

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Master en comunicaciones

“Diseño y estudio radioeléctrico de un sistema de comunicaciones inalámbricas basado en una red de sensores con tecnología ZigBee en entornos boscosos”

Alejandro Eguizábal Garrido

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Agradecimientos

A toda la gente que me ha apoyado hasta el momento y seguro seguirá haciéndolo, a mi familia, a mi novia y al equipo de personas que han hecho que entre todos, este proyecto haya salido adelante.

Gracias a todos.

Resumen

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de las ondas electromagnéticas y su propagación en un entorno boscoso arbolado.

Para ello se han realizado simulaciones en dos frecuencias diferentes, a saber 2.4GHz y 868 MHz, ambas utilizadas en tecnología ZigBee. Se ha llevado a cabo un modelo aproximado sobre la estructura de diferentes arboles teniendo en cuenta sus propiedades materiales así como las del entorno que los rodea.

Los escenarios simulados se han generado mediante distribuciones aleatorias y haciendo uso de código Matlab de trazado de rayos 3D se han obtenido resultados concluyentes utilizados a posteriori para ser comparados con mediciones reales.

ÍNDICE

1. Introducción.....	5
2. Objetivos TFM.....	6
3. Estado del arte.....	7
3.1 Masas Forestales / Situación medio ambiental	7
3.1.1 Caracterización de Masas Forestales Arbóreas	9
3.1.2 Riesgos Forestales.....	13
3.2 Redes de sensores inalámbricas (WSN) IEEE 802.15	15
3.2.1 ZigBee IEEE 802.15.4.....	15
3.3 ZigBee y Propagación de ondas-radio en entornos forestales	18
3.4 Trabajos relacionados con la materia	23
4. Desarrollo.....	29
4.1 Descripción del entorno	29
4.2 Caracterización y modelado del escenario	31
4.3 Creación de los escenarios simulados.....	35
4.4 Resultados I: Primeras simulaciones	40
4.4.1 Primer escenario: 64 pinos.....	41
4.4.2 Segundo escenario: 64 hayas	45
4.4.3 Tercer escenario: 12 robles	50
4.4.4 Cuarto escenario: 32 pinos, 32 hayas	56
4.5 Resultados y análisis del escenario final.....	61
5. Conclusiones	69
6. Líneas Futuras	70
7. Bibliografía.....	71
Anexo I.....	72
Anexo II.....	74
Anexo III.....	76
Anexo IV	Error! Bookmark not defined.

1. Introducción

Cada verano vemos como parte de los bosques y zonas montañosas son arrasadas por las llamas. La concienciación de la sociedad por el cuidado del medio ambiente es cada vez mayor, pero aún queda un largo camino por recorrer y sistemas como WSN nos ayudan a tener el entorno que nos rodea controlado para actuar de inmediato ante cualquier imprevisto; de esta problemática surge la motivación del proyecto.

El escenario principal con el que nos encontramos en este trabajo dista mucho de tener unas condiciones óptimas para la radio propagación, ya que el terreno de montaña es muy abrupto con subidas y bajadas, y las ondas se ven sometidas a fuertes atenuaciones debido a la alta densidad de vegetación arbórea que podemos encontrar en los bosques Navarros. Para caracterizar dicha vegetación se ha consultado documentación sobre dichos bosques y se han determinado las tres áreas más comunes que podemos encontrar, a saber hayedos, robledales y pinares, los cuales se han modelado para poder realizar las simulaciones pertinentes.

Cuando hablamos de nuevas tecnologías nunca se sabe que nos deparará el mañana, pero si sabemos las tendencias del mercado y las tecnologías punteras actuales, una de ellas es sin duda las WSN o redes de sensores inalámbricas, esta tecnología se encuentra en un momento álgido gracias a la infinidad de aplicaciones para las que se utiliza. Podemos hablar de otras como pueden ser redes móviles o WiMax, y en todas ellas encontramos sus mayores limitaciones en el canal radio.

Tras barajar diversas opciones se optó por realizar el estudio utilizando tecnología Zigbee, con una tasa binaria baja lo que conlleva una reducción considerable de energía y aumenta notablemente la durabilidad de las baterías, además de tener en cuenta la facilidad y rapidez para realizar el despliegue de los nodos sensores en un entorno tan hostil como pueden ser un bosque.

El estudio del canal radio en este tipo de entornos, nos va a proporcionar esa información necesaria para el diseño y despliegue de una WSN y poder optimizar este tipo de redes al máximo dependiendo de la funcionalidad a la que estén destinadas, bien sea protección de incendios, protección de patrimonio cultural en zonas medio ambientales, o la monitorización del cambio climático.

2. Objetivos TFM

El objetivo principal de este trabajo es el análisis del canal radio de un sistema ZigBee aplicado a un entorno boscoso, concretamente a zonas montañosas donde se pueden encontrar árboles como pinos, robles, abetos, abedules, hayas, etc. para utilizar dicho sistema como herramienta de comunicación y monitorización del entorno.

Para llevar a cabo el objetivo queda subdividido de la siguiente forma:

En primer lugar se realizará la caracterización del entorno a estudiar y se procederá a la modelización de dicho entorno y el estudio de los materiales y las propiedades que los forman. Posteriormente se llevarán a cabo simulaciones mediante código de trazado de rayos 3D para obtener planos de cobertura zonal y en altura del escenario.

Se realizarán mediciones en un bosque real con la finalidad de obtener datos de PER y potencias de enlaces punto a punto, y realizar una comparativa entre los resultados obtenidos en las simulaciones y las medidas de campo.

Por último los resultados obtenidos deben ser lo suficientemente concluyentes como para ser utilizados como apoyo en el despliegue de una red WSN en un entorno boscoso.

Resulta apropiado dividir las formaciones arbóreas o forestales en dos partes, podemos encontrar superficies forestales certificadas o no certificadas, las superficies certificadas cuentan con procesos específicos de control y gestión, los cuales se encargan de determinar que todo el producto extraído de esa masa forestal sea totalmente apto para el consumidor y por tanto estas superficies son controladas por personas especializadas para realizar una gestión sostenible del lugar en términos económicos, ambientales y sociales, no ocurre lo mismo en superficies no certificadas en las que la naturaleza hace su trabajo y no cuenta con colaboración humana.

Esta clasificación no es irrelevante ya que dependiendo del escenario escogido para el despliegue de una red de sensores tendremos que tener en cuenta la situación en la que se encuentran las formaciones arbóreas así como los años que tienen o de los que disponen de vida antes de llevar a cabo tala controlada.



Figura 3.2: Proporción de la superficie forestal certificada “Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente de Navarra”

En relación a la certificación podemos hablar de las masas arbóreas ordenadas, las cuales son la base de la gestión forestal sostenible, y proporcionan una regulación para el rendimiento económico teniendo en cuenta las restricciones biológicas para lograr así la persistencia y mejora de los bosques.

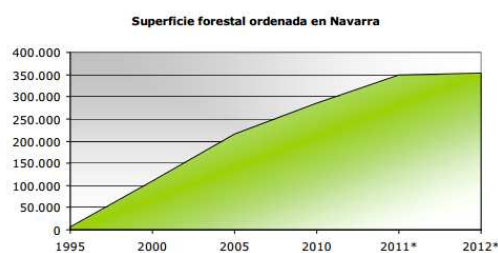


Figura 3.3: Superficie forestal ordenada en Navarra “Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente de Navarra”

Como podemos apreciar en la gráfica anterior la superficie forestal ordenada ha aumentado en un 200% desde el año 2000, repartiendo dicho porcentaje en su mayor parte en superficies pertenecientes a Entidades Locales, y en menor medida a superficies pertenecientes al Patrimonio Forestal de Navarra y a propietarios particulares. La metodología utilizada para la ordenación de montes, es específica para cada monte en particular a excepción de posibles agrupaciones que dispongan de unas características similares y específicas.

3.1.1 Caracterización de Masas Forestales Arbóreas

Antes de realizar cualquier despliegue de red, bien sea inalámbrica o no, debemos realizar un análisis in-situ del lugar o en su defecto utilizando planos, para asegurarnos cuál es la forma óptima para realizar dicho despliegue. En el caso particular del presente proyecto, nuestro escenario es un bosque o masa arbórea la cual deberemos caracterizar para conseguir un resultado satisfactorio.

Los bosques por norma general tienen dos formas básicas, *regulares e irregulares*, y una longevidad dependiente de la finalidad a la que se ve sometido dicho bosque, bien sea por una razón económica o simplemente por conservación.

A continuación se presentan varios modelos para caracterizar estas masas forestales arbóreas y ayudarnos a realizar un estudio y despliegue óptimo.

En primer lugar debemos tener en cuenta que nos encontramos ante un escenario cambiante en el tiempo y es muy posible que en pocos años haya cambiado lo suficiente como para que el sistema deje de funcionar de forma correcta. Dentro de un bosque cada individuo que lo forma se ve influenciado por el resto de individuos que lo rodean, por tanto debemos realizar un doble enfoque a la hora de realizar la caracterización; *estático y dinámico*.

El enfoque estático está dirigido a caracterizar el escenario en un momento o periodo de tiempo corto puntual, y por el contrario el dinámico intenta realizar una aproximación de como el entorno experimentara cambios según vaya pasando el tiempo.

La primera clasificación que se debe establecer ante una masa arbórea es la relacionada con la intervención humana, en relación con alguna demanda social. Denominamos *masa natural o primaria* a aquella que proviene de una sucesión vegetal y no tiene ni tendrá intervención humana alguna, por otro lado clasificaremos como *masa forestal o secundaria* cualquier masa que haya tenido o tenga un tratamiento selvícola, para satisfacer una necesidad social.

Dentro de las agrupaciones vegetales podemos encontrar diferentes formaciones, aunque en nuestro caso solo nos interesan las formaciones arbóreas, formadas por plantas leñosas de más de 2 metros de altura, que a su vez pueden tener varios estratos o pisos.

Haciendo uso de modelos estáticos (en este caso en concreto el modelo de KRAFT 1884), para realizar la caracterización, debemos realizar una clasificación de los pies que componen la formación arbórea, dividiendo en dos grupos de árboles, por un lado dominantes, que son aquellos que tienen una mayor altura y por otro lado dominados, que son el resto de árboles con alturas inferiores. La altura total del conjunto quedara subdividida en pisos para realizar una clasificación más específica en altura como vemos en la siguiente imagen.

