitan de un gran ancho de banda, cosa que el Bluetooth no puede dado que su velocidad de transmisión de datos es de 1Mbps.

- **El estándar IEEE 802.15.3b:**

Desarrollado para dotar a la capa MAC (Medium Access Control) de una mayor interoperabilidad y mejorar compatibilidad con estándares más antiguos.

- **El estándar IEEE 802.15.3c:**

Consiste en una capa física para ondas milimétricas. Estas ondas transmiten en la banda libre de 57-64 GHz y permiten velocidades de transferencia de hasta 2 Gbps; pensadas para accesos a internet de alta velocidad, retransmisión de streamings o retransmisiones en HD.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.4:**

Fue creado para investigar soluciones de baja velocidad con un gran tiempo de vida de las baterías y una estructura de muy baja complejidad. Funciona en las bandas de frecuencia ISM y está dirigida a aplicaciones con sensores, juguetes interactivos, tarjetas inteligentes, controles remotos, domótica, etc.

- Tasas de transferencia de datos: 20, 40 y 250 Kbps.
- Direccionamientos de red cortos 16-bit y largos 64 bits (direccionamiento IEEE).
- Soporte para dispositivos de latencia cortos (como un joystick).
- Acceso al canal de comunicación por CSMA-CA.
- Establecimiento de red automático a través de un coordinador.
- Administración de energía para asegurar el bajo consumo.
- 16 canales de comunicación en la banda 2.4 Ghz, 10 en la de 915 Mhz y 1 en la de 868 Mhz.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.5:**

Trabaja en las especificaciones de una red mallada en el ámbito de las Wireless PAN. Se tratará de una red mallada total (full mesh) si todos los nodos de la red están conectados entre sí y se considerará una red mallada parcial (partial mesh) cuando algunos nodos están conectados a todos los demás, pero otros solo lo están a los nodos con los que intercambian datos.

Las redes malladas tienen la capacidad de proporcionar:

- Ampliación de la cobertura sin la necesidad de aumentar la potencia de transmisión o la sensibilidad del receptor.
- Fiabilidad mejorada a través de múltiples rutas redundadas.
- Configuración de red muy fácil.
- Mejora de la vida de la batería debido al menor número de retransmisiones.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.6:**

Estándar conocido como BAN (Body Area Network). No trabaja en una banda de frecuencia concreta, aunque, si lo hacen sus aplicaciones. Consiste en un estándar de bajo consumo de potencia que actúe sobre, dentro o alrededor del cuerpo humano (sin limitarlo a los humanos), para una multitud de aplicaciones; yendo desde aplicaciones médicas, electrónica de consumo, de entretenimiento, etc.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.7:**

Estándar conocido como VLC (Visible Light Communication). Sus características más reseñables son la modificación de las capas física y MAC (Medium Access Control) para poder conseguir comunicaciones en el espectro de luz visible.

Tras esta explicación poniendo en contexto las redes WPAN, ahora pasaremos a poner algunos ejemplos de lo que podemos encontrar de estas cercanas al objetivo del proyecto.

Comenzaremos con el artículo ***High-rate wireless personal area networks[1]***; en este artículo se presenta un panorama general de las redes inalámbricas de área personal *high-rate*, sus aplicaciones específicas y una descripción técnica del control de acceso al medio, la capa física y el rendimiento del sistema. Las WPAN *high-rate* operan en la banda sin licencia de 2,4 GHz a velocidades de datos de hasta 55 Mbps, que son proporcionales a la distribución de vídeo de alta definición y audio de alta fidelidad. El Task Group 3 y la industria han realizado un esfuerzo constante para crear una especificación estándar de la capa MAC y de la capa física para alta velocidad.

Tras esta visión general pasamos a ver en los siguientes artículos el estándar 802.15.4; en el artículo ***IEEE 802.15.4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks[2]*** se hace un análisis sobre cómo es una red de área personal inalámbrica de baja velocidad, o LR-WPAN, es una red de comunicaciones inalámbricas diseñada para bajo consumo de energía, de corto alcance y de bajo costo. Hasta ahora, el foco principal en la industria inalámbrica ha estado fijado en comunicaciones con un mayor rendimiento de datos, dejando de lado un conjunto de aplicaciones que requieren conectividad inalámbrica sencilla con un rendimiento relajado y requisitos de latencia. El Task Group 4 se encuentra actualmente trabajando para definir un estándar de comunicación inalámbrica para LR-WPAN. Este artículo aborda las consideraciones técnicas y los requisitos necesarios del sistema al implementar una red de área personal inalámbrica de bajo consumo, de bajo coste y ofrecer una visión general de las aplicaciones que la tecnología hará posible.

Mientras que en *Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks*[3] se aborda que el estándar IEEE 802.15.4 está diseñado específicamente para redes inalámbricas de área personal de baja velocidad (LR-WPAN) enfocado a las redes de sensores. Se trata de proporcionar a la red inalámbrica una baja tasa de datos, baja potencia y bajo costo en la comunicación a nivel de dispositivo. En este trabajo se ha establecido un entorno realista para la evaluación previa de los resultados del estándar IEEE 802.15.4 en redes inalámbricas.

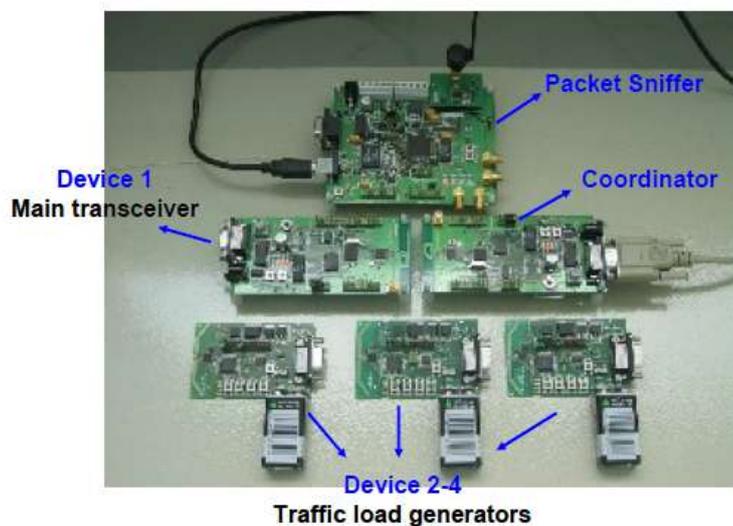


Fig. 3.1: Dispositivo experimental [3]

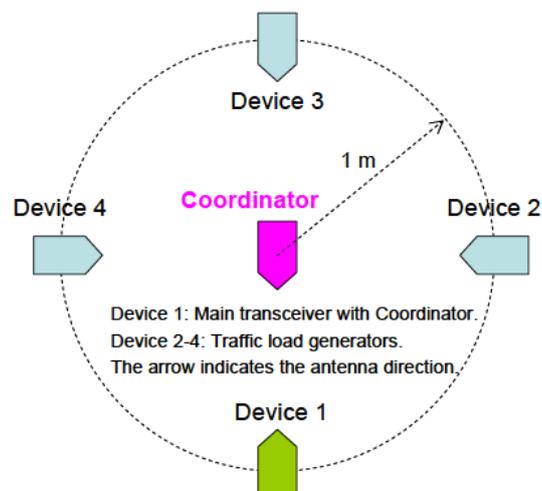


Fig. 3.2: Setup de los experimentos en topología de estrella [3]

Se llevan a cabo varias series de experimentos prácticos para estudiar sus diversas características (las condiciones de los experimentos se encuentran impresas en las gráficas) y los resultados que se obtienen son los siguientes:

I. Transmisión de datos directas e indirectas

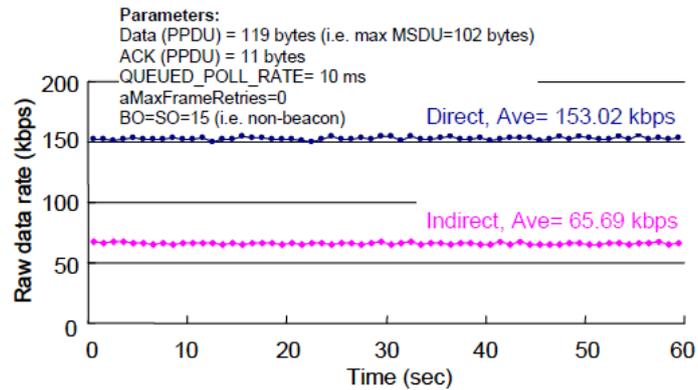


Fig. 3.3: Velocidad de datos para transmisiones directas e indirectas en redes habilitadas como no balizadas [3]

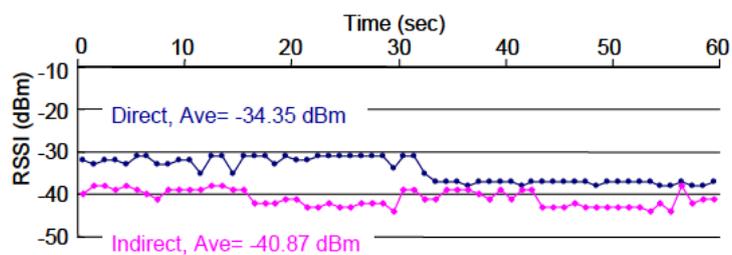


Fig. 3.4: RSSI datos para transmisiones directas e indirectas en redes habilitadas no balizadas [3]

II. El mecanismo CSMA-CA

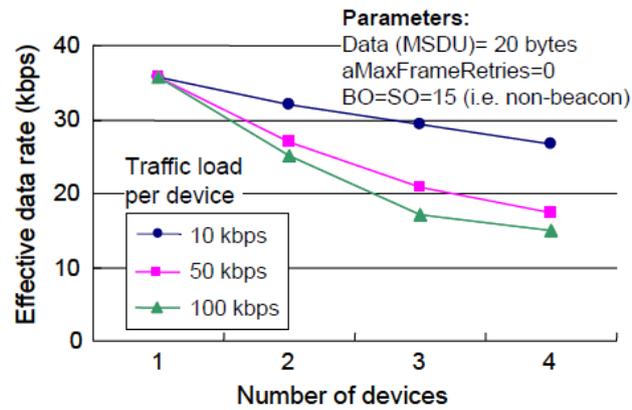


Fig. 3.5: Tasa efectiva de datos de CSMA-CA con carga de tráfico variable en una red habilitada como no balizada [3]

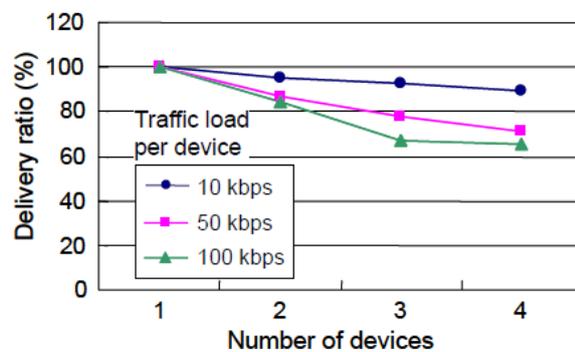


Fig. 3.6: Velocidad de entrega de CSMA-CA con carga de tráfico variable en una red habilitada como no balizada [3]

III. Tamaño de la carga útil de datos

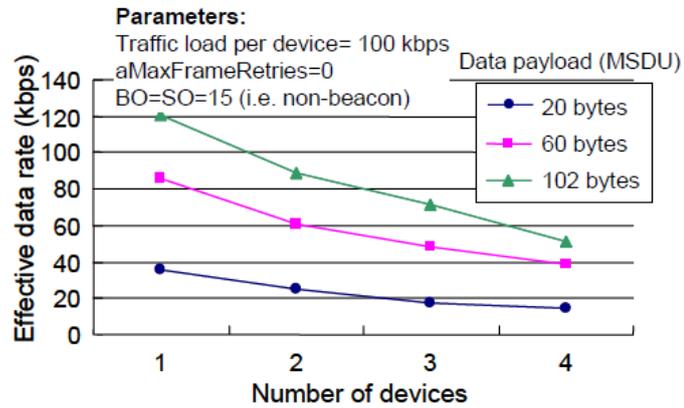


Fig. 3.7: Tasa efectiva de datos de CSMA-CA con carga útil de datos variable en una red habilitada como no balizada [3]

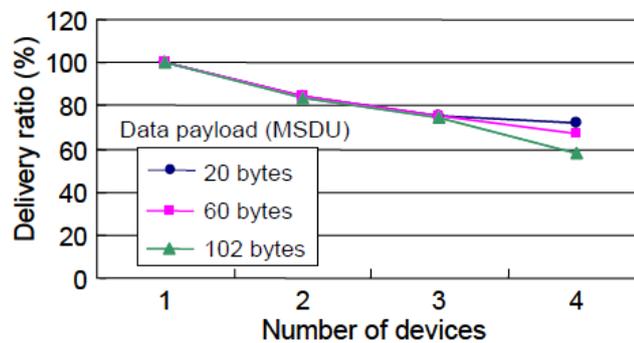


Fig. 3.8: Velocidad de entrega de CSMA-CA con carga útil de datos variable en una red habilitada como no balizada [3]

IV. En modo baliza habilitado

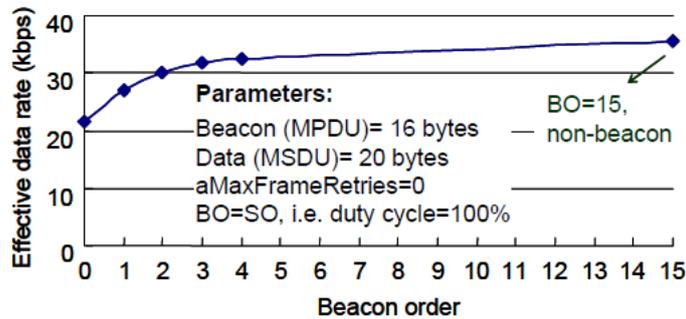


Fig. 3.9: Velocidad de datos efectiva en red habilitada como balizada [3]

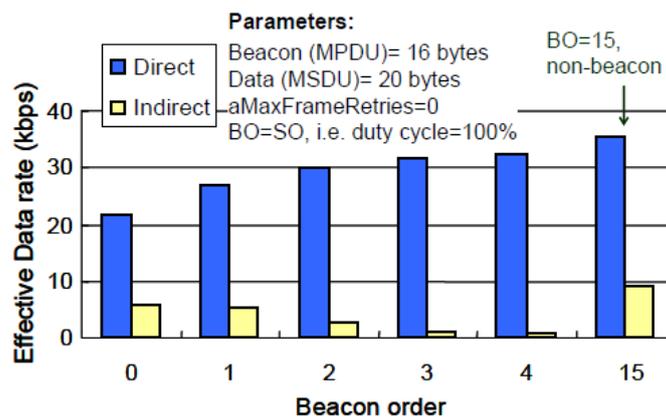


Fig. 3.10: Velocidad de datos efectiva en red habilitada como balizada para transmisión directa e indirecta [3]

El rendimiento de los datos, la relación de la entrega y la indicación de intensidad de señal recibida (RSSI) se investigan como las métricas de rendimiento.

Los resultados muestran las características de sobrecarga del protocolo que reduce el rendimiento alcanzable; añadiendo más nodos en CSMA-CA aumenta probabilidad de colisión y disminuye el rendimiento; el aumento del tamaño de carga útil reduce la sobrecarga por trama y aumenta el rendimiento; la transmisión de más balizas reduce el rendimiento útil. Los experimentos permiten asociar valores numéricos con estos fenómenos. Con su simplicidad, bajo consumo de energía, conectividad a bajo costo y la creación de redes a nivel de dispositivo hace que IEEE 802.15.4 sea adecuado para aplicaciones de redes de sensores inalámbricos.

Continuando en este estándar pero mirando las redes UWB tenemos que en **UWB Systems for Wireless Sensor Networks[4]** las redes de sensores inalámbricos se están convirtiendo en una importante área de las comunicaciones. Permiten una gran cantidad de nuevas aplicaciones como la vigilancia, control de edificios, automatización de fábricas y la detección en el vehículo.

	2.4GHz ZigBee	2.4 GHz WiFi	UWB
Data rate	Low, 250kbps	High, 11 Mbps for 802.11b and 100+ Mbps for 802.11n	Medium, 1 Mbit/s mandatory, and up to 27Mbps for 802.15.4a
Transmission distance	Short, < 30 meters	Long, up to 100 meters	Short, < 30 meters
Location accuracy	Low, several meters	Low, several meters	High, < 50cm
Power consumption	Low, 20mW – 40mW	High, 500mW- 1W	Low, 30mW
Multipath performance	Poor	Poor	Good
Interference resilience	Low	Medium	High with high complexity receivers , low with simplest receivers
Interference to other systems	High	High	Low
Complexity and cost	Low	High	Low – medium – high are possible

Fig. 3.11: Comparación de las tecnologías inalámbricas [4]

Los nodos sensores tienen que operar bajo restricciones severas de consumo de energía y factor de forma y proporcionar la capacidad precisa de auto-localización. Estos requisitos se pueden cumplir muy bien con varias formas de la tecnología de transmisión UWB. Se discuten varias técnicas y compensaciones de los sistemas UWB e indican que el time-hopping y el frequency-hopping combinado con técnicas simples de acceso múltiple, como ALOHA, son diseños más adecuados. También se describe el estándar IEEE 802.15.4a, un importante sistema que adopta el radio impulso UWB para asegurar comunicaciones de datos robustas y de precisión. Con el fin de dar cabida a las redes heterogéneas, que utiliza una modulación específica, codificación y formas de onda que pueden ser detectados así por ambos receptores coherentes y no coherentes.

Pasando a otros estándares en el artículo **IEEE 802.15.5 WPAN mesh standard-low rate part: Meshing the wireless sensor networks**[5] se presenta el funcionamiento del IEEE 802.15.5, que proporciona la capacidad para una malla de dispositivos de una red de área personal inalámbrica (WPAN). La norma proporciona un marco arquitectónico que permite a los dispositivos WPAN originar topologías de malla inalámbricas interoperables, estables y escalables. Se compone de dos partes: mallas de low-rate y de high-rate. En este trabajo, se presenta sólo la malla de low-rate, ya que está diseñado para soportar las redes de sensores inalámbricos. IEEE 802.15.5 low-rate es un protocolo de enrutamiento que atiende bien a las necesidades de las redes de sensores inalámbricos con recursos limitados. Mediante la unión direcciones lógicas a la topología de la red, IEEE 802.15.5 obvia la necesidad de descubrimiento de ruta. Esto elimina la latencia de descubrimiento de ruta inicial, ahorra espacio de almacenamiento y reduce la sobrecarga de comunicación y consumo de energía. Un esquema de estado de vínculos distribuidos se construye del esquema de direccionamiento de bloque para mejorar la calidad de las rutas, la robustez y balanceo de carga. El esquema de enrutamiento escala bien con respecto a varios parámetros de rendimiento. La norma también ofrece funciones mejoradas, como multidifusión, difusión confiable, ahorro de energía, sincronización de tiempo, el trazado de la ruta y la portabilidad. También presentamos la evaluación del desempeño de las principales funciones que cumple con 50 nodos desplegados por todo el piso ($100 \times 140 \text{ m}^2$) en el edificio de CUNY Ingeniería.

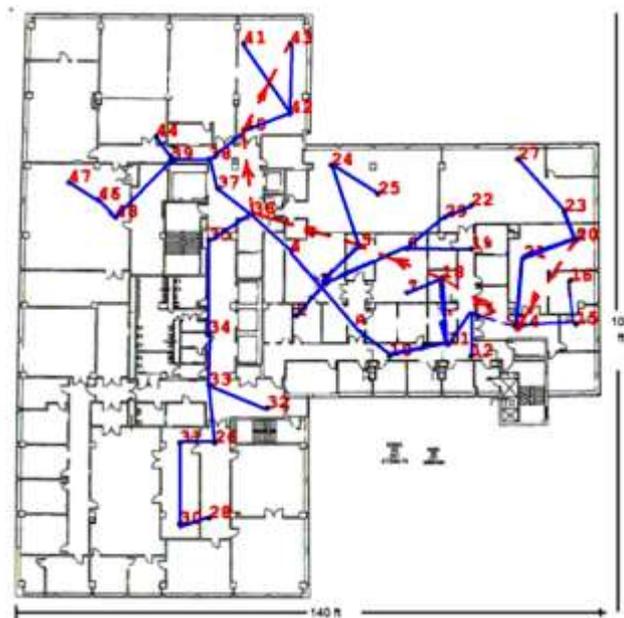


Fig. 3.12: Esquema de la planta del piso [5]

Los resultados dan fe de que el IEEE 802.15.5 servirá bien para redes inalámbricas de área personal y redes de sensores inalámbricos.

Tras ver lo que nos aportan los estándares y pasando a ver las tecnologías, por un lado tenemos que en *Forming Optimal Topologies for Bluetooth-Based Wireless Personal Area Networks*[6] se aborda el problema de determinar una topología óptima para Bluetooth Wireless Personal Area Networks (BT- WPAN). En BT-WPAN están disponibles múltiples canales de comunicación, a través de una técnica de salto en frecuencia. La topología de la red es en nodos que se agrupan para compartir el mismo canal y donde se seleccionan nodos como puente de un canal a otro.

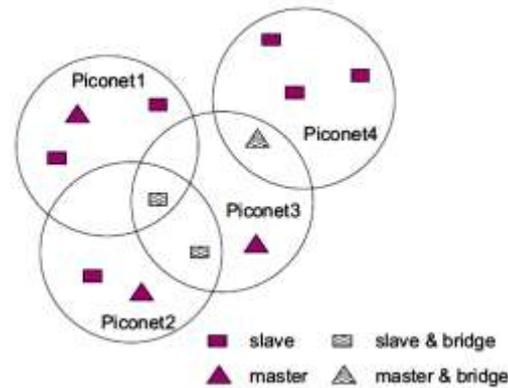


Fig. 3.13: Representación gráfica de una BT-WPAN [6]

Esto tiene un impacto significativo en la capacidad y el rendimiento del sistema, así como la vida de la batería de los nodos. La determinación de una topología óptima es por lo tanto extremadamente importante. Nuestro enfoque se basa en una formulación min-max del problema de optimización, que produce topologías que minimizan la carga de tráfico de los nodo más congestionados de la red (por lo tanto también la minimización del consumo de energía), mientras que se satisfacen las necesidades del tráfico y de las limitaciones que plantea la tecnología BT-WPAN. Nosotros investigamos el desempeño de las topologías producidas por nuestro enfoque de optimización como los requisitos del sistema varían, y evaluamos las ventajas y desventajas que existen entre la complejidad del sistema y la eficiencia de la red. Los resultados muestran que una topología optimizada para algunos requisitos de tráfico es muy robusta a cambios en el patrón de tráfico. Debido a la complejidad del problema, la solución óptima se alcanza de una manera centralizada. Aunque esto implica limitaciones graves, una solución centralizada puede ser aplicada cada vez que se elige un coordinador de la red y proporciona un término útil de comparación para cualquier heurística distribuida.

Mientras que en *Short-Range Wireless Communications for Next-Generation Networks: UWB, 60 GHz Millimeter-Wave WPAN And ZigBee*[7] se presenta la normalización, regulación y temas de desarrollo asociados a las tecnologías inalámbricas de corto alcance para redes de área personal de próxima generación (PAN). Tecnologías de comunicación de ondas milimétricas de banda ultra ancha (UWB) y 60 GHz prometen una comunicación inalámbrica de banda ancha de corto alcance sin precedentes y son los precursores de las redes inalámbricas multigigabit. A pesar del enorme potencial para las redes PAN, la normalización y reglamentación mundial del espectro cuestiona el éxito de UWB. Por otro lado, se espera que ZigBee sea una tecnología fundamental de corto alcance para bajo rendimiento y redes de ultra bajo consumo de energía.

Systems	UWB	60 GHz WPAN	ZigBee
Standard status	Dissolved in IEEE	In progress	Approved
Frequency allocation	3.1–10.6 GHz	57–64 GHz (U.S.) 59–66 GHz (Japan) 57–66 GHz (Europe) ³	2.4–2.4835 GHz ¹ 901–928 MHz ² 868–868.6 MHz ⁴
Channel bandwidth	≥ 500 MHz	Not yet available	2, ¹ 0.6, ² 0.3 MHz ⁴
Number of RF channels	2 ⁵ 14 ⁶	4 (IEEE 802.15.3c)	16, ¹ 10, ² 1 ⁴
Maximum data rate	100 Mb/s (10 m) 200 Mb/s (4 m) 480 Mb/s (optional)	2 Gb/s (at least) ≥ 3 Gb/s (optional)	250 kb/s ¹ 40 kb/s ² 20 kb/s ⁴
Modulation	DSSS, ⁵ OFDM ⁶	Not yet available	BPSK, ^{2,4} OQPSK ¹
Maximum coverage	~10 m	~20 m	~20 m
Channel access	Hybrid multiple access (Random and guaranteed access)		CSMA/CA (Optional) guaranteed time slot

¹ 2.4 GHz band ZigBee
² 915 MHz bands ZigBee
³ This frequency band is under consideration.
⁴ 868 MHz band ZigBee
⁵ DS-UWB
⁶ MB-OFDM

Fig. 3.14: Resumen de características de UWB, 60 GHz WPAN y ZigBee [7]

Se describe la situación actual y la dirección del desarrollo futuro de UWB, emergiendo de ondas milimétricas de 60 GHz PAN y la baja velocidad de datos de ZigBee. En este artículo se aborda también cuestiones de protocolo MAC inalámbrica de 60 GHz multigigabit PAN.

Tras ver un espectro general de las WPAN ahora vamos a realizar un inciso en las redes inalámbricas de área corporal y veremos algunas soluciones que se han encontrado dentro de ellas.

3.3 Redes inalámbricas de área corporal (WPAN)

En los próximos artículos veremos distintos estudios sobre las redes inalámbricas de área corporal y algunas aplicaciones en las distintas tecnologías existentes.

Comenzando por el artículo *Body-Posture-Based Dynamic Link Power Control in Wearable Sensor Networks[8]* en él se explora los mecanismos de gestión de la energía sobre el cuerpo, en el contexto de las emergentes redes de área corporal inalámbricas. En sistemas con recursos limitados severamente como las WBANs, la gestión de la energía es importante para el retardo de paquetes, la pérdida y el rendimiento del sistema, siempre que sea aplicable.

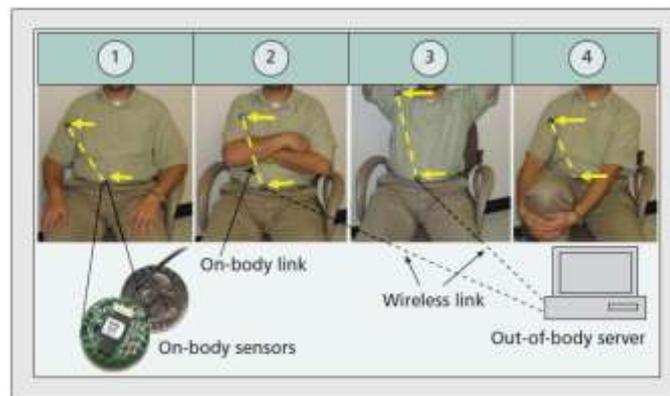


Fig. 3.15: Setup del experimento [8]

Utilizando los resultados experimentales de una red de sensores portátil prototipo, se caracteriza la naturaleza dinámica de los enlaces en el cuerpo con diferentes posturas corporales.

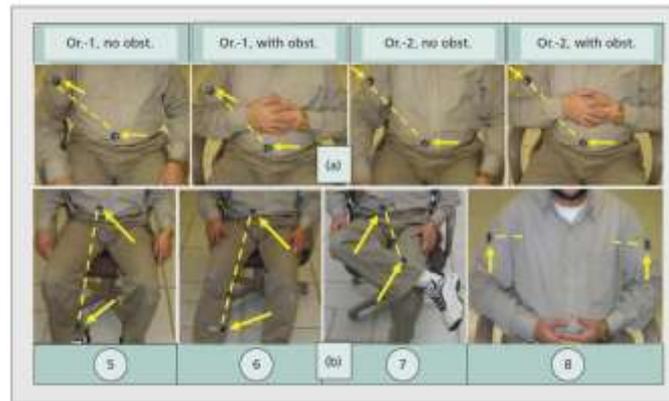


Fig. 3.16: a) Diferentes orientaciones de la antena sensor y diferentes obstrucciones del enlace corporal, b) diferentes enlaces corporales [8]

Una revisión de la literatura sigue para examinar los mecanismos de control de potencia de transmisión pertinentes para lograr un equilibrio entre el consumo de energía y la pérdida de paquetes en los vínculos entre los sensores del cuerpo montado. Especial hincapié se pone en los enfoques que se han personalizado para TPC mediante el seguimiento de la movilidad del nodo postural. A continuación, el artículo desarrolla un mecanismo dinámico de control de potencia que realiza una asignación óptima de potencia según la postura corporal. Por último, el rendimiento del mecanismo experimental es evaluado y comparado con una serie de esquemas de asignación de potencia estáticos y dinámicos.

En la misma línea que el artículo anterior, en **Wireless Body Area Network Node Localization Using Small-Scale Spatial Information**[9] se presenta un nuevo esquema para identificar automáticamente las ubicaciones de los nodos de sensores en una red de área corporal inalámbricas (WBAN). Las lecturas de la presión atmosférica del aire se comparan con el mapa de nodos en el espacio físico.

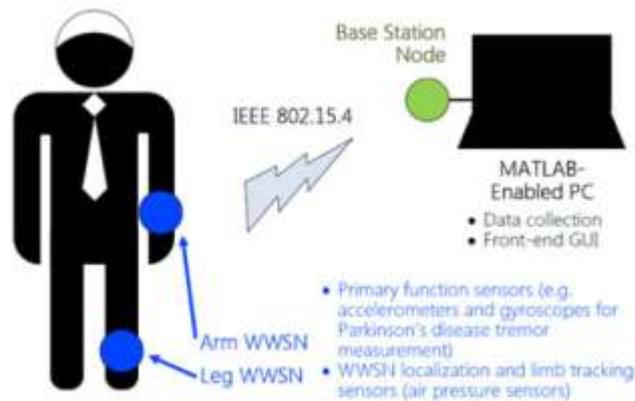


Fig. 3.17: Topología de la plataforma WBAN que se utiliza para validar experimentalmente la técnica de localización de nodos [9]

Esta mejora permite la colocación de un nodo sensor sin asistencia, proporcionando una solución para obtener y monitorizar continuamente la localización de los nodos sin el anclaje de nodos o balizas. Para validar este sistema de localización, se lleva a cabo un análisis estadístico en un conjunto de sensores de presión de aire y un prototipo de WBAN para examinar el rendimiento y limitaciones. Sobre la base de una separación de 60 cm entre los nodos, indicativos de la separación prevista entre las extremidades y las posiciones de colocación a lo largo del cuerpo del paciente, las mediciones superan sistemáticamente la fiabilidad p-valor dentro de un intervalo de confianza del 95%. También buscan demostrar experimentalmente una mejora en la reducción de errores de falsos positivos, en los esquemas convencionales basados en acelerómetro sobre el cuerpo, en la detección de una caída. Un análisis estadístico de los datos ha demostrado que al monitorear continuamente las posiciones de las extremidades del paciente la WBAN sería más capaz de discriminar argumentos "como la caída" de las caídas reales.

Mientras que en *Dynamic Channel Modeling for Multi-Sensor Body Area Networks*[10] se propone un modelo de canal para WBAN's, tiempo-invariantes y multi-enlace, sobre la base de una amplia campaña de medición utilizando una sonda de canal multi-puerto. Se coloca un total de 12 nodos en el cuerpo para medir el canal multi-enlace en la WBAN.

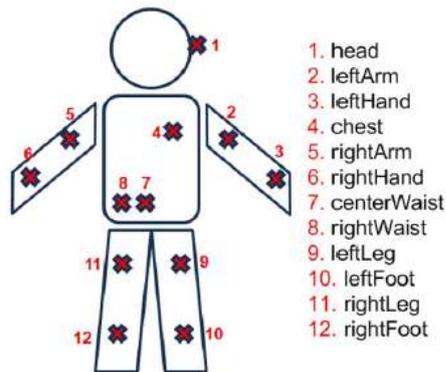


Fig. 3.18: Esquema de colocación de los nodos en el cuerpo [10]

El modelo empírico resultante tiene en cuenta la potencia recibida, las estadísticas del desvanecimiento del enlace y la auto correlación y correlación cruzada del enlace. Se investiga la dependencia de la potencia recibida con la distancia y el desvanecimiento de enlace se modela con una distribución log-normal. La función de auto correlación del enlace se divide en un componente de decaimiento y una componente sinusoidal para tener en cuenta el movimiento periódico de las extremidades causado al caminar. Se demuestra que la correlación cruzada entre diferentes enlaces también es alta para un número de enlaces específicos en el cuerpo.

Finalmente, el modelo se valida al considerar varias métricas independientes de validación; las métricas se muestran a continuación.

- Capacidad de enlace de múltiples saltos

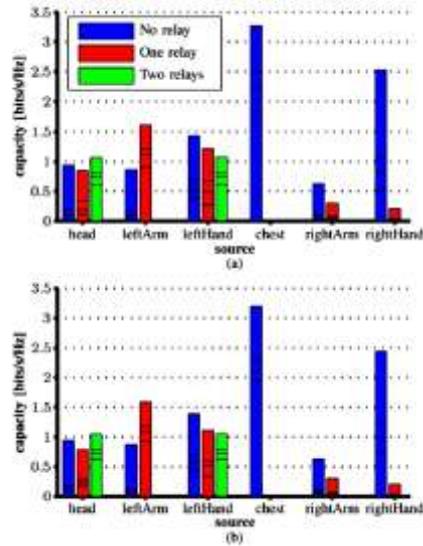


Fig. 3.19: a) Medidas y b) modelo [10]

- Nivel de la velocidad de cruce (LCR)

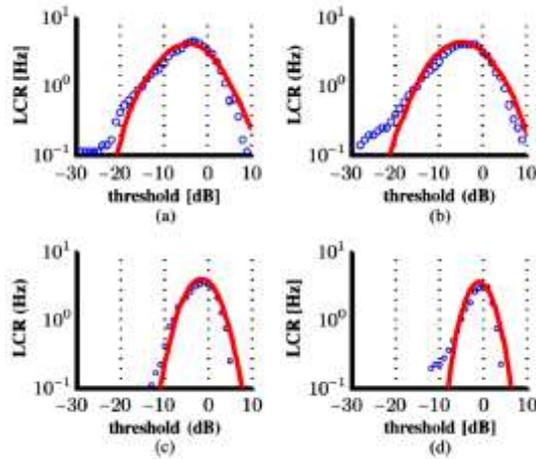


Fig. 3.20: a) Cabeza - centro de la cintura, b) brazo izquierdo - centro de la cintura, c) mano izquierda - centro de la cintura y d) tórax - centro de la cintura [10]

- Duración media de desvanecimiento (AFD)

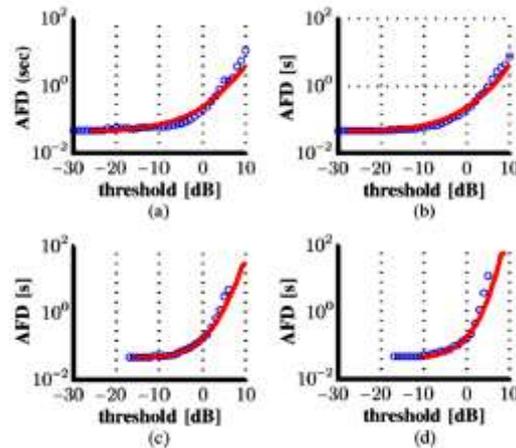


Fig. 3.21: a) Cabeza - centro de la cintura, b) brazo izquierdo - centro de la cintura, c) mano izquierda - centro de la cintura y d) tórax - centro de la cintura [10]

La capacidad tiene como objetivo validar las pérdidas del trayecto y el desvanecimiento del modelo, mientras que el LCR y la AFD tienen como objetivo validar el comportamiento temporal. Para todos los parámetros de validación, el modelo se muestra para reproducir satisfactoriamente las mediciones, mientras se señalan sus límites.

A continuación, vemos como hay estudios que investigan el efecto del cuerpo en movimiento y todos sus efectos en estas redes.

Como por ejemplo en *F-Channel Characterization of Walking Passerby's Effects on 2.48-GHz Wireless Body Area Network*[11] se presenta un análisis estadístico de los efectos de andar de un transeúnte sobre una red corporal inalámbrica (WBAN) de banda estrecha a una frecuencia de 2.4 GHz, en ambientes interiores y exteriores. Los experimentos se llevaron a cabo para medir las respuestas dinámicas del canal de varios enlaces sobre el cuerpo de los transeúntes con cuatro conjuntos de movimientos predefinidos, mientras el usuario permanece de pie e inmóvil. Se identificaron los enlaces en el cuerpo que sufrieron desvanecimientos de ganancia superiores a 20 dB en su ruta. Los efectos de los tipos de movimientos del transeúnte, tanto en ambientes interiores como exteriores, se analizaron y se compararon con los efectos de los movimientos del usuario, tales como caminar y correr. Los parámetros para la distribución de Rice, que fue encontrado para ser un buen ajuste para la variación de la ganancia del canal, se presentan para modelar el canal hasta las estadísticas de segundo orden, como la tasa de paso a nivel y la duración media de desvanecimiento.