En la figura podemos ver 1) Y 2) Dominantes , 3) y 4) dominados.

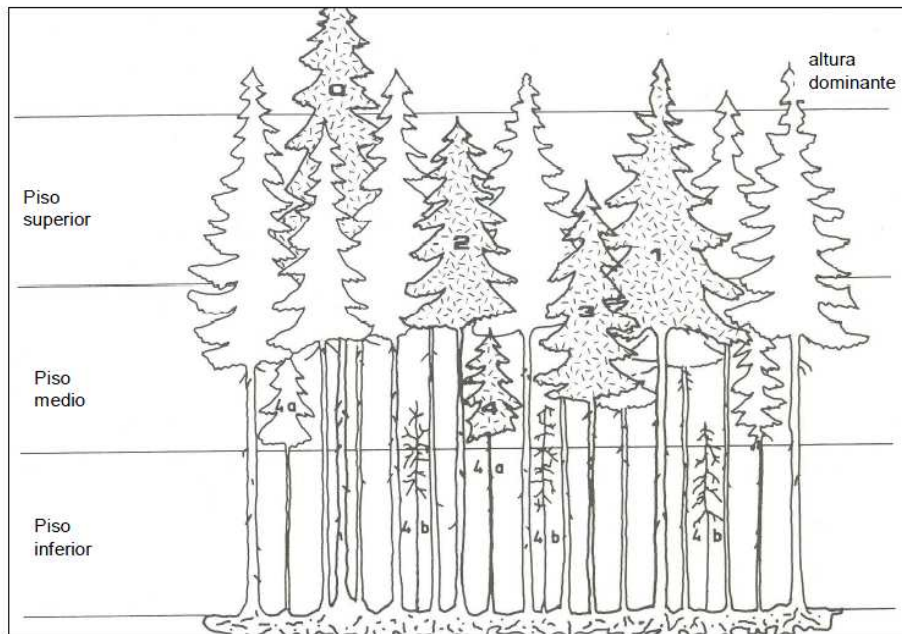


Figura 3.4: Clasificación sociológica en una masa regular de pino silvestre. Modelo de KRAFT (1884).

El modelo de KRAFT suele ser utilizado para el estudio y clasificación de agrupaciones regulares aunque existen otros muchos como PHILIPS (1949), LANIER (1986) o TAYLOR (1939), destacar el modelo de BAKER (1950) el cual nos deja ilustraciones como la siguiente imagen en la que se realiza una clasificación muy similar a la presentada anteriormente del modelo de KRAFT.

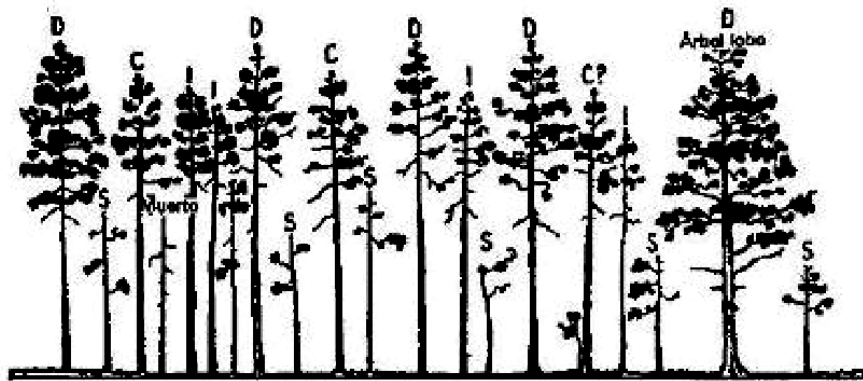


Figura 3.5: Clasificación sociológica de los pies de una masa regular: D, dominante; C, codominante; I, intermedio; S, sumergido. Tomado de BAKER, 1950.

Las clasificaciones basadas en la idea de Kraft no son aplicables para agrupaciones irregulares. Por tanto para caracterizar masas mixtas o irregulares conviene utilizar la clasificación llamada IUFRO (International Union of Forest Research Organisations), también aplicable a masas regulares.

La clasificación IUFRO consiste en asignar a cada pie o árbol seis dígitos, de los cuales los tres primeros reflejan sus características sociológicas y los tres últimos sus características económicas, como se ve reflejado en la siguiente tabla.

Criterios	Clases	Valoración
criterios sociológicos (cifras 1 a 3)	altura	100 buena
		200 normal
		300 mala
	vitalidad	10
		20
		30
	comportamiento jerárquico evolutivo	1
		2
		3
criterios económicos (cifras 4 a 6)	valor selvícola	400 bueno
		500 normal
		600 malo
	calidad de fuste	40
		50
		60
	longitud de copa	4
		5
		6

Figura 3.6: Clasificación sociológica de los pies de una masa según modelo IUFRO.

Una vez realizada la clasificación de las especies que forman la masa vegetal y determinadas sus principales propiedades pasamos al estudio de la *espesura*, la cual va ser un factor de gran interés ya que nos va influir directamente en la radiación de nuestras motas ZigBee empeorando notablemente la señal, provocando efectos de scattering y atenuando las señales notablemente reduciendo los radios de cobertura.

En las masas arbóreas el estudio de la espesura se realiza de forma diferente según el número de estratos o pisos que presenten. El caso más común es que solo aparezca un único estrato, pero en el caso de que hubiera varios se puede recurrir a describir cada uno de ellos por separado. Con el fin de completar la descripción es conveniente realizar una representación gráfica en planta y perfil del escenario como se muestra en el siguiente ejemplo.

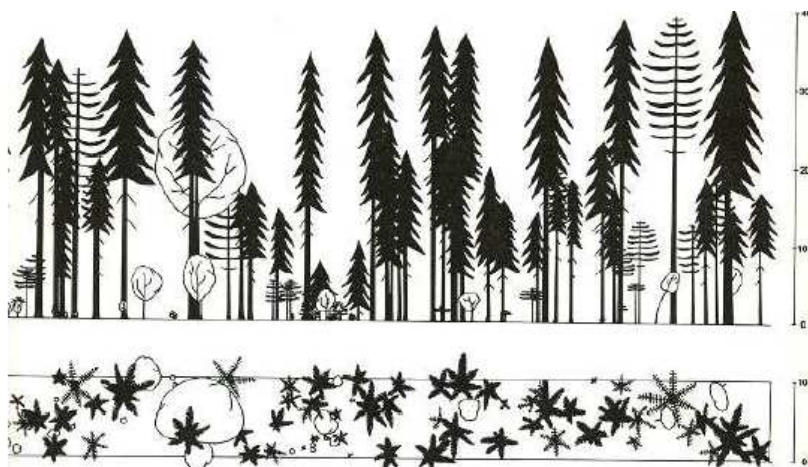


Figura 3.7: Ejemplo de representación que expresa, a través del alzado y de la planta la espesura de una masa. Adaptado de LANIER (1986).

Existen diferentes formas o métodos para cuantificar la espesura en masas arbóreas de un solo estrato.

- En su forma más simple “encontramos la *densidad*”, que nos proporciona un índice de espesura directamente proporcional y que no refleja bien la variación de la espesura en el tiempo, y digo directamente proporcional porque definimos densidad como el número de pies o arboles con un diámetro determinado entre la superficie total del escenario.

$$N = (np \times 10.000) / Sp, \text{ en pies/ha.}$$

Siendo np el número de pies un una parcela de superficie Sp.

- El siguiente método denominado como “*Fracción de cabida cubierta*” nos proporciona un índice de espesura cuantificada a partir del área total del escenario analizado y la parte cubierta del área por la proyección de las copas del arbolado, la evaluación suele realizarse de forma visual, aunque también es posible llevarla a cabo utilizando planos del escenario o mediante fotografías aéreas y suele expresarse en tanto por ciento.

$$Fcc = (Sc \times 100) / St$$

Donde Sc es la superficie cubierta y St la superficie total del escenario.

Para concluir el método de Hart-Becking, también denominado coeficiente de espaciamiento o índice de Hart-Becking, expresa la espesura en función de la separación entre los pies y la altura de los mismos, a través de la tangente del ángulo que forma el fuste de un árbol y la línea trazada desde su cima hacia la base del pie situado a distancia equivalente al espaciamiento medio entre árboles.

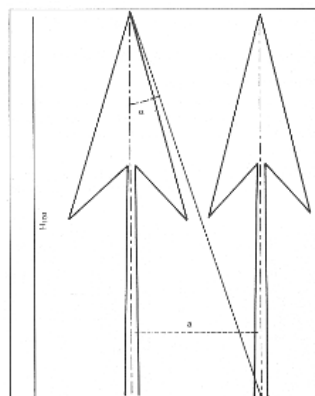


Figura 3.8: Representación gráfica del concepto de Índice de Hart-Becking.

Se puede emplear en dos tipos de distribuciones, una en distribución marco real en la que el área de estudio queda dividida en cuadrados, enfocado a masas artificiales y

distribución en tresbolillo en la que se divide el área en una red de triángulos equiláteros.

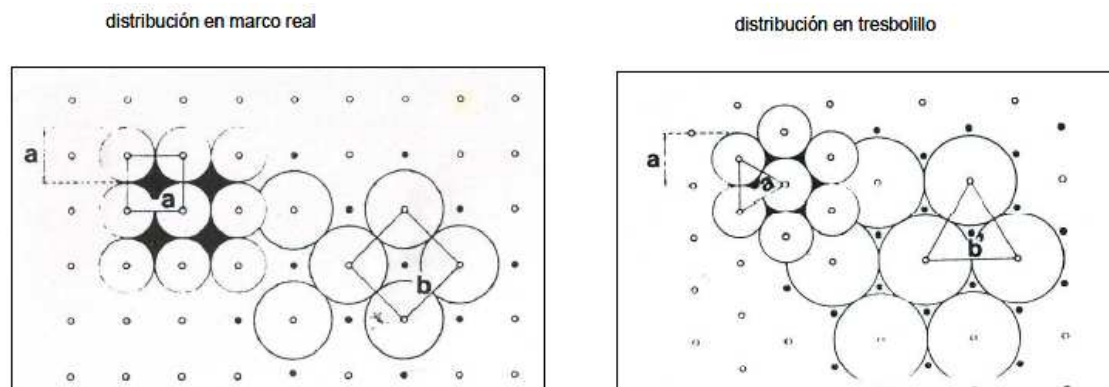


Figura 3.9: Modelos de distribución de los pies de una masa. Adaptado de SCHÜTZ (1990)

Podemos encontrar más métodos como son REINEKE comúnmente utilizado en América, Relación de espaciamiento, o Área basimétrica entre otros.

3.1.2 Riesgos Forestales

Los bosques se ven sometidos a un gran número de perturbaciones, sucedidas casi siempre por causas naturales pero de vez en cuando ocasionadas por la presencia humana. Entre todas ellas podemos enumerar incendios, vendavales, avenidas, erosiones o deslizamientos de tierra, depósitos fluviales, aludes, actividades volcánicas, tormentas de granizo, predicción por mamíferos, plagas o enfermedades. Todas ellas contribuyen activamente cada año a la degradación de los bosques y en casos extremos a su desaparición.

De todas las perturbaciones enumeradas anteriormente, hay que destacar la principal causa que afecta a la destrucción total o parcial de los bosques y por supuesto estamos hablando de los incendios. Dichos incendios no destruyen únicamente los bosques su flora, fauna, provocan inundaciones y desertificación, sino que en muchas ocasiones familias incluso pueblos enteros han tenido que ser desalojados de sus hogares por este motivo.

En la última década se estima que un 55% de los 180.000 incendios sucedidos en España fueron intencionados o causados por negligencias, y el número de incendios muy lejos de reducirse aumenta paulatinamente a causa del cambio climático o también conocido como calentamiento global.

Los incendios podemos clasificarlos en tres tipos:

1. Incendio superficial; el fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del terreno.

2. Incendio subterráneo; El fuego se inicia de forma superficial pero se propaga bajo el suelo mineral debido a la acumulación y compactación de combustibles.
3. Incendio de copa o aéreo; Se inicia de forma superficial propagándose rápidamente hacia las copas de los árboles debido a combustibles naturales.

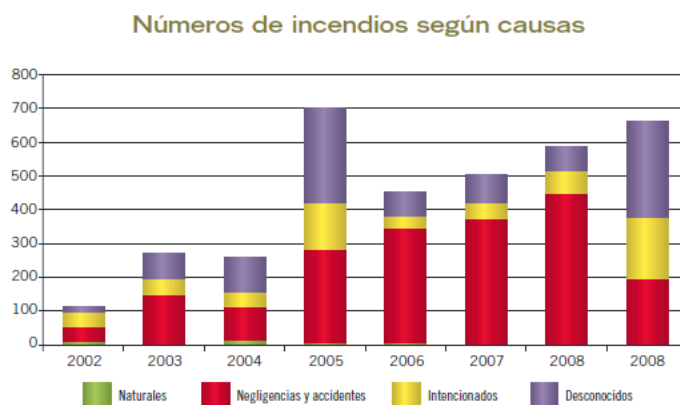


Figura 3.10: Número de incendios según causas "Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente"

Como podemos apreciar en la gráfica, las causas más comunes de los incendios según los estudios realizados por el departamento rural y de medio ambiente son negligencias y accidentes junto con causas desconocidas.

La superficie afectada por los incendios es un dato importante a la hora del análisis, con bastante frecuencia se producen conatos de incendio que realmente no llegan a clasificarse como tal, pero depende en gran medida de la composición y estructura de las masas forestales, del resultado de las medidas preventivas y de la eficacia de las tareas de extinción.

En la siguiente gráfica podemos ver la extensión de terreno en hectáreas afectada por los incendios desde el año 2002.



Figura 3.11: Superficie afectada por incendios. "Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente"

De toda esta problemática surge la idea de utilizar WSN para la monitorización de entornos boscosos y la prevención de estos incendios y todo tipo de perturbaciones a las que se ven sometidos los bosques.

3.2 Redes de sensores inalámbricas (WSN) IEEE 802.15

Para comenzar a describir la tecnología que se utiliza en el presente proyecto no podemos dejar de lado la capa más baja utilizada por múltiples redes WPANs, definida por el estándar IEEE 802.15 y utilizada también por Zigbee, nos proporciona parámetros a tener en cuenta en las comunicaciones inalámbricas de nuestra red de sensores como son la tasa binaria, la calidad de servicio o el consumo energético.

Y como todas las tecnologías inalámbricas buscando la finalidad de eliminar despliegues de cable y facilitar la instalación y suplantación de equipos, así como superar limitaciones físicas como puede ser el caso de este proyecto en la instalación de sensores en un bosque.

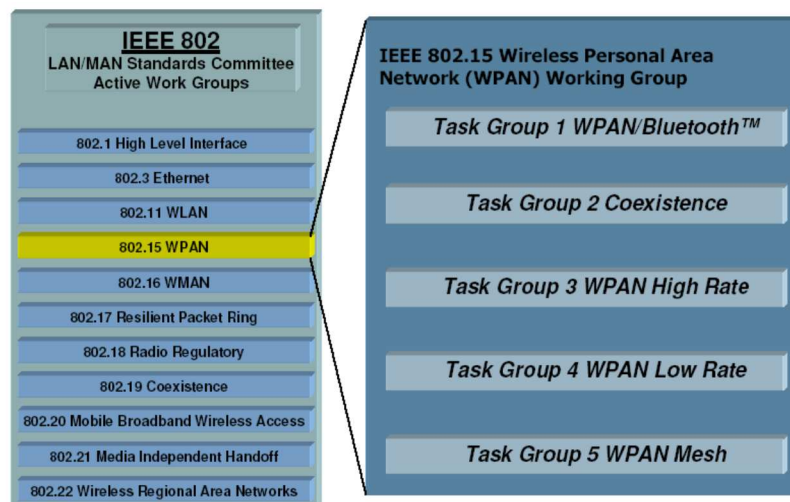


Figura 3.12: Grupos de trabajo del IEEE 802.15

En la imagen anterior podemos ver los diferentes grupos de trabajo formados dentro de WPANs, específicos para ser empleados en diferentes tipos de tecnologías.

3.2.1 ZigBee IEEE 802.15.4

ZigBee es un estándar diseñado principalmente para satisfacer las necesidades de las redes inalámbricas de bajo consumo, este estándar es utilizado en infinidad de aplicaciones con un propósito general, el de actuar como pasarela para la recogida de datos del mundo que nos rodea.

Una de las principales motivaciones para el uso de una tecnología inalámbrica, es el ahorro en costes de instalación, ya que desplegar una red inalámbrica es más rápido que una red cableada y en muchos casos este tipo de redes de sensores se van a encontrar en entornos de difícil acceso donde desplegar una red cableada es totalmente imposible.

Las capas que se implementan en el estándar de ZigBee, están estructuradas en dos partes bien diferenciadas, por un lado encontramos las capas inferiores PHY y MAC definidas por el estándar del IEEE 802.15.4 cuyas características son adoptadas por ZigBee y serán descritas a continuación, y por otro lado las capas superiores estandarizadas por la ZigBee Alliance.

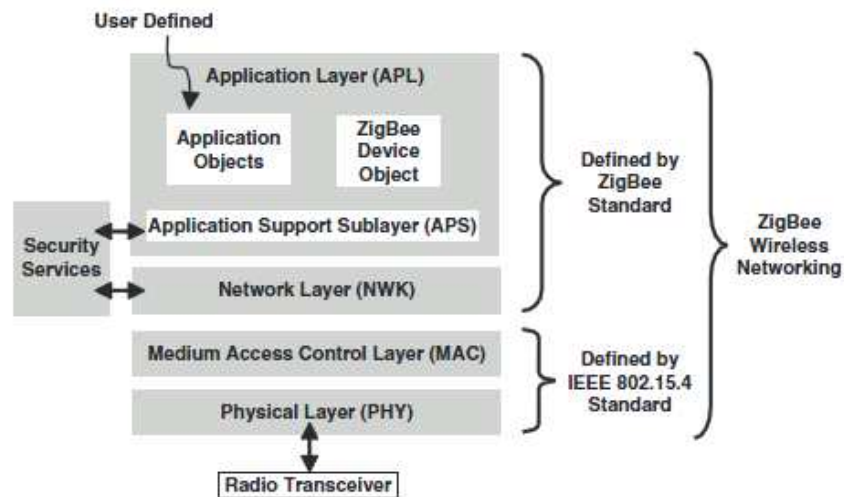


Figura 3.13: Capas de ZigBee.

En la siguiente tabla encontramos las principales propiedades del protocolo del IEEE 802.15.4, utilizado por ZigBee. Opera en bandas libres, en Europa y América, aunque decir que la banda de 915MHz en Europa no se utiliza por estar ocupada por la telefonía móvil.

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latency	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Figura 3.14: Principales propiedades del protocolo IEEE802.15.4

Las tasas binarias que podemos encontrar son relativamente bajas si las comparamos con otros sistemas parecidos, pero como ya se ha comentado uno de los principales objetivos de ZigBee es el ahorro energético.

También comentar brevemente el acceso al medio en el que se utiliza CSMA-CA o CSMA-CA ranurado.

La capa de red ZigBee es la encargada de gestionar la puesta en marcha y control de la red al igual que se hace en una red cableada. Mediante la asignación de direcciones IP de 16bits consigue el enrutamiento necesario para comunicar todos los nodos de la red.

El tráfico puede ser de tres tipos; broadcast, multicast, o unicast.

Una red de sensores ZigBee puede estar compuesta por tres tipos diferentes de nodos, el primero nodo coordinador, nodo enrutador, y por ultimo nodo final o terminal sin embargo si analizamos el protocolo 802.15.4 solamente define dos dispositivos, a saber un dispositivo de funcionalidad completa o (FFD) y un dispositivo de funcionalidad reducida o (RFD) no apto para coordinar, únicamente para enviar datos sensados. Existe por tanto una pequeña discrepancia entre los protocolos de las diferentes capas, aunque cabe destacar que son compatibles entre sí.

La topología de red que encontramos en las redes de sensores puede ser en árbol, en estrella o en malla. Aunque la más utilizada es la topología en malla la cual nos proporciona una mejor distribución para analizar zonas de manera más uniforme.