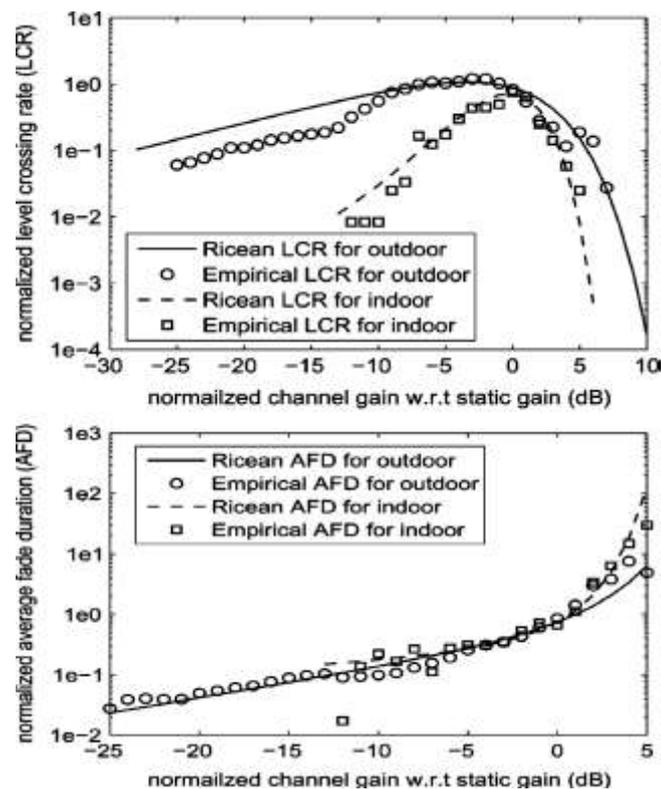


Fig. 3.22: Diagramas de la tasa de Rice y empírica del nivel de la velocidad de cruce (LCR) y la duración media de desvanecimiento (AFD) frente a la ganancia del canal normalizado (wrt ganancia estática) para el transmisor en el lado izquierdo de la cabeza al caminar un transeúnte por delante de un usuario estático en ambientes interiores y exteriores [11]

Tras estos resultados, los parámetros permiten el uso de simuladores de desvanecimiento de canal para reproducir los efectos del canal en el cuerpo de los transeúntes; además, los resultados de este estudio también pueden servir como una buena referencia para el estudio futuro de otros casos dinámicos.

O en este otro, ***Experimental Outage Capacity Analysis for Off-body Wireless Body Area Network Channel with Transmit Diversity[12]***, donde investiga la diversidad de ganancias y las capacidades de interrupción de los canales en la WBAN con diversidad de transmisión. Se miden los canales fuera del cuerpo en una cámara anecoica, con respecto a los diversos movimientos humanos y las posiciones de las antenas de transmisión, para evaluar la influencia de los movimientos corporales habituales sobre el desempeño de los sistemas de WBAN. Se ha demostrado que el aprovechamiento de la diversidad de transmisión de dos canales no correlacionados alivia el efecto nocivo del movimiento humano en las condiciones del canal y alcanza alta diversidad de ganancias.

Tras lo visto hasta ahora, en *Investigation of on-body Bluetooth transmission*[13] vemos ya un caso concreto; en el cual nos habla de que el desarrollo de los dispositivos de comunicación, especialmente los teléfonos celulares ha hecho necesario el avance de varias tecnologías móviles y usables, como auriculares Bluetooth dentro de las redes de área corporal inalámbricas (WBAN). Tales dispositivos portátiles utilizan el cuerpo humano como un canal de comunicación, por lo que es vital una comprensión global de los mecanismos de transmisión entre estos dispositivos. En este estudio se presenta una investigación para caracterizar la transmisión electromagnética entre una antena de auriculares Bluetooth montado sobre el cuerpo y una antena de teléfono móvil. Las antenas comerciales utilizadas para estudiar diversos factores que afectan a los enlaces de comunicación *on body* incluye la separación del auricular del cuerpo y la presencia de objetos de bloqueo. Se ha llevado a cabo una modelización numérica a fondo, con el apoyo de las mediciones, para demostrar la importancia de las ondas de superficie en la transmisión *on body* Bluetooth.

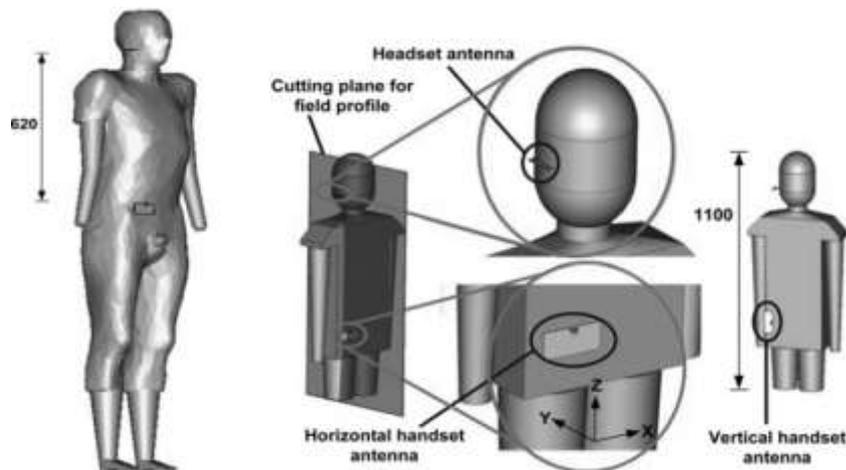


Fig. 3.23: Modelo numérico del cuerpo humano y de la configuración del test sobre el cuerpo [13]

Para concluir vamos a ver que se está estudiando en las aplicaciones médicas, ya que estas pueden ser lo más cercano a lo que trata este proyecto.

Comenzando con **Cooperative Wireless Sensor Environments Supporting Body Area Networks[14]**, el cual nos dice que las WBAN's han recibido una significativa atención en los últimos años, debido a su potencial para incrementar la eficiencia en monitorizar el cuidado de la salud. Los sensores típicos usados en las WBAN's son dispositivos transceptores individuales de baja potencia que utilizan un único canal de transmisión para la capa de control de acceso al medio. Sin embargo, el rendimiento de estos dispositivos se degrada cuando aumenta la densidad de los dispositivos. Un enfoque para contrarrestar esta degradación del rendimiento es explotar múltiples canales en la capa MAC, cuando el uso óptimo de los canales se logra mediante la cooperación entre los nodos de sensores. En este artículo se propone un entorno cooperativo de WBAN que soporta transmisiones multi salto a través de involucrar la cooperación de ambos entornos de sensores y nodos WBAN. La solución propuesta se extiende a la cooperación en la capa MAC junto con un enrutamiento basado en el gradiente transversal en capas que permite la interacción entre la WBAN y el entorno de sensores con el fin de garantizar la entrega de datos de la WBAN's a una pasarela distante. Se han realizado extensas simulaciones para los escenarios de cuidado de la salud para validar la cooperación en la capa MAC, así como el enrutamiento basado en el gradiente transversal en capas.

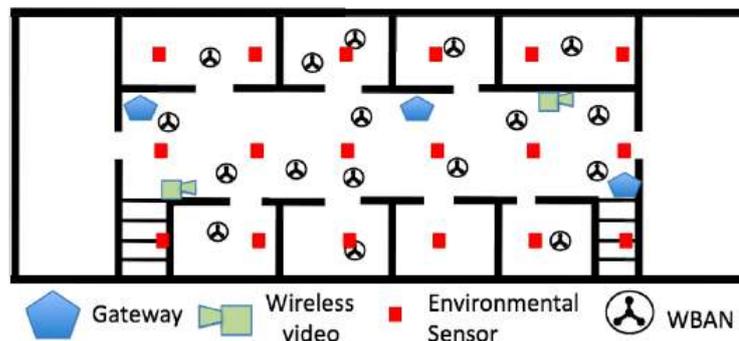


Fig. 3.24: WBAN de pacientes en un entorno de sensores [14]

Las comparaciones con otras cooperaciones multi-canal de la capa MAC y soluciones de enrutamiento han demostrado la mejora en el rendimiento general del enfoque propuesto evaluado en términos de pérdida de paquetes, consumo de energía y retardo.

O este otro, *Guest Editorial Body Sensor Networks From Theory to Emerging Applications*[15], que sus miras en el uso de redes de sensores para el cuidado de la salud, de bienestar y el trabajo en ambientes extremos tiene largas raíces en el sector de la ingeniería en la comunidad médica y de la biología. Con la madurez de las redes inalámbricas de sensores, redes de área corporal (BAN) y BANs inalámbricas (WBANs), los recientes esfuerzos en la promoción del concepto de redes corporales de sensores (BSN) tienen como objetivo ir más allá de la conectividad de sensores para adoptar un enfoque a nivel de sistema para abordar cuestiones relacionadas con el diseño y realización de biosensores, interfaces de muy baja potencia de procesamiento / comunicación, captación de la energía, de detección automática, de minería de datos, de inferencia y de sensores inalámbricos integrados.

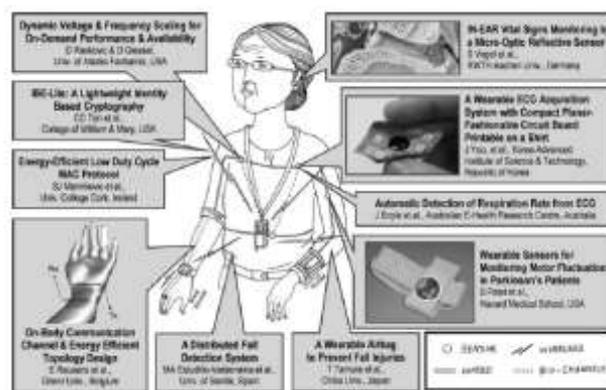


Fig. 3.25: Ilustración del diseño espacial del especial problema de las redes inalámbricas corporales [15]

Como resultado, la arquitectura del sistemas basado en WBAN y BSN se está convirtiendo en un método ampliamente aceptado de la organización de los sistemas de monitorización ambulatoria y ubicuos. Este trabajo editorial presenta una instantánea de la investigación actual y las aplicaciones emergentes y aborda algunos de los desafíos y las cuestiones de aplicación.

Y por último, **Virtual Groups for Patient WBAN Monitoring in Medical Environments[16]**, que propone que las redes inalámbricas corporales (WBAN) ofrecen una gran oportunidad para la monitorización remota de la salud. Sin embargo, la ingeniería WBAN de los sistemas de monitorización de la salud se encuentra con una serie de desafíos, incluyendo la extracción de información eficiente, el buen ajuste dinámicamente del proceso de monitoreo para adaptarse a la calidad de los datos y para permitir la traducción de requisitos de alto nivel de los médicos a la reconfiguración del sensor. El presente trabajo aborda estos desafíos, al proponer una arquitectura que permite crear grupos virtuales entre los dispositivos de los pacientes, las enfermeras y los médicos con el fin de permitir el análisis de datos a distancia.

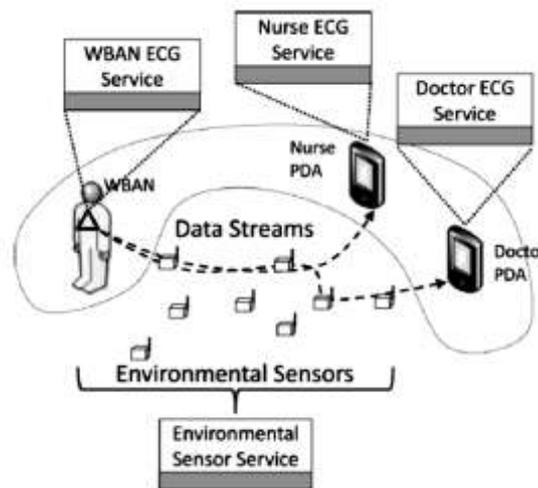


Fig. 3.26: Interacción de un servicio en un grupo a través de un entorno de sensores [16]

La formación de grupos y la modificación se lleva a cabo con respecto a las condiciones de los pacientes y requisitos de los oficiales médicos, que se podría ajustar fácilmente a través de políticas de alto nivel. También proponemos, una nueva métrica llamada la Calidad de la Vigilancia de la Salud, que permite a los médicos proporcionar información sobre la calidad de los datos recibidos. Los datos recogidos se transmiten a los miembros de los grupos virtuales a través de una red de sensores ambientales subyacente. El enfoque propuesto se evalúa a través de una serie de simulaciones.

3.4 Tecnología ZigBee / 802.15.4

3.4.1 Introducción

A finales de la década de los años 90 los ingenieros planteaban que Wi-Fi y Bluetooth dejaban un hueco vacío para un cierto tipo de aplicaciones. En particular, la necesidad de diseñar redes ad-hoc de interfaz radio digital que pudieran organizarse automáticamente sin la necesidad de configuración externa o administración de red. El estándar IEEE 802.15.4 se completó en 2003 y fue ratificado a finales de 2004.

Mientras tanto, en el año 2002 se forma la ZigBee como una asociación sin ánimo de lucro y compuesta por más de 175 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objetivo de favorecer el desarrollo e implantación de dicha tecnología; así como de promocionar eventos entre fabricantes, los llamados “BeeFests”, dedicados a mejorar la interoperabilidad entre marcas, de la misma forma que Bluetooth SIG lo hace con los “UnplugFests”.



Fig. 3.27: Logo ZigBee Alliance

Entre las empresas asociadas destacan Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Ember, Philips y Motorola; las cuales trabajan en convertir ZigBee en un estándar de comunicaciones radio y bidireccional, para aplicaciones de domótica, automatización de edificios, control industrial, periféricos de PC, juguetería, sensores médicos, etc.

ZigBee describe un protocolo inalámbrico para Redes de Área Personal o WPAN, que difiere del resto de estándares inalámbricos en que ha sido diseñado para aplicaciones que requieren bajo coste y bajo consumo, producido por una conectividad más sofisticada que otros sistemas inalámbricos. El estándar ZigBee está enfocado a un segmento del mercado que busca baja transmisión de datos y bajo ciclo de servicio de conectividad. La razón de promover un nuevo protocolo como estándar es permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes.

ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4, que define la capa física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC). La ZigBee Alliance ha completado el estándar con las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para lo que se denomina la pila o stack ZigBee.

3.4.2 Arquitectura

ZigBee está basado en el modelo de torre OSI de siete capas de red. Las capas física y de acceso al medio están definidas en el estándar 802.15.4, mientras que ZigBee especifica las capas de red y aplicación y los mecanismos de seguridad; la capa de aplicación está formada por la subcapa de soporte de aplicación APS, el objeto de dispositivo ZigBee ZDO y la plataforma de aplicación con los objetos de aplicación de cada fabricante.

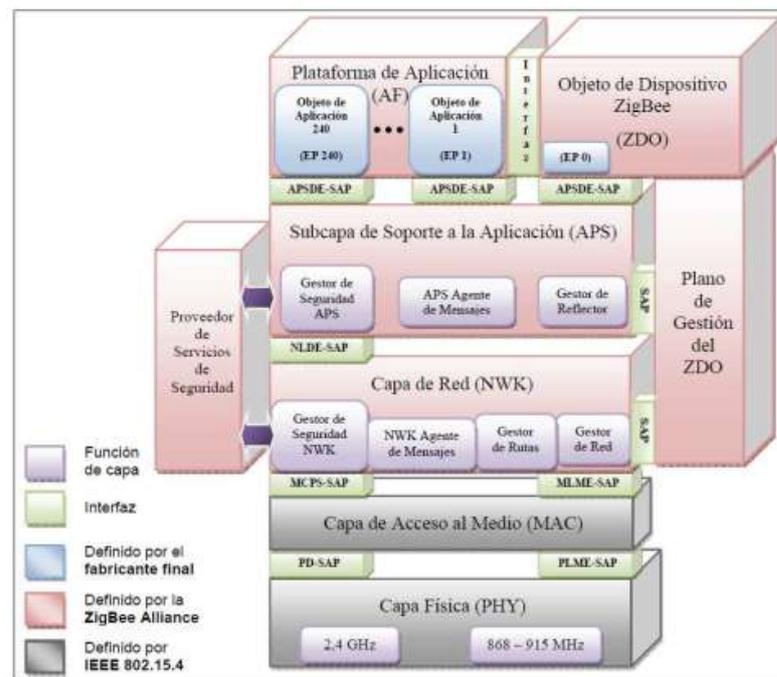


Fig. 3.28: Arquitectura Zigbee [ESTUDIO DE REDES WSN Y SU APLICACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL, Universidad de Valladolid, 2013, Diego Jiménez Amo]

- **Capa física (PHY)**

El estándar 802.15.4 ofrece dos opciones de PHY que combinadas con la capa MAC ofrecen un amplio rango de aplicaciones en red. Dichas PHYs se basan en técnicas de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), que dan como resultado bajos costes de implementación, y además comparten la de paquetes low-duty-cycle (bajo ciclo de ocupación) con operaciones de bajo consumo de energía. Como principal diferencia entre ambas PHYs se encuentra en la banda de frecuencias. Por un lado la capa PHY de los 2.4 GHz, especifica la operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que habitualmente está disponible a nivel mundial; mientras que la capa PHY de los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en

Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos. La disponibilidad internacional de la banda de 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplias y costes de manufacturación más bajos; mientras que las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la creciente congestión e interferencias asociadas a la banda de 2.4 GHz, además de mayores rangos de alcance debido a las menores pérdidas de propagación.

Otra diferencia es la velocidad de transmisión. La PHY de 2.4 GHz ofrece una tasa de 250 kb/s, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece tasas de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s, respectivamente. Las diferentes velocidades de transmisión se pueden utilizar para lograr una amplia variedad de aplicaciones; por ejemplo, la baja densidad de datos en la PHY de los 868/915 MHz sirve para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, mientras que la velocidad de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir poca latencia.

Capa física	Banda	Parámetros de los Datos			Parámetros de chip	
		Velocidad bits (kbps)	Velocidad símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad chip (kchip/s)	Modulación
868/915 MHz	868 – 868.6 MHz	20	20	BPSK	300	BPSK
	902 – 928 MHz	40	40	BPSK	600	BPSK
2.4GHz	2.4 – 2.4835 GHz	250	62.5	16-ary ortogonal	2000	O-QPSK

Fig. 3.29: Parámetros de modulación

- **Capa de control de acceso al medio (MAC)**

Es la responsable de asegurar la comunicación entre los nodos de la red, evitando colisiones y mejorando la eficiencia.

Las acciones que realiza son las siguientes:

- Generar balizas (beacons) cuando el dispositivo es un coordinador y funciona en modo balizado.
- Sincronizar las balizas de la red.
- Gestionar la conexión y desconexión a la red de los dispositivos asociados al propio nodo.
- Emplear el algoritmo CSMA-CA para gestionar el acceso al canal.
- Asegurar un enlace fiable con la capa MAC de los nodos contiguos.

El protocolo MAC soporta dos modos de funcionamiento (el coordinador es el encargado de seleccionar uno u otro en el momento de iniciar la red):

- **Modo balizado:** la baliza se genera periódicamente por el coordinador y se distribuye a la red por los routers. Dicha baliza sirve para sincronizar todos los nodos de la red, de modo que estos puedan despertarse en un momento determinado, enviar los datos almacenados y volver al modo de ahorro energético (sleep). Así, tanto el coordinador, como los routers y los dispositivos finales pueden pasar gran parte del tiempo en modo de bajo consumo. La topología en malla no admite el modo balizado debido a la complejidad que ello conllevaría (a un mismo dispositivo podrían llegarle balizas provenientes de distintos routers).
- **Modo no balizado:** en este modo los dispositivos no están sincronizados unos con otros. De manera que únicamente los dispositivos finales pueden entrar en el modo sleep mientras que los routers y el coordinador deben estar continuamente funcionando en modo recepción y así estar preparados para recibir datos en cualquier momento. Este modo es más simple pero hace que gran parte de sus nodos (coordinador y routers) tengan un mayor consumo energético. Asimismo, impide que los coordinadores puedan planificar sus envíos a los dispositivos finales.

- **Capa de Red (NWK)**

Capa definida por la especificación de ZigBee. Esta capa es necesaria para gestionar las capas físicas y MAC del estándar 802.15.4 y para proveer de una adecuada interfaz de servicio al nivel de aplicación.

Las acciones que realiza son las siguientes:

- Configuración de nuevos dispositivos.
- Inicialización de la red PAN.
- Asociación, re-asociación y abandono de una red.
- Adjudicación de direcciones de red.
- Descubrimiento de la topología de red.
- Encaminamiento (routing).

Existen dos tipos de direcciones a nivel de red, direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. No puede haber dos dispositivos que posean la misma dirección IEEE. Así pues, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta.

El estándar IEEE 802.15.4 dispone de dos tipos distintos de dispositivos:

- **FFD (Full Function Device):** dispositivo de función completa. Se puede usar en cualquier topología. Puede operar como Coordinador de Red de Área Personal (Coordinador PAN) o como dispositivo de red (end point).
- **RFD (Reduced Function Device):** dispositivo de función reducida. Limitado a una topología en estrella. No puede ser Coordinador de red, solo puede recibir órdenes o informar a un Coordinador cercano, y es muy fácil de implementar.

También se definen los roles que pueden adquirir los dispositivos en la red:

- **Coordinador:** es el dispositivo encargado de inicializar y gestionar la red, así como de las tareas de seguridad. En toda red ha de existir un coordinador.
- **Router:** son los dispositivos que gestionan el tráfico y dan la posibilidad de aumentar el tamaño y número de dispositivos en una red. Son los encargados del enrutamiento cuando hay casos de congestión o de fallos en algún nodo. Pueden estar conectados al coordinador o a otro router.
- **Dispositivo Final:** son los dispositivos que normalmente envían y reciben información pero no realizan tareas de enrutamiento. Deben estar conectados a un router o al coordinador y no admiten dispositivos conectados a ellos. Al no tener que realizar tareas de gestión de red estará la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo saliendo de él únicamente cuando tenga que transmitir información.

Toda red ZigBee estará formada por un sólo coordinador, uno o varios routers y varios dispositivos finales, por lo que las redes seguirán alguna de las siguientes topologías posibles.

■ Topologías de red

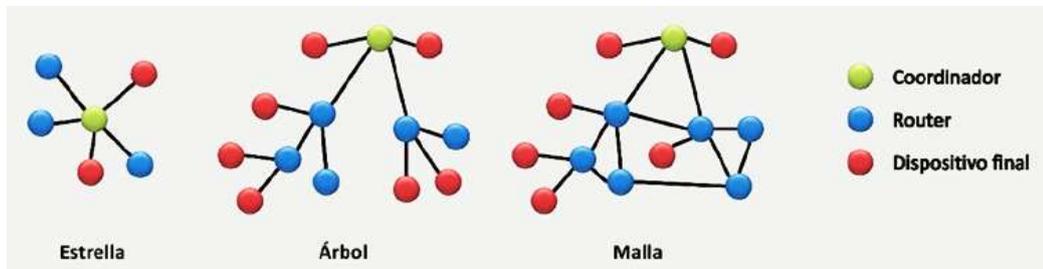


Fig. 3.30: Topologías de Red [Revista de la Asociación de Ingenieros del ICAI]

– **Estrella:** están compuestas por un FFD como coordinador y una serie de FFD o RFD como dispositivos finales. Las comunicaciones entre dispositivos finales han de pasar por el coordinador. Como inconvenientes la expansión de la red se ve limitada por el radio de alcance del dispositivo coordinador y se recomienda alimentar el dispositivo coordinador a partir de la red eléctrica ya que su consumo puede ser elevado para un funcionamiento con baterías.

– **Árbol:** se considera como una variante de la topología en malla. La diferencia entre ambas es que en árbol los nodos se organizan de forma jerárquica. Los dispositivos encargados de gestionar la red y realizar las tareas de encaminamiento pueden tener nodos colgando de ellos. Esta topología facilita la expansión. Se recomienda que el coordinador y los routers estén alimentados con baterías.

– **Malla:** están compuestas por un coordinador, uno o varios routers y uno o varios dispositivos finales. Todos los dispositivos de la red pueden comunicarse entre sí. La función de coordinador la llevará a cabo el primer router que inicie la. Al repartir las tareas de coordinación y encaminamiento en más de un dispositivo aumenta la fiabilidad y la flexibilidad, a costa de una mayor complejidad. La comunicación entre dispositivos tiene más de un camino posible y la planificación de dichos caminos ha de solventarse por la propia red.

▪ Capa de aplicación (APL)

La capa de aplicación está compuesta por la subcapa de soporte de aplicación (APS), el marco de aplicación (application framework) y el objeto de dispositivo ZigBee (ZigBee Device Object o ZDO).

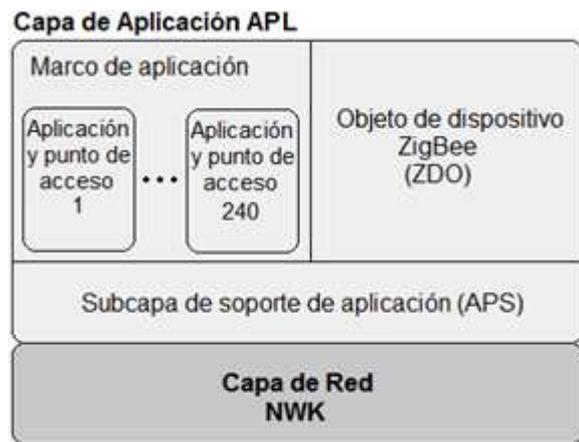


Fig. 3.31: Capa de aplicación [CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO EN REDES ZIGBEE/802.15.4, Universidad de Málaga, 2009, Gonzalo Campos Garrido]

▪ Subcapa de soporte de aplicación (APS o Application Sublayer)

Proporciona una interfaz de comunicación entre la capa de red y la capa de aplicación.

Las acciones que realiza son las siguientes:

- Genera la PDU a nivel de aplicación.
- Se encarga de gestionar el intercambio de mensajes los puntos de acceso de dos dispositivos después de estar vinculados.
- Mejorar la fiabilidad de la capa de red. Como por ejemplo definir una confirmación ACK a nivel de aplicación.
- Rechazar mensajes duplicados.

▪ Marco de aplicación (AF o Application Framework)

Es el entorno en el cual se gestionan las diferentes aplicaciones, cada una de ellas está asociada a un punto de acceso distinto.

Se permiten hasta 240 aplicaciones distintas dentro de un mismo dispositivo. El punto de acceso 0 está asignado al nivel ZDO. El rango de 241-254 está reservado para uso futuro. Por último, el punto de acceso 255 es usado para la comunicación broadcast con todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación.

Por último, es la encargada de definir tanto el perfil de aplicación como los diferentes clústeres; cada clúster se caracteriza por un identificador propio (clúster ID).

- **Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO o ZigBee Device Object)**

Este nivel satisface necesidades comunes a todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación.

Las acciones que realiza son las siguientes:

- Inicializar las capas APS y de red.
- Definir el rol del dispositivo dentro de la red (coordinador, router o dispositivo final).
- Gestionar los vínculos entre puntos de acceso.
- Asegurar una comunicación segura entre dispositivos.

4. Propagación Radioeléctrica

4.1. Modelo de propagación en espacio libre

El modelo de propagación en espacio libre se utiliza para calcular el nivel de potencia recibida en un punto cuando no existe ningún objeto cercano al enlace que puede afectar la propagación electromagnética. Esta condición es mucho más exigente que la conocida como *line-of-sight* (LOS) entre el transmisor y receptor, que solo considera obstáculos a los que se encuentran en la línea que une ambos extremos del enlace. Un enlace puede ser LOS, pero ello no impide que objetos cercanos produzcan reflexiones que puedan afectar la señal que se propaga en el trayecto directo. El modelo de propagación de espacio libre es sin embargo una buena referencia para enlaces más complejos y es además bastante exacto cuando el efecto de elementos cercanos no es significativo.

El modelo predice que la potencia disminuye en función de la distancia de separación (d) entre transmisor y receptor, de acuerdo a la ecuación de Friis:

$$P_r \text{ mW} = \frac{P_t \text{ mW} G_{Tx} G_{Rx}}{L} \frac{\lambda^2}{4\pi d^2}$$

Donde P_t es la potencia transmitida, $P_r(d)$ es la potencia recibida, que depende de la distancia entre transmisor y receptor, G_t es la ganancia de la antena de transmisión, G_r es la ganancia de la antena de recepción, d es la separación Tx-Rx en metros, L son las pérdidas del sistema ($L \geq 1$) y λ es la longitud de onda de la señal electromagnética en metros.

Las pérdidas de trayecto (path loss) representan la atenuación de la señal como una magnitud positiva (en dB) dependiente de la frecuencia de operación y de la distancia entre transmisor y receptor, y están definidas como la diferencia entre la potencia transmitida y recibida de acuerdo a la ecuación:

$$PL \text{ dB} = -20 \log \frac{\lambda}{4\pi d}$$

4.2. Fenómenos de propagación

4.2.1. Atenuación y absorción

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que explica cómo se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos.

La cantidad de potencia perdida va a depender de su frecuencia y por supuesto, del material. La potencia decrece de manera exponencial y la energía absorbida generalmente se transforma en calor.

En las comunicaciones inalámbricas, se considera al metal y el agua como absorbentes perfectos, o sea no van a ser atravesados (aunque capas finas de agua podrían permitir que una parte de la potencia pase). Cuando hablamos del agua, tenemos que recordar que la misma se encuentra en diferentes formas: lluvia, niebla, vapor y nubes bajas y todas van a estar en el camino de los radioenlaces.

Existen otros materiales que tienen un efecto más complejo en la absorción de la radiación electromagnética, por ejemplo, la absorción en los árboles y la madera, depende de cuánta cantidad de agua y de otros compuestos químicos contenga. Generalmente los plásticos y materiales similares, no absorben mucha energía de radio, pero esto varía dependiendo de la frecuencia y el tipo de material.

Un ejemplo interesante, por la temática de éste proyecto, es el agua de mar que, a bajas frecuencias se comporta como un conductor y a frecuencias UHF y próximas a microondas se comporta como un dieléctrico con pérdidas moderadas:

$$\sigma = 5 \frac{S}{m}$$

$$\varepsilon_r = 80$$

$$\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} = \frac{9 \cdot 10^8}{f(\text{Hz})}$$

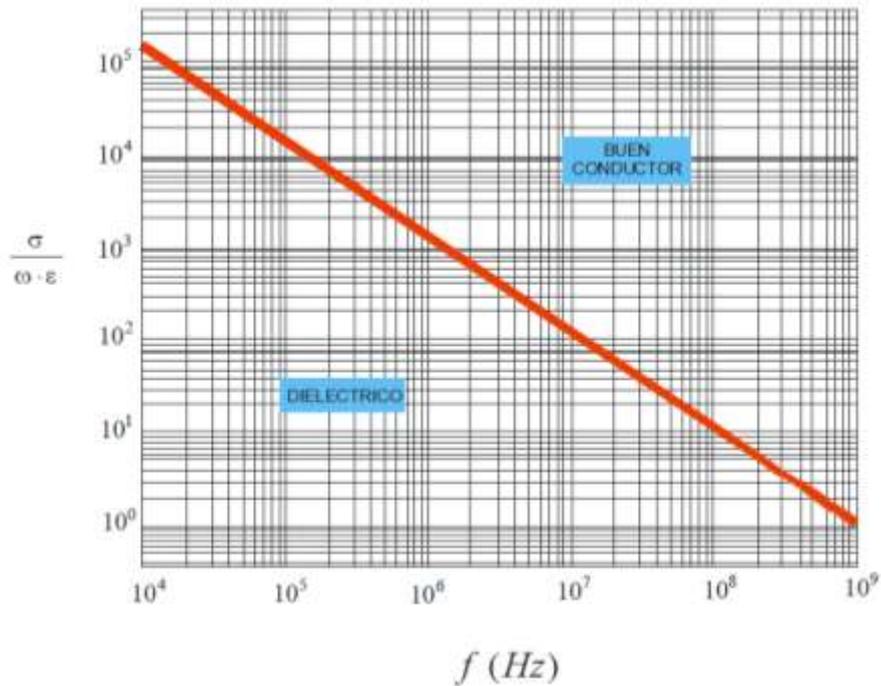


Fig. 4.1: Comportamiento del agua de mar en función de la frecuencia [Universidad de Córdoba]

Se observa que para $f > 100$ MHz el agua de mar comienza a dejar de ser buen conductor y para $f > 1$ GHz ya se comporta como dieléctrico, aunque con pérdidas. La siguiente figura da una idea de lo absorbentes que son distintos tipos de superficie.

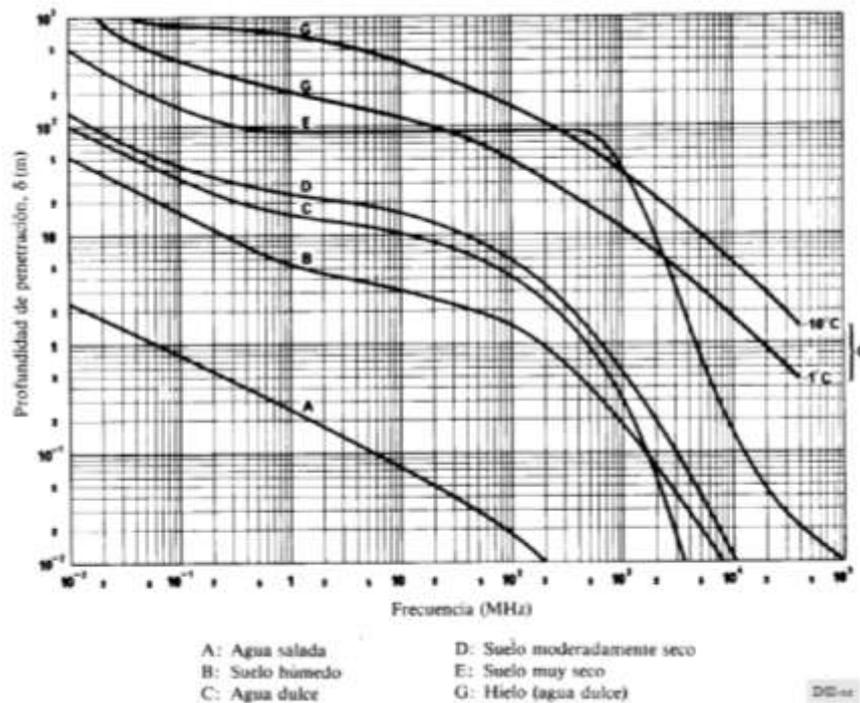


Fig. 4.2: Profundidad de penetración (δ) para distintos materiales [Rec. UIT-R P.527-3]

Al contrario de lo que ocurre en el vacío o en dieléctricos sin pérdidas, en buenos conductores la densidad de energía media asociada al campo magnético es mucho mayor que la asociada al campo eléctrico. La energía de una onda que se propaga en un buen conductor es fundamentalmente magnética. Ello da lugar a corrientes parásitas o de Foucault que están asociadas a pérdidas por efecto Joule y es el mecanismo de funcionamiento de los blindajes metálicos a alta frecuencia. También este fenómeno tiene gran importancia el estudiar la respuesta biológica de los seres vivos a los campos electromagnéticos.

El cuerpo humano se puede considerar como un conductor de conductividad media-alta, debido a su gran contenido en agua y electrolitos. Por ello hay una profundidad de penetración dependiente de la frecuencia que hace que, excepto para frecuencia extremadamente bajas (por debajo de los 30 Hz), la penetración del campo eléctrico es despreciable. La mayor parte de la energía es magnética, traduciéndose en corrientes de Foucault y otros efectos. Este es el motivo de que la mayoría de los estudios se centran en el efecto de los campos magnéticos sobre la salud.

BANDA SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN	FRECUENCIA MHz	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN cm	
		Músculos, piel y tejidos con alto contenido en agua	Grasa, huesos y tejidos con bajo contenido en agua
$f < 30$ MHz La absorción en el tronco decrece rápidamente con la frecuencia. Absorción significativa puede ocurrir en cuello y piernas.	1	91,30	-
	10	21,60	-
	27,12	14,30	150,00
$30 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$ Absorción alta debido a resonancias del cuerpo entero (70 MHz) e incluso más altas en partes del cuerpo, como la cabeza, por ej. (400 MHz)	40,68	11,20	118,0
	100	6,66	60,40
	200	4,79	39,20
	300	3,89	32,10
$400 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$ Absorción localizada por resonancias o por enfoque quasi-óptico del campo E.M. incidente	433	3,57	26,20
	750	3,18	23,00
	915	3,04	17,70
	1500	2,42	13,90
$3 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$ La energía se disipa en la superficie del cuerpo de forma similar a las radiaciones infrarrojas	2450	1,70	11,20
	3000	1,61	9,74
	5000	2,78	6,67
	5300	0,72	5,24
	8000	0,41	4,61
	10000	0,34	3,39

Fig. 4.3: Absorción del cuerpo humano frecuencia [Universidad de Córdoba]

4.2.2. Reflexión y refracción

La reflexión y la refracción de las ondas electromagnéticas están basadas en la óptica geométrica donde se supone que la energía es transportada a lo largo de rayos cuyo comportamiento sigue leyes geométricas simples.

Cuando una onda se propaga en un medio de permitividad ϵ_1 , permeabilidad μ_1 y conductividad σ_1 , incide sobre la frontera de otro medio de parámetros ϵ_2 , μ_2 , σ_2 , en la forma en que se ilustra en la figura 4.4, una parte de la energía de la onda se refleja y otra se transmite al segundo medio. El ángulo de incidencia y el de reflexión (ϕ) son iguales, mientras que el ángulo de refracción es diferente y depende de la relación entre las permitividades relativas de los medios.

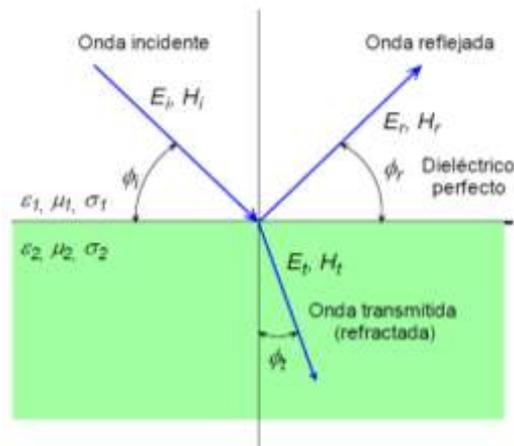


Fig. 4.4: Reflexión y refracción en la frontera entre dos medios distintos.

La velocidad de propagación es $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$, donde $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ y $\mu = \mu_0\mu_r$. En el espacio libre, $v = 3 \times 10^8$ m/s.

Uno de los principios de la óptica geométrica establece que:

$$\frac{v_i}{\sin \phi_i} = \frac{v_r}{\sin \phi_r} = \frac{v_t}{\sin \phi_t}$$

Como la velocidad de propagación en un medio de permitividad relativa ϵ_r es $v = c \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} = c/n$, donde n es el índice de refracción del medio, igual a la raíz cuadrada de la permitividad relativa:

$$\phi_i = \phi_r$$

$$n_1 \sin \phi_i = n_2 \sin \phi_t$$

Esta última relación se conoce como ley de Snell, en la que n_1 es el índice de refracción del primer medio y n_2 el del segundo.

4.2.3. Difracción

La difracción ocurre cuando la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor está obstruida por una superficie que tiene irregularidades agudas (bordes). Las ondas secundarias resultantes desde la superficie obstructora están presentes a través del espacio e incluso detrás del obstáculo, dando lugar a una flexión de ondas alrededor del obstáculo, al igual que cuando no existe una trayectoria de línea de visión entre el transmisor y el receptor. A alta frecuencia, la difracción depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, la fase, y la polarización de la onda incidente.

En la difracción se genera una pérdida de potencia de transmisión, donde la potencia de la onda difractada es significativamente menor que el frente de onda que la provoca.

El Principio de Huygens provee un modelo para comprender este comportamiento, donde cada punto de un obstáculo genera un nuevo frente de ondas, y este nuevo frente puede hasta rodear al obstáculo. Si bien el fenómeno de la difracción se da en todas las frecuencias, cuanto más baja es la frecuencia, las ondas electromagnéticas se difractan más, dando la impresión de doblar la esquina. Por otro lado, cuanto mayor sea la frecuencia de transmisión, mayores serán las pérdidas.

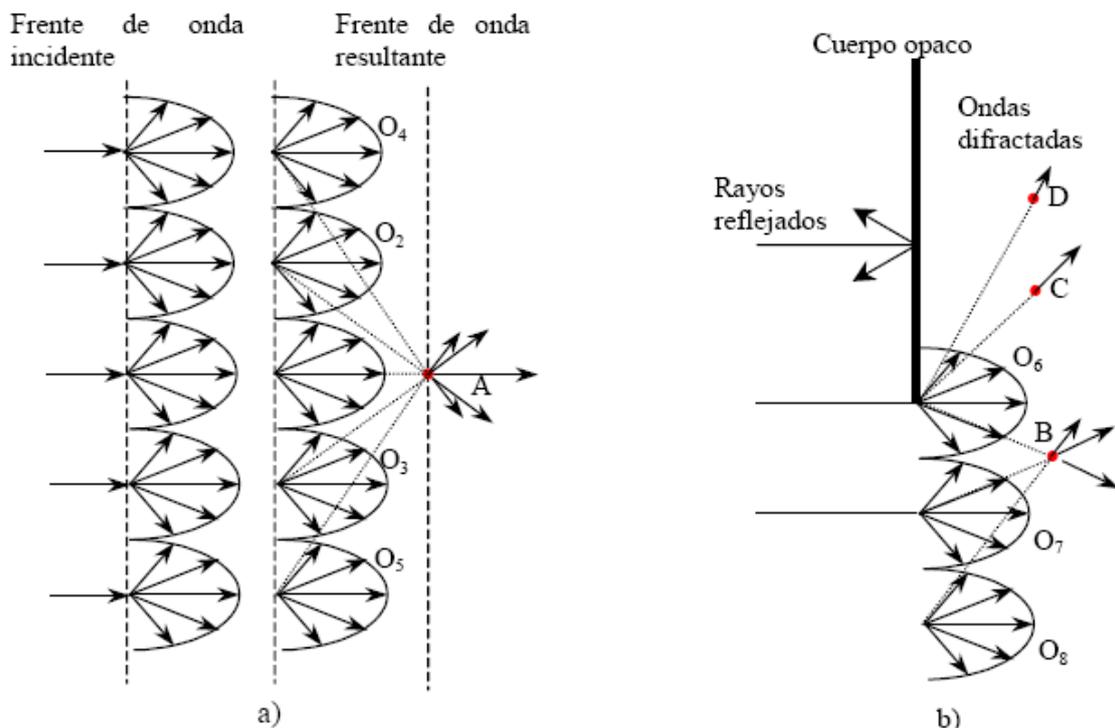


Fig. 4.5: Principio de Huygens [Física de las Ondas Radioeléctricas dentro del Estándar IEEE802.11b - Frenzel, A.M.; Carrasco, A.; Monachesi,E.; Chaile, M.G.].

4.2.4. Dispersión

La dispersión o scattering, ocurre cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre una superficie rugosa. La rugosidad de la superficie es diferente para cada onda, ya que depende de la longitud de onda de la señal incidente. Generalmente, si la variación en una superficie es mayor que $\lambda/8$, la superficie se considera rugosa y dispersará la señal en varias direcciones.

Es un proceso de interacción general entre las ondas electromagnéticas y los objetos. La dispersión provoca que parte de la energía sea irradiada en numerosas direcciones diferentes. Si hay muchos objetos en la trayectoria de la señal, y los objetos son relativamente pequeños comparados con la longitud de onda de la señal, entonces el frente de onda propagado se distribuirá en múltiples direcciones, sumándose a las interferencias constructivas y destructivas de la señal.

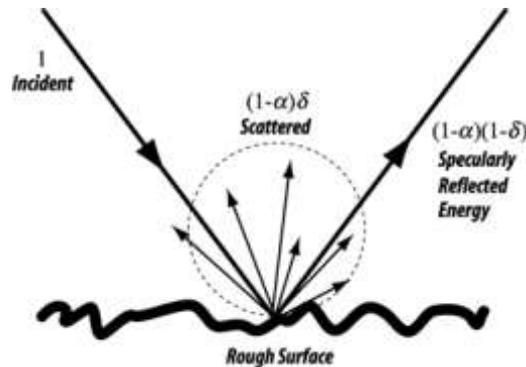


Fig. 4.6: Dispersión de una señal transmitida

4.2.5. Multitrayecto (Multipath)

El efecto del multitrayecto (multipath) explica que, a causa de los fenómenos descritos anteriormente, las señales llegan al receptor a través de diferentes caminos, y por consiguiente en tiempos diferentes. Este fenómeno juega un papel muy importante en las comunicaciones inalámbricas por los retardos e interferencia que provocan.

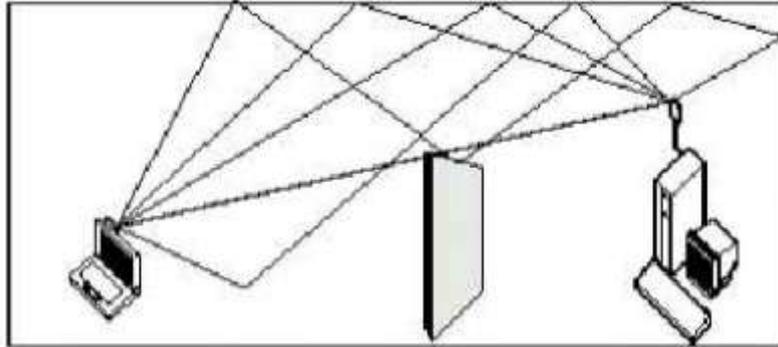


Fig. 4.7: Propagación multitrayectoria [Física de las Ondas Radioeléctricas dentro del Estándar IEEE802.11b - Frenzel, A.M.; Carrasco, A.; Monachesi,E.; Chaile, M.G.].

Por lo tanto, el canal de radio también puede estar caracterizado por la recepción multitrayectoria (multipath), donde la señal ofrecida al receptor está compuesta no solamente de ondas de radio de visión directa entre transmisor y receptor (line of sight, LOS), sino también de una gran cantidad de ondas de radio reflejadas, dispersadas o difractadas por estructuras tales como paredes, suelos, objetos, etc.

Las trayectorias resultantes para cada una de las ondas principales llegan con muchos pequeños retardos, y tienen diferentes valores de fase debido a las diferentes distancias recorridas. El número de trayectorias diferentes en un punto dado del espacio dependen de la forma y la estructura del edificio. Los niveles reales de la señal reflejada también dependen de la geometría del entorno.

Algunas señales ayudarán a la trayectoria directa (interferencia constructiva), mientras que otras señales restarán (interferencia destructiva).

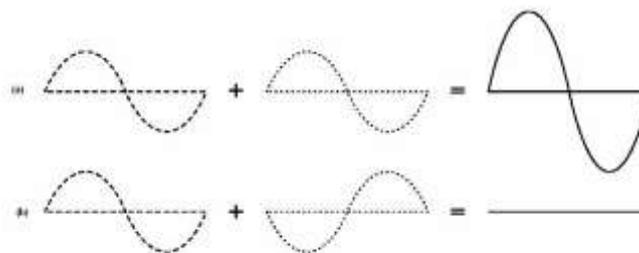


Fig. 4.8: Interferencia (a) constructiva y (b) destructiva

Existen dos clases de multitrayectoria. La multitrayectoria difusa, que proporciona un tipo de nivel de ruido de fondo, y la multitrayectoria especular, que puede causar interrupciones en la señal o puntos muertos de radio dentro de un edificio (hasta de 40 dB en algunos casos). Este problema es especialmente difícil en callejones subterráneos, túneles y habitaciones pequeñas. El funcionamiento apropiado del acoplamiento de la comunicación por radio requiere que la multitrayectoria sea reducida al mínimo o eliminada.

En este contexto, la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) es prácticamente inmune a los efectos de la multitrayectoria, debido a su propia filosofía estructural, ya que al estar basado en el salto a diferentes frecuencias, la interferencia multipath queda automáticamente contrarrestado. Sin embargo, la técnica DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) puede solucionar este problema aumentando la capacidad de la antena (por ejemplo diversidad de antenas), lo que genera costes y complejidad añadidos.

Por último la multitrayectoria se relaciona con los modelos de propagación y la pérdida de camino mediante el empleo teorías estocásticas y funciones de distribución de probabilidad para poder estimar el comportamiento del canal de radio. Las variaciones de la señal en un edificio donde no hay trayectorias con línea de visión clara entre receptor y transmisor se pueden aproximar, por ejemplo, por la función de distribución Rayleigh.

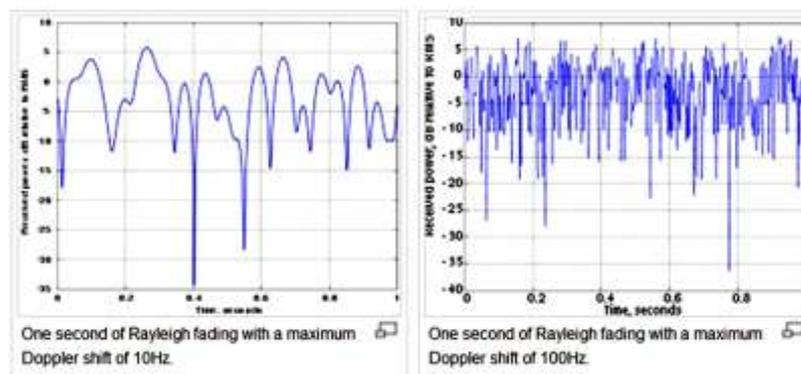


Fig. 4.9: Desvanecimiento en un canal Rayleigh [Física de las Ondas Radioeléctricas dentro del Estándar IEEE802.11b - Frenzel, A.M.; Carrasco, A.; Monachesi,E.; Chaile, M.G.]

5. Análisis de los resultados

5.1 Introducción

En este punto se explica de forma detallada los resultados obtenidos del proyecto, referidos tanto a las medidas realizadas como a los resultados obtenidos mediante simulación, incluyendo las oportunas valoraciones de los mismos.

5.2 Metodología y parámetros

Aquí detallamos todo el software y hardware usado para la realización de las simulaciones y la toma de medidas.

5.2.1 Simulación

Para recrear todos los escenarios y obtener los datos de interés, se utilizó un software de trazado de rayos en tres dimensiones implementado en un entorno Matlab y basado en un algoritmo de Ray-Launching.

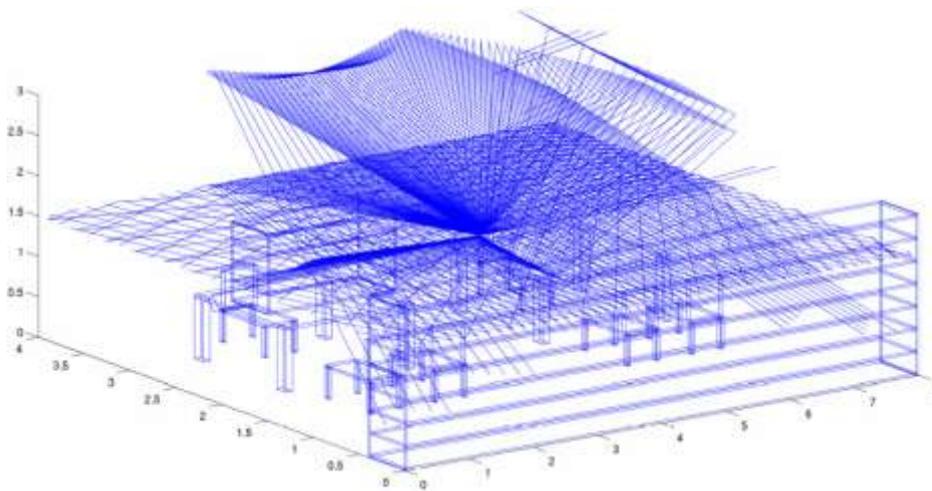


Fig. 5.1: Ejemplo de escenario interior en 3D con los rayos lanzados desde un transmisor situado en el centro.

Cada rayo se computa individualmente y el campo eléctrico de cada punto del escenario es la suma de las contribuciones de todos los rayos que los atraviesan. Al calcular la potencia recibida en cada punto del espacio, pueden crearse mapas de cobertura a una altura fija, como se muestra en la siguiente figura.

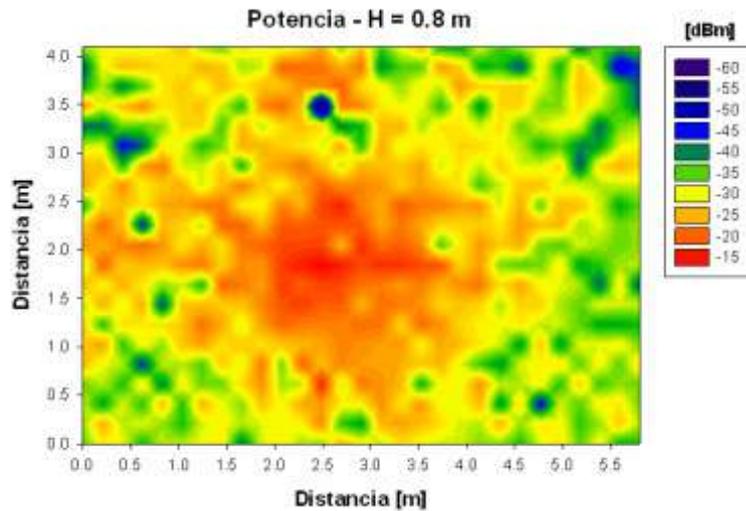


Fig. 5.2: Ejemplo de mapa de potencia recibida a una altura de 0,8m y con un único transmisor situado en el centro.

El principio del software consiste en dividir el escenario en cuboides iguales y de menor tamaño, proporcionando el valor de potencia que hay en cada uno de ellos. De esto dependerá la resolución del escenario de tal manera que, a mayor resolución los cuboides serán más pequeños, y viceversa.

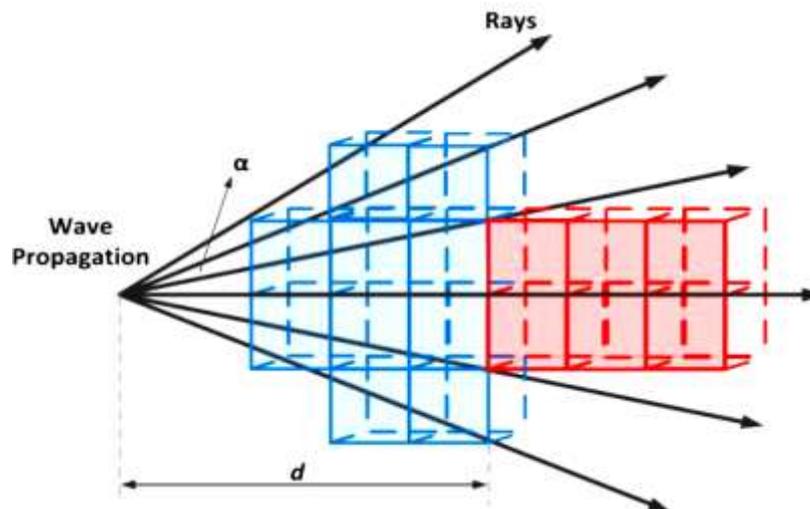


Fig. 5.3: Representación de los cuboides, Arancha Leon, Leire Azpilicueta, Erik Aguirre, Peio Lopez-Iturri, Francisco Falcone, "Topological Dependence in the Performance of Deterministic Wireless Channel Estimation", 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, Memphis, July 2014

El uso de los cuboides lleva implícito el problema de la reflexión, refracción y difracción, lo cual nos lleva a tener unos valores inexactos de los resultados; para paliarlo realizamos una corrección manual de estos ya que el simulador aún no es capaz de realizarlo automáticamente.

A pesar de todo una mayor resolución no implica unos mejores resultados. Si los cuboides son demasiado grandes (poca resolución) se pierde precisión en los datos y si los cuboides son muy pequeños (gran resolución) se producen problemas de reflexión, refracción y difracción que hacen que los datos obtenidos se desvíen considerablemente de la realidad, por consiguiente se pierde exactitud; por no hablar del coste computacional que supone para una máquina procesar esa gran cantidad de cálculos.

Consecuentemente, existe un compromiso que se deberá resolver en cada caso de estudio, realizando un análisis previo y calibrando de forma correcta el escenario, como se ha hecho en este proyecto.

Tras la introducción al método utilizado, es importante conocer los parámetros con los que se han simulado todos los escenarios y que se enumeran aquí:

- Potencia de transmisión: 0-18 dBm.
- Frecuencias de operación: 2,41 GHz.
- Tamaño de los cuboides: 5, 10, 20, 50 y 100 cm.
- Número de rebotes de los rayos igual a 6.
- Incremento de θ y ϕ del lanzamiento de rayos de la antena: $\pi/180$ y $\pi/360$.

5.2.2 Medidas

En éste apartado se realizaron medidas de potencia recibida o RSSI (Received Signal Strength Indicator), por lo que para ello se utilizaron distintos transmisores y receptores.

Para ello se hizo uso de la siguiente instrumentación, cuyos principales datos son los siguientes, todas sus características se pueden ver más detalladamente en el anexo X:

- Marconi 2041 Low Noise Generator:
 - 10 kHz to 2,7 GHz
 - Low residual FM noise: 0,3Hz RMS at 1GHz
 - Low spurious signals: -90dBc non-harmonics
 - Low phase noise: -140dBc/Hz at 1GHz
 - Comprehensive modulation modes
 - +13dBm output (+19dBm optional)
 - 0,1Hz to 500kHz modulation oscillator
 - Comprehensive frequency and amplitude sweep capabilities



Fig. 5.4: Marconi 2041 Low Noise Generator.

- Analizador de espectros Agilent FieldFox N9912A:
 - Sensibilidad: -148dBm
 - Rango de frecuencia: 9KHz a 6GHz
 - Conectores: 2xUSB 2.0, 1xminiUSB, 1xLAN, 1xminiSD slot
 - Calibración en el Puerto de salida RF: Sí



Fig. 5.5: Agilent FieldFox N9912A.

- Antenna Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna:
 - Frecuencia: 2,4-2,5GHz
 - Ganancia: 0,82dBi medida en cámara anecoica
 - Polarización: Lineal
 - Impedancia: 50Ω



Fig. 5.6: Antenna Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna.

- Módulos XBEE PRO:
 - Velocidad de transmisión: 250 Kbps
 - Rango de alcance: 90 m
 - Potencia de transmisión: 50 mW (+17 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm)
 - Sensibilidad del receptor (1% PER): -102 dBm



Fig. 5.7: Módulo XBEE PRO.

Después de hablar de las herramientas empleadas, se debe exponer el contexto en el que se hicieron, es decir, el plan de medidas junto con los parámetros utilizados. Estos dependen de cada uno de los dos tipos de medidas.

5.2.3 Medidas RSSI

Estas medidas consisten sencillamente en observar la potencia recibida en determinados puntos. Para realizar estas medidas usaremos el generador de señal, las motas XBEE y el analizador de espectro.

De manera que con estas medidas de potencia corroboraremos los resultados obtenidos de las simulaciones.

5.3 Definición de los escenarios

En este apartado daremos una descripción de los diferentes escenarios en los cuales realizaremos el estudio del canal radioeléctrico.

5.3.1 Escenario 1

Escenario preliminar con el que empezamos a realizar las labores de validación del sistema antes de realizar los experimentos en exterior.



Fig. 5.8: Foto del escenario

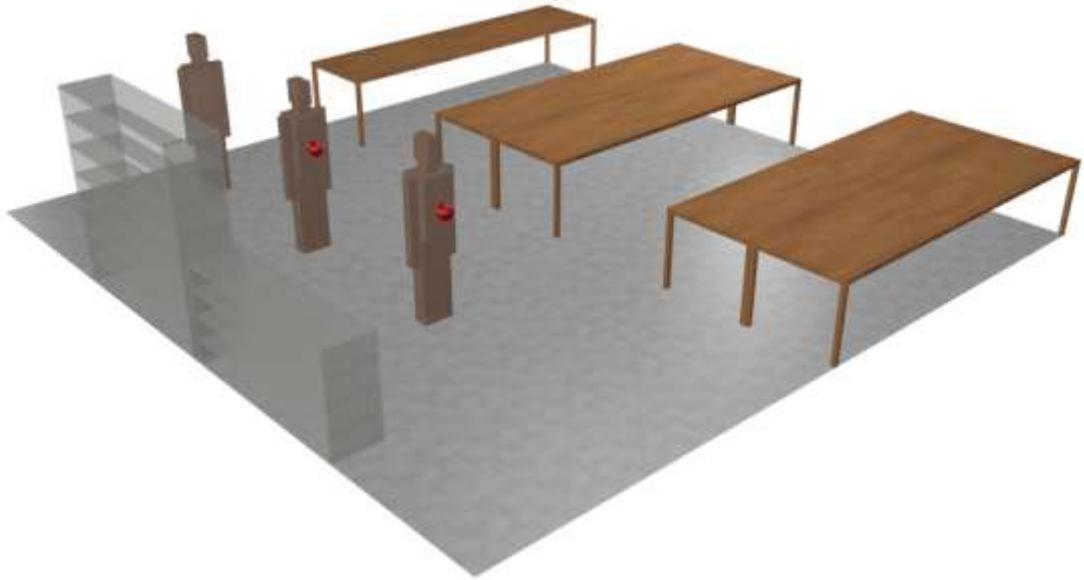


Fig. 5.9: Modelo 3D del escenario

Está compuesto por mesas, las tres del lado derecho, y estanterías, las dos del lado izquierdo. Se corresponde con una aproximación parcial de la primera estancia del laboratorio “Luis Mercader” de antenas y microondas, dado que coincidió con el traslado a este.

En él se encuentran tres personas en las posiciones (6,1), (6,3) y (6,5), siendo estos dos últimos los que llevan colocada una antena emisora a la altura de 1.15 metros.

5.3.2 Escenario 2



Fig. 5.10: Modelo 3D del escenario

Corresponde con una medida exacta y parcial de la primera estancia del laboratorio “Luis Mercader” de antenas y microondas, tras el traslado. En el vemos mesas, tres a mano derecha y una a mano izquierda arriba, y armarios, tres a mano izquierda.

En él se encuentran tres personas en las posiciones (4.24,1), (4.24,3) y (4.24,5), siendo estos dos últimos los que llevan colocada una antena emisora a la altura de 1.15 metros.

5.3.3 Escenario 3



Fig. 5.11: Foto del escenario

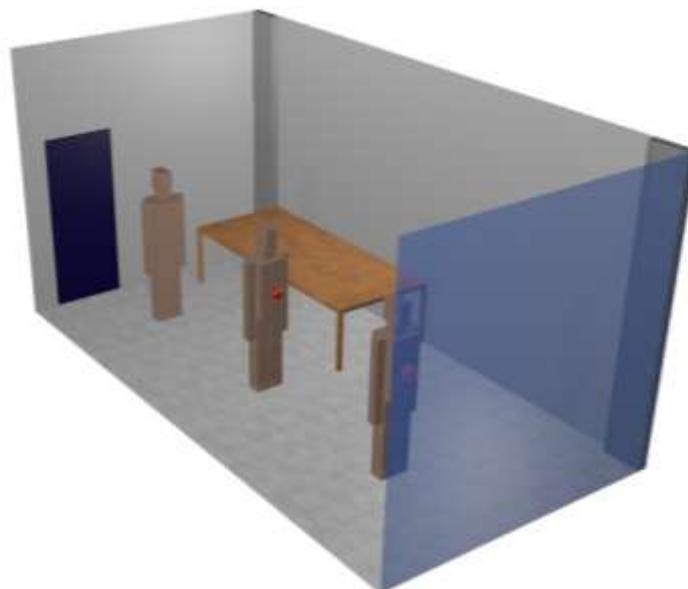


Fig. 5.12: Modelo 3D del escenario

Corresponde con una sala de juntas de la planta tercera del edificio de los Tejos, con una mesa en la mano izquierda.

En él se encuentran tres personas en las posiciones (2,1), (2,3) y (2,5), siendo estos dos últimos los que llevan colocada una antena emisora a la altura de 1.15 metros.

5.3.4 Escenario 4

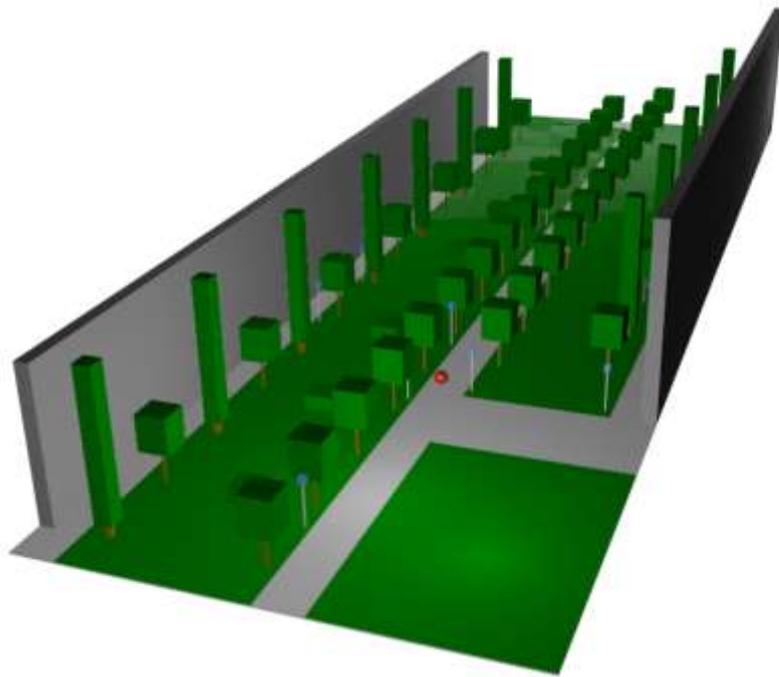


Fig. 5.13: Modelo 3D del escenario

Corresponde con la recta que hay entre el edificio de los Tejos y el aulario, con jardines y arboles a ambos lados de la recta de cemento.

Situaremos una antena, con y sin persona, en la posición (14.5, 76) y a una altura de 1.36 metros.

Tras esto procederemos al análisis de los resultados obtenidos en los experimentos y las simulaciones.

5.4 Resultados

5.4.1 Escenario 1

Comenzamos definiendo la potencia del transmisor, en este caso trabajaremos con 10 dBm ya que es la potencia que le daremos al generador de señal para las medidas empíricas.

Tras esto tomamos del simulador el plano de potencia que hay a la altura de la antena y calculamos su mapa de cobertura.

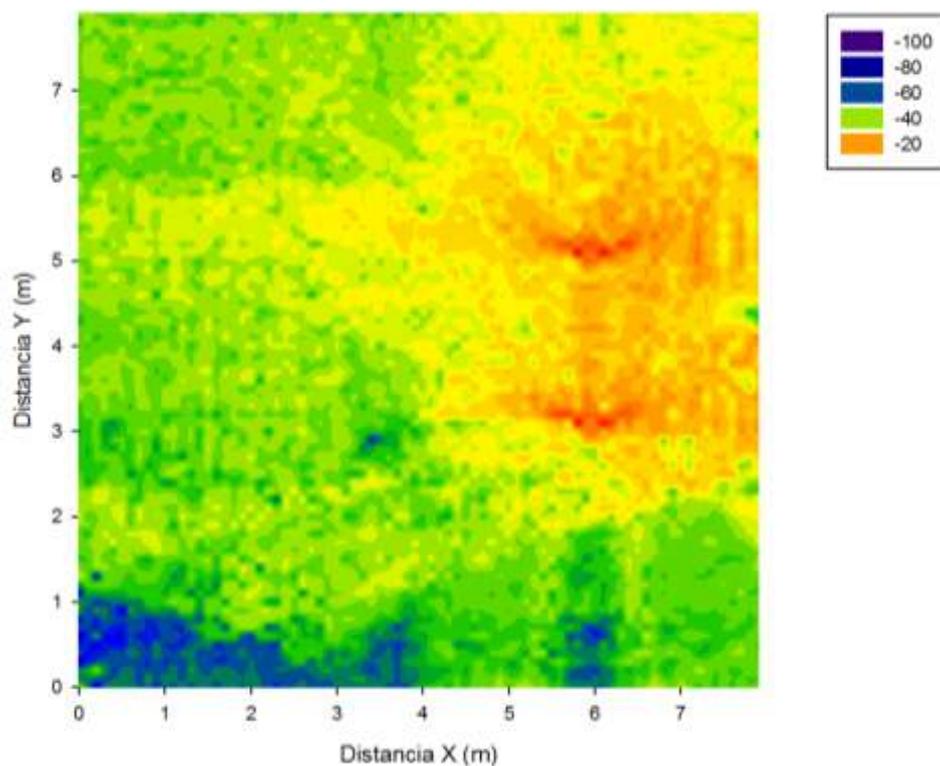


Fig. 5.14: Mapa de cobertura del Escenario 1 con cuboides de 0.1m

Como podemos observar, se ve claramente dónde se encuentran situadas las antenas y como hay una potencia de entorno a los -40dBm en casi toda la habitación; con mínimas zonas donde cae más la potencia.

Tras esto tomamos una radial de potencia en $X=6\text{m}$ con el objetivo de confirmar que los datos obtenidos con el simulador se asemejan a los obtenidos empíricamente, para ello compararemos los resultados de cuboides de distinto tamaño con el fin de encontrar los que mejor nos ajusten el modelo.

Comparamos los datos de la radial medida con los datos obtenidos de las simulaciones y el resultado obtenido es el siguiente.

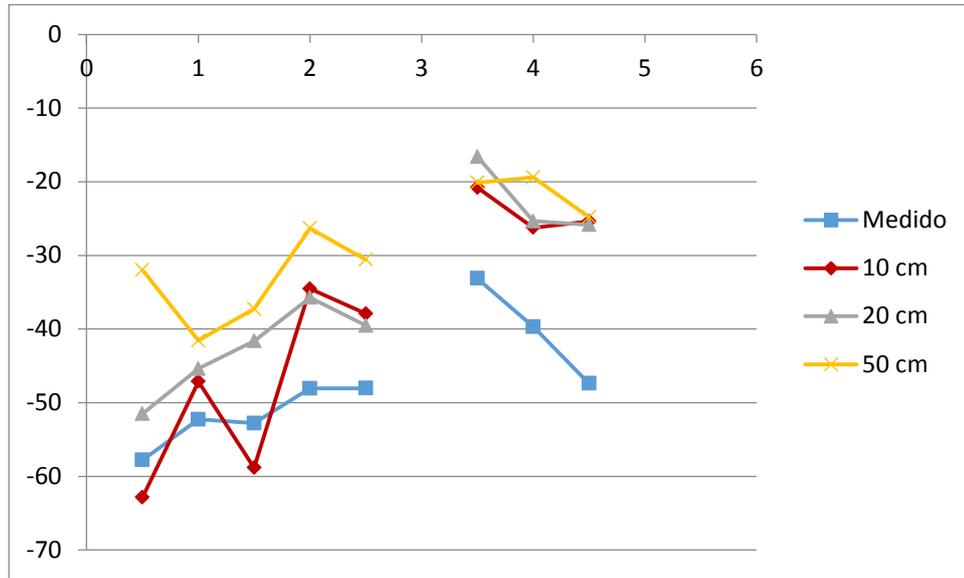


Fig. 5.15: Radial en X=6m

Vemos que los resultados obtenidos de las simulaciones no convergen con los medidos, esto nos indica que el modelo no es bueno y por ello ajustamos el escenario lo más fidedignamente con el real.

Tras esto repetimos el proceso con el siguiente escenario.

5.4.2 Escenario 2

Mantenemos las condiciones de altura y potencia de las antenas anteriores y tomamos del simulador el plano de potencia que hay a la altura de la antena y calculamos su mapa de cobertura.

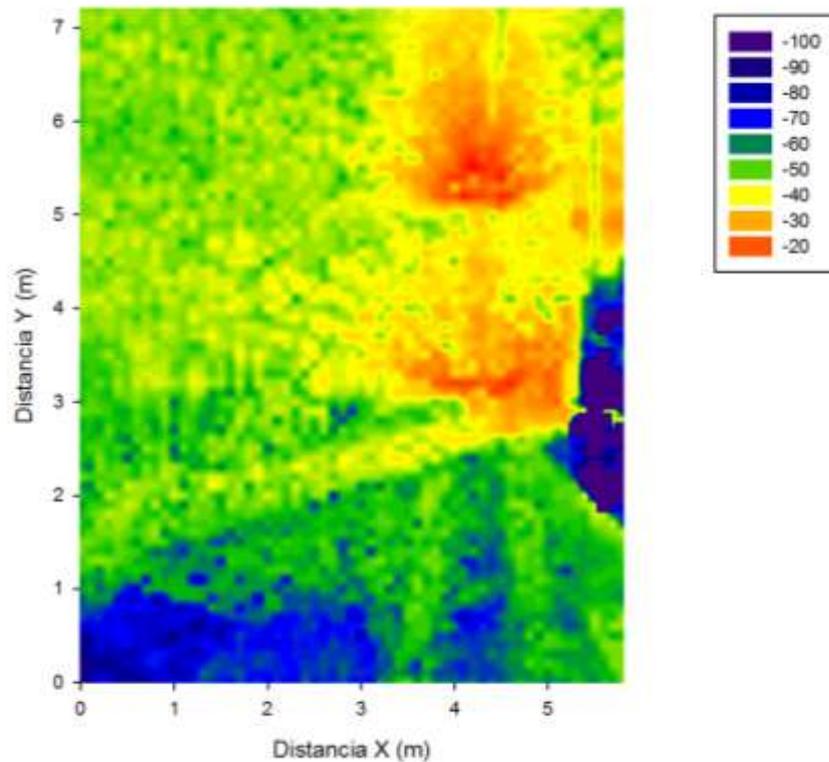


Fig. 5.16: Mapa de cobertura del Escenario 2 con cuboides de 0.1m

En este caso al igual que en el anterior se distinguen perfectamente las antenas, pero se distinguen zonas donde cae más la cobertura que en el escenario 1.

Tras esto tomamos una radial de potencia en $X=6m$ con el objetivo de confirmar que los datos obtenidos con el simulador se asemejan a los obtenidos empíricamente, para ello compararemos los resultados de cuboides de distinto tamaño con el fin de encontrar los que mejor nos ajusten el modelo.

Comparamos los datos de la radial medida con los datos obtenidos de las simulaciones y el resultado obtenido es el siguiente.

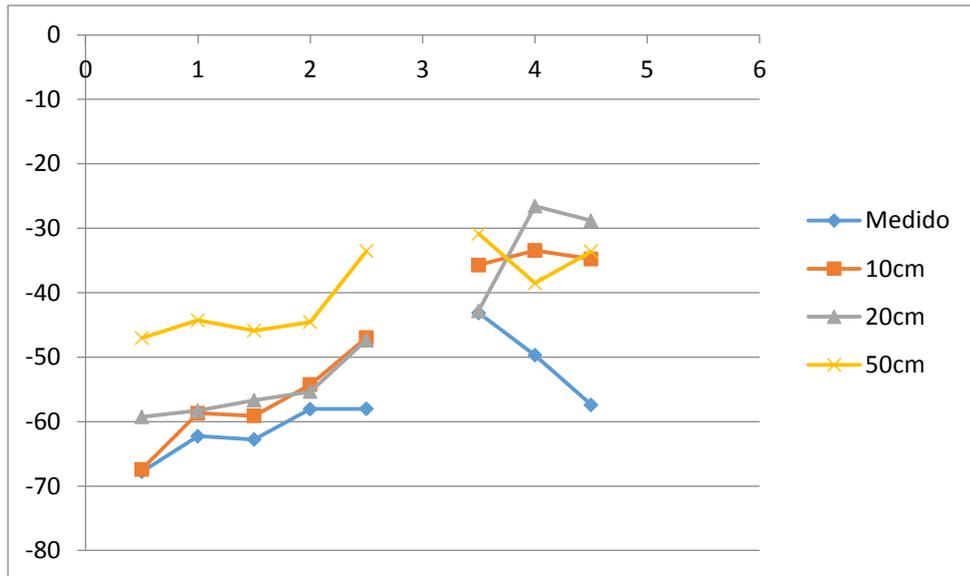


Fig. 5.17: Radial en X=4.24m

En este caso vemos que hasta los tres metros los cuboides de 10cm y los de 20 cm nos dan valores de potencia cercanos a los medidos, pero a partir de ahí divergen.