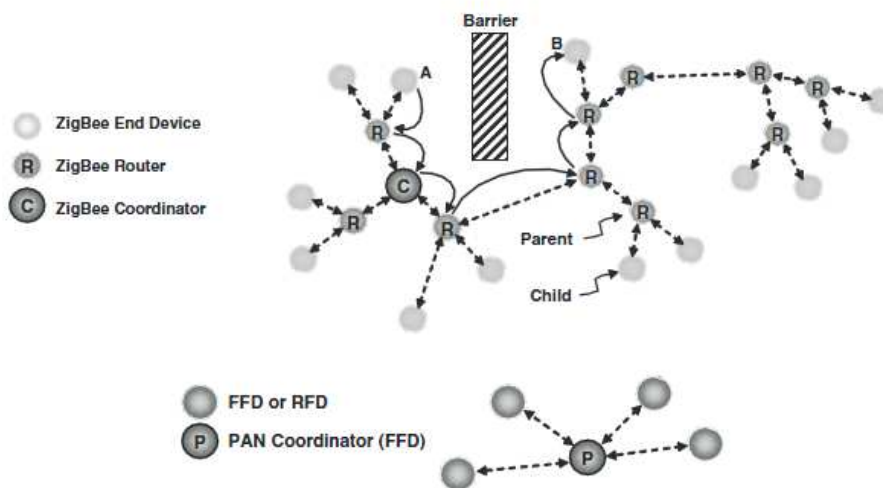


Figure 1.6: A Star Network Topology

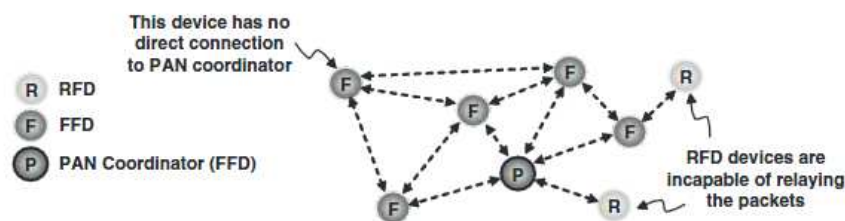


Figura 3.15: Topologías de red para IEEE 802.15.4. "ZigBee Wireless Networks and Transceivers"

Para concluir con este apartado comentar brevemente que todos los métodos definidos por IEEE802.15.4 usan técnicas DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) o PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) para mejorar el rendimiento del receptor.

Resumen de las características más significativas:

- Soporte para múltiples topologías de red como de punto a punto, punto a multipunto y redes de malla.
- Ciclo de trabajo bajo - ofrece batería de larga duración.
- Baja latencia.
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).
- Hasta 65.000 nodos por red.
- 128-bit AES de cifrado para las conexiones de datos seguras.
- De prevención de colisiones, reintentos y reconocimientos.

3.3 ZigBee y Propagación de ondas-radio en entornos forestales

Para poder realizar un buen diseño de una red WSN, nos debemos hacer antes una serie de preguntas básicas como cuál es la distancia óptima de separación entre nodos sensores. La respuesta depende de varios parámetros los cuales debemos tener en cuenta como son, la potencia de transmisión, la sensibilidad en recepción, como se propaga la señal por el medio, parámetros de las antenas que instalemos y la frecuencia que utilice el sistema para transmitir.

También debemos tener en cuenta en el diseño la esperanza de vida con la que aproximadamente vamos a dotar el sistema, ya que nos veremos condicionados por el consumo de energía de los nodos, a los que quizás debamos instalarles algún tipo de suministro energético, del propósito de la aplicación, de la robustez del sistema y la topología de red, etc.

El mayor problema al que nos vamos a enfrentar, es la atenuación producida por el follaje de la masa forestal, y por este motivo estoy realizando el presente proyecto, para analizar de manera más precisa la propagación de las ondas en este entorno, y tener suficiente información para realizar despliegues óptimos.

Vamos a analizar con detalle los procesos físicos a los que las ondas se ven sometidos:

En primer lugar debemos hablar de las pérdidas por propagación en espacio libre a las que cualquier tecnología inalámbrica debe hacer frente y que están caracterizadas por la siguiente ecuación.

$$[FSL]=10\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

Donde:

- d = distancia entre emisor y receptor.
- λ = longitud de onda de la señal

Además de la atenuación producida en la señal por espacio libre, también debemos tener en cuenta posibles efectos multitrayecto que a consecuencia del entorno van a producirse. Las ramas, hojas, troncos, etc van a provocar diferentes efectos físicos en la señal como son las reflexiones, difracciones, scattering entre otras.

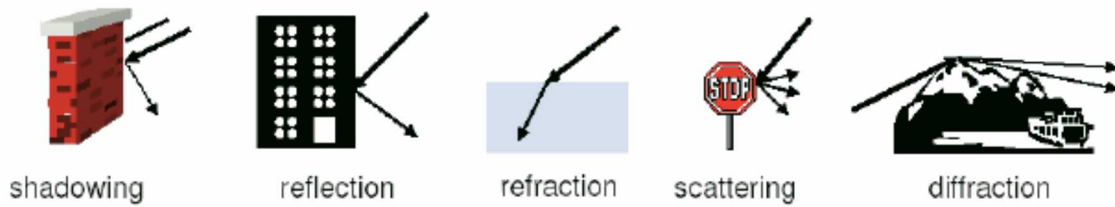


Figura 3.16: Fenómenos físicos debidos a interferencias con obstáculos.

La variación producida en la humedad de los bosques, también influye en la propagación de las ondas, ya que las constantes eléctricas de los materiales (conductividad y permitividad) cambian en relación a dicha humedad.

Un ejemplo claro es la madera, cuyas propiedades dieléctricas en el rango de frecuencias de 10^2 a 10^{11} Hz dependen de su densidad, la especie de árbol y la temperatura termodinámica. Existe una dependencia entre la permitividad de la madera húmeda y su grado de densidad según estudios realizados, la cual a bajas frecuencias se comporta de forma lineal aumentando el grado de permitividad. Hay que tener en cuenta la edad de los árboles para realizar estas aproximaciones, ya que como vemos en el siguiente gráfico la densidad de la madera varía conforme a la edad del árbol.

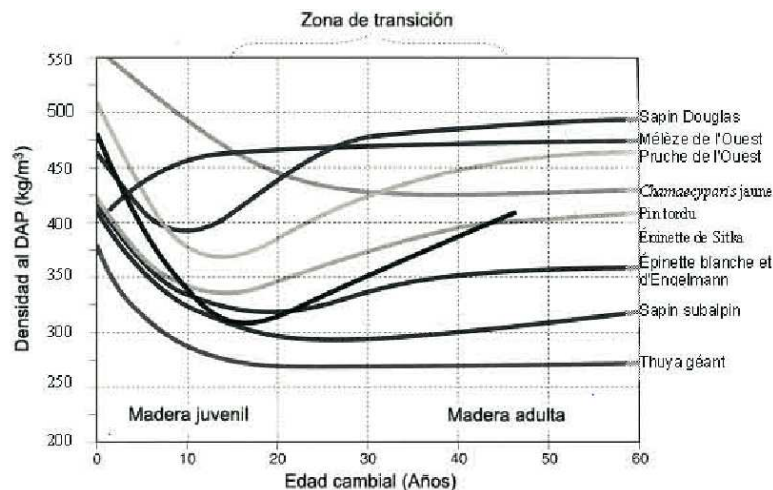


Figura 3.17: Cambios en la densidad de la madera según su edad.

Así mismo los parámetros dieléctricos de la madera húmeda también se ven afectados por cambios en la composición de fase según el grado de humedad y el tipo de madera sometida.

El estudio anteriormente nombrado, analiza la variación de los parámetros dieléctricos de diferentes tipos de madera, abedul, álamo, y abeto entre otras, sometiénolas a diferentes grados de humedad, y analizando como varia el índice de refracción y la absorción del material.

En el siguiente grafico podemos ver como varia el índice de refracción y la absorción de diferentes maderas sometidas a estudio. Se distinguen tres zonas bien diferenciadas donde la evaporación progresiva del agua contenida en la madera da lugar a cambios en dichos parámetros.

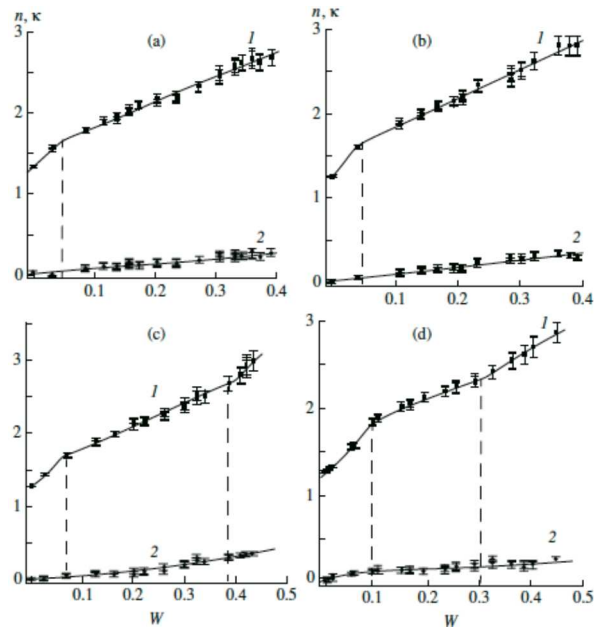


Figura 3.18: Dependencia del índice de refracción y absorción con la humedad. “The Effect of Volume Humidity and the Phase Composition of Water on the Dielectric Properties of Wood at Microwave Frequencies”

Aun teniendo delante estos estudios, debemos plantearnos si los resultados que ofrecen pueden ayudarnos en nuestro despliegue de la red WSN, o por el contrario el comportamiento de la madera o cualquier otro material será distinto en el medio natural que un laboratorio.

Otro efecto a tener en cuenta es la atenuación por lluvias, esta debe ser considerada aunque la dispersión causada por lluvia no es relevante para anchos de banda menores a 1 GHz.