Esto nos lleva a plantearnos buscar un nuevo escenario ya que los dos primeros han sido solo parte del laboratorio y esto quizás esté haciendo que los resultados no converjan, por ello creamos el escenario 3.

5.4.3 Escenario 3

Mantenemos las condiciones de altura y potencia de los escenarios anteriores y añadimos otra prueba con los XBEE y 18 dBm de potencia, y tomamos del simulador el plano de potencia que hay a la altura de la antena y calculamos su mapa de cobertura.

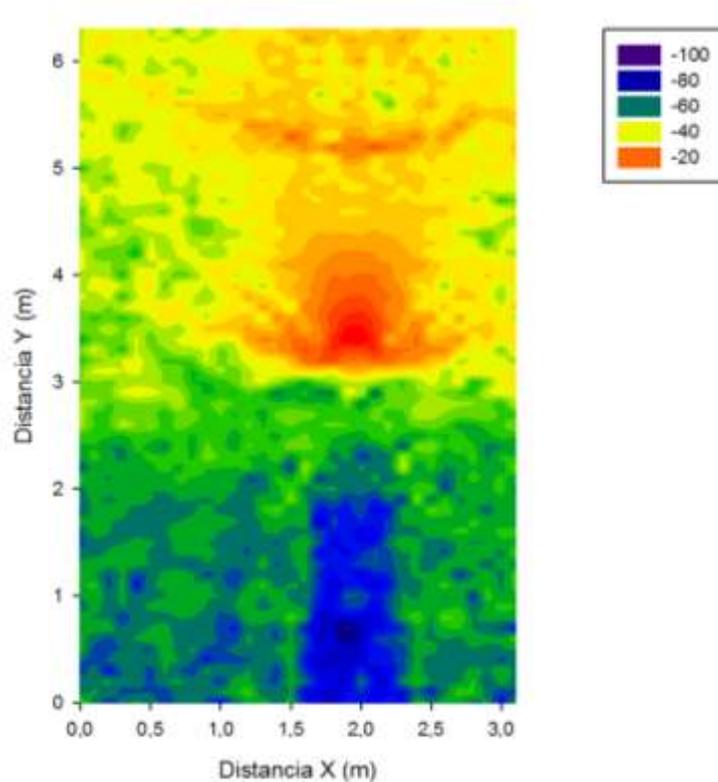


Fig. 5.18: Mapa de cobertura del Escenario 3 con cuboides de 0.1m

Se distingue bien la posición de las antenas y vemos que tiene una buena cobertura en todo el escenario, lo cual es lo esperado ya que es más pequeño que los anteriores.

Tras esto vamos a comparar los datos de la radial medida con los datos obtenidos de las simulaciones, pero usando primero como antena generadora una XBEE y el resultado obtenido es el siguiente.

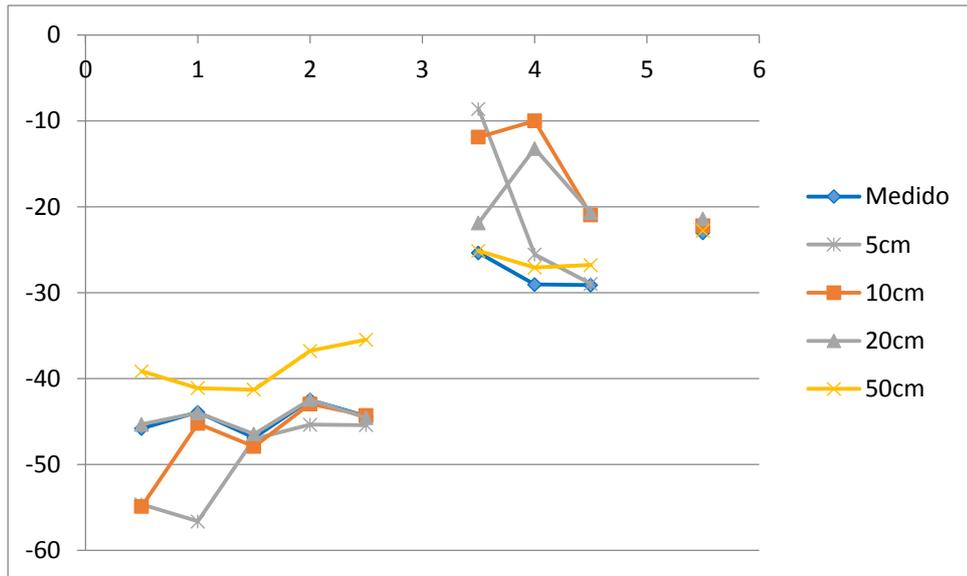


Fig. 5.19: Radial en X=2m

Vemos que los cuboides de 10cm y de 20cm se comportan muy bien pero no llegan a aproximarse del todo a los medidos, por lo que decidimos repetir las medidas pero usando el generador de señal con 10 dBm de potencia; el resultado es el siguiente.

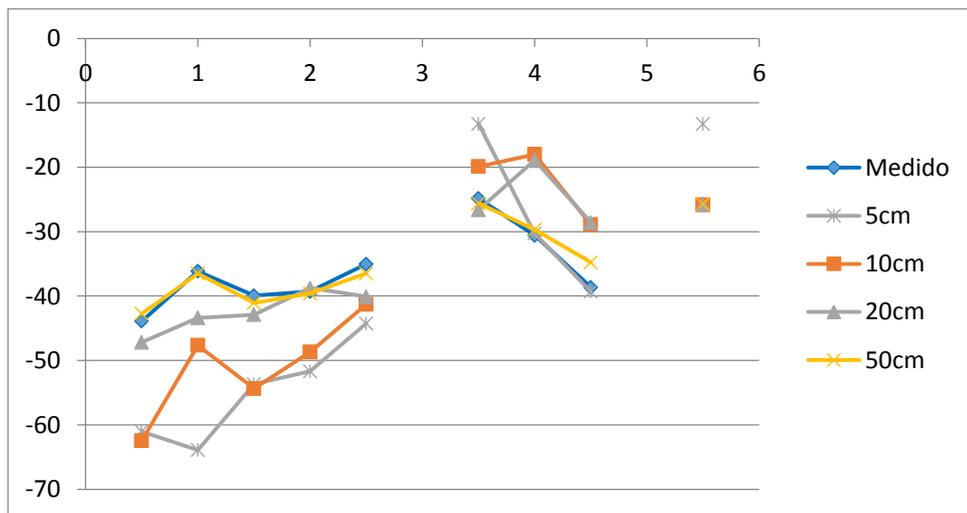


Fig. 5.20: Radial en X=2m

Ahora vemos que los cuboides de 20 y 50 cm se aproximan perfectamente con las medidas, luego ya hemos conseguido la convergencia con los datos tras tres escenarios.

Tras esto pasamos a calcular los perfiles de *Delay spread*, tiempo entre el primer y el último rayo lanzado, para los cuboides de 0.2m y 0.5m. Comenzamos con los cuboides de 0.2m.

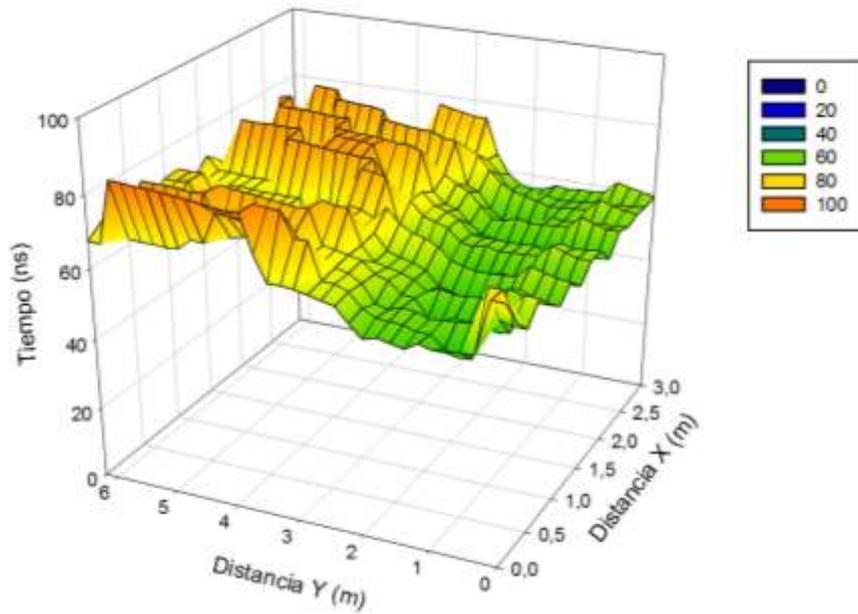


Fig. 5.21: *Delay spread* del Escenario 3, cuboides de 0.2m y la antena en X=3m

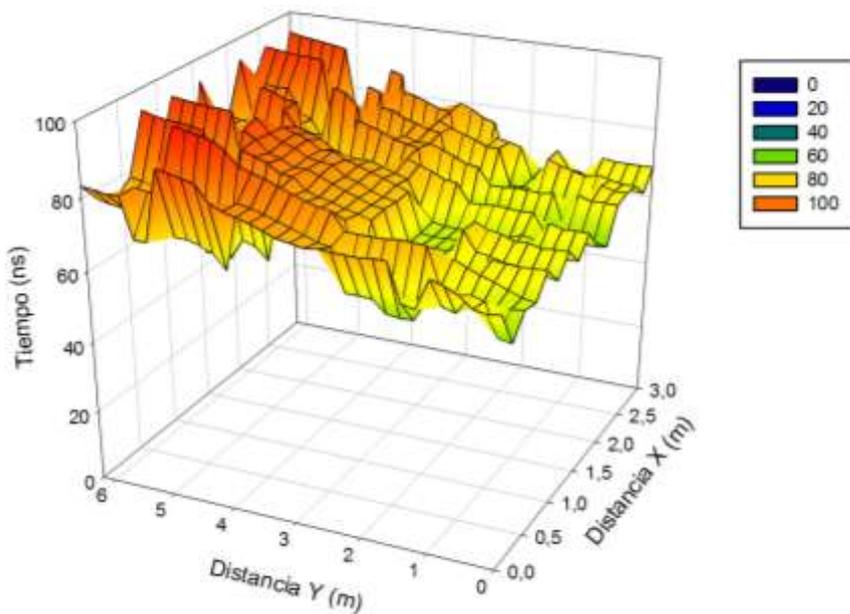


Fig. 5.22: *Delay spread* del Escenario 3, cuboides de 0.2m y la antena en X=5m

Vemos que hay mayor retardo de propagación cuando la antena se encuentra en el hombre que está en X=5m que cuando se encuentra en X=3m.

Ahora pasamos a ver el de los cuboides de 50cm.

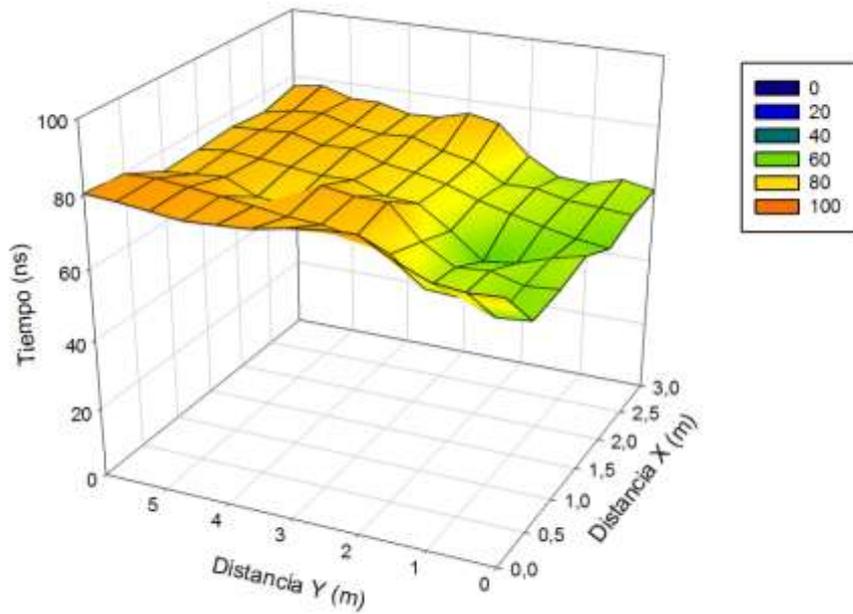


Fig. 5.23: *Delay spread* del Escenario 3, cuboides de 0.5m y la antena en X=3m

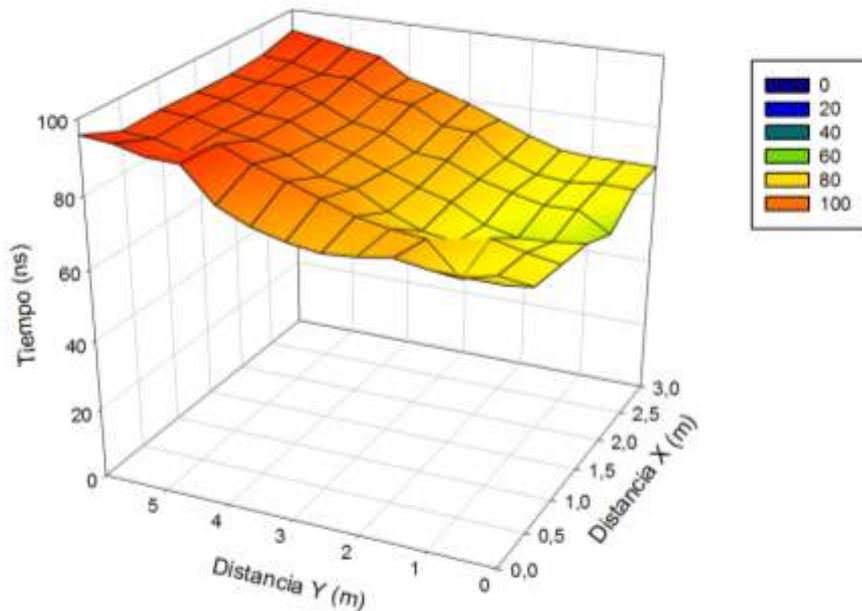


Fig. 5.24: *Delay spread* del Escenario 3, cuboides de 0.5m y la antena en X=5m

Volvemos a apreciar que hay mayor retardo de propagación cuando la antena se encuentra en el hombre que está en X=5m que cuando se encuentra en X=3m.

Vemos que en ambos casos sus valores son similares pero al tener más resolución los cuboides de 0.2m estos nos dan más variaciones y como resultado esa forma más ondulada.

De esto podemos decir que el retardo es mayor cuando la antena se encuentra en X=5 puesto que al encontrarse más cerca de la cristalera hay más reflexiones de los rayos y menos absorciones, mientras que cuando se encuentra en X=3 hay más absorciones que reflexiones y por lo tanto el retardo es menor

Por último miraremos como son los perfiles de Retardo-potencia para los cuboides de 0.2m y de 0.5m.

Comenzamos con los cuboides de 0.2m.

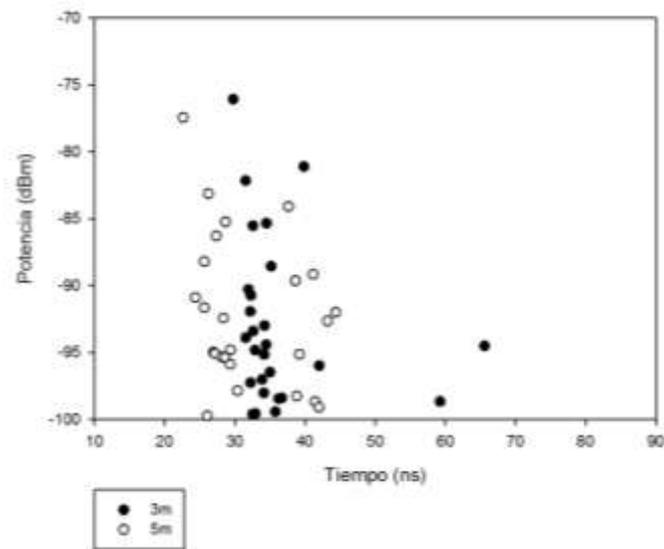


Fig. 5.25: Perfil de retardo-potencia del escenario 3, cuboides de 0.2m, la antena en X=3m y en X=5m

Vemos que están más dispersos los datos cuando la antena se encuentra en X=5m que cuando está en X=3m.

Continuamos con los cuboides de 0.5m.

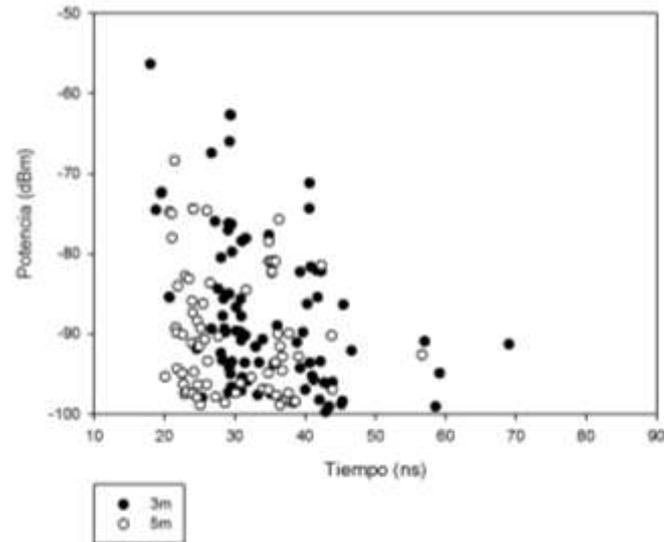


Fig. 5.26: Perfil de retardo-potencia del escenario 3, cuboides de 0.5m, la antena en X=3m y en X=5m

En este caso Vemos mucho más dispersos los datos cuando la antena se encuentra en X=5m y cuando está en X=3m.

Ahora comparamos cuando la antena se encuentra en X=3m y con ambos cuboides.

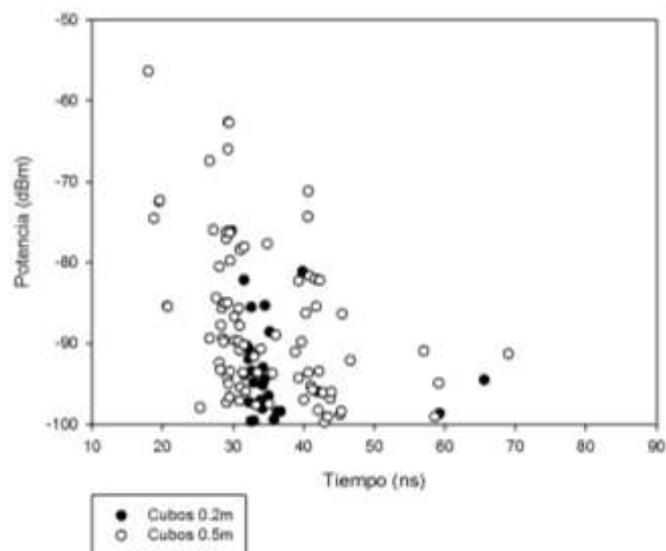


Fig. 5.27: Perfil de retardo-potencia del escenario 3, cuboides de 0.2m y 0.5m, la antena en X=3m

Vemos claramente que están más dispersos los de los cuboides de 0.5m que los de 0.2m. Ahora hacemos lo mismo pero con la antena en X=5m.

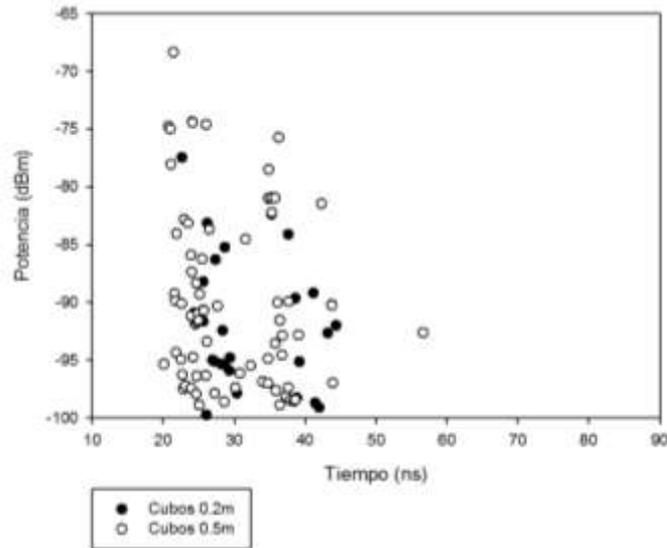


Fig. 5.28: Perfil de retardo-potencia del escenario 3, cuboides de 0.2m y 0.5m, la antena en X=5m

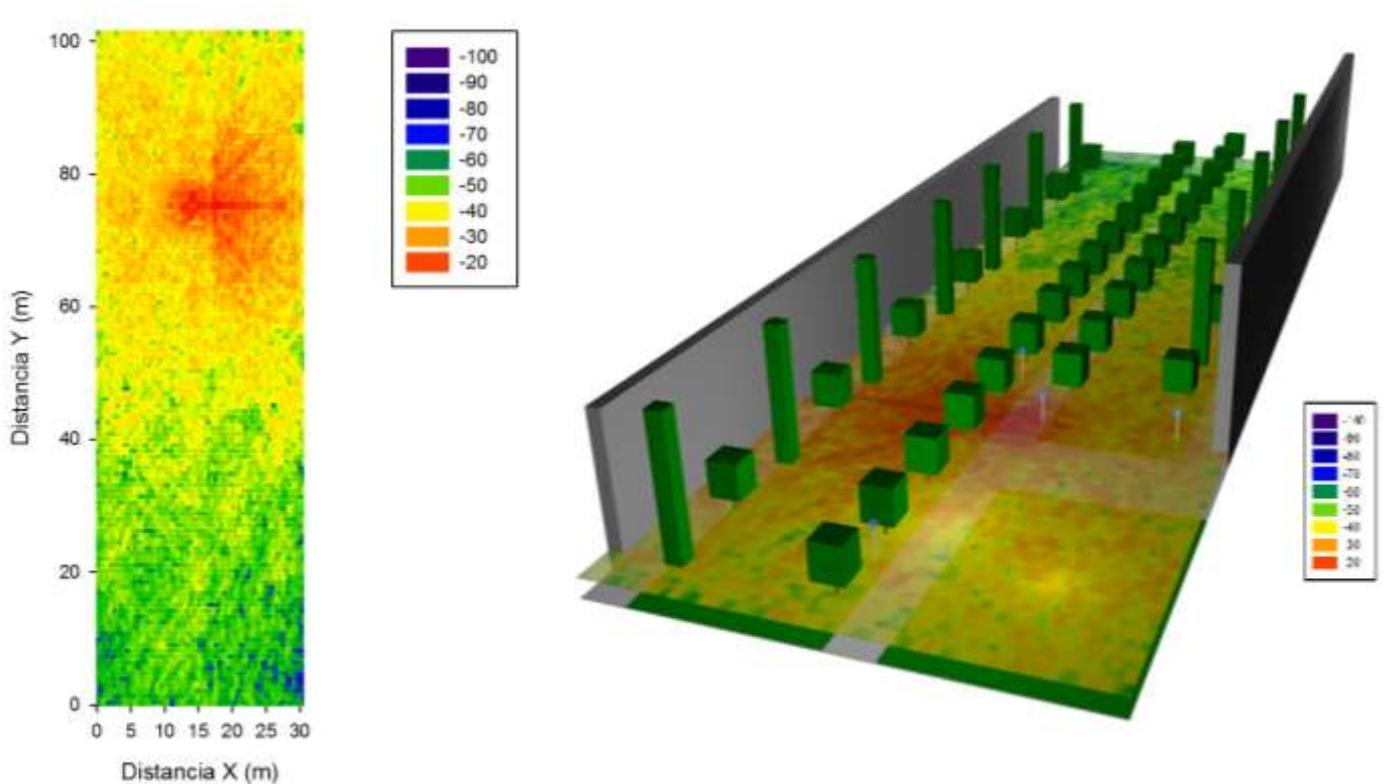
Como vemos, ambos casos tienen los datos muy dispersos cuando la antena está en X=5m que cuando está en X=3m; además, con la antena en X=3m la potencia cae más debido a que tiene más absorciones de los rayos, como ya hemos podido apreciar en las gráficas de *delayspread*.

Con esto damos por validado el modelo en interior, a partir de aquí se preparó un nuevo escenario que entrañó un desafío.

5.5.4 Escenario 4

En este escenario vamos a realizar para su caracterización, medidas y simulaciones con y sin persona.

Comenzaremos sin persona, usando antenas XBEE, a una altura de 1.36m y con potencia de transmisión de 18 dBm.



El mapa de cobertura es el siguiente:

Fig. 5.29: Mapa de cobertura del Escenario 4 con cuboides de 0.5m, visto en planta y superpuesto en el modelo 3D

Como podemos observar el sistema sin persona cubre bien toda la totalidad del espacio del escenario, para corroborar esto realizamos una radial de potencia en $X=14.5m$ y el resultado es el siguiente.

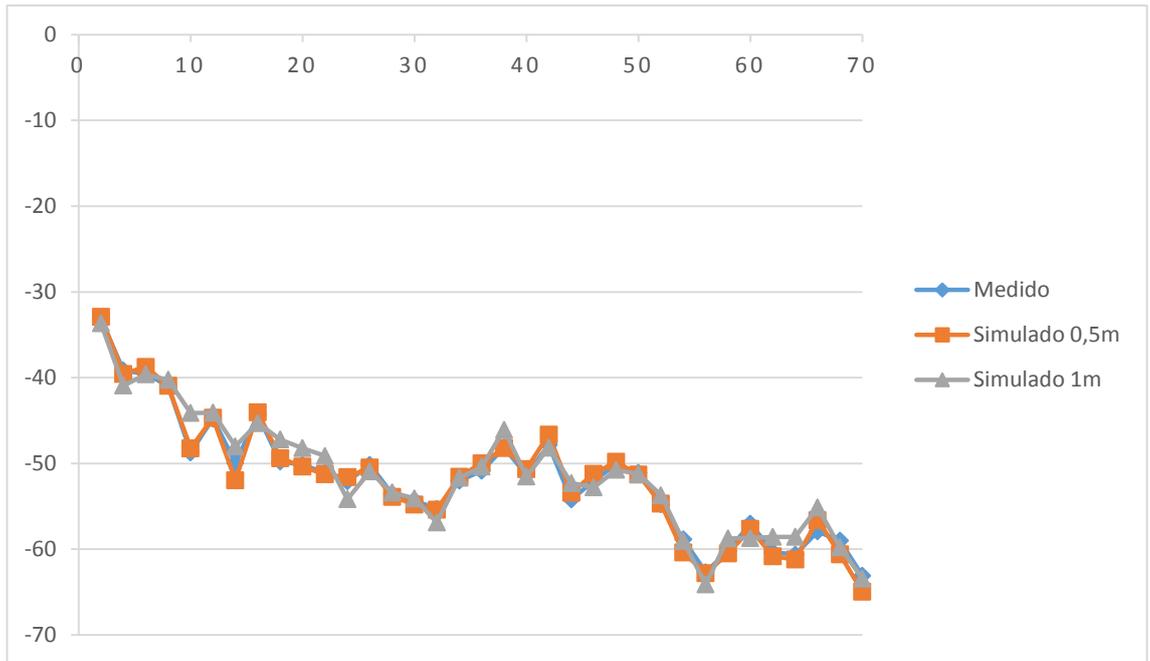


Fig. 5.30: Radial en X=14.5m sin persona

Vemos que tanto los cuboides de 0.5m como los de 1m se ajustan muy bien a los resultados de las medidas; además, se ve perfectamente cómo va decreciendo suavemente la potencia según nos alejamos de la antena.

Si comparamos estos datos con las sensibilidades típicas de sistemas ZigBee y Bluetooth, tenemos el siguiente balance de enlace.

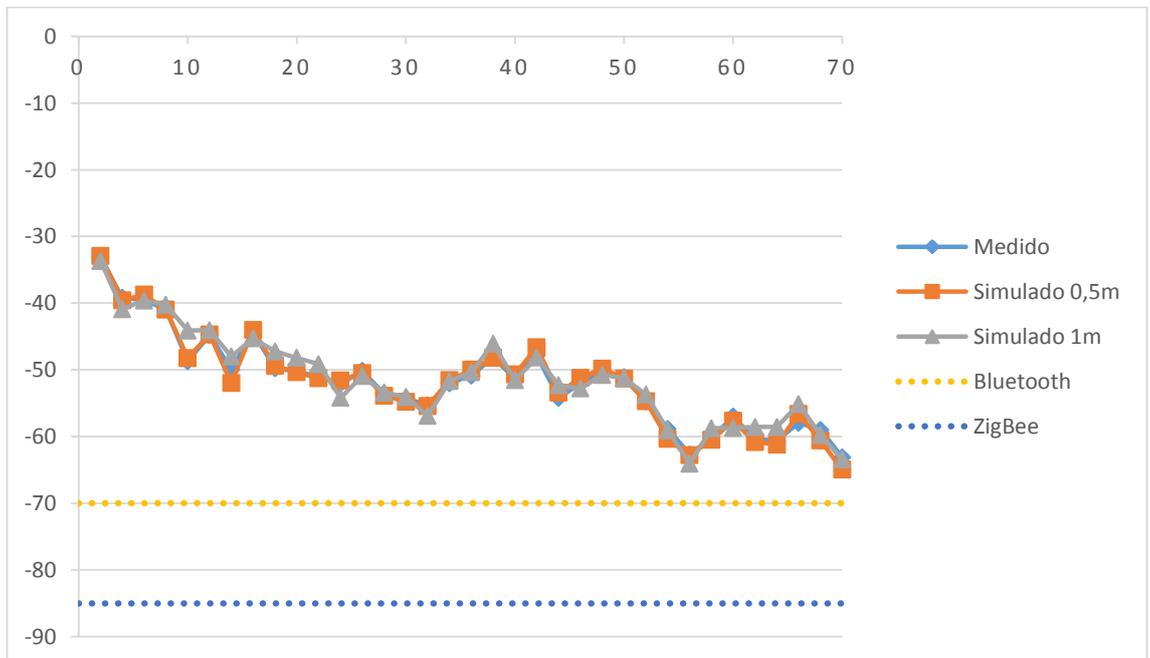
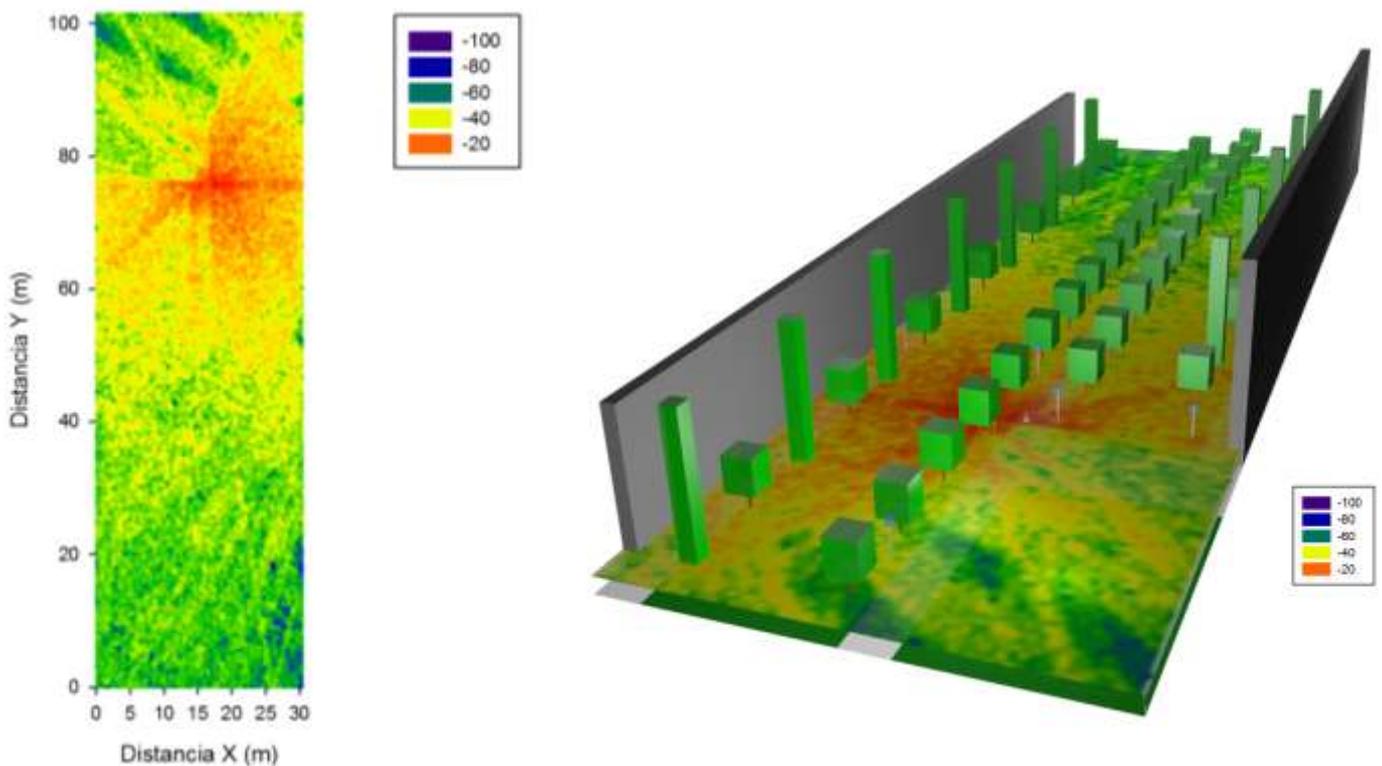


Fig. 5.31: Balance de enlace en la radial en X=14.5m sin persona

Vemos que nuestro enlace se encuentra por encima de la sensibilidad mínima de los estándares de Bluetooth (-70 dBm) y de ZigBee (-85 dBm), teniendo un margen estrecho con Bluetooth pero con un margen amplio sobre ZigBee; por lo tanto, corroboramos lo visto en el mapa de cobertura y vemos en esta primera aproximación un buen funcionamiento del sistema.

Ahora pasamos a repetir el experimento pero añadimos esta vez a una persona llevando la antena sobre su cuerpo; usando antenas XBEE, a una altura de 1.28m y con potencia de transmisión de 18 dBm.



El mapa de cobertura es el siguiente:

Fig. 5.32: Mapa de cobertura del Escenario 4 con cuboides de 0.5m, visto en planta y superpuesto en el modelo 3D

Como podemos observar al añadir a una persona no nos ha modificado mucho la cobertura respecto al caso anterior, de nuevo volvemos a calcular una radial de potencia en $X=14.5\text{m}$ y el resultado es el siguiente.

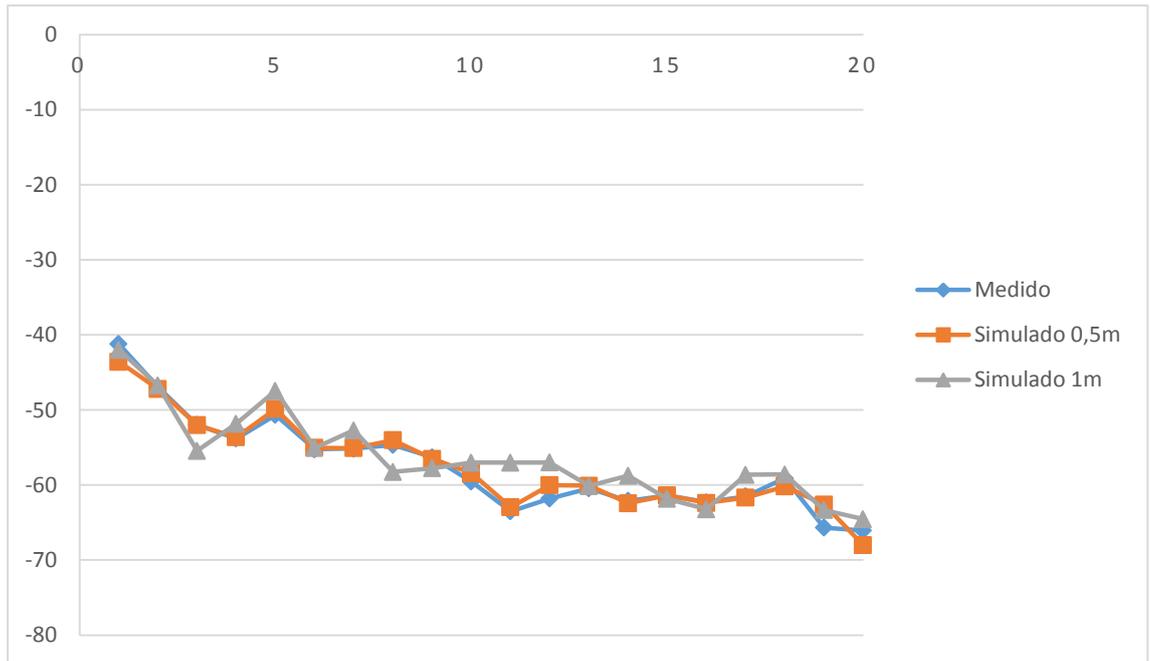
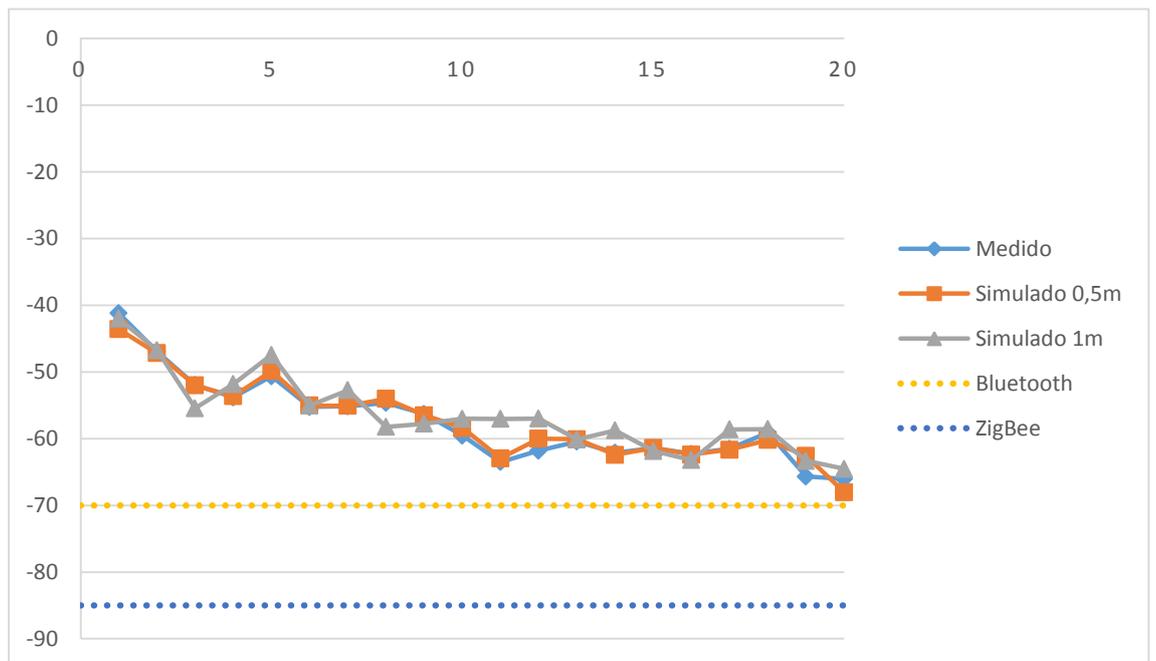


Fig. 5.33: Radial en X=14.5m con persona

Vemos que tanto los cuboides de 0.5m como los de 1m se ajustan muy bien a los resultados de las medidas; además, se ve perfectamente cómo va decreciendo suavemente la potencia según nos alejamos de la antena.

Si comparamos estos datos con las sensibilidades típicas de sistemas ZigBee y



Bluetooth, tenemos el siguiente balance de enlace.

Fig. 5.34: Balance de enlace en la radial en X=14.5m con persona

Vemos que nuestro enlace se encuentra por encima de la sensibilidad mínima de los estándares de Bluetooth (-70 dBm) y de ZigBee (-85 dBm), teniendo un margen aún más estrecho, que en el caso anterior, con Bluetooth pero con un margen amplio sobre ZigBee; por lo tanto, corroboramos lo visto en el mapa de cobertura y vemos que al introducir a una persona continuamos teniendo un buen funcionamiento del sistema.

Tras esto podemos decir que el sistema en estático se comporta de una forma muy buena, cumpliendo con lo esperado y dejando un buen margen en cuanto a potencia recibida.

Tras esto realizamos unos espectrogramas de una persona en movimiento para hacer una primera aproximación a la práctica deportiva.

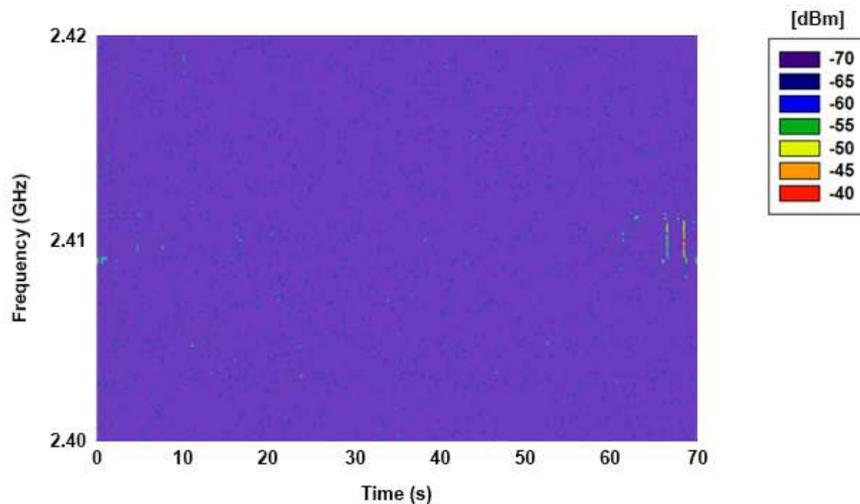


Fig. 5.35: Espectrograma con el receptor al comienzo del camino

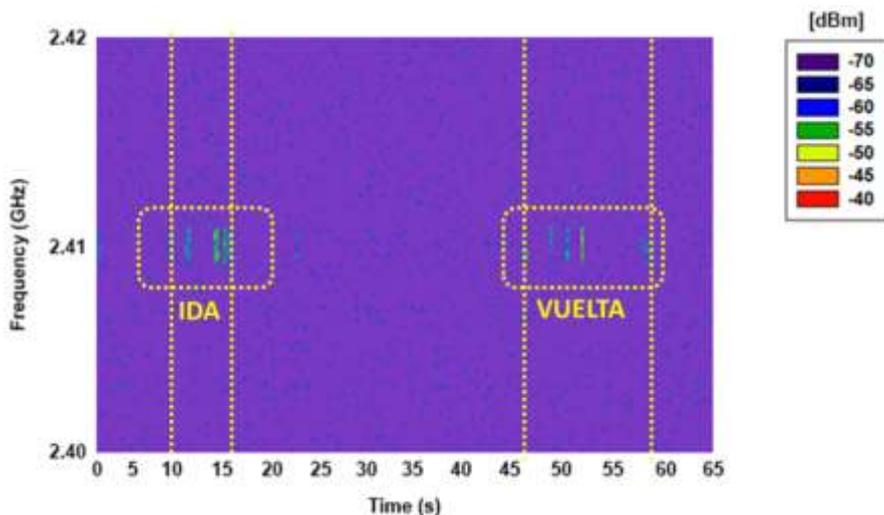


Fig. 5.36: Espectrograma con el receptor en mitad del camino

Como podemos observar en el primer espectrograma se ve potencia nítidamente al comienzo y al final del tiempo, que corresponde a la ida y a la vuelta hasta el final del camino.

Mientras que en el segundo espectrograma se ve potencia nítidamente cuando pasamos las dos veces por delante del receptor, que corresponde a la ida y a la vuelta hasta el final del camino, y un poco menos nítido al salir desde el punto de partida; en este caso a la ida el transmisor va en el brazo a la mano contraria a la que se encuentra en receptor, por lo que hay absorción por parte del cuerpo y su detección es menor; mientras que a la vuelta el transmisor va en el brazo a la mano en la que se encuentra en receptor, por lo que no hay la absorción anterior por parte del cuerpo y su detección es mayor.

Con esto vemos una primera aproximación a que el enlace pueda funcionar con una variación de la velocidad y la distancia.

6. Conclusiones

Tras exponer el trabajo realizado en el proyecto y después de analizar los resultados obtenidos mediante simulaciones y medidas, pasaremos a comentar las conclusiones obtenidas.

La primera es la gran influencia que tienen los objetos y personas sobre la propagación electromagnética; como hemos podido comprobar todos los objetos y personas absorben energía, lo cual nos genera limitaciones en el sistema.

La segunda es que el software de trazado de rayos se ha mostrado eficiente para la validación de los escenarios con las personas en estático, tanto en pequeñas como en largas distancias; pero en este momento está limitado para realizar simulaciones de movimiento y simulaciones con varias antenas, los resultados han sido realizados con superposiciones.

La última es que tras ver los mapas de cobertura y los balances de enlace para el escenario 4 con y sin persona, la tecnología ZigBee presenta un gran margen de potencia con la cual poder desarrollar la red.

7. Líneas futuras

A partir del punto en el que nos encontramos podremos continuar desarrollando la red de las siguientes formas:

- Realizar simulaciones y medidas con más personas para determinar la robustez del sistema.
- Evaluar y estudiar la necesidad de colocar más de una antena sobre los usuarios, con el fin de tener la máxima capacidad posible.
- Estudiar la influencia del movimiento en la capacidad del sistema.
- Estudiar la mejor disposición posible de la antena/as sobre los usuarios.
- Estudiar la influencia de la piel mojada sobre la capacidad del enlace.

Tras esto, se podría como este tipo de redes *outdoor* pueden ser utilizadas para todo tipo de deportes de equipo (fútbol, baloncesto, balonmano, etc.), con varios participantes (náuticos, del motor, ciclismo, etc.) en los cuales deseemos monitorizar cualquier parámetro de los participantes con cualquier objetivo.

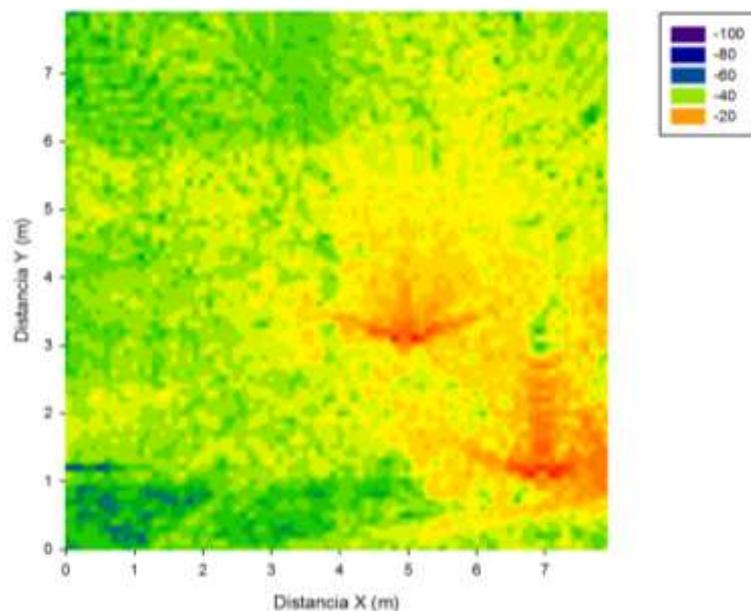
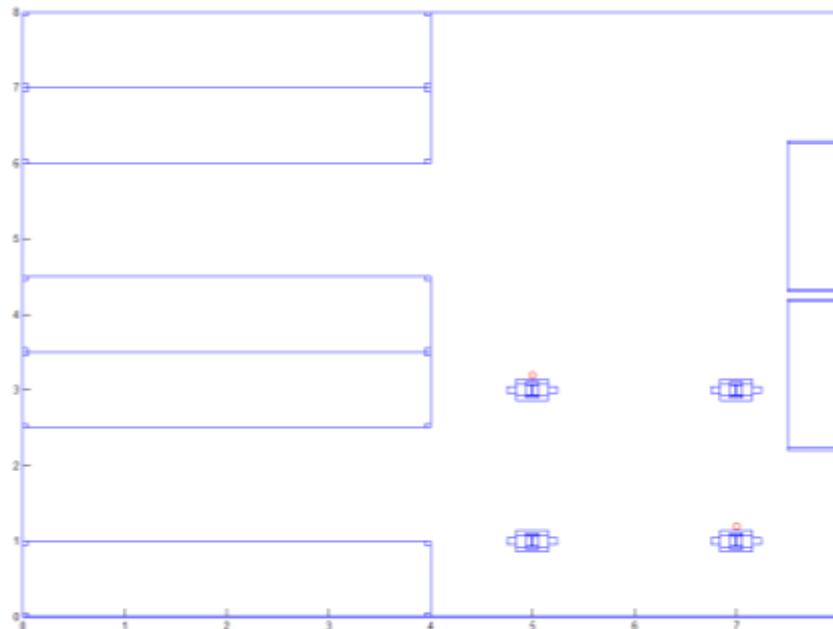
Para ello deberemos estudiar la casuística concreta de cada uno y elegir la tecnología idónea para ella

8. Anexos

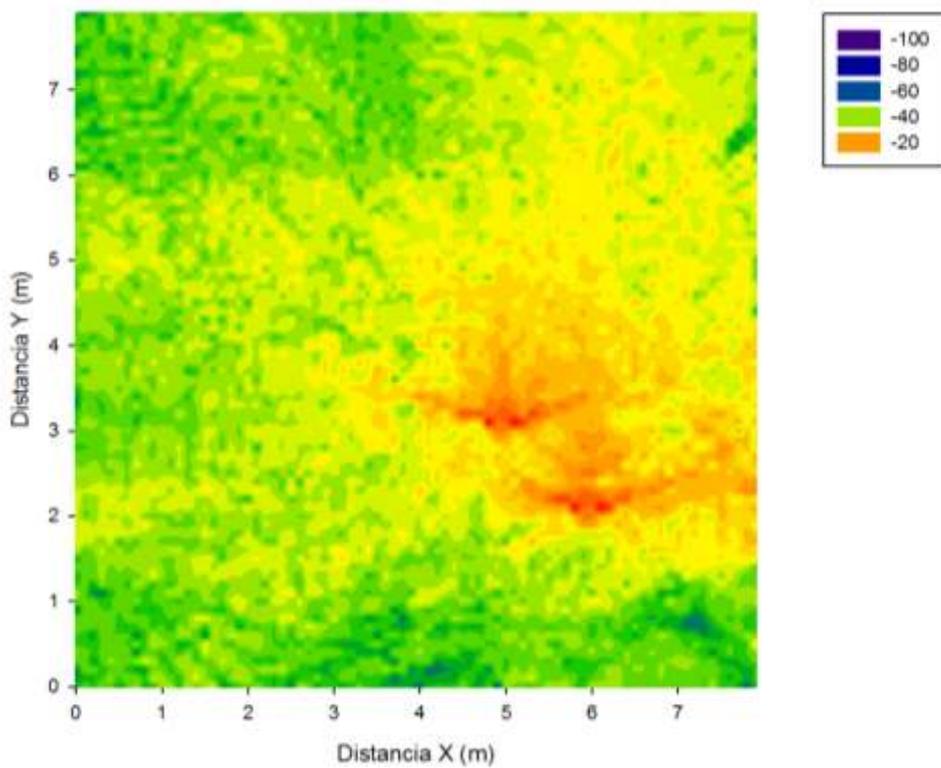
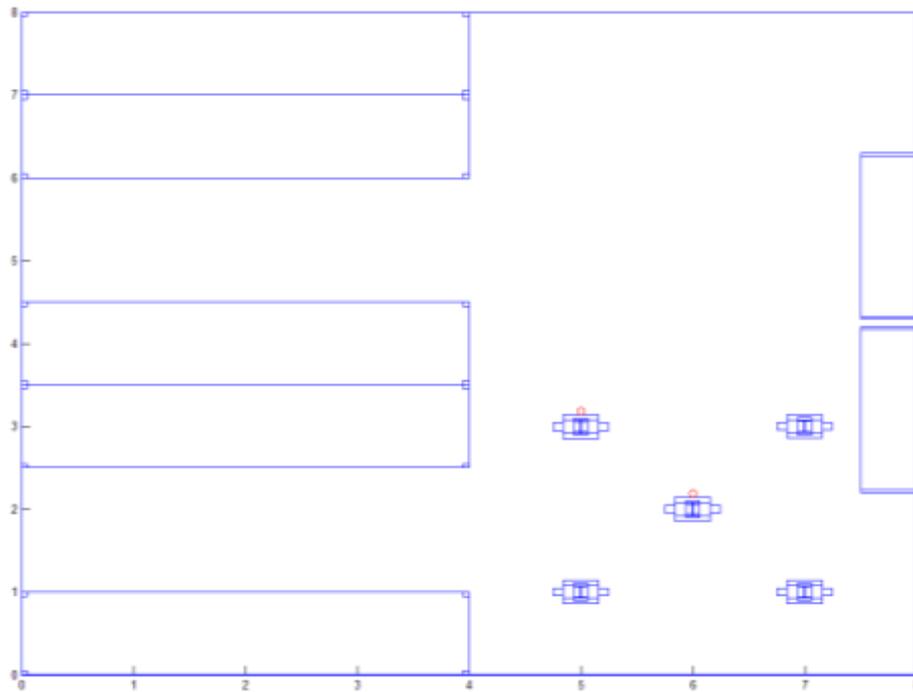
8.1 Configuraciones adicionales

En este apartado se presentan dos configuraciones de personas en el escenario 1 en posiciones distintas a las vistas durante todo el proyecto, estas simulaciones se engloban dentro del estudio previo y solamente se calcularon sus mapas de cobertura.

8.1.1 Escenario 1 con cuatro personas

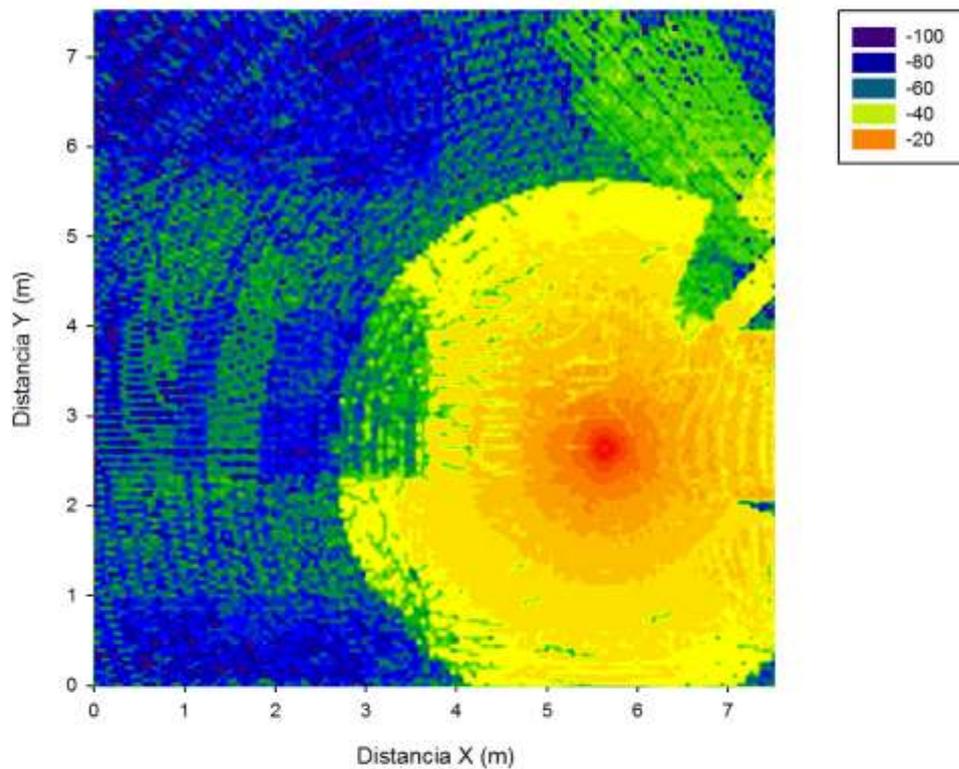


8.1.2 Escenario 1 con cinco personas

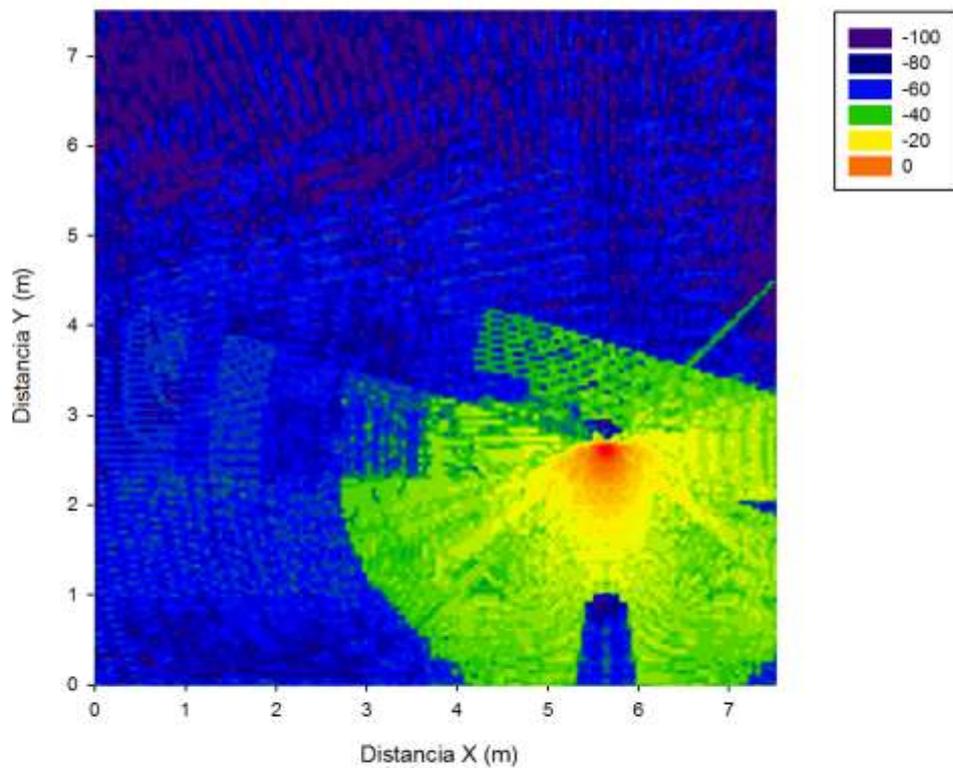


8.2 Mapas de cobertura de todas las simulaciones realizadas

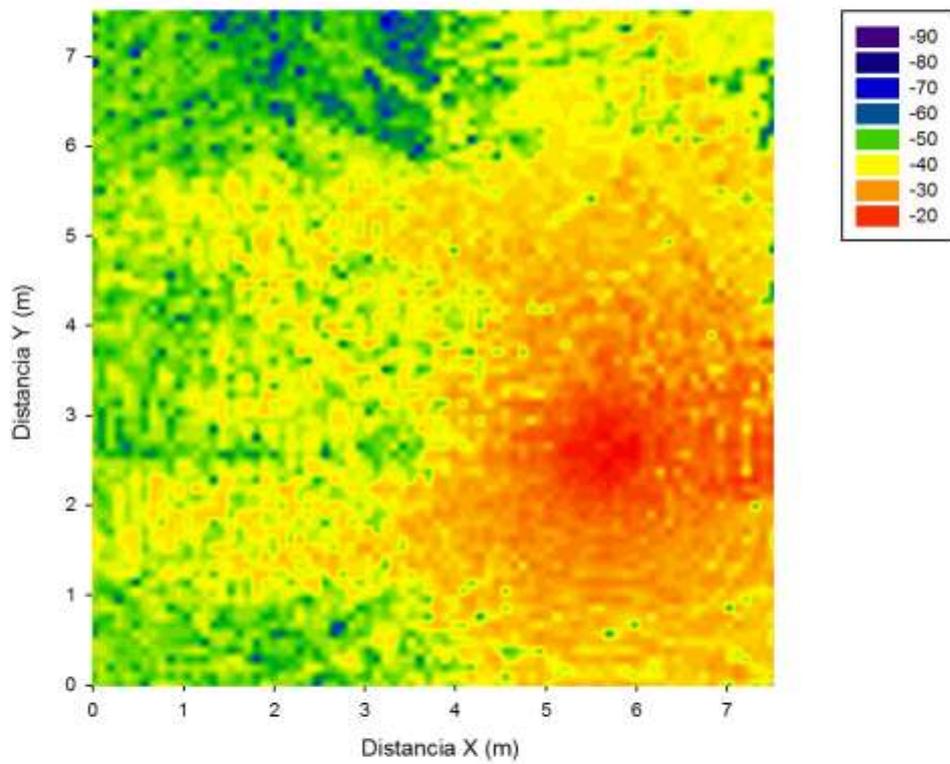
1. Escenario1 / sin personas/ antena en (6,3) / resolución 0.05m



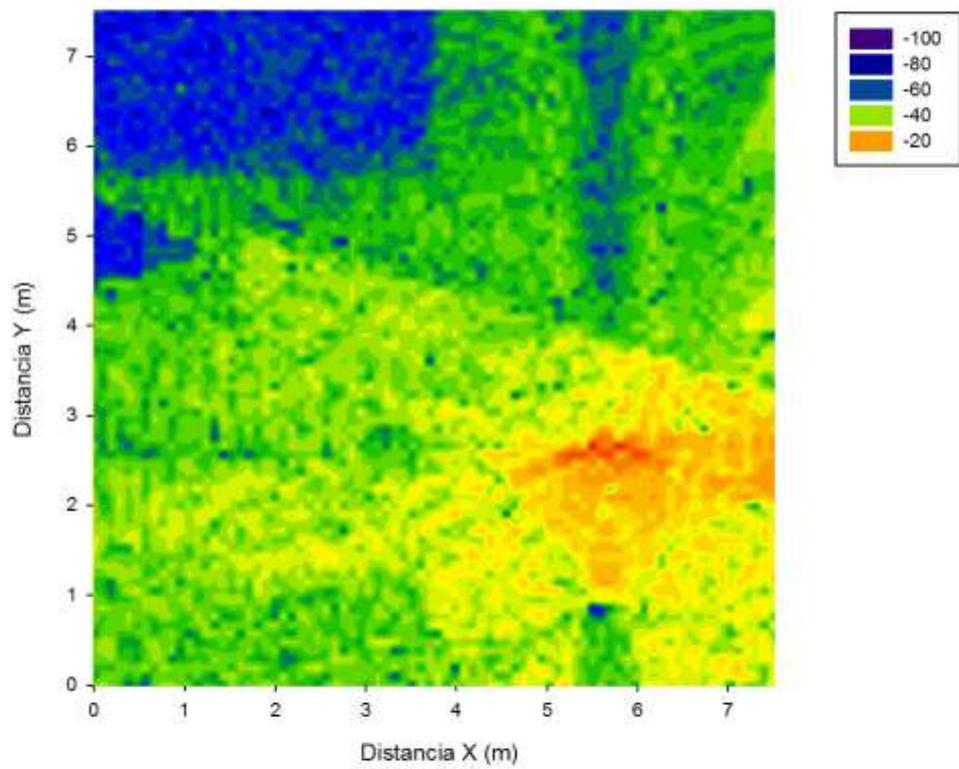
2. Escenario1 / 2 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.05m



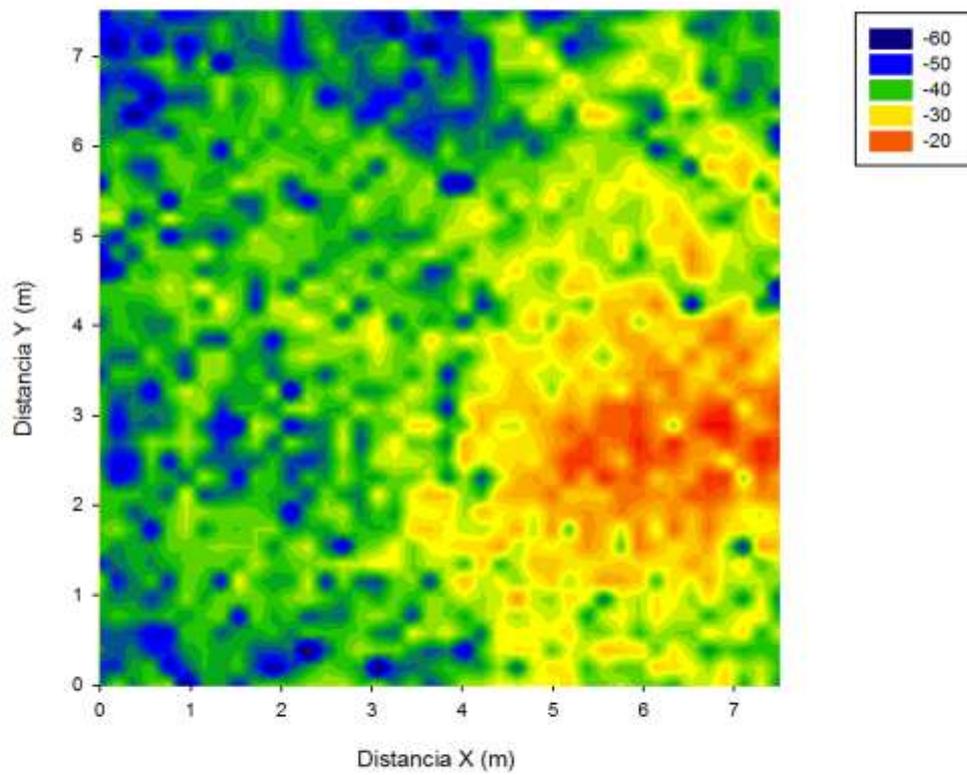
3. Escenario1 / sin personas/ antena en (6,3) / resolución 0.1m



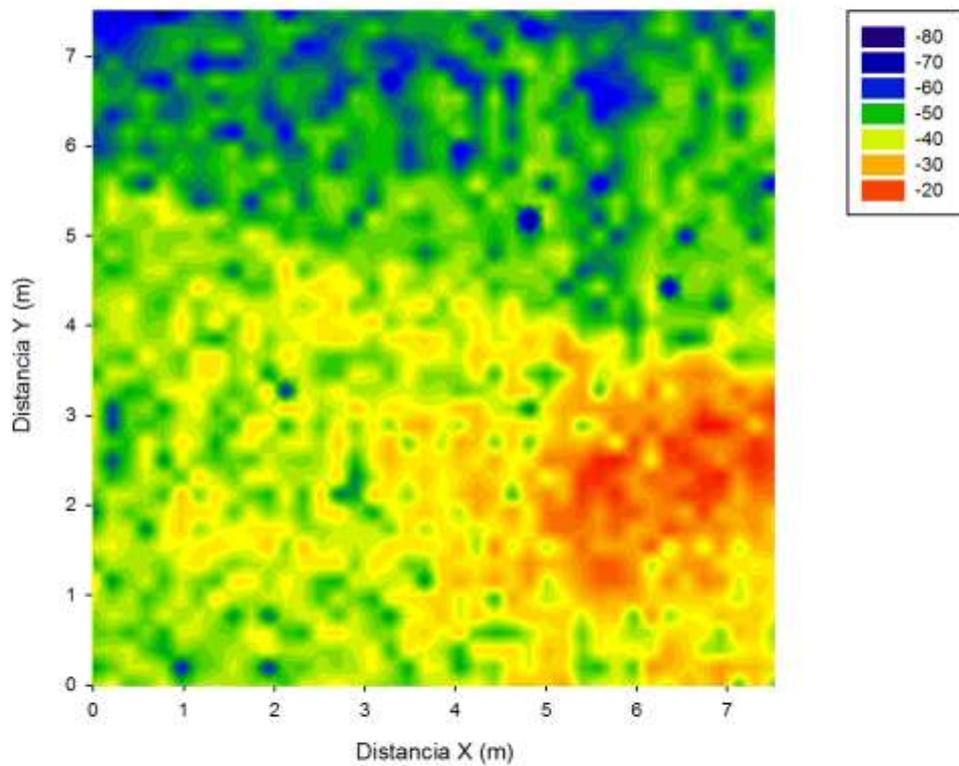
4. Escenario1 / 2 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.1m



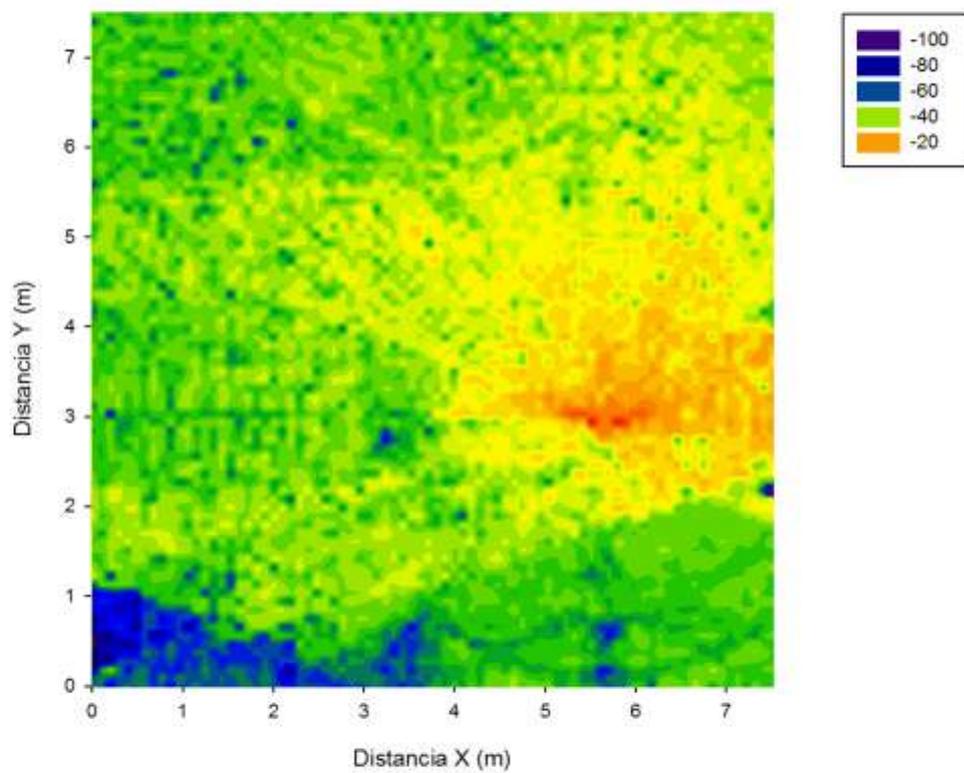
5. Escenario1 / sin personas/ antena en (6,3) / resolución 0.2m



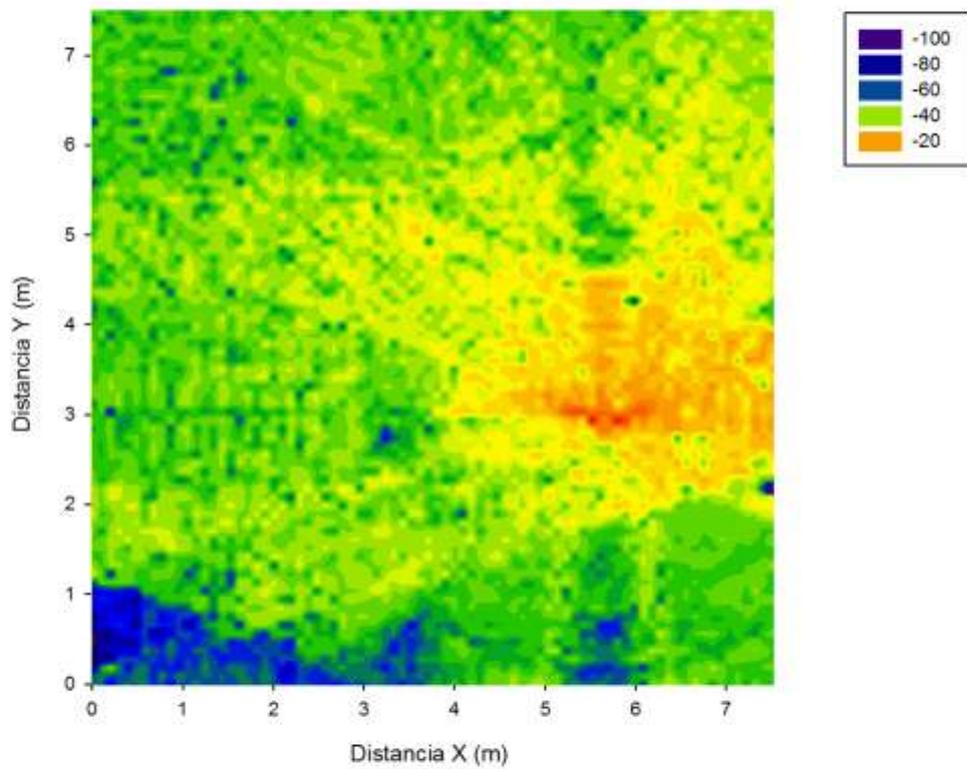
6. Escenario1 / 2 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.2m



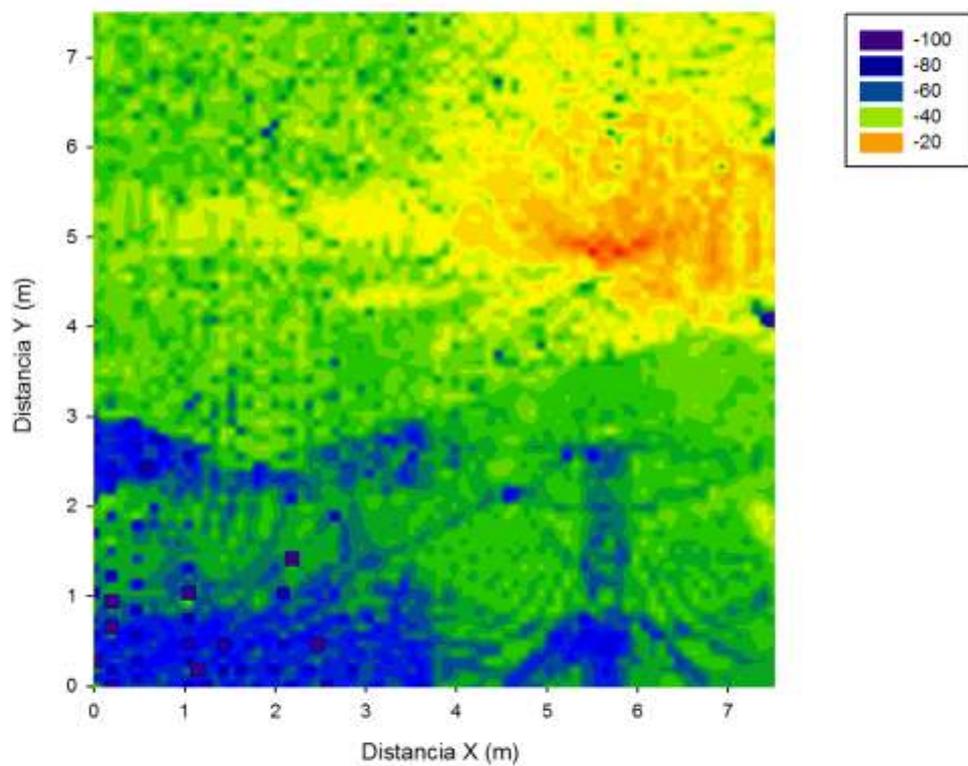
7. Escenario1 / 2 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.1m