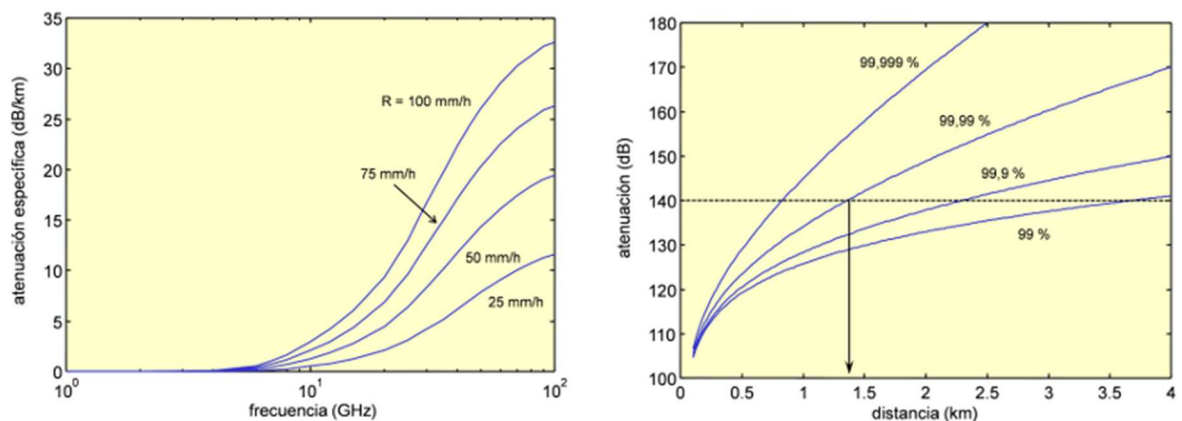


Figura 3.19: Atenuaciones producidas por la lluvia. Caudal y QoS.

En las gráficas anteriores podemos ver atenuaciones producidas por lluvia para diferentes frecuencias e intensidades de lluvia y para calidad de servicio en la red respecto a distancia.

La propagación de los campos eléctricos puede ser expresada en términos de ondas directas, ondas reflejadas y ondas laterales. Por esta razón el bosque se considera un medio multicamino, donde una misma señal con diferentes fases, retardos, atenuaciones puede influir en la señal recibida, de manera constructiva o destructiva.

En definitiva, los aspectos imprescindibles a considerar en un entorno arbolado, son clima, efectos de la vegetación, y entorno multitrayecto (constructivo o destructivo).

Existen diferentes métodos empíricos, para realizar aproximaciones en la propagación de las ondas en bosques, aunque la única forma posible de determinar estas características de forma exacta, es realizando mediciones in-situ. Se ha llegado a estimar que las pérdidas por propagación a través de la vegetación pueden determinarse por:

$$L = A \cdot f^B \cdot d^C$$

Donde los parámetros A, B y C deben obtenerse empíricamente mediante técnicas de regresión basadas en datos específicos.

El primer modelo empírico es Weissenberger's:

$$L_w(dB) = \begin{cases} 1,33 \cdot f^{0,284} \cdot d^{0,588}; & 14m < d \leq 400m \\ 0,45 \cdot f^{0,284} d; & 0m \leq d < 14m \end{cases}$$

Donde: - f = frecuencia en GHz

-d = profundidad en m

Mediante este método se pretende estimar la diferencia de atenuación en un medio con hojas o sin hojas en un intervalo de 3 a 5 dB.

Los dos siguientes métodos han sido desarrollados por la ITU (International Telecommunication Union), suponiendo que la mayor parte del trayecto realizado por las ondas, se da a través de vegetación.

$$L_{ITU-R} (dB) = 0,2 \cdot f^{0,3} \cdot d^{0,6}$$

$$L_{FITU-R}(dB) = \begin{cases} 1,37 \cdot f^{0,18} \cdot d^{0,59}; & out - of - leaf \\ 0,39 \cdot f^{0,39} d^{0,26}; & in - leaf \end{cases}$$

Donde: - f = frecuencia en MHz

- d = profundidad en m

Gracias a estos modelos, determinar la propagación a través de una masa forestal es algo medianamente factible, aunque todavía hoy es un desafío hacerlo con un alto grado de exactitud.

Para concluir con este apartado comentar brevemente un modo de como caracterizar las pérdidas por propagación en un bosque, aplicables al despliegue de una red WSN o a cualquier onda-radio que se vea obligada a atravesar una zona boscosa o una gran masa vegetal.

- Manteniendo la altura de antena constante, el campo varía inversamente en función de la distancia al cuadrado.
- La presencia de vegetación, produce unas pérdidas constantes las cuales son independientes de la distancia entre transmisor y receptor.
- El campo recibido puede estar considerablemente despolarizado en relación a la orientación de la antena.

Un posible modelado del bosque puede ser el siguiente: una partición en capas del entorno donde encontramos suelo-bosque, bosque-aire, aire-ionosfera. La primera capa no es influyente si la densidad del bosque es alta, como sucedería en este proyecto, y la última capa tiene en cuenta la onda reflejada por la ionosfera, lo cual solo ocurre cuando hablamos de frecuencias bajas y la onda lateral se representa en todas las frecuencias y viaja teóricamente rozando las copas de los árboles.

Esta capa intermedia se trata como un bloque dieléctrico disipativa, a la vez que tiene en cuenta el concepto de onda lateral, y onda ionosférica como se aprecia en la siguiente imagen.

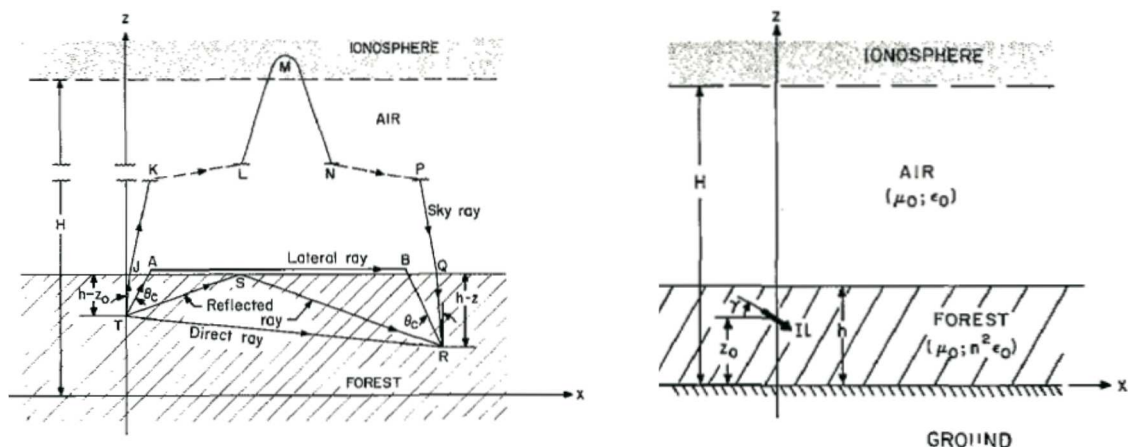


Figura 3.20: Modelado forestal mediante sistema de tres capas. "On Radio---Wave Propagation in Forest Environments"

Debido a las condiciones cambiantes del entorno, este modelo fija unos posibles valores en cuanto a permitividad relativa y conductividad de forma que englobe todos los posibles estados de la capa boscosa (capa intermedia del modelo).

3.4 Trabajos relacionados con la materia

Tras la aparición de las WSN hace unos años, se han ido presentando novedosos proyectos, junto con actualizaciones de los sistemas ZigBee, que han dado lugar a nuevas tecnologías como 6LowPan.

Vamos a centrarnos en presentar proyectos ya realizados de forma satisfactoria, y relacionados con el cuidado del medio ambiente ya que se trata de la temática del presente proyecto.

Si indagamos un poco en el tema nos damos cuenta que los proyectos realizados a gran escala, conllevan unos gastos económicos muy grandes y por tanto la mayoría de ellos están subvencionados por la Unión Europea o bien por el organismo pertinente en cada país del cuidado del medio ambiente, en España en particular por el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente.

Podemos encontrar diferentes temáticas dentro de la protección del medio ambiente, por ejemplo monitorización y prevención de incendios, bien sea para proteger el ecosistema o para salvaguardar monumentos históricos, también encontramos casos en los que se centran más en la recogida de datos medio ambientales ya sea de humedad, precipitaciones, temperaturas, para prevenir posibles inundaciones, huracanes, u otro tipo de inclemencias meteorológicas.

La tecnología empleada en todos estos proyectos son las WSN, pero en casi ningún caso estas redes están solas, y digo esto porque todos los sistemas se ven apoyados por otros bien sean cámaras termográficas, estaciones meteorológicas, etc.

El primer proyecto que voy a analizar se llama **Firesens**, surge a raíz de los incendios producidos entre 2007-2009 en Grecia y Turquía donde sitios arqueológicos como la antigua Olimpia o la ciudad de Notion entre otros, se vieron seriamente amenazadas o parcialmente destruidas a causa de incendios. Financiado por la Unión Europea, y desarrollado por países como Grecia, Italia, Turquía o Bélgica, centraron sus esfuerzos en el diseño de una red de sensores inalámbrica junto con otros elementos como cámaras de vigilancia para llevar a cabo su cometido.



Figura 3.21: Ruinas protegidas por una WSN en Grecia. "Firesens.com"

La metodología y arquitectura de red empleada en este proyecto es la siguiente:

En un escenario típico para asegurar una situación arqueológica determinada, se realizara un despliegue de sensores inalámbricos alrededor del monumento a proteger, y se realizaran mediciones periódicas del entorno, los datos recogidos por los sensores serán tratados y monitorizados. Por otro lado las cámaras ópticas se encargaran de vigilar el sitio en cuestión y también los alrededores, posibles zonas boscosas para una mayor seguridad.

Los sensores a instalar pueden ser de diversos tipos, bien sean de humo, de calor, etc. En el caso de la detección de un incendio el sistema crea una alarma y seguirá analizando los datos recogidos por sensores y cámaras para determinar la dirección y velocidad de las llamas ayudándose de un sistema de geo localización para extinguirlo lo más rápidamente posible, y facilitar la coordinación de los equipos.

Los incendios no son la única causa de destrucción de sitios arqueológicos, así que la recogida de datos como variaciones en la temperatura, facilitara la previsión de riegos por inundaciones o tormentas.

La topología de la red de sensores no es establecida de forma estricta, ya que dependiendo de las necesidades la situación y las dimensiones del terreno a cubrir puede variar. Pero la más empleada es la de estrella donde nodos pasivos del tipo maestro-esclavo rinden cuentas a un nodo activo interconectado con sus semejantes en las diferentes áreas a cubrir y todo ello conectado a un centro de control.

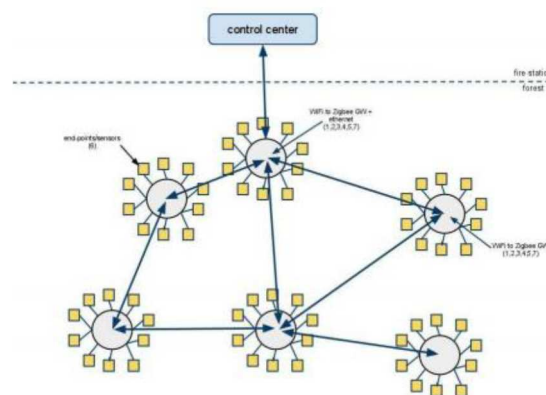


Figura 3.22: Topología de red mallada para WSN.

Las tecnologías empleadas en este proyecto son básicamente dos, cámaras u sensores complementándose entre sí. Las **cámaras** pueden ser de dos tipos bien **CCTV** utilizadas para la detección a corto alcance o **cámaras de infrarrojos** sensibles a las variaciones de temperatura, por otro lado los **sensores de tipo PIR**, con una configuración maestro-esclavo se encargaran de recoger datos bien sean de temperatura o de detección de humos en las áreas próximas a los sitios que se desea asegurar y entregarlos a un nodo principal encargado de enviarlos a la estación de recogida, donde se llevara a cabo el procesado.

Los datos recogidos por los sensores junto con las imágenes capturadas por las cámaras serán lo suficientemente deterministas para dar la voz de alarma, ayudados los algoritmos de procesado y fusión de datos.

Estos algoritmos se encargan de procesar las imágenes de las cámaras para la detección del fuego y el humo, para realizar la previsión de propagación del fuego con los datos de los sensores y cámaras mediante un sistema de fusión de datos robusto después de realizar las pruebas pertinentes y concluir su desarrollo.

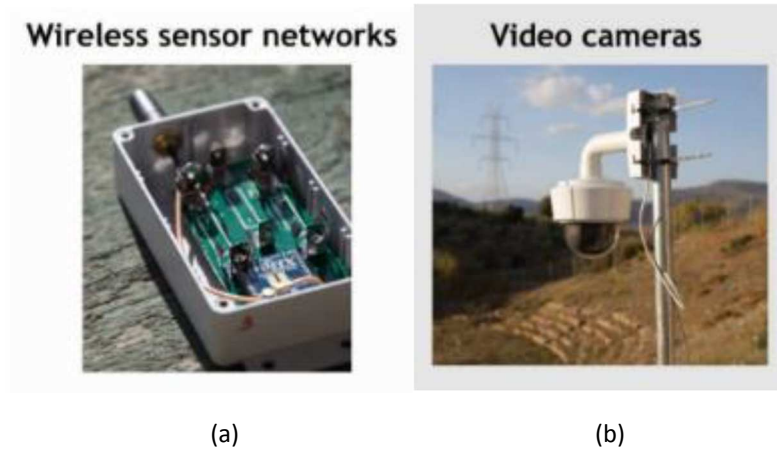


Figura 3.23: a) Nodo sensor b) Cámara termográfica

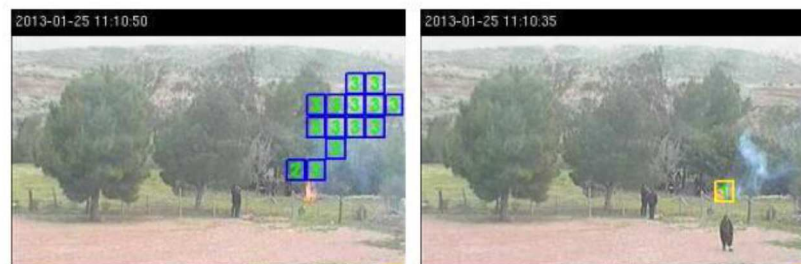


Figura 3.24: Monitorización del humo mediante cámaras CCTV. "Firesens.com"

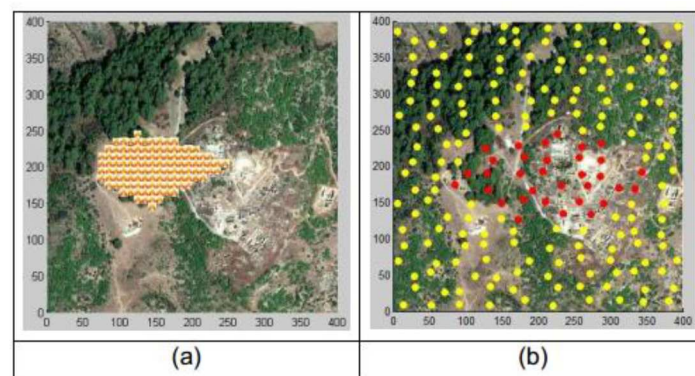


Figura 3.25: Monitorización red WSN para predicción de la dirección del incendio. "Firesens.com"

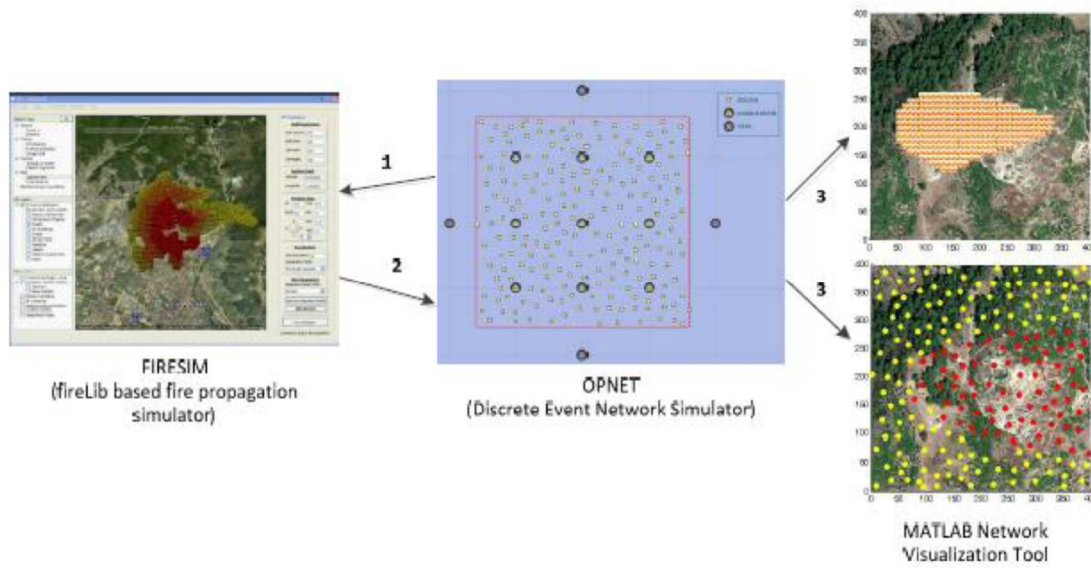


Figura 3.26: Software de monitorización red WSN para predicción de la dirección del incendio. "Firesens.com"

El siguiente proyecto abarca la temática de la necesidad de proteger zonas rurales residenciales, y además se incluyen otros propósitos como son la prevención y gestión de catástrofes naturales.

Nombrado como **Scier**, involucra tanto al sector privado como al sector público siendo financiado por ambas partes, y desarrollado por países como Francia, Portugal o España entre otros.



Figura 3.27: Pruebas eficiencia y simulación incendios e inundaciones. "Proyecto Scier"

A continuación se presenta la metodología y arquitectura de red:

La arquitectura definida consta de dos partes bien diferenciadas, por un lado encontramos el sistema de alarmas locales y por otro el sistema de computación.

El sistema de alarmas local incluye todo el equipamiento sensores, elementos de computación y redes inalámbricas desplegadas en la zona, las cuales nos proporcionaran los datos necesarios para monitorizar el escenario.

Las unidades de control asociadas a cada zona controlan la red de sensores, reciben las entradas de datos y los utilizan para ejecutar algoritmos de fusión que nos proporcionen los estados de alarma.

Estas unidades de control son capaces de operar por si mismas pero es conveniente utilizar estaciones centralizadas para obtener una mayor fiabilidad de las posibles catástrofes, incendios, etc.

No está reflejado en el proyecto un límite para el tamaño de la zona a cubrir aunque queda limitado por el número de sensores que se instalen y se asocian a cada una de estas unidades de control. Puesto que la implantación del sistema puede darse para un particular o para el estado público se hace presente la necesidad de instalar varias unidades de control si la zona a cubrir es muy amplia.

Por otro lado el sistema de control es el que incluye los elementos software, para la monitorización y el control remoto de la red de sensores, dado que la cantidad de datos que llegan a los sistemas de control pueden ser muy grandes han diseñado modelos de ejecución que proporcionan una gama completa de las predicciones independientemente para cada tipo de catástrofe.

La topología de la red es mallada como se aprecia en la imagen los sensores pasivos son dependientes de la unidad de control (el triángulo), ya que la zona no es muy extensa solo podemos ver una unidad de control pero de manera teórica incluyo la siguiente gráfica.

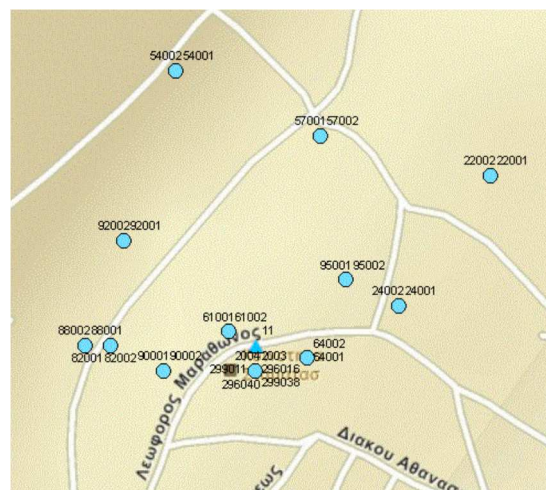


Figura 3.28: Monitorización despliegue de red WSN. "Proyecto Scier"



Figura 3.29: WSN en entornos arbolados. "www.elmundo.es"

Las tecnologías empleadas básicamente incluyen dos tipos de nodos sensores y las unidades de control y procesamiento de datos.

Los nodos de sensores funcionan con baterías, y constan de una unidad de detección, un transceptor de radio y un micro-procesador de baja potencia que controla la comunicación de radio y la adquisición de datos del sensor. Los nodos utilizados fueron desarrollados por CSEM y son WiseNodes (868Mhz).