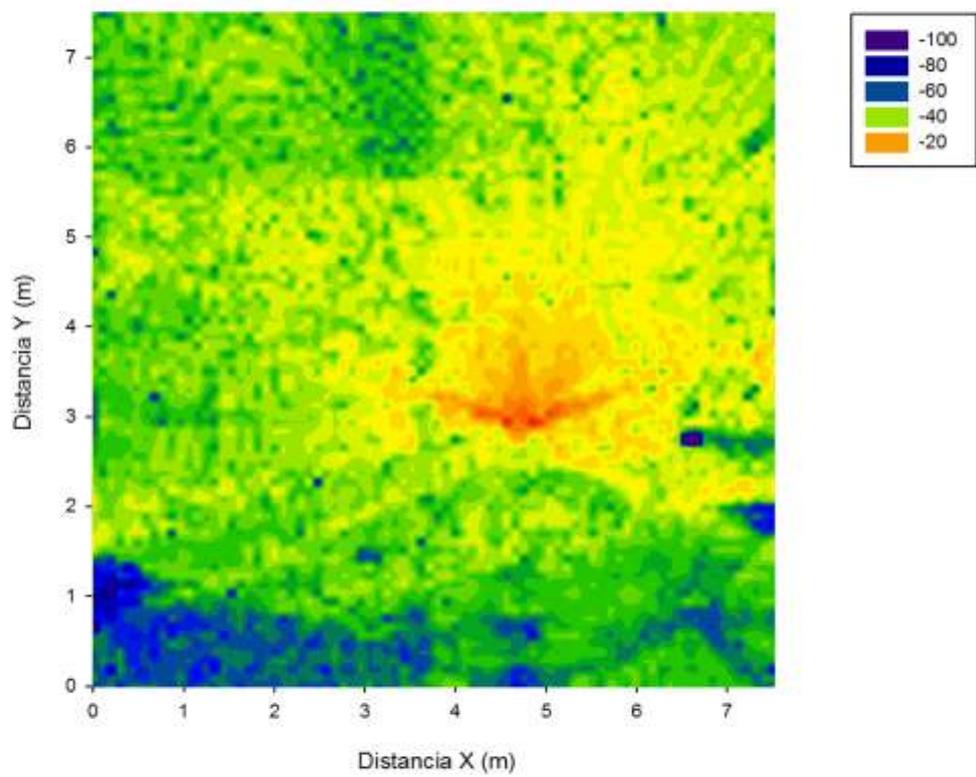
8. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.1m



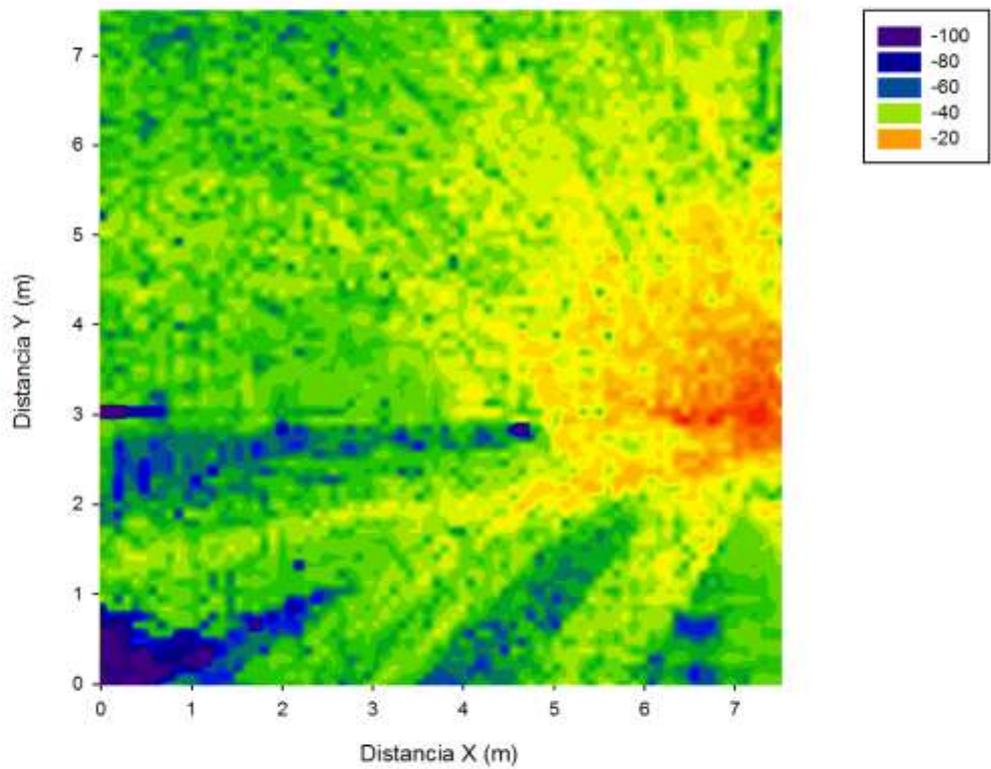
9. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,5) / resolución 0.1m



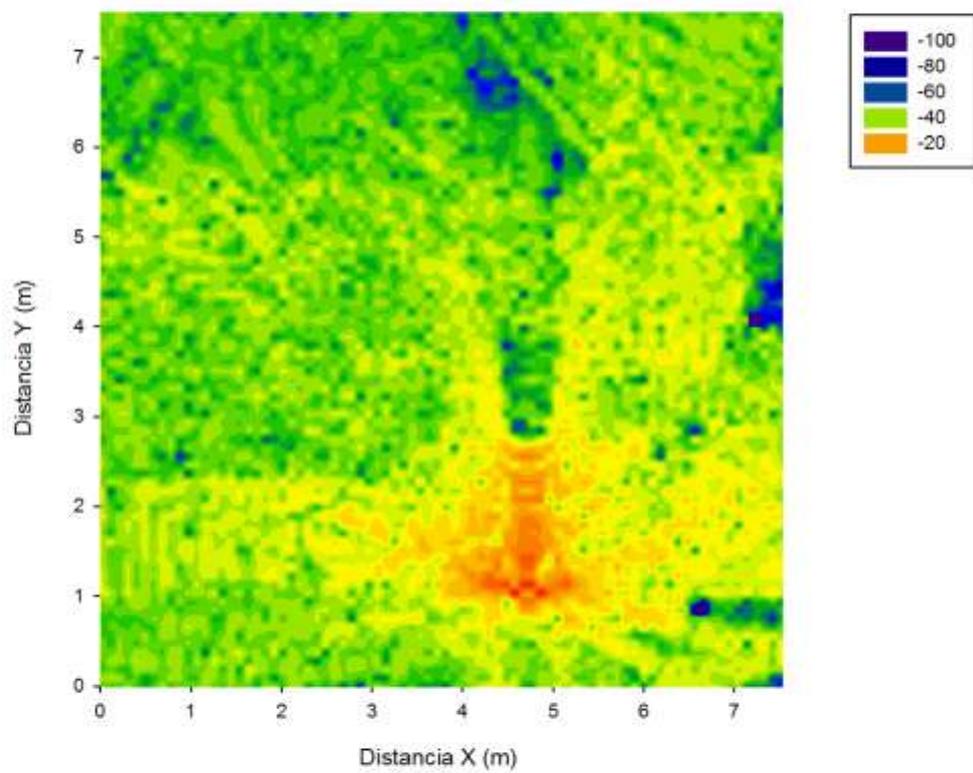
10. Escenario1 / 4 personas/ antena en (5,3) / resolución 0.1m



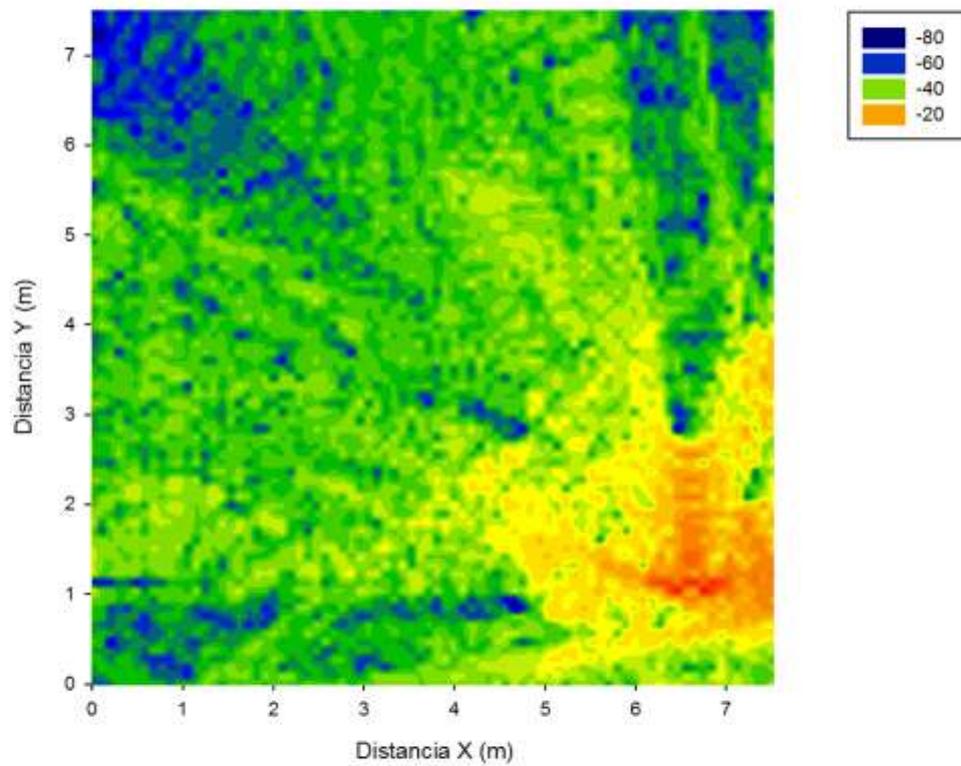
11. Escenario1 / 4 personas/ antena en (7,3) / resolución 0.1m



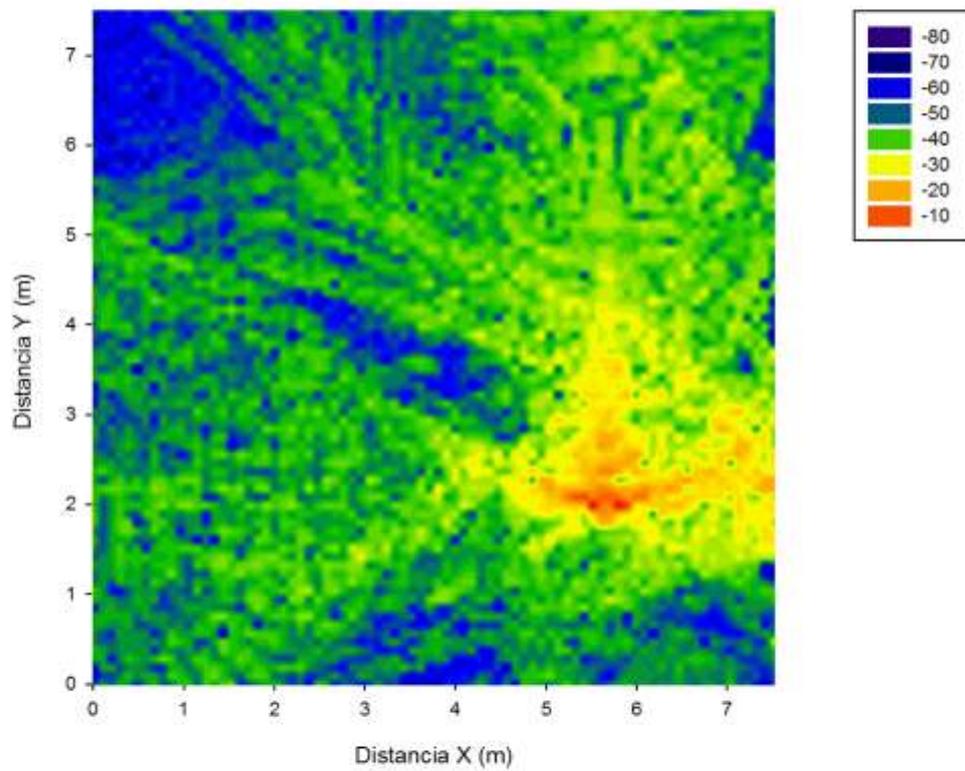
12. Escenario1 / 4 personas/ antena en (5,1) / resolución 0.1m



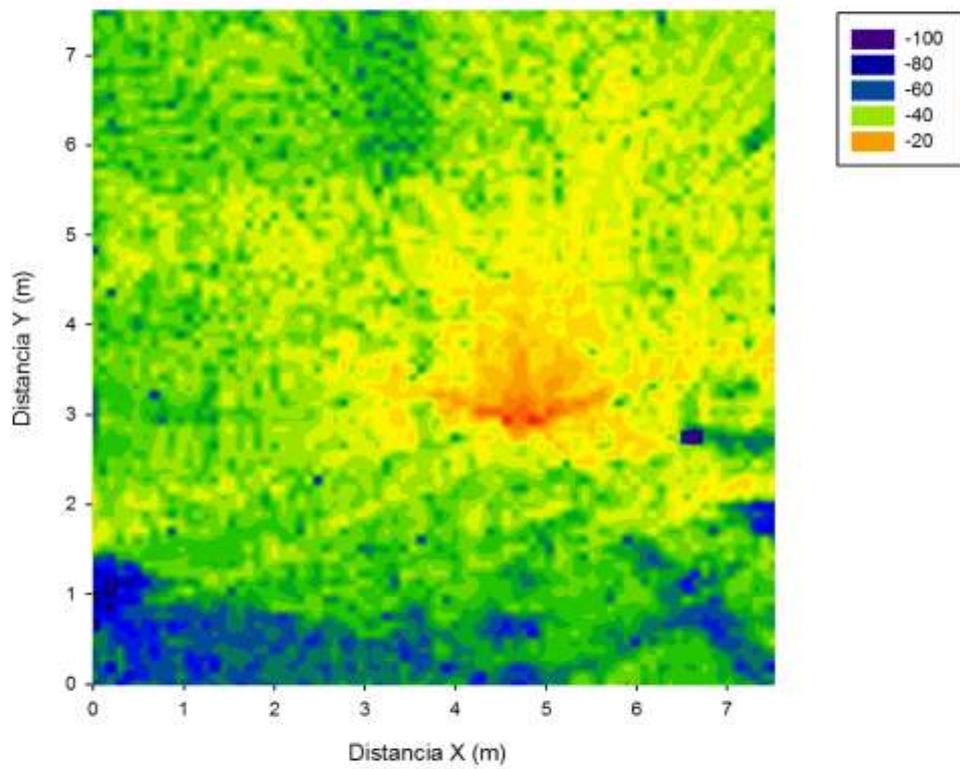
13. Escenario1 / 4 personas/ antena en (7,1) / resolución 0.1m



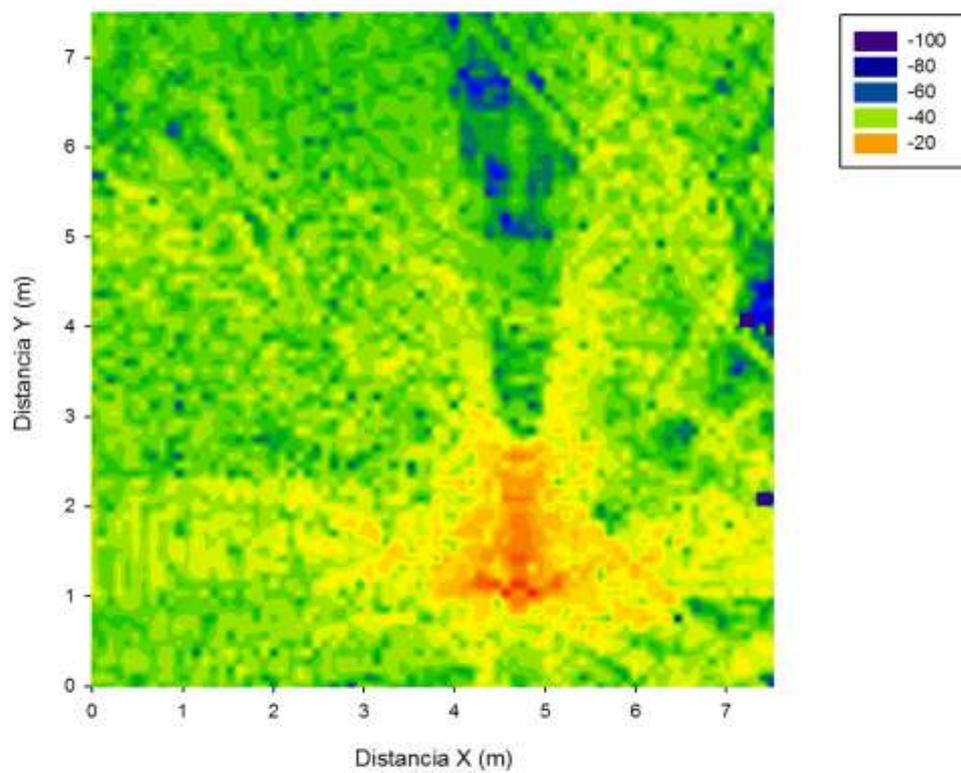
14. Escenario1 / 5 personas/ antena en (6,2) / resolución 0.1m



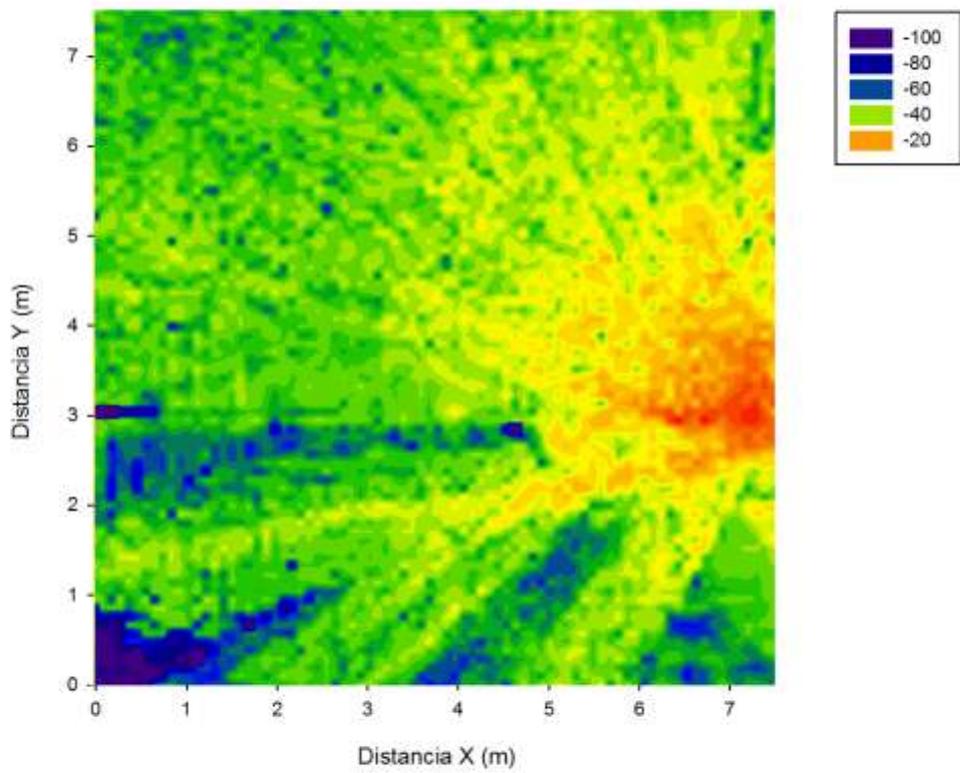
15. Escenario1 / 5 personas/ antena en (5,3) / resolución 0.1m



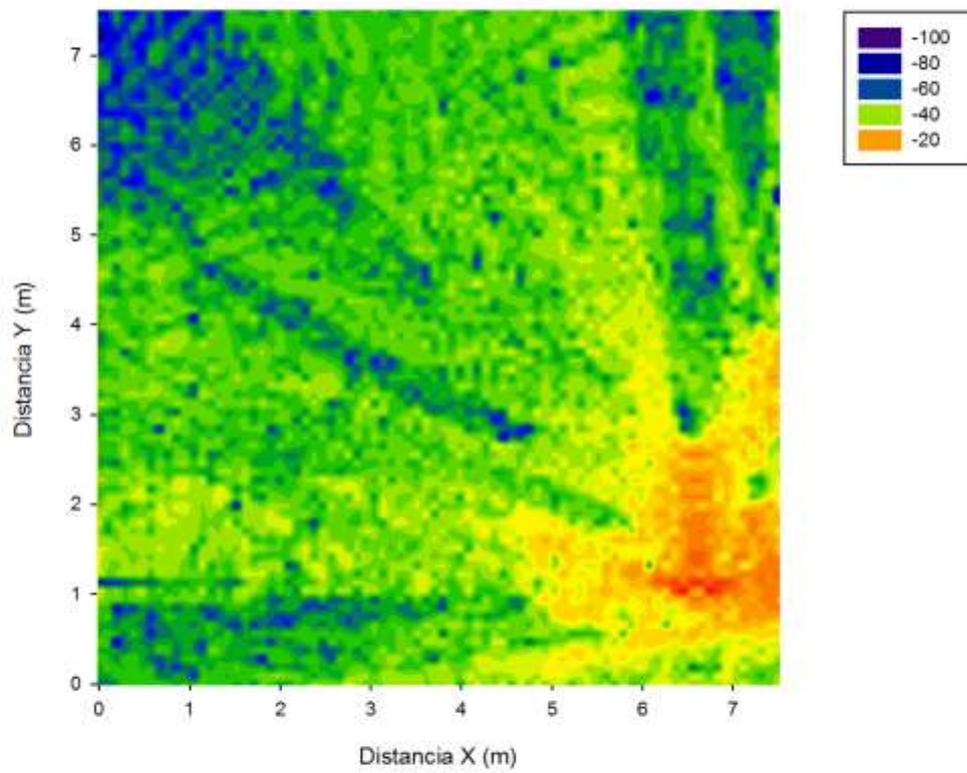
16. Escenario1 / 5 personas/ antena en (5,1) / resolución 0.1m



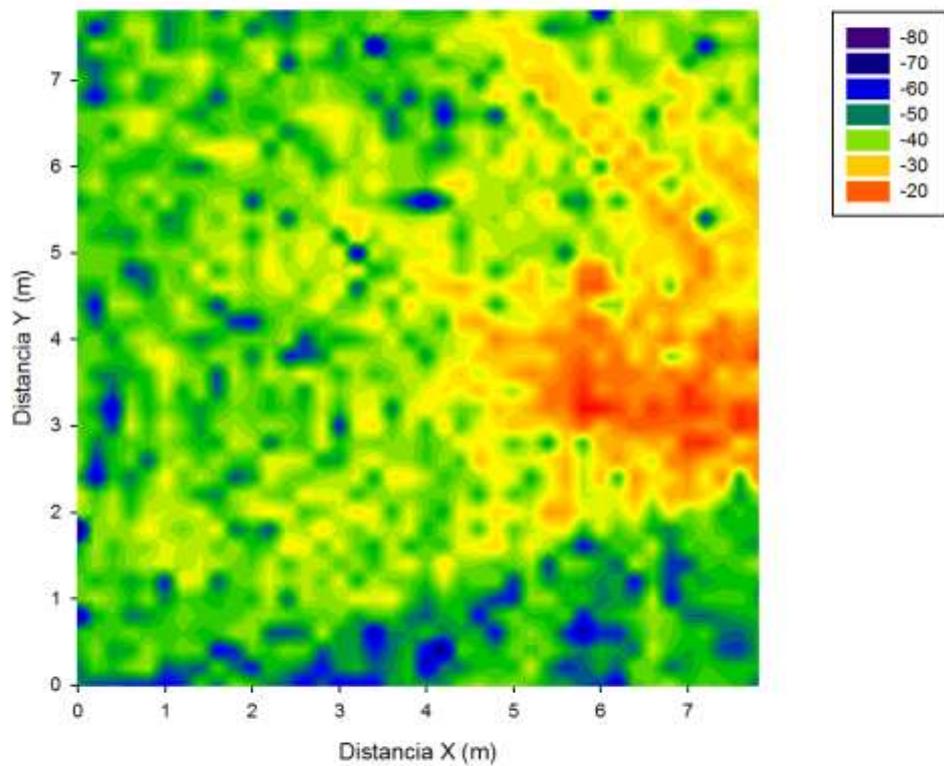
17. Escenario1 / 5 personas/ antena en (7,3) / resolución 0.1m



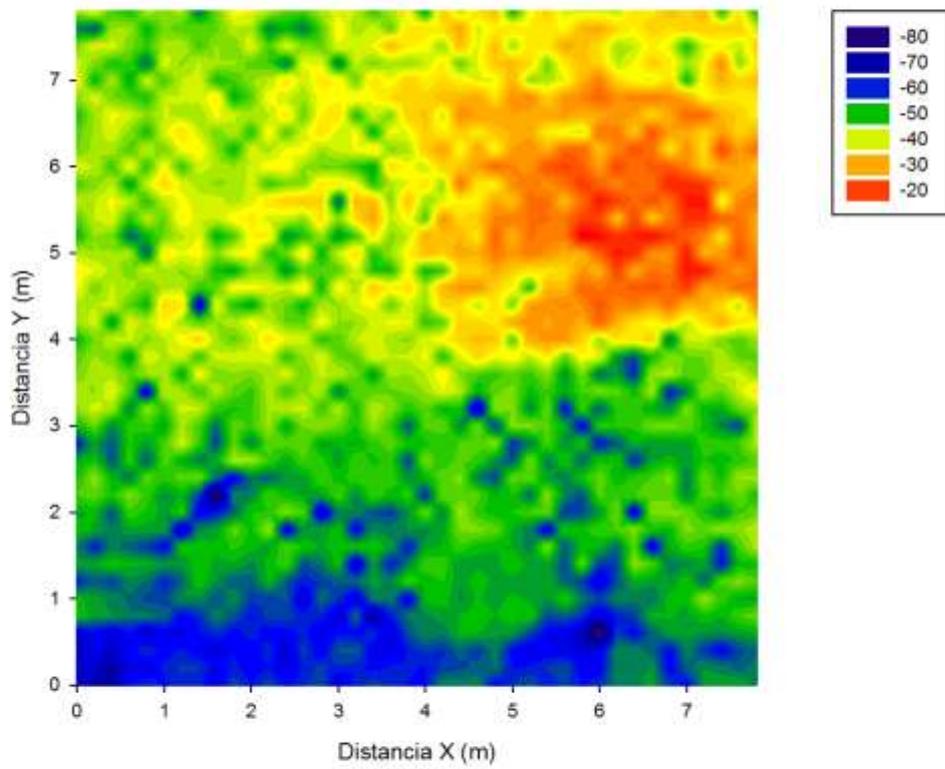
18. Escenario1 / 5 personas/ antena en (7,1) / resolución 0.1m



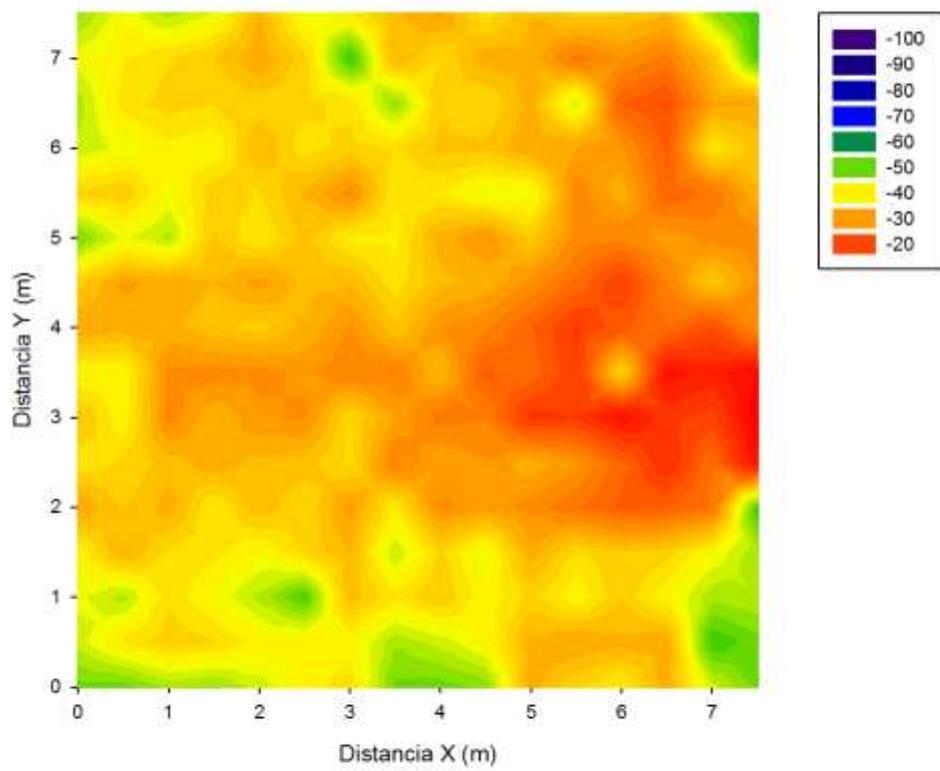
19. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.2m



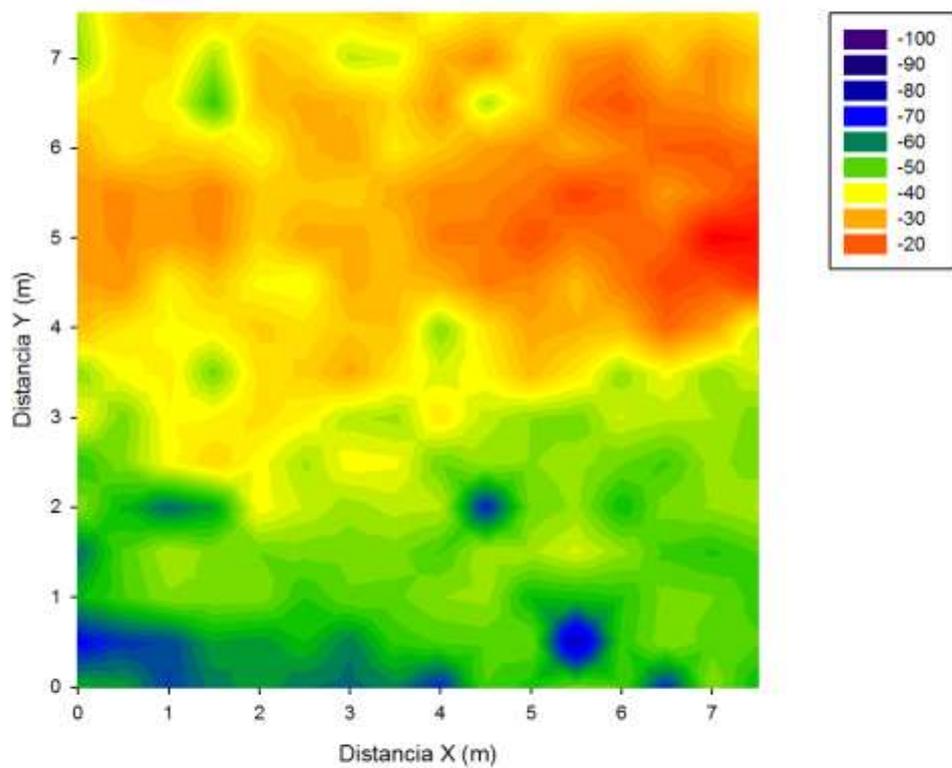
20. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,5) / resolución 0.2m



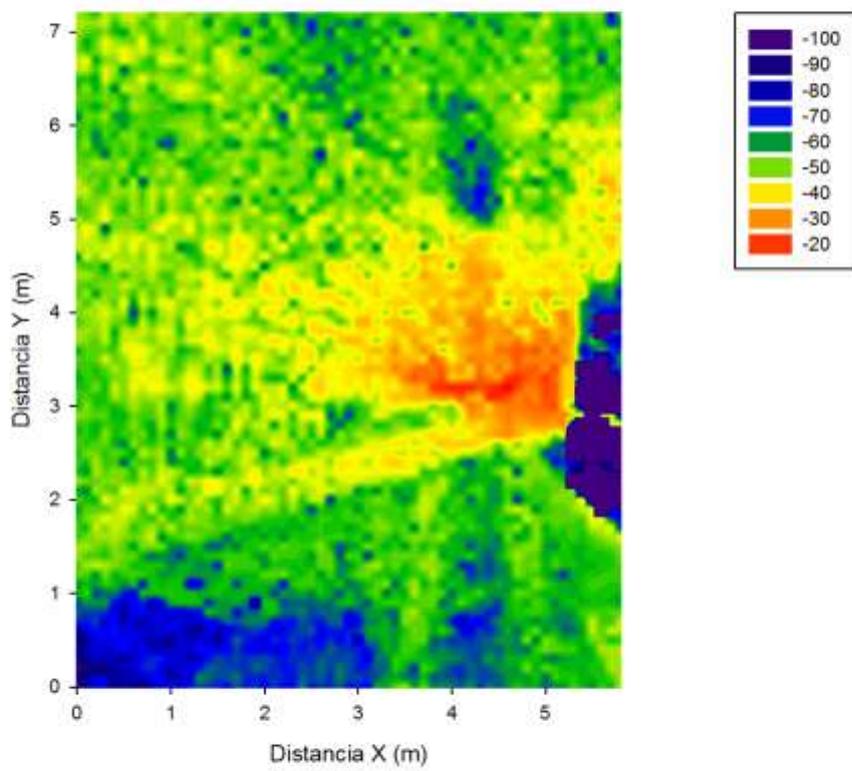
21. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,3) / resolución 0.5m



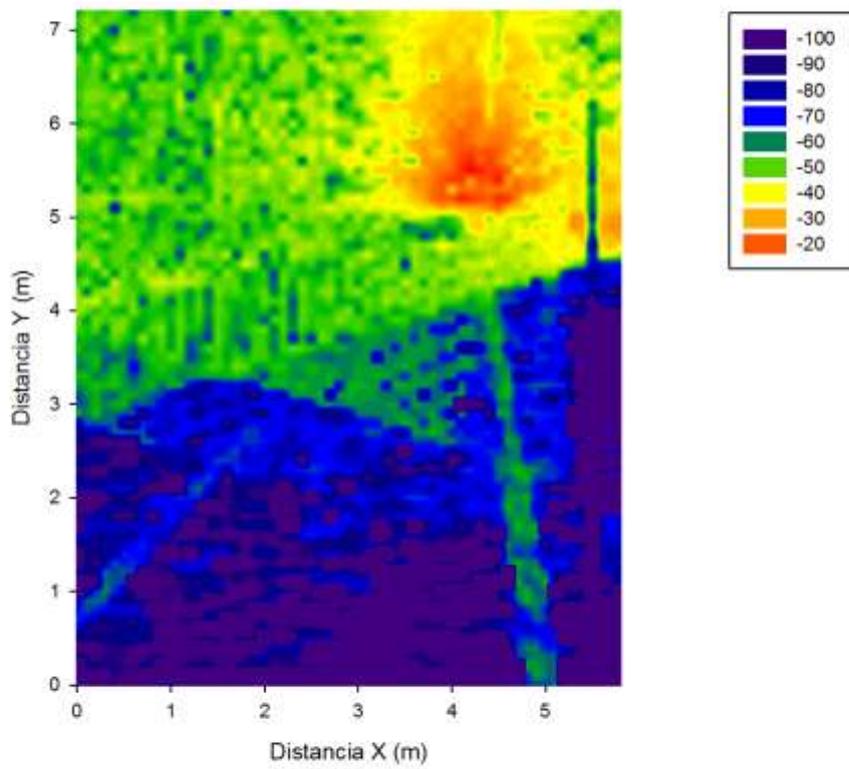
22. Escenario1 / 3 personas/ antena en (6,5) / resolución 0.5m