Se instalaron dos tipos de sensores, por un lado sensores de temperatura, y por otro sensores de visión de baja resolución, y en vez de enviar las imágenes se basan en una imagen modelo para enviar las variaciones.



Figura 3.30: Nodo sensor. "Proyecto Scier"

4. Desarrollo

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto, ha sido necesaria la recogida de información en diferentes áreas, un primer lugar fue necesario establecer el lugar y estudiar en profundidad el entorno, para realizar una clasificación sobre especies vegetales y realizar una clasificación de los parámetros de interés sobre los materiales que componen el entorno. Estas características, como por ejemplo índices de refracción, permitividad, etc. Son utilizadas para realizar las simulaciones que se presentan en los siguientes apartados e intentar que estas simulaciones se aproximen con la mayor exactitud posible al escenario real. Utilizando Matlab, se han generado los escenarios, simulados mediante un código de trazado de rayos 3D.

Estas simulaciones han proporcionado resultados concluyentes en base a niveles de potencia en el escenario, estudio de la aparición de fenómenos físicos a los que se ven sometidos las ondas radio, como por ejemplo scattering, reflexión, difracción, etc.

Por último se ha realizado una mejora en la presentación de los escenarios con una mayor relevancia en el proyecto y se han generado una serie de imágenes 3D para facilitar un mejor análisis de la situación del entorno.

4.1 Descripción del entorno

El entorno en el que se centra este proyecto, son las masas forestales, formaciones vegetales arbóreas, o más comúnmente llamados bosques. Los escenarios simulados están basados en masas arbóreas situadas en la Comunidad Foral de Navarra, y por tanto el estudio que se ha llevado a cabo sobre las especies vegetales predominantes en estos bosques se ha centrado en especies autóctonas de la zona.

Sin realizar discrepancia alguna entre formaciones naturales o forestales.



Figura 4.1: Localización de Navarra en la Península Ibérica.

La zona concreta donde se han realizado las mediciones in-situ es el bosque de Orgui, situado al norte de Pamplona y donde nos encontramos un predominio vegetal de especies como roble en su gran mayoría roble Americano, y aunque en este bosque no se encuentren especies como el haya o el pino si las hemos tenido en cuenta para realizar el proyecto ya que una gran parte de las masas naturales que encontramos en Navarra están formadas por estos tipos de árboles. También se dejan ver zonas de monte bajo aunque no son relevantes para este proyecto. A continuación presento unas imágenes capturadas en el momento en que se realizaron las mediciones in situ del escenario principal e imágenes de la ubicación del lugar exacto capturadas con google maps.

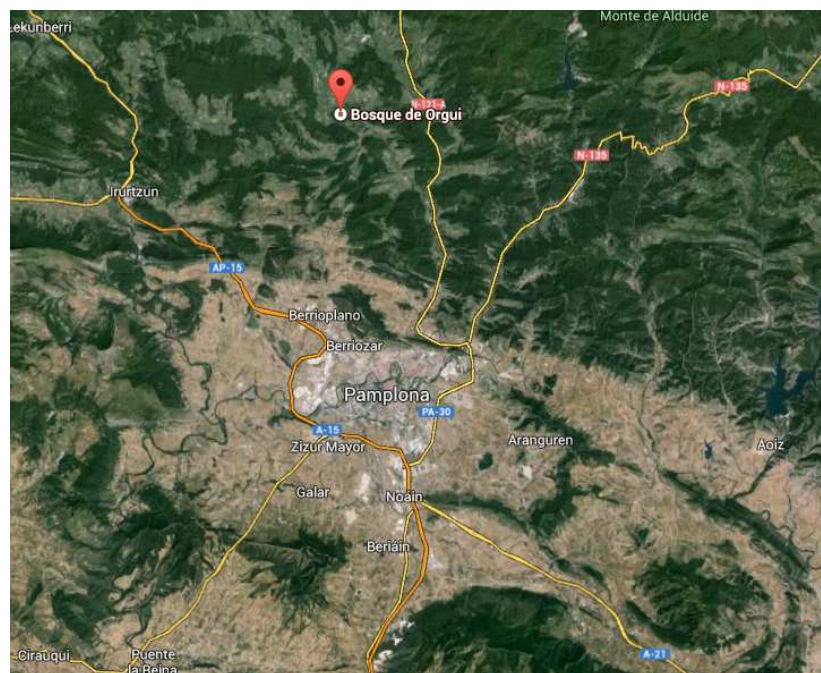


Figura 4.2: Localización Bosque de Orgui. "Imagen satélite google maps"



Figura 4.3: Situación Bosque de Orgui. "Imagen satélite google maps"

4.2 Caracterización y modelado del escenario

Una vez escogido el lugar donde se van a llevar a cabo las mediciones, se realizó un análisis de las especies vegetales para su posterior recreación en Matlab mediante un modelo aproximado.

En primer lugar nos encontramos con robles, la estructura de un roble es compleja y realizar una aproximación 3D es verdaderamente complicado, así que se optó por realizar una aproximación donde se respeta la forma principal del árbol pero modelando la copa como un cubo donde se engloban tanto hojas como ramas.

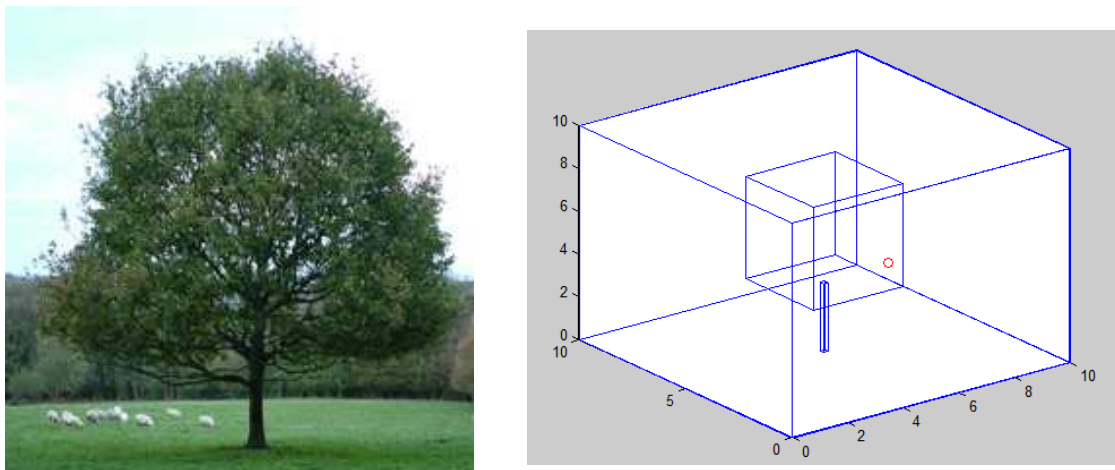


Figura 4.4: Modelado árbol Roble.

Para realizar el modelado de los robles, se ha generado una función la cual dependiendo de la altura del árbol crea el tronco y la copa, tres cuartos del árbol son tres quintos de la altura del árbol es copa y dos quintos tronco, además para generarlo de forma más exacta se tiene en cuenta también el ancho de tronco y el ancho de copa, el ancho de tronco hay que definirlo en la función, y por tanto el ancho de copa queda dependiente de esta variable adquiriendo un ancho de copa igual a la mitad de la altura del árbol.

En segundo lugar encontramos hayas, este árbol suele aparecer en agrupaciones bastante grandes, y por tanto modifica su forma debido a la influencia de los árboles que lo rodean, conocidos como hayedos este conjunto de árboles tienden a crecer mucho en busca de luz y la estructura de un individuo dentro de un hayedo es un tronco muy alto y una copa más reducida en tamaño en la parte superior.

La estructura de la copa de las hayas ha sido modelada mediante capas de cubos superpuestos, del mismo tamaño en el eje x – eje y, disminuyendo su longitud conforme aumenta la altura del árbol.

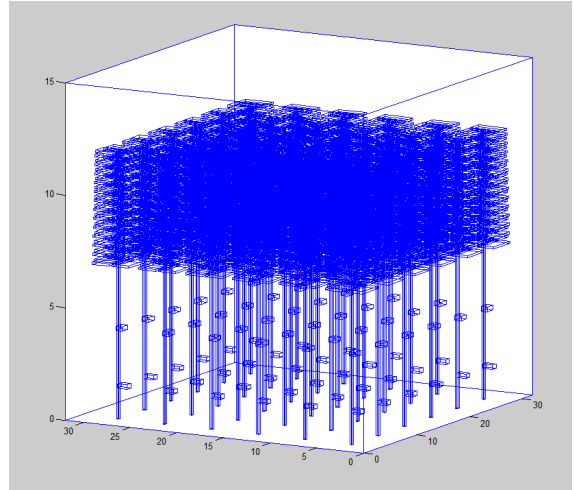


Figura 4.5: Modelado bosque de Hayas.

El modelado de las hayas, en este caso es algo diferente al de los robles, ya que su estructura es muy distinta y tienen un tronco considerablemente más alto. El proceso para generar los árboles está definido en la misma función que para los demás árboles, y en este caso el tronco de las hayas contiene en altura tres quintos de la altura total, por tanto la copa posee los dos quintos restantes, la formación de la copa se lleva a cabo de forma descendente por el árbol aumentando sus longitudes en el eje x e y en 25 cm por capa. También se han incluido dos ramas en la parte inferior del árbol con el fin de aproximarse lo más posible a la realidad y que las ondas que viajen por la parte inferior del hayedo encuentren una mínima oposición a su normal propagación.

Por último hemos creado dos modelos aproximados de pinos, uno que se asemeja más a un abeto, de menor altura con una mayor frondosidad en su parte inferior, y el otro modelo más parecido a un pino silvestre o pino negro, con un tronco de mayor tamaño, y una estructura de copa en forma de cono. Esta forma ha sido conseguida gracias a la superposición en capas de mayor longitud a menor según se asciende por el pino, como se muestra en las siguientes imágenes.