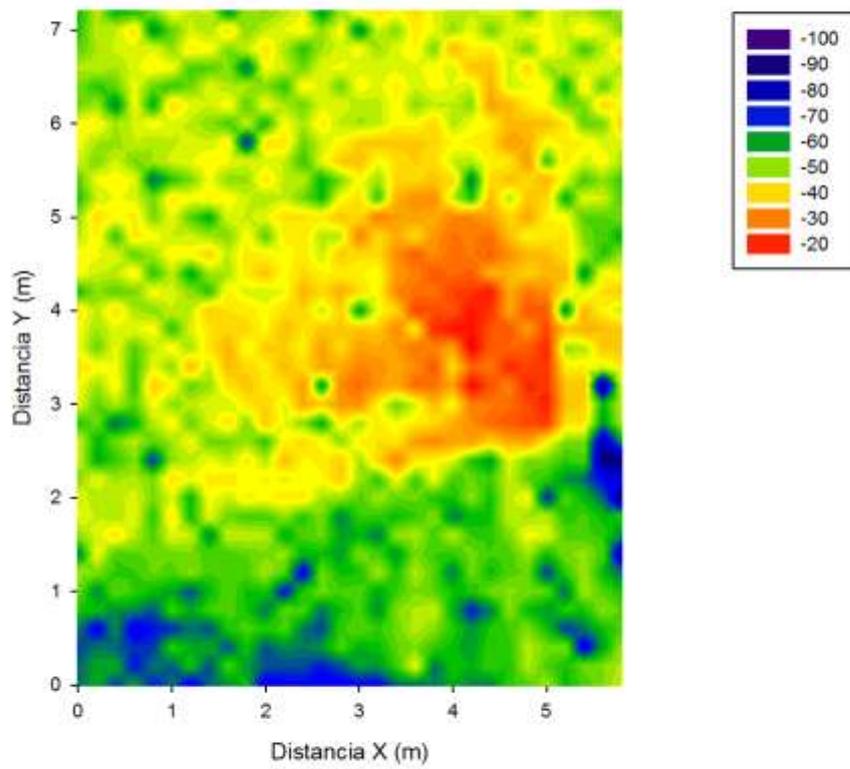
23. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,3) / resolución 0.1m



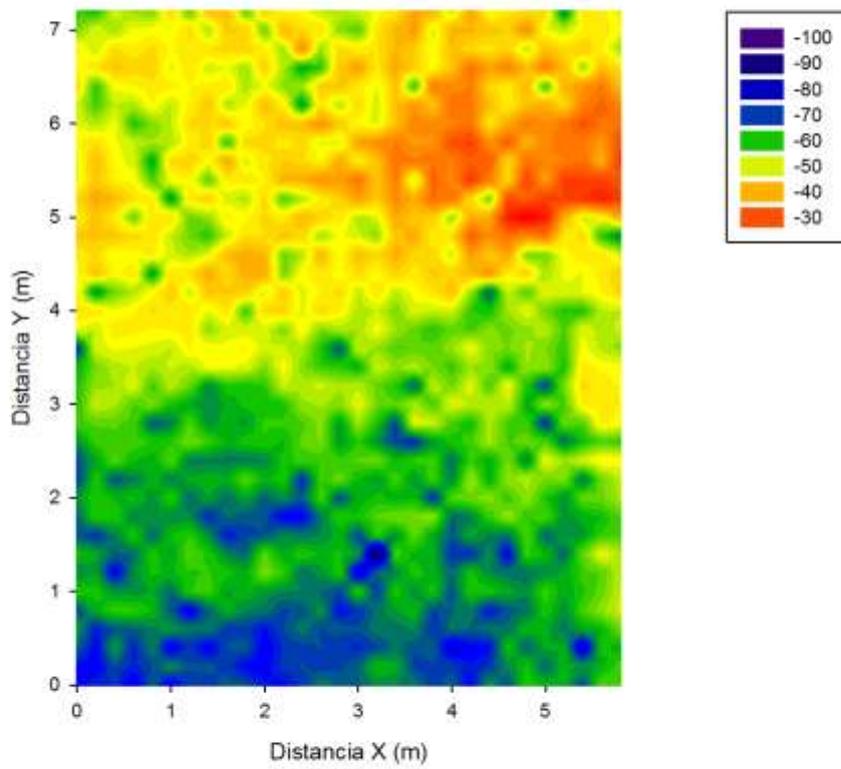
24. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,5) / resolución 0.1m



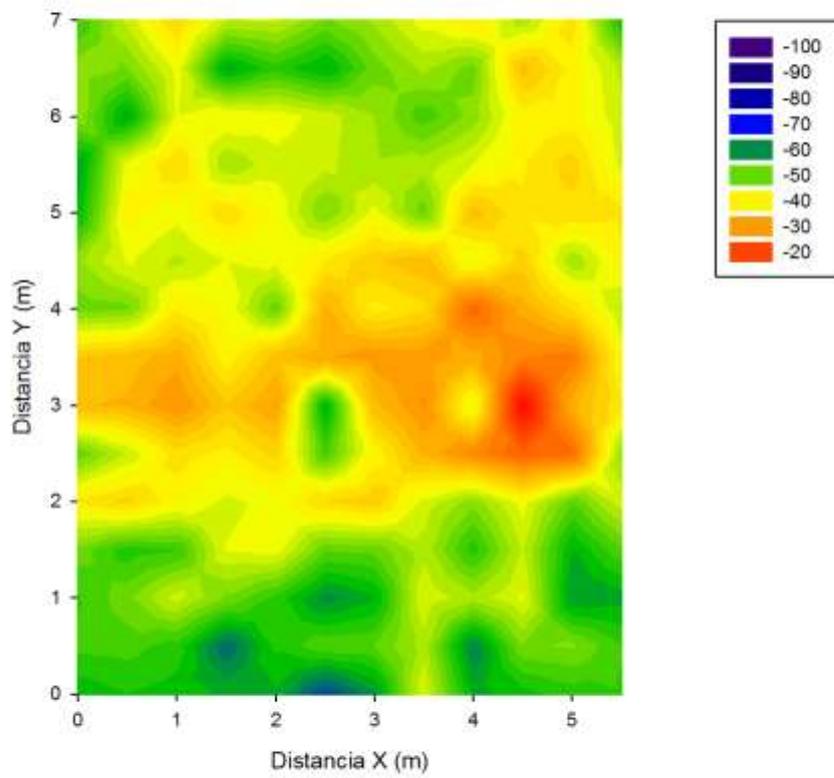
25. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,3) / resolución 0.2m



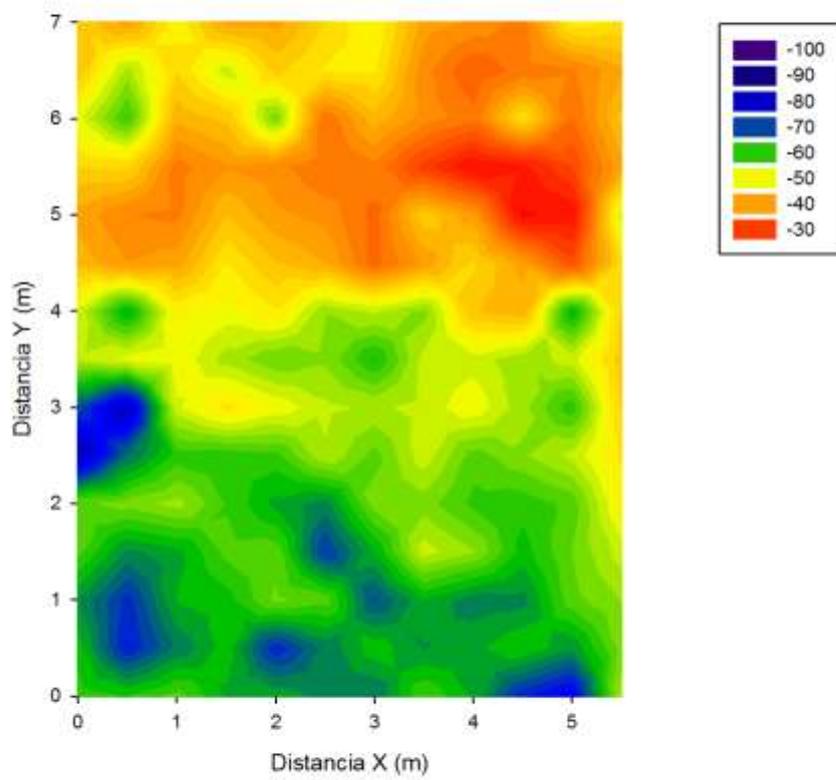
26. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,5) / resolución 0.2m



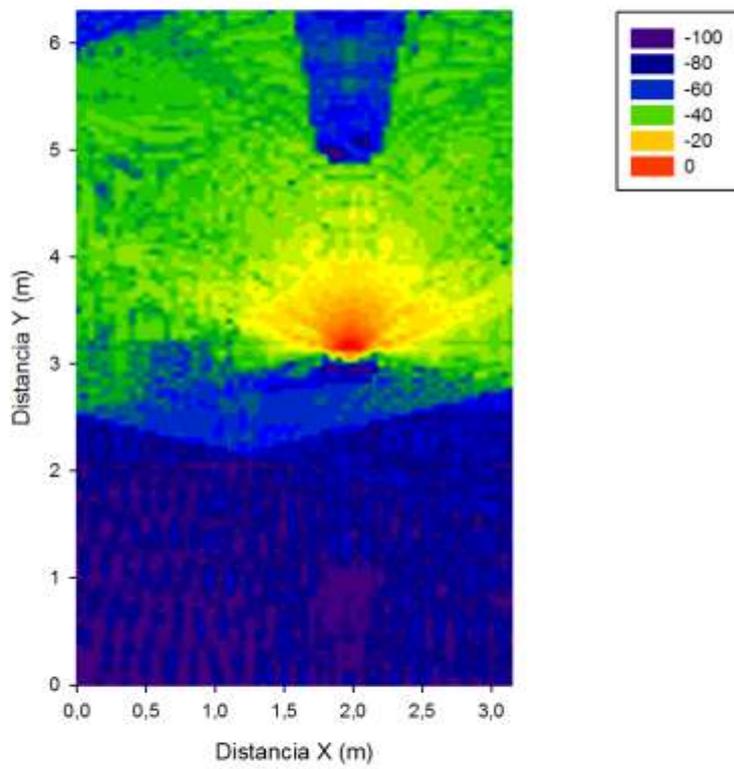
27. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,3) / resolución 0.5m



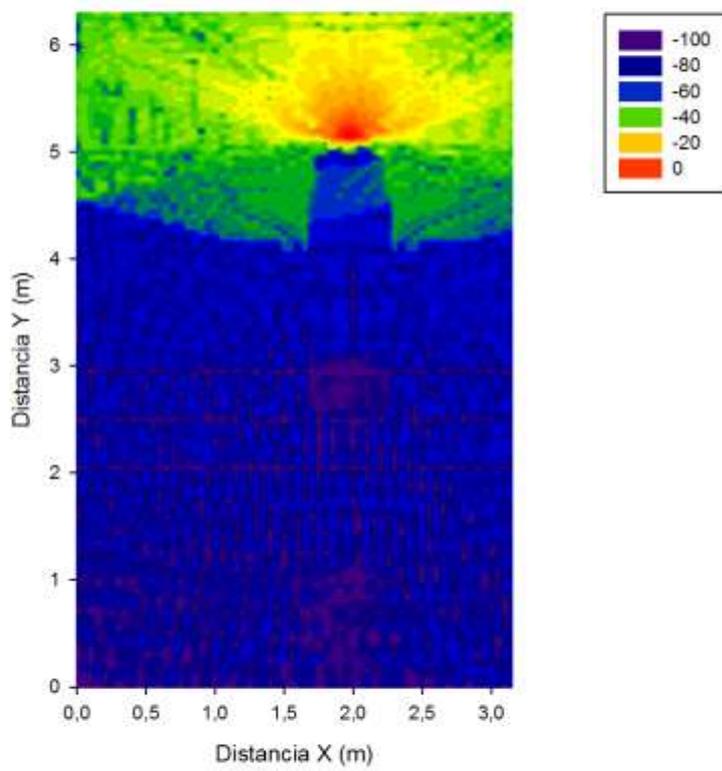
28. Escenario2 / 3 personas/ antena en (4.24,5) / resolución 0.5m



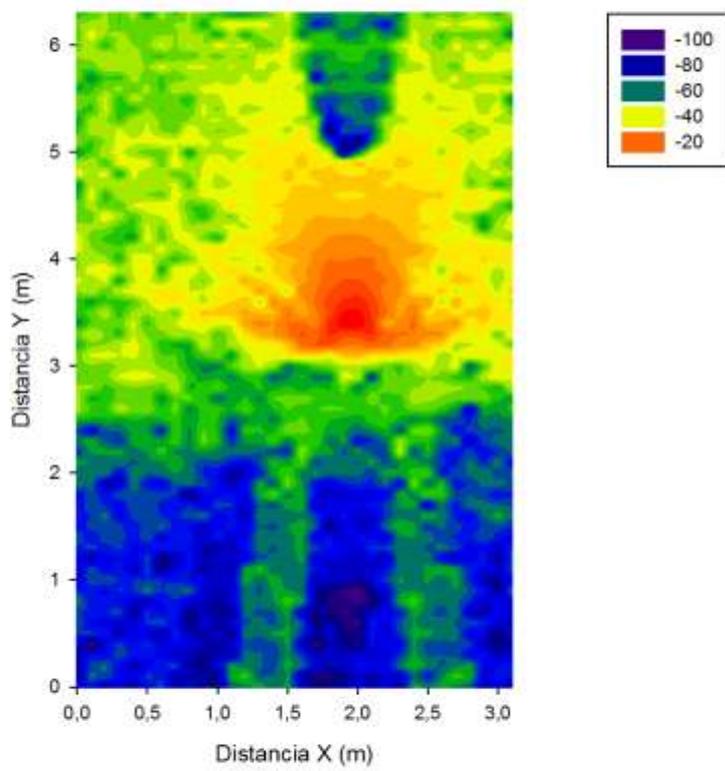
29. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,3) / resolución 0.05m



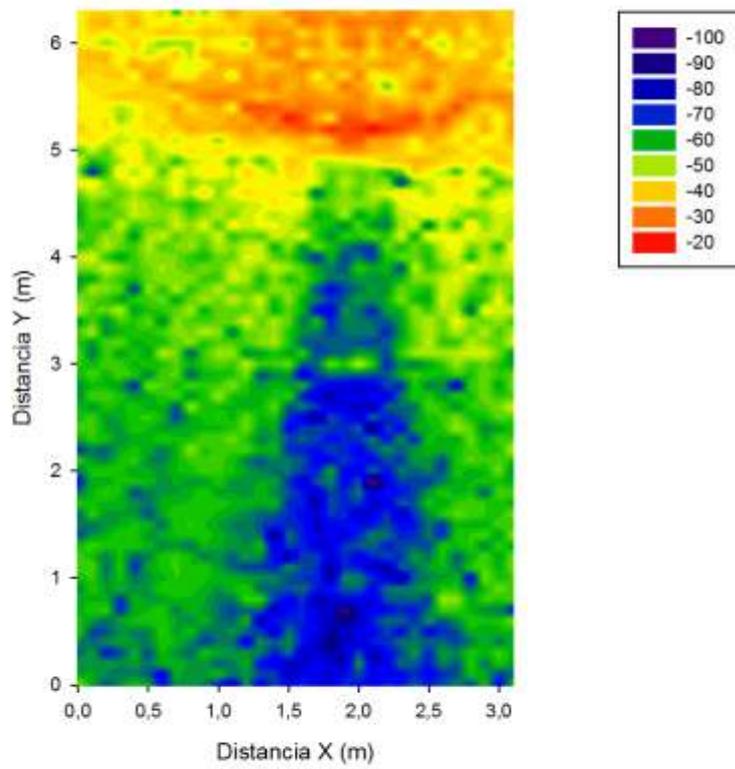
30. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,5) / resolución 0.05m



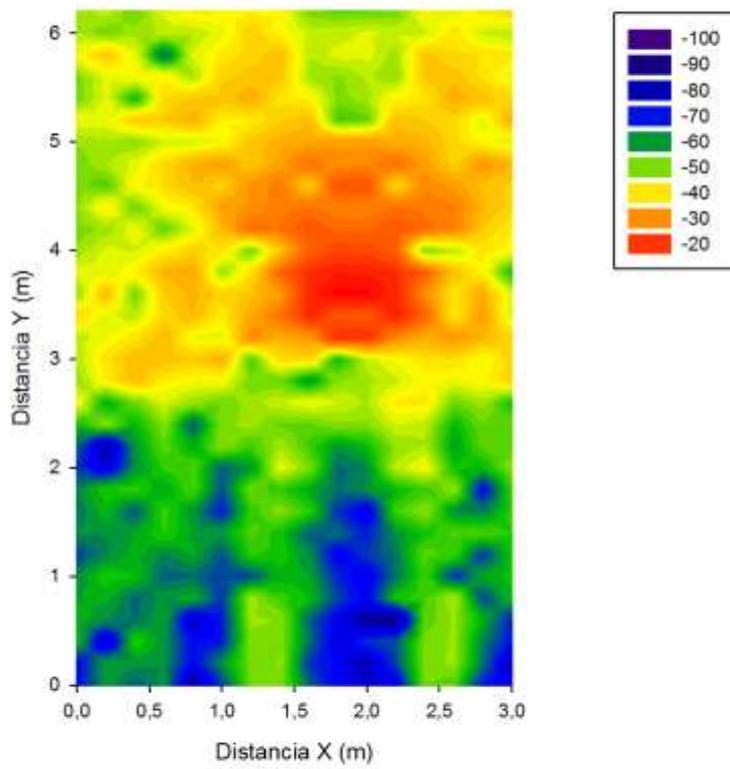
31. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,3) / resolución 0.1m



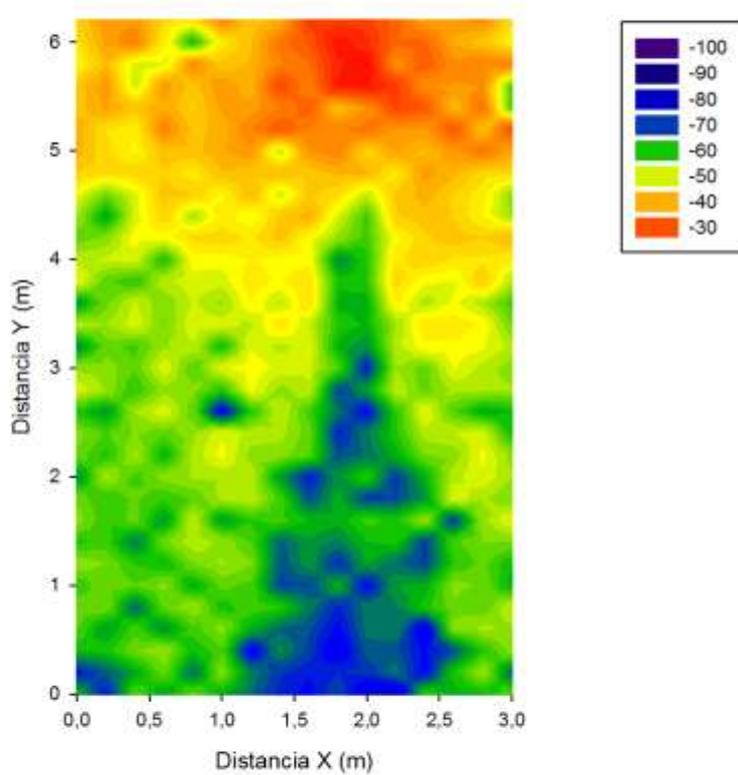
32. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,5) / resolución 0.1m



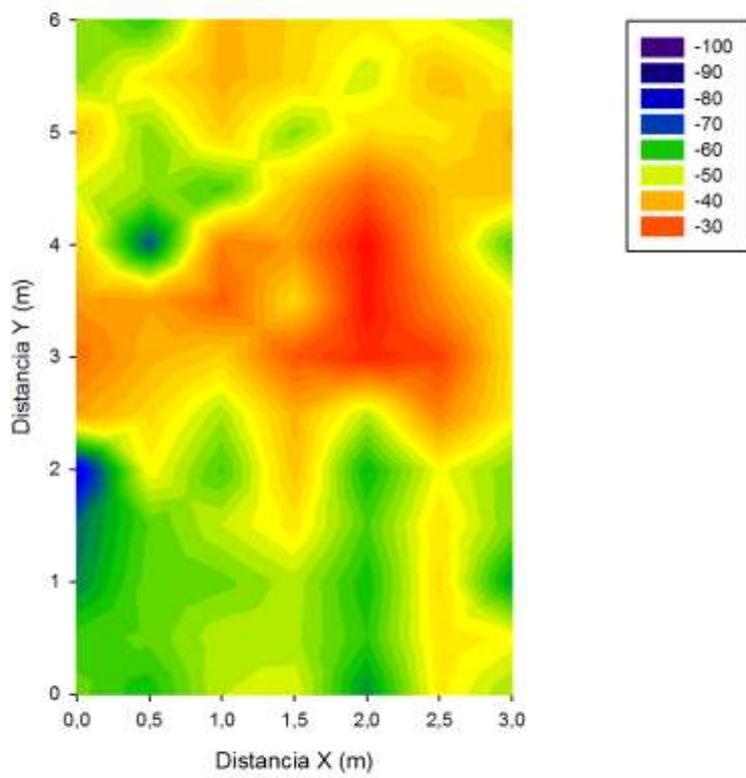
33. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,3) / resolución 0.2m



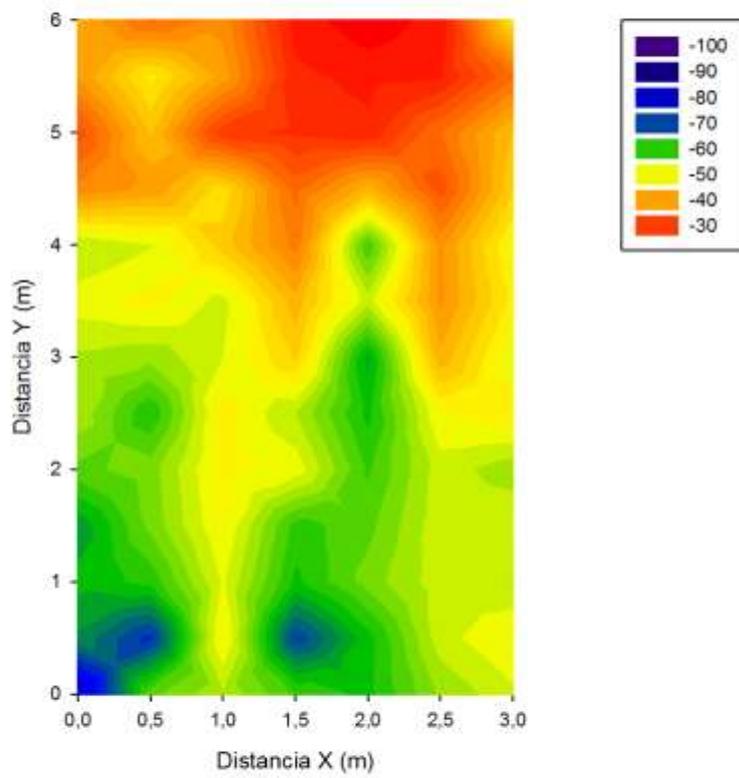
34. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,5) / resolución 0.2m



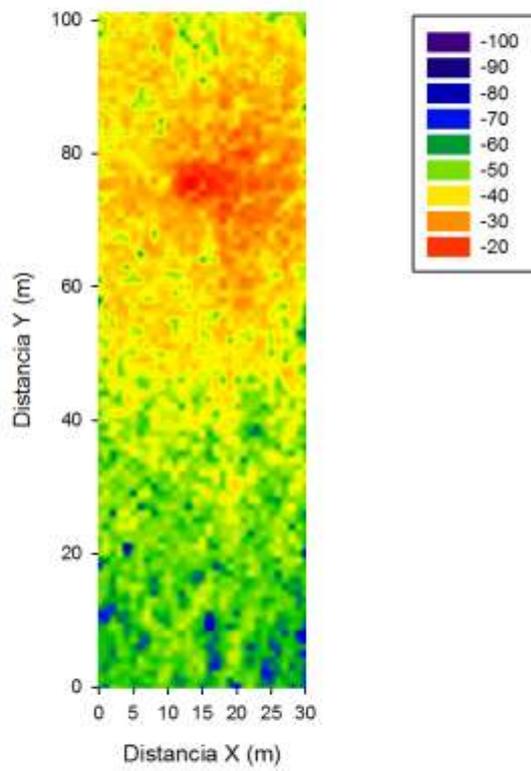
35. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,3) / resolución 0.5m



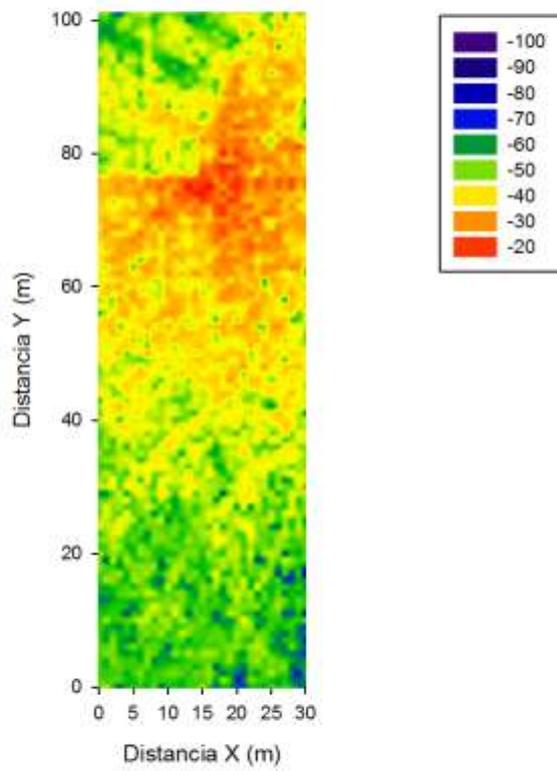
36. Escenario3 / 3 personas/ antena en (2,5) / resolución 0.5m



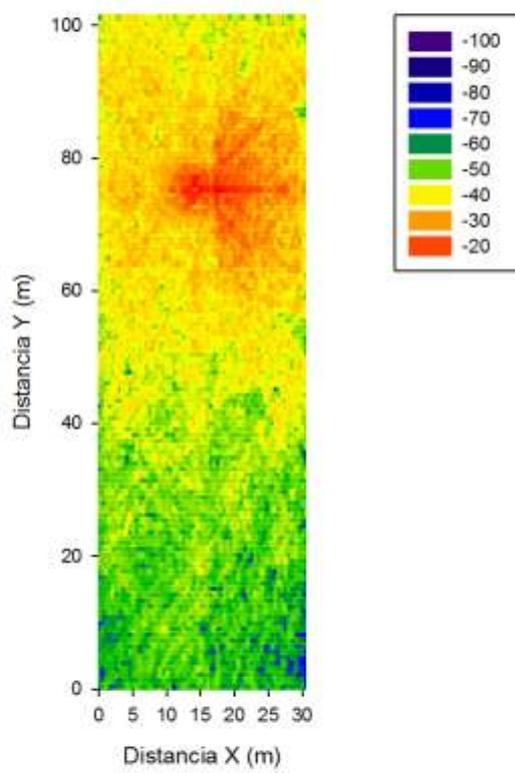
37. Escenario4 / sin persona/ antena en (14.5,76) / resolución 1m ($\theta=\phi=1^\circ$)



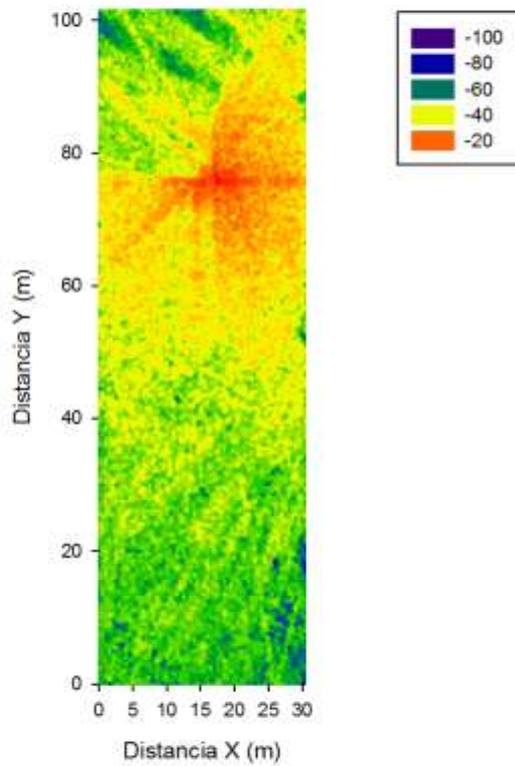
38. Escenario4 / 1 persona/ antena en (14.5,76) / resolución 1m ($\theta=\phi=1^\circ$)



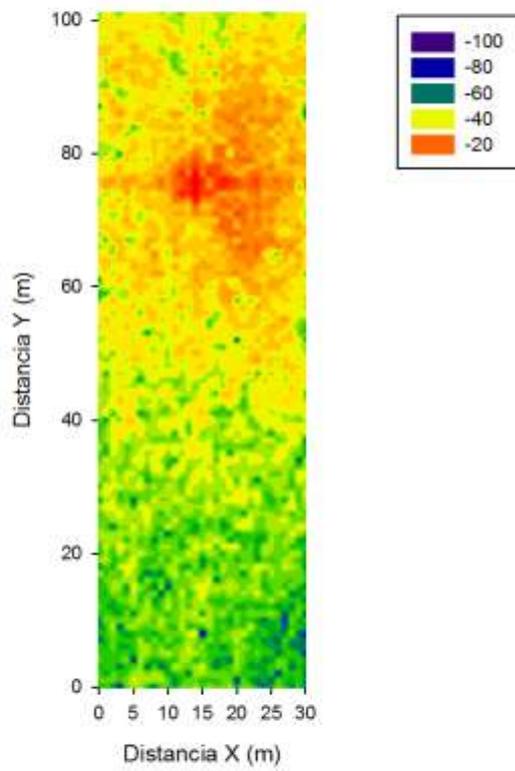
39. Escenario4 / sin persona/ antena en (14,5,76) / resolución 0.5m ($\theta=\phi=0.5^\circ$)



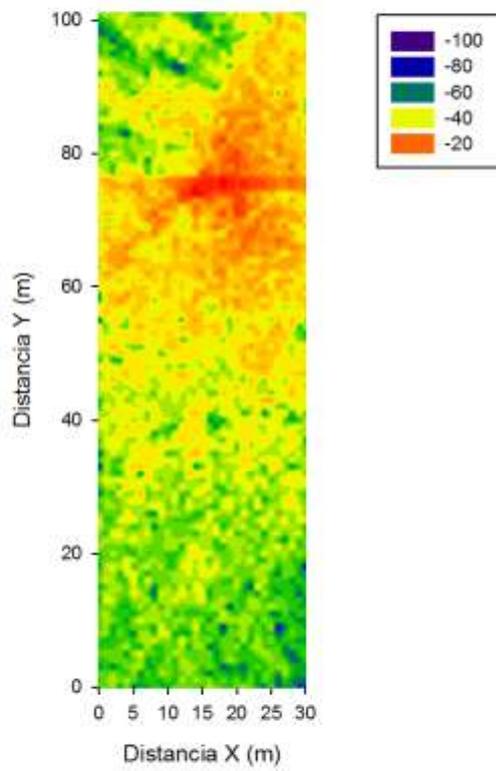
40. Escenario4 / 1 persona/ antena en (14.5,76) / resolución 0.5m ($\theta=\phi=0.5^\circ$)



41. Escenario4 / sin persona/ antena en (14.5,76) / resolución 1m ($\theta=\phi=0.5^\circ$)



42. Escenario4 / 1 persona/ antena en (14.5,76) / resolución 1m ($\theta=\phi=0.5^\circ$)



8.3 Fotos reales de los escenarios

8.3.1 Escenario 1/2



8.3.2 Escenario 3



8.3.3 Escenario 4





DANIEL REMIRO ARAMENDIA

8.4. Herramientas utilizadas

Aquí se presentan todas las hojas de características del hardware usado y se detalla que todo el software utilizado

8.4.1. Hardware

8.4.1.1. Marconi 2041 Low Noise Generator



Fig. 8.1: Marconi 2041 Low Noise Generator.

of output level making it ideal for use as a local oscillator or in testing passive components.

Option 6 - Avionics

This optional facility provides for the internal generation of modulation waveforms suitable for the testing of Instrument Landing Systems (ILS) and VHF Omni Range (VOR) beacons. Additional modes of operation support the testing of ADF, Marker Beacons and the SELCAL signaling system.

Option 8 - RF Profiles and Complex Sweep

The RF Profile facility allows the signal generator to compensate for frequency dependent level errors introduced by cables, amplifiers and signal combiners. The Complex Sweep facility allows for the generation of sweeps whose step size, step time and RF level changes while the sweep is in progress. These features are particularly useful for EMC, Tempest and ATE applications.

Option 11 - Electronic Attenuator

An electronic attenuator option is available to meet demanding extended life requirements for repetitive switching, found in high volume production applications.

SPECIFICATION

GENERAL DESCRIPTION

2040 series signal generators cover the frequency ranges 10 kHz to 1.35 GHz, 10 kHz to 2.7 GHz and 10 kHz to 5.4 GHz. A large screen dot matrix display with soft key function selection allows flexibility of operation and ease of use. The output may be amplitude, phase or frequency modulated with pulse modulation available as an option. Modulation is available using a combination of an internal synthesized LF oscillator with up to two external signal inputs. A second internal source is available as an option.

CARRIER FREQUENCY

Range

10 kHz to 1.35 GHz (2040).

10 kHz to 2.7 GHz (2041).

10 kHz to 5.4 GHz (2042).

Overrange

Selectable overrange mode allows uncalibrated levels up to +19 dBm to be generated (typically up to +25 dBm for 2030/40 with Option 003 fitted).

Selectable extended hysteresis provides for uncalibrated RF level control with up to 24 dB range without level interruption.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

Indication

11 digits with annunciators.

Resolution

0.1 Hz.

Accuracy

As frequency standard.

Phase Incrementing

The carrier phase can be advanced or retarded in steps of $\pi/128$ radians (approximately 1.4°) using the rotary control.

RF OUTPUT

Range

-144 dBm to +13 dBm.

When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +7 dBm at maximum AM depth.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control. Units may be μV , mV , V EMF or PD; dB relative to 1 μV , 1 mV EMF or PD; dBm.

Conversion between dB and voltage units may be achieved by pressing the appropriate units key (dB, or $\sqrt{\mu\text{V}}$, mV).

Indication

4 digits with unit annunciators.

Resolution

0.1 dB.

Accuracy At 22°C $\pm 5^\circ\text{C}$

	<1.35 GHz	<2.7 GHz	<5.4 GHz
>0 dBm	± 0.5 dB	± 0.7 dB	± 1 dB
>-100 dBm	± 0.85 dB	± 1 dB	± 1.5 dB
>-127 dBm	± 0.85 dB	± 1 dB	-

Temperature stability dB/°C

± 0.005	± 0.01	± 0.02
-------------	------------	------------

VSWR

For output levels less than 0 dBm:

Less than 1.25:1 to 2.2 GHz.

Less than 1.4:1 to 2.7 GHz.

Less than 1.5:1 to 5.4 GHz.

Output Protection

Reverse power of 50 W from a source VSWR of up to 5:1.

NOISE MODES

Three noise modes are offered with the following characteristics:

Low Noise Mode 1

Lowest phase noise with a restricted FM deviation capability and reduced AM bandwidth.

Low Noise Mode 2

Low phase noise with restricted FM deviation capability and full AM bandwidth.

Normal Mode

Full FM deviation capability and AM bandwidth.

SPECTRAL PURITY

At RF levels up to +7 dBm:

Harmonics

2040, 2041:

Better than -30 dBc to 1 GHz;

Better than -27 dBc above 1 GHz;

2042:

Better than -30 dBc to 1 GHz;

Better than -27 dBc to 1.35 GHz;

Better than -25 dBc above 1.35 GHz;

Sub-Harmonics

Better than -90 dBc to 1.35 GHz.

Better than -40 dBc to 2.3 GHz.

Better than -30 dBc to 5.4 GHz.

Non-Harmonics (offsets greater than 3 kHz)

In low noise modes:

Better than -70 dBc up to 21.09375 MHz.

Better than -90 dBc from 21.09375 MHz to 2.7 GHz.

Better than -84 dBc above 2.7 GHz.

In normal mode:

Better than -70 dBc.

Residual FM (FM off)

Low noise mode: Less than 0.3 Hz RMS deviation in a 300 Hz to 3.4 kHz unweighted bandwidth at 1 GHz.

Normal mode: Less than 7 Hz RMS deviation in a 300 Hz to 3.4 kHz unweighted bandwidth at 470 MHz.

SSB ϕ Noise

Carrier Frequency Range	SSB Phase Noise in dBc/Hz at offset frequencies of:		
	100 Hz	1 kHz	20 kHz & Above
<1.35 GHz	-75	-115	-140
<675 MHz	-81	-121	-140
<337.5 MHz	-87	-121	-140
<168.7 MHz	-92	-127	-143
<84.3 MHz	-96	-131	-143
<42.1 MHz	-98	-131	-143
<21 MHz	-82	-127	-140

RF Leakage

Less than 0.5 mV PD at the carrier frequency in a two turn 25 mm loop 25 mm or more from any part of the case.

FM on AM

Typically less than 100 Hz for 30% AM depth at a modulation frequency of 1 kHz and a carrier frequency of 500 MHz.

FM on AM

Typically less than 0.1 radians at a carrier frequency of 500 MHz for 30% AM depth for modulation rates up to 10 kHz.

MODULATION MODES

Four modulation modes are available:

Single

FM, Wideband FM, FM, AM or Pulse (optional).

Dual

Two independent channels of differing modulation type (e.g. AM with FM).

Composite

Two independent channels of the same modulation type (e.g. FM1 with FM2).

Dual composite

A combination of Dual and Composite modes providing four independent channels (e.g. AM1 with AM2 and FM1 with FM2).

FREQUENCY MODULATION

Deviation

Peak deviation available varies with carrier frequency and noise mode selected as follows:

Carrier Frequency Range	Maximum FM Deviation available:	
	Normal Mode	Low Noise Modes
2.7 to 5.4 GHz	27-54 MHz*	200 kHz
1.35 to 2.7 GHz	13.5-27 MHz*	100 kHz
675 to 1350 MHz	6.75-13.5 MHz*	50 kHz
337.5 to 675.0 MHz	3.375-6.75 MHz*	25 kHz
168.75 to 337.5 MHz	1.687-3.375 MHz*	12.5 kHz
84.375 to 168.75 MHz	843-1687 kHz*	6.25 kHz
42.1875 to 84.375 MHz	421-843 kHz*	3.125 kHz
21.09375 to 42.1875 MHz	210-421 kHz*	1.56 kHz
10 kHz to 21.09375 MHz	1 MHz	6.25 kHz

*Maximum FM deviation available is 1% of carrier frequency value when in normal noise mode.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

Indication

3 digits with annunciators.

Displayed Resolution

1 Hz or 1 least significant digit, whichever is greater.

Accuracy at 1 kHz

In low noise modes:

±6% of indication ±1 Hz excluding residual FM.

In normal mode:

±5% of indication ±10 Hz excluding residual FM.

Bandwidth (1 dB)

DC to 300 kHz (DC coupled).

10 Hz to 300 kHz (AC coupled).

Bandwidth is limited to 100 kHz in low noise modes.

Input is capable of accepting external sources of FSK signals. Typical 3 dB bandwidth in normal mode is greater than 1 MHz.

Group delay

Less than 1 μ s from 3 kHz to 500 kHz in normal mode.
 Less than 3 μ s from 3 kHz to 250 kHz in low noise modes.
 Carrier Frequency Offset
 In DC FM mode less than $\pm(1 \text{ Hz} + 0.1\%$ of set deviation) after using DC FM nulling facility.

Distortion

Using external modulation without ALC:
 Less than 3% at maximum deviation for modulation frequencies up to 20 kHz.
 Less than 0.3% at 10% of maximum deviation for modulation frequencies up to 20 kHz.

Modulation Source

Internal LF generator or external via front panel sockets.

WIDEBAND FM**Deviation**

As FM.

Indication

3 digits with annunciators.

Selection

By keyboard entry of data. The sensitivity is controlled in 3 dB steps and the display will indicate the value of deviation nearest to the requested value.

Input level

1 V RMS to achieve indicated deviation.

Accuracy

As FM.

3 dB Bandwidth

In normal noise mode typically 10 MHz (DC or AC coupled).
 In low noise modes typically 250 kHz
 (DC or AC coupled).

Group delay

Less than 0.5 μ s from 3 kHz to 10 MHz in normal modes.

Modulation Source

External via rear panel socket (50 Ω impedance).

PHASE MODULATION

(Normal mode only)

Deviation

0 to 10 radians.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

Indication

3 digits with annunciators.

Resolution

0.01 radians.

Accuracy at 1 kHz

$\pm 5\%$ of indicated deviation excluding residual phase modulation.

3 dB Bandwidth

100 Hz to 10 kHz.

Distortion

Less than 3% at maximum deviation at 1 kHz modulation rate.

Modulation Source

Internal LF generator or external via front panel sockets.

AMPLITUDE MODULATION

For Carrier Frequencies up to 1 GHz:

Range

0 to 99.9%.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by up/down keys and by rotary control.

Indication

3 digits with annunciator.

Resolution

0.1%.

Accuracy

$\pm 4\%$ of setting $+ 1\%$.

1 dB Bandwidth

In normal and low noise mode 2:

With Modulation ALC off; DC to 30 kHz in DC coupled mode and 10 Hz to 30 kHz in AC coupled mode.

Typical modulation bandwidth exceeds 50 kHz.

In low noise mode 1:

With Modulation ALC off; Useable from DC to 1.5 kHz in DC coupled mode and 10 Hz to 1.5 kHz in AC coupled mode.

Distortion

For a modulation rate of 1 kHz:

Less than 1% total harmonic distortion for depths up to 30%.

Less than 3% total harmonic distortion for depths up to 80%.

Modulation Source

Internal LF generator or external via front panel sockets.

MODULATION OSCILLATOR**Frequency Range**

0.1 Hz to 500 kHz.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

Indication

7 digits with annunciators.

Resolution

0.1 Hz.

Frequency Accuracy

As frequency standard.

Distortion

Less than 0.1% THD in sine wave mode at frequencies up to 20 kHz.

Alternative Waveform

A triangular wave is available for frequencies up to 100 kHz and a square wave up to 2 kHz.

Signaling Tones

The modulation oscillator can be used to generate sub-audible or sequential (up to 16 tones) signaling tones in accordance with EIA, ZVEI, DZVEI, CCYR, EURO 1, EEA, NATAL and DTMF* standards. Facilities are also available for creating and storing user defined tone systems.

* Requires second modulation oscillator (Option 001) to be fitted.

EXTERNAL MODULATION

Two independent inputs on the front panel with BNC connectors, EXT MOD 1 and EXT MOD 2. The modulation is calibrated with 1 V RMS sine wave applied. Input impedance 100 k Ω nominal.

MODULATION ALC

The EXT MOD 1 and EXT MOD 2 modulation inputs can each be levelled by an ALC system.

Level Range

0.7 V RMS to 1.4 V RMS sine wave.

Distortion

Less than 0.1% additional distortion for frequencies up to 20 kHz (typically less than 0.1% up to 50 kHz).

1 dB Bandwidth

Typically 10 Hz to 500 kHz.

LF OUTPUT

Front panel BNC connector. The output may be configured in the LF Generator Mode to give an output from the internal modulation oscillator and in the LF Monitor Mode to give an output from the internal modulation signal paths.

Selection

By keyboard entry of data. Variation by UP/DOWN keys and by rotary control.

Indication

7 digits with unit annunciators for frequency and 4 digits with unit annunciators for level.

Level

100 μ V to 5 V RMS with a load impedance of greater than 600 Ω .

100 μ V to 1.4 V RMS with a load impedance of greater than 50 Ω .

Common mode voltage

\pm 0.5 V maximum.

Source impedance

5.6 Ω nominal.

Level Accuracy at 1 kHz

With a load impedance of greater than 10 k Ω :

+5% for levels above 50 mV and \pm 10% for levels from 500 μ V to

50 mV.

Frequency Response

Typically better than \pm 1 dB from 0.1 Hz to 300 kHz.

SWEEP

Not available in low noise mode.

Control Modes

Start/stop values of selected parameter.

Number of steps.

Time per step.

Step Time

1 ms to 10 s per step.

Sweep Ramp

Synchronized analog ramp with an amplitude of nominally 0 to 10 V peak on rear panel BNC connector.

Markers

Five user selectable markers for frequency or level provide an indication when specified parameter values have been reached. Output 0 V to +5 V from 600 Ω on rear panel BNC socket.

Trigger

Rear panel BNC connector. Applying 0 V or a switch closure starts the sweep or steps from point to point on the sweep. Socket is internally connected via 10 k Ω pull-up resistor to +5 V.

FREQUENCY STANDARD (OCXO)**Frequency**

10 MHz.

Temperature Stability

Better than \pm 5 in 10^6 over the operating range of 0 to 50°C.

Warm up time

Within 2 in 10^6 of final frequency within 10 minutes from switch on at 20°C ambient.

Ageing Rate

Better than 2 in 10^6 per year.

Output

Rear panel BNC socket provides an output at frequencies of 1, 5 or 10 MHz with a nominal 2 V pk-pk level into 50 Ω .

External input

Rear panel BNC socket accepts an input at 1, 5 or 10 MHz with an input level in the range 220 mV to 1.8 V RMS into 1 k Ω .

GENERAL**GPB INTERFACE**

A GPB interface designed in accordance with IEEE 488.2 is fitted as standard.

Capabilities

Complies with the following subsets as defined in IEEE Std.488.1, 5H1, AH1, T6, L4, SR1, RL1, PPO, DC1, DT1, CO, E2.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Conforms with the protection requirements of the EEC Council Directive

89/336/EEC. Conforms with the limits specified in the following standards:
 IEC/EN61326-1 : 1997, RF Emission Class B, Immunity Table 1, Performance Criteria B

SAFETY

Conforms with the requirements of EEC Council Directive 73/23 EEC (as amended) and the product safety standard IEC / EN 61010-1 : 2001 + C1 : 2002 + C2 : 2003 for class 1 portable equipment, for use in a Pollution Degree 2 environment. The instrument is designed to be operated from an Installation Category 2 supply.

RATED RANGE OF USE

(Over which full specification is met)

Temperature

0 to 55°C.

Humidity

Up to 93% at 40°C.

CONDITIONS OF STORAGE AND TRANSPORT

Temperature

-40 to +71°C.

Humidity

Up to 93% relative humidity at 40°C.

Altitude

Up to 4600 m (15,000 ft).

POWER REQUIREMENTS

AC supply

Four voltage settings covering:

100 V~ (Limit 90 - 115 V~)

120 V~ (Limit 105 - 132 V~)

220 V~ (Limit 188 - 242 V~)

240 V~ (Limit 216 - 264 V~)

Frequency: 50 - 400 Hz (Limit 45 - 440 Hz) 180 VA max

CALIBRATION INTERVAL

2 years.

DIMENSIONS AND WEIGHT

(Over projections but excluding front panel handles)

Height	Width	Depth	Weight
152 mm	425 mm	525 mm	21 kg
6 in	16.6 in	20.5 in	46 lb

OPTIONS

OPTION 1 - SECOND MODULATION OSCILLATOR OPTION

Specification as Modulation Oscillator.

OPTION 2 - PULSE MODULATION OPTION

Modulation Modes

Pulse modulation may be used alone or in conjunction with FM, ΦM or Wideband FM.

Rise Time

Less than 25 ns.

Control

0 to +1 V for carrier off, +3.5 to +5 V for carrier on.

ON/OFF Ratio

Better than 70 dB, typically exceeds 80 dB.

Additional level error

Less than ± 0.5 dB.

Propagation delay

Typically 80 ns from pulse input to RF pulse output.

Input impedance

50 Ω nominal.

OPTION 105 - SLOW RISE TIME PULSE MODULATION

Modifies pulse modulation option for a typical rise and fall time of 2 μ s.

OPTION 3 - +19 dBm RF OUTPUT LEVEL OPTION

For 2040 model only.

RF Output Range

-144 dBm to +19 dBm. When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +13 dBm at maximum AM depth.

Overrange allows levels up to +25 dBm to be requested.

Harmonics

At RF levels up to +7 dBm; better than -27 dBc.

OPTION 6 - AVIONICS OPTION

See separate sheet.

OPTION 8 - RF PROFILE AND COMPLEX SWEEP

See separate sheet.

OPTION 12 - ELECTRONIC ATTENUATOR

Carrier Frequency Range

250 kHz* to 1.35 GHz (2040).

250 kHz* to 2.7 GHz (2041).

* Useable to 10 kHz

RF Output Range

-138 dBm to +10 dBm. When AM is selected the maximum output level reduces linearly with AM depth to +4 dBm at maximum AM depth.

Accuracy

± 1.2 dB for output levels > -127 dBm at 22°C ± 5 °C

Temperature Stability

± 0.01 dB/°C

VSWR

<1.5:1 for output levels less than 0 dBm.

Reverse Power Handling

1 W from a source VSWR of up to 5:1.

Amplitude Modulation

Standard specification applies for carrier frequencies above 50 MHz (Above 100 MHz for Option6)

8.4.1.2. Agilent Fieldfox RF Analyzer N9912A



Fig. 8.2: Analizador de espectros Agilent Fieldfox N9912A.

Specifications

Warranted performance. Specifications include guardbands to account for the expected statistical performance distribution, measurement uncertainties, and changes in performance due to environmental conditions. The following conditions must be met:

- FieldFox has been turned on at least 90 minutes
- FieldFox is within its calibration cycle
- Storage or operation at 25 °C ±5 °C range (unless otherwise stated)

Typical:

Expected performance of an average unit over a 20 °C to 30 °C temperature range, unless otherwise indicated; does not include guardbands. It is not covered by the product warranty. The FieldFox must be within its calibration cycle.

Nominal:

A general, descriptive term or design parameter. It is not tested, and not covered by the product warranty.

Cable and antenna analyzer

Frequency	
Frequency range	
	2 MHz ¹ to 4 GHz 2 MHz ² to 6 GHz
Frequency reference	
Accuracy	±2 ppm
Aging rate	±1 ppm/yr
Temperature stability	±1 ppm over -10 to 55 °C
Frequency resolution	
2 MHz to 1.6 GHz	2.5 kHz
> 1.6 GHz to 3.2 GHz	5 kHz
> 3.2 GHz to 6 GHz	10 kHz
Measurement speed	
Return loss	1.5 ms/point (nominal) 1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
Distance-to-fault	2.4 ms/point (nominal) 0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
Data points	
	101, 201, 401, 601, 801, 1001 (up to 10,001 using SCPI)
Directivity	
Corrected	> 42 dB
QuickCal (Option 111)	> 42 dB (typical) ³
Source match	
Corrected	> 36 dB
QuickCal (Option 111)	≥ 35 dB (typical) ³
Reflection tracking	
Corrected	± 0.06 dB
QuickCal (Option 111)	± 0.15 dB (typical) ³

Dynamic range

Reflection (RF Out port)	
2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)
Transmission measurement	
2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
> 2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)
Output power range	
High power	
2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< +7 dBm, +2 dBm (nominal)
Low power	
2 MHz to 4 GHz	< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -29 dBm (nominal)
Immunity to interference	
	+16 dBm (nominal)
Maximum input level (RF Out port)	
	+23 dBm
Maximum input DC voltage (RF Out port)	
	±50 VDC

Cable and antenna measurements

Return loss	
Display range	0 to 100 dB
Resolution	0.01 dB
VSWR	
Display range	0 to 100
Resolution	0.01
Distance to fault (DTF)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Range = (number of points - 1)/(span²) x Vf (velocity factor in cable) x c (light speed) • Resolution = range/(number of points - 1) • Number of points: 101, 201, 401, 601, 801, 1001 (up to 10,001 using SCPI) • Distance-to-fault display: return loss, VSWR, reflection coefficient
Cable loss (1-port)	
	Terminated cable under test with short
Insertion loss (2-ports)	
	Requires Option 110
Transmission measurement	
Frequency range	
Option 104	2 MHz to 4 GHz
Option 106	2 MHz to 6 GHz
Dynamic range	
2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)

Network analysis

S11	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
S21	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
A	Reflected power
R	Source power
Display	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart, polar, group delay, unwrapped phase
Calibration types	Mechanical cal QuickCal Normalization
IF bandwidth selections	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz
Data points	101, 201, 401, 601, 801, 1001, 1601, 4001, 10,001 (custom number of points can be set using SCPI)

Spectrum analyzer

Frequency

Frequency range	
Option 104	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz
Option 106	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz
Frequency reference	
Accuracy	±2 ppm
Frequency aging	±1 ppm/yr
Frequency reference	
Temperature stability	±1 ppm over -10 to 55 °C
Frequency readout accuracy	
± (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)	
Frequency span	
Range	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency
Span accuracy	±(2 x RBW centering + horizontal resolution)
Span resolution	1 Hz
Resolution bandwidth (RBW)	
Range (-3 dB bandwidth)	
Zero span	300 Hz to 1 MHz in 1-3-10 sequence; 2 MHz
Non-zero span	10 Hz to 300 kHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence; 1 MHz, 2 MHz
Accuracy	1 kHz to 1 MHz: ±5% (nominal) 10 Hz to 100 KHz non-zero span: ±1% (nominal) 2 MHz: ±10% (nominal) 300 Hz zero span: ±10% (nominal)
Selectivity (-60 dB/ -3 dB)	4:1 (nominal)
Video bandwidth (VBW)	
Range	1 Hz to 2 MHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence
Stability	
Noise sidebands, CF = 1 GHz	10 kHz offset: -88 dBc/Hz (typical) 30 kHz offset: -89 dBc/Hz, (typical) 100 kHz offset: -95 dBc/Hz, (typical) 1 MHz offset: -115 dBc/Hz, (typical)
Sweep acquisition, span > 0 Hz	
Range	1 to 5000, number of data acquisitions per trace point; value is normalized to the minimum required to achieve amplitude accuracy with CW signals
Resolution	1
Readout	Measured value representing time required to tune receiver, acquire data, and process trace
Trace updates	
	Span = 20 MHz, RBW = 3 kHz: 1.5 updates/second Span = 100 MHz, RBW auto coupled: 7 updates/second Span = 6 GHz, RBW auto coupled: 1 update/second
Trace points	
	101, 201, 401, 601, 801, 1001 points, default is 401

Amplitude

Measurement range	Displayed average noise level (DANL) to +20 dBm	
Input attenuator range	0 to 31 dB, 1 dB steps	
Maximum DC voltage at RF In port	±50 VDC	
Maximum input power at RF In port	+27 dBm (0.5 W)	
Displayed average noise level (DANL)	10 Hz RBW, 10 Hz VBW, 50 ohm termination on input, 0 dB attenuation, average detector	
Preamplifier OFF	20 to 30 °C	
10 MHz to 2.4 GHz	-130 dBm (typical)	
> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-125 dBm (typical)	
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-119 dBm (typical)	
Preamplifier ON (Option 235)	20 to 30 °C	
10 MHz to 2.4 GHz	-148 dBm (typical)	
> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-145 dBm (typical)	
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-138 dBm (typical)	
	-10 to 55 °C	
10 MHz to 2.4 GHz	< -141 dBm	
> 2.4 GHz to 5 GHz	< -138 dBm	
> 5 GHz to 6 GHz	< -130 dBm	
Total absolute amplitude accuracy¹	Peak detector, 10 dB attenuation, preamplifier off, RBW < 2 MHz, input signal 0 dBm to -50 dBm, all settings auto-coupled	
	20 to 30 °C	
2 MHz to 10 MHz	±1.8 dB	±0.60 dB (typical)
> 10 MHz to 3.0 GHz	±1.5 dB	±0.50 dB (typical)
> 3.0 GHz to 5.0 GHz	±1.9 dB	±0.60 dB (typical)
> 5.0 GHz to 6.0 GHz	±2.1 dB	±0.60 dB (typical)
Second harmonic distortion (SHI)	-30 dBm signal at input mixer	
2 MHz to 1.35 GHz	< -70 dBc, +40 dBm SHI (nominal)	
1.35 GHz to 3.0 GHz	< -80 dBc, +50 dBm SHI (nominal)	

Third order intermodulation distortion (TOI)	
Two -30 dBm tones at input mixer	> 100 kHz tone separation < -96 dBc, +18 dBm TOI (nominal)
Residual responses	
Input terminated, 0 dB attenuation, preamplifier off, RBW \leq 1 kHz, VBW auto-coupled	
20 MHz to 3 GHz	-90 dBm (nominal)
> 3 GHz to 6 GHz	-85 dBm (nominal)
Spurious responses	
Input mixer level -30 dBm	
RFsig = RFtune + 417 MHz	-70 dBc (nominal)
RFsig = RFtune + 1.716 GHz	-80 dBc (nominal)
Input mixer level -10 dBm, first IF image response	
RFsig = RFtune - 2 x 0.8346 GHz, for RFtune 5.7 to 6.0 GHz	-50 dBc (nominal)
Sidebands	-80 dBc (nominal) -60 dBc (nominal) when battery charging, 260 kHz offset
Preamplifier	
Option 230	100 kHz to 4 GHz
Option 231	100 kHz to 6 GHz
Gain	22 dB (nominal)
Reference level	
Range	-170 dBm to +30 dBm
Resolution	0.1 dB
Accuracy	0 dB (no error)
Traces	
	4 traces, data/max/average/min
Detectors	
	Normal, positive peak, negative peak, sample, average
Markers	
Marker types	Normal, noise marker, band/interval marker, frequency counter marker
Number of markers or delta markers	6
Marker functions	Peak, next peak, peak left, peak right, marker to center, minimum search
RF In VSWR	
	1.5:1 (50 ohm)
Trigger	
	External, video trigger, FFT gating with video (IF envelope) trigger

General specifications

Connector type		Type-N (female)
Input impedance		50 ohm
External reference		
	Input type	BNC female
	Reference frequency	10 MHz
	Required level	-5 dBm to 10 dBm
Display		6.5" transfective, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating
Speaker		Built-in speaker
Headphone jack		Built-in headphone jack
Connectivity		2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN
GPS		Latitude, longitude, elevation and accurate time are provided. The GPS information can be displayed on the screen, and saved as part of the image, data, or recording file. The GPS capability is standard with all N9912A FieldFox RF analyzers. An external USB GPS receiver is required. Agilent recommends the Microsoft Streets & Trips, or Microsoft AutoRoute with GPS locator.
Internal storage		Minimum 16 MB, up to 1000 traces
External storage		1 x micro SD slot and 2 x USB 2.0
EMC		Complies with European EMC Directive 2004/108/EC <ul style="list-style-type: none"> • IEC/EN 61326-2-1) • CISPR Pub 11 Group 1, Class A • AS/NZS CISPR 11 • ICES/NMB-001
ESD		<ul style="list-style-type: none"> • IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test
Safety		Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC <ul style="list-style-type: none"> • IEC/EN 61010-1 2nd Edition • Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04 • USA: UL 61010-1 2nd Edition
Environmental		Meets MIL-PRF-28800F Class 2 specification
	Humidity	95% at 40 °C
	Temperature	
	Operating	-10 °C to +55 °C
	Non-operating	-51 °C to 71 °C
Weight		6.2 lbs / 2.8 kg including battery
Dimensions (H x W x D)		11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)
Power		
	Power supply	External DC input: 15 to 19 VDC
	External AC power adapter	
	Input	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
	Output	15 VDC, 4 A
	Power consumption	12 W
	Battery	6 cell Lithium Ion, 10.8 V, 4.6 A-h
	Battery operating time	4 hours
Languages		English, Chinese, French, Spanish, Japanese, Russian, German, Italian, and Turkish

N9912A FieldFox RF analyzer

FieldFox RF Analyzer base functions:

One port cable and antenna analyzer (4 GHz), broadband calibration, CalReady, standard mechanical cal kit support. Measurements include: return loss, distance-to-fault (DTF), one port cable loss and VSWR.

Standard accessories included N9912A:

AC/DC adapter; battery; soft carrying case comes with backpack and shoulder straps; Quick Reference Guide; User's Guide

N9912A FieldFox Options

Option 104	4 GHz cable and antenna analyzer
Option 106	6 GHz cable and antenna analyzer
Option 110	Transmission measurement
Option 111	QuickCal
Option 230	4 GHz spectrum analyzer (requires Option 104)
Option 231	6 GHz spectrum analyzer (requires Option 106)
Option 235	Preamplifier for spectrum analyzer (requires Option 230 or 231)
Option 236	Interference analyzer
Option 302	External USB power sensor support
Option 303	Network analysis capability
Option 308	Vector voltmeter
Option 010	Network analyzer time domain
Option 311	Channel power meter

8.4.1.3. Antenna Titanis 2.4 GHz Swivel SMA Antenna

Datos generales:

Product name	Titanis 2.4 GHz
	B4844 (Standard SMA – male)
Part Number	B4844-R (Reverse thread SMA – male)
Frequency	2.4 – 2.5 GHz
Polarization	Linear
Operating temperature	-40 °C to +85 °C
Impedance	50 Ω
Weight	7.1 g
Antenna type	¹ Swivel external
Dimensions	20 x 19.5 x 62.5 [mm]

Características eléctricas:

	Typical performance	Conditions
Peak gain	2.2 dBi	Data given for the 2.4 – 2.5 GHz frequency range
Average gain	-1.0 dBi	
Average efficiency	80%	
Maximum Return Loss	-13 dB	
Maximum VSWR	1.6:1	

Rendimiento eléctrico:

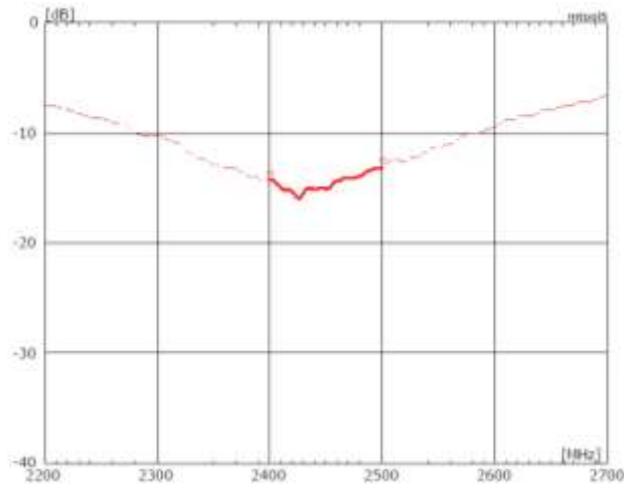


Fig. 8.3: Pérdidas de retorno.

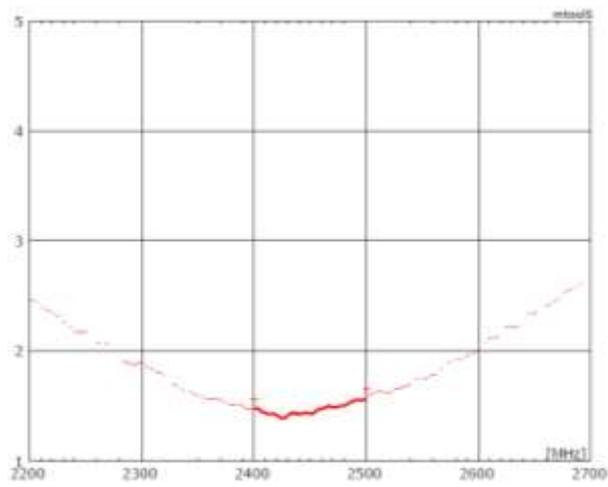


Fig. 8.4: VSWR.

Diagrama de radiación:

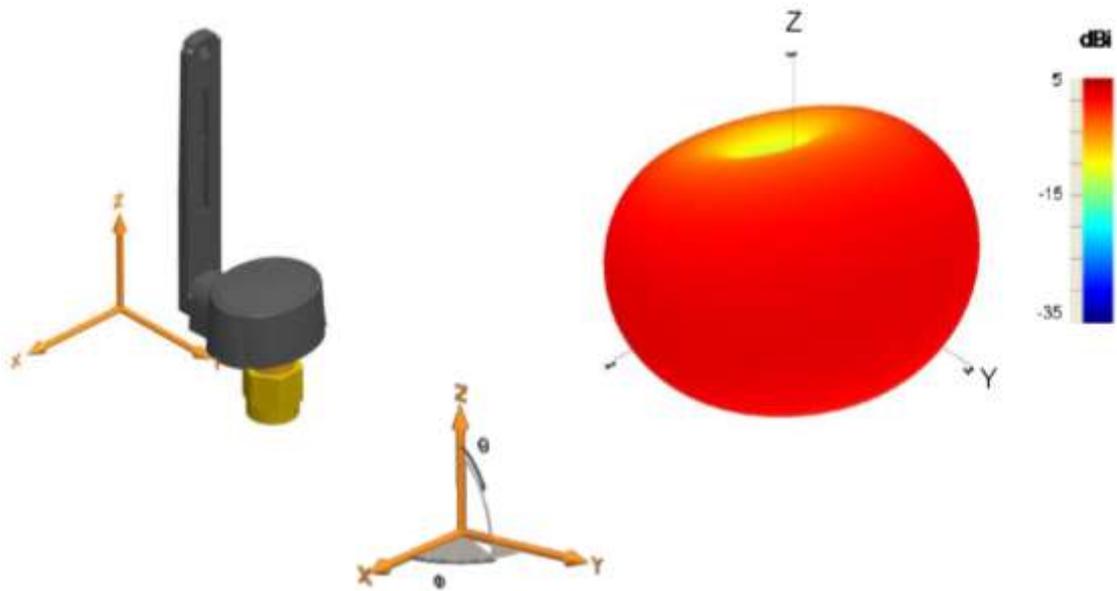


Fig. 8.5: Diagrama de radiación tridimensional.

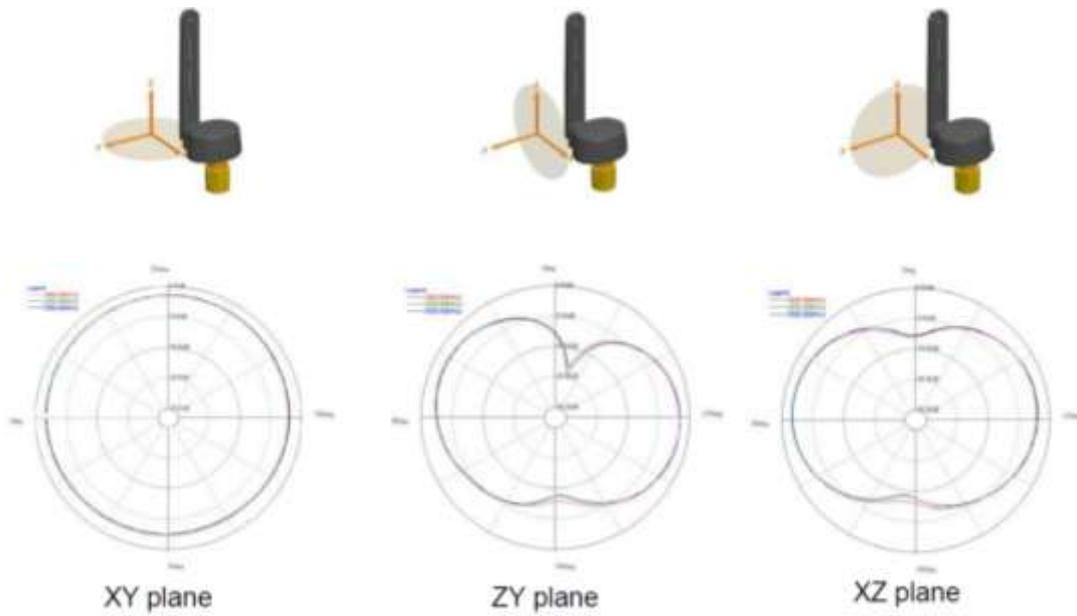


Fig. 8.6: Cortes del diagrama de radiación.

8.4.1.5. Motas XBEE

Wasp mote

General data:

Microcontroller:	ATmega1281
Frequency:	8MHz
SRAM:	8KB
EEPROM:	4KB
FLASH:	128KB
SD Card:	2GB
Weight:	20gr
Dimensions:	73.5 x 51 x 13 mm
Temperature Range:	[-20°C, +65°C]
Clock:	RTC (32KHz)



Consumption:

ON:	9mA
Sleep:	62µA
Deep Sleep:	62µA
Hibernate:	0.7µA

Operation without recharging: 1 year*

* Time obtained using the Hibernate mode as the energy saving mode

Inputs/Outputs:

7 Analog (I), 8 Digital (I/O), 1 PWM, 2 UART, 1 I2C, 1USB

Electrical data:

Battery voltage:	3.3 V - 4.2V
USB charging:	5 V - 100mA
Solar panel charging:	6 - 12 V - 280mA
Auxiliary battery voltage:	3V

Built-in sensors on the board:

Temperature (+/-): -40°C, +85°C. Accuracy: 0.25°C
Accelerometer: ±2g (1024 LSb/g) / ±6g (340LSb/g)
 40Hz/160Hz/640Hz/2560Hz

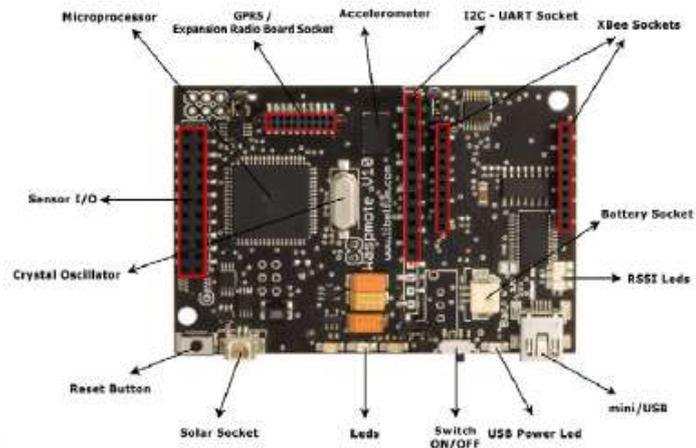
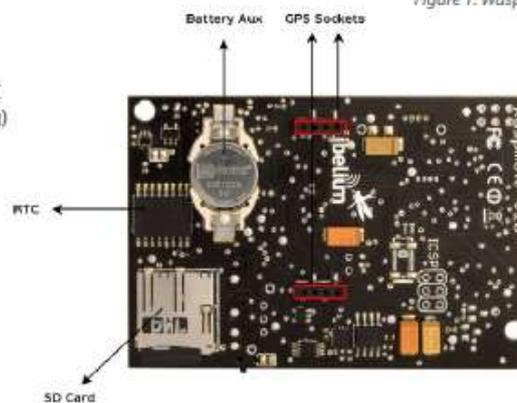


Figure 1: Wasp mote Board Top



802.15.4/ZigBee

Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	ZigBee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
XBee-868	RF	868MHz	315mW	-112dBm	12km
XBee-900	RF	900MHz	50mW	-100dBm	10km
XBee-XSC	RF	900MHz	100mW	-106dBm	12km



Figure 3: XBee

* Line of sight and 5dBi dipole antenna

Antennas: 2.4GHz: 2dBi / 5dBi
868/900MHz: 0dBi / 4.5dBi

Connector: RPSMA

Encryption: AES 128b

Control Signal: RSSI

Standards: XBee-802.15.4 - 802.15.4 Compliant / XBee-ZB - ZigBee-Pro v2007 Compliant

Topologies: star, tree, mesh

Over the Air Programming is also possible once the node has been installed. With this technique you can reprogram wirelessly one or more Waspnote sensor nodes at the same time by using a laptop and the Waspnote Gateway.



Figure 32: Typical OTA process

Radio Interfaces

Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	ZigBee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
XBee-868	RF	868MHz	315mW	-112dBm	12km
XBee-900	RF	900MHz	50mW	-100dBm	10Km
XBee-XSC	RF	900MHz	100mW	-106dBm	12Km

* Line of sight and Fresnel zone with 5dBi dipole antenna

8.4.1.6. Estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20

Las principales características de este equipo son las siguientes:

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Fig. 8.7: Ordenador Lenovo ThinkStation D20.

8.4.1.7. Ordenador portátil Lenovo U410

Algunas de sus características son:

- Procesador Intel® Core™ i5-3317U de cuatro núcleos a 1,7GHz
- Memoria DDR3 de 8 GB a 1.600 MHz
- Tarjeta gráfica NVIDIA® GeForce® 610M de 1 GB
- Disco duro de 500 GB a 5400 rpm y unidad SSD de 32 GB



Fig. 8.8: Ordenador portátil Lenovo U410.

8.4.2. Software

8.4.2.1. Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa MathWorks.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación M ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas.

Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas de álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos gráficamente en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.

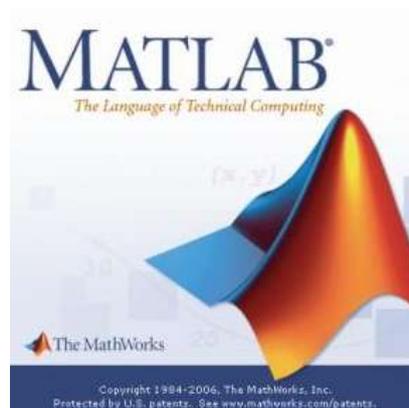


Fig. 8.9: Matlab de MathWorks.

8.4.2.2. SigmaPlot

SigmaPlot es uno de los paquetes estadísticos más conocidos. A partir de una sencilla hoja de cálculo permite generar gráficas de alta calidad y efectuar análisis estadísticos complejos, de un modo rápido y sencillo.

SigmaPlot ha sido creado por la empresa SYSTAT® y cuenta con un gran reconocimiento a nivel mundial, además de haber sido premiado en varias ocasiones.

Sus principales características son:

- Gran flexibilidad.
- Compatibilidad con Microsoft Windows y Office.
- Más de 100 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Rápida representación gráfica desde plantillas.
- Posibilidad de combinación con las capacidades estadísticas de SPSS.
- Extensible a través de macros Visual Basic.
- Ayuda en línea.

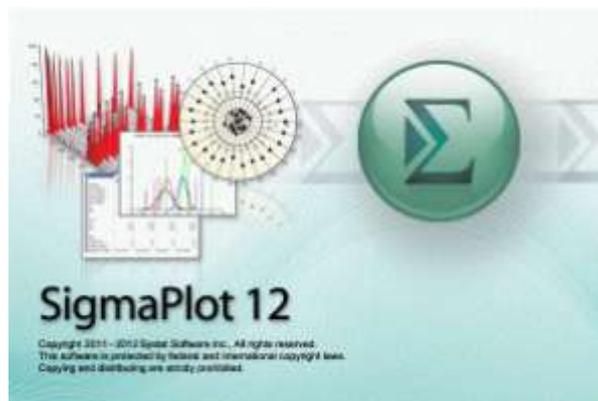


Fig. 8.10: SigmaPlot 12.

8.4.2.3. Microsoft Word & Excel

Microsoft Word es el procesador de textos más conocido hoy en día, ya sea desde una página en blanco, o usando alguna de las plantillas de las que dispone, éste programa ayuda a crear, editar y enriquecer textos con una gran selección de herramientas y contenido complementario.

Las características más importantes de Microsoft Word son:

- Generar tablas y gráficas.
- Crear hiperenlaces a páginas web.
- Insertar imágenes y capturas de pantalla.
- Exportar a PDF.
- Herramientas de corrección y traducción - Macros para automatizar tareas.



Fig. 8.11: Microsoft Word 2013.

Microsoft Excel es un software específico de hojas de cálculos que posee una interfaz práctica y funcional donde el usuario puede gestionar rápidamente su información y visualizar todos los datos de la mejor forma.

Las características más importantes de Microsoft Excel son:

- Rápida creación de tablas y gráficos.
- Gran cantidad de plantillas.
- Gráficos dinámicos y elegantes.
- Posibilidad de compartir documentos en línea.



Fig. 8.12: Microsoft Excel 2013.