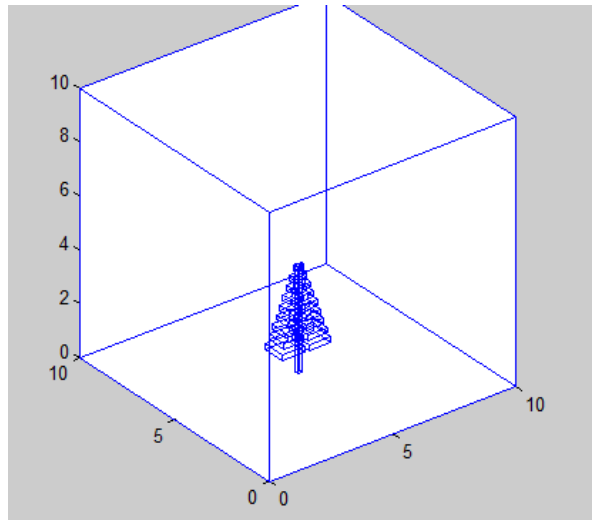


Figura 4.6: Modelado para un abeto común.

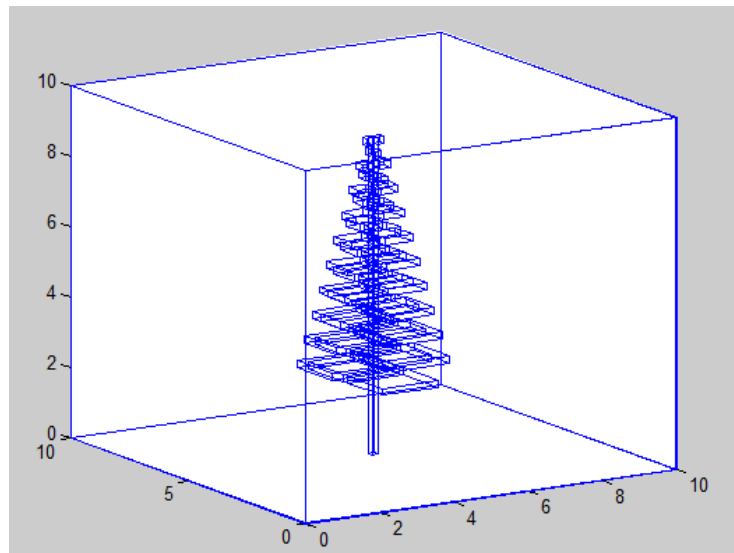
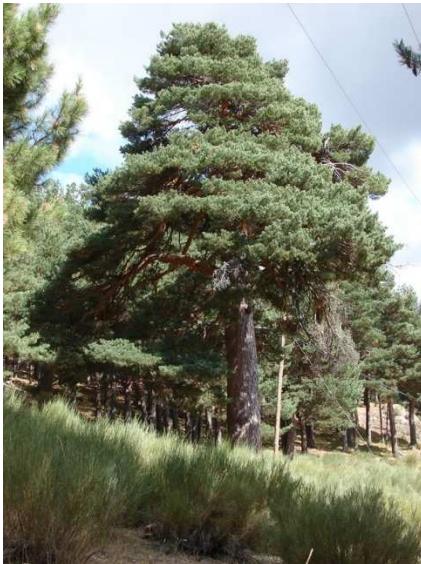


Figura 4.7: Modelado para un pino negro.

Si nos fijamos detalladamente en abetos y pinos, podemos ver alguna diferencia entre ellos, una que se aprecia a simple vista es el tronco, el abeto tiene un tronco casi inexistente ya que las ramas crecen prácticamente a la altura del suelo, sin embargo en los pinos tenemos casi un tercio de árbol que es tronco sin ramas y la parte de arriba crece en forma de cono.

Otra característica que los distingue en el modelado es la estructura generada para las ramas, ya que los pinos están compuestos por cubos tanto en el eje x como en el eje y, y por el contrario la estructura de copa de los abetos solo dispones de cubos en un eje x o y pero en ningún caso en los dos. Estas diferencias son generadas de forma automática definidas en una función creada en Matlab, donde establecida la altura a saber $< 4\text{m}$ se generan abetos y para arboles $> 4\text{m}$ se generan pinos.

Hablemos ahora sobre los suelos donde se forman estos bosques, y los cuales también ejercen una fuerte influencia en la propagación de las ondas radio. Los sustratos sobre los que se forman, generalmente son básicos y ricos en bases como sustratos ácidos, pobres en bases. Muy sensibles a encharcamientos suelen encontrarse en terrenos con pendiente, con suelos muy arenosos y muy percolables, como consecuencia de la disolución de los carbonatos del agua. También debemos tener en cuenta la acumulación en de los suelos de hojarasca y restos vegetales.



Figura 4.8: Suelo característico de un bosque.

El suelo y los materiales que componen los árboles como la madera o el follaje se ven sometidos a cambios dependiendo del clima, estas variaciones hay que tenerlas en cuenta a la hora de simular, ya que las propiedades dieléctricas de estos materiales van variando. Para obtener los valores de permitividad y conductividad se ha utilizado el libro “*handbook of Dielectric Properties of Material at Microwave Frequencies*, VYACHESLAV V.KOMAROV” estimando unos valores mínimos y máximos, mediante las siguientes funciones.

Para la madera de pino se han estimado los siguientes valores obtenidos del libro:

$$\begin{aligned} \text{Epsilon}_r &= 1.4; \\ \text{Conductivity} &= 0.021; \end{aligned}$$

Para la madera de hayas y robles se estiman los valores mediante la siguiente función dependiente de la temperatura, en nuestro caso hemos aproximado $t = 20^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} \text{Epsilon}_r &= -4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 0.0002 \cdot t^2 - 0.0212 \cdot t + 21.483; \\ \text{Conductivity} &= 3 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 0.0003 \cdot t^2 - 0.004 \cdot t + 7.3238; \end{aligned}$$

Para el follaje de los árboles se estiman los valores de la siguiente función dependiente de la humedad, entre los límites $0.1 < h < 0.3$ se ha fijado un valor intermedio de $h = 0.2$.

$$\begin{aligned} \text{Epsilon}_r &= 137 \cdot h^3 - 69.688 \cdot h^2 + 23.385 \cdot h + 1.4984; \\ \text{Conductivity} &= 1.1541 \cdot h^3 - 0.5489 \cdot h^2 + 0.1669 \cdot h - 0.0004; \end{aligned}$$

Y por último para el suelo se han estimado los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \text{Epsilon}_r &= 4.8; \\ \text{Conductivity} &= 0.98; \end{aligned}$$

4.3 Creación de los escenarios simulados

Una vez escogido el escenario y tras haber recopilado toda la información necesaria comenzamos a generar escenarios en Matlab para descubrir posibles errores a la hora de simular, y asegurarnos de un correcto funcionamiento en el código. En un principio se comenzó creando escenarios muy simples, como ya estaban creados los modelos de los tres árboles que se utilizan en el proyecto, simplemente se generaron tres escenarios cada uno de ellos con un modelo de árbol pino, haya y roble.

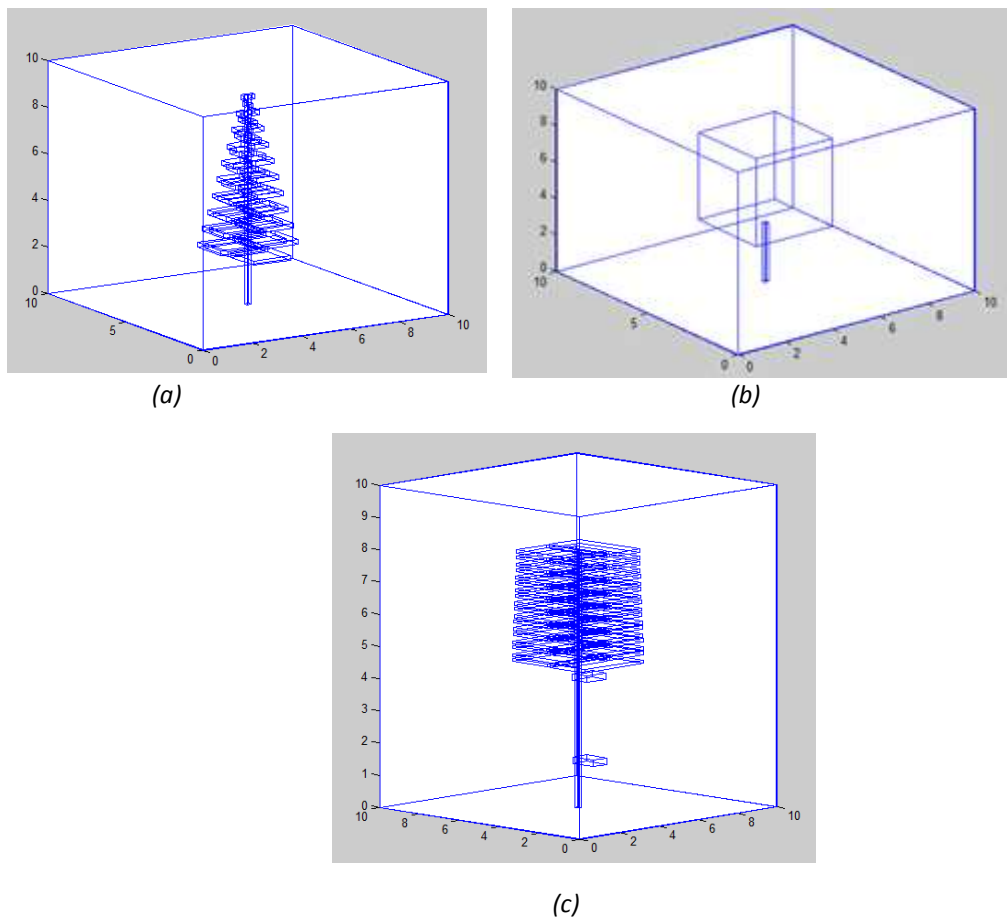


Figura 4.9: Recreación en Matlab de a) Pino negro b) Roble Americano c) Haya.

Una vez creados y simulados, se comprobó que no teníamos ningún error y el funcionamiento era el esperado, y se procedió a la creación de escenarios más grandes en los que incluimos un mayor número de árboles.

Llegados a este punto nos planteamos las simetrías existentes en los bosques entre árboles, y definitivamente solo encontramos simetría en áreas donde de masas forestales o secundarias, en las que la influencia del hombre está presente y las plantaciones se realizan de forma ordenada. Entonces se crearon dos tipos de escenarios, por un lado escenarios simétricos en los que los árboles son de una misma

clase y se colocan de forma simétrica y los escenarios en los que la aleatoriedad está presente y pretendes asemejarse más a masas naturales o primarias en las que el crecimiento de los arboles no se ve influenciado por procesos de selvicultura sino por el medio mismo.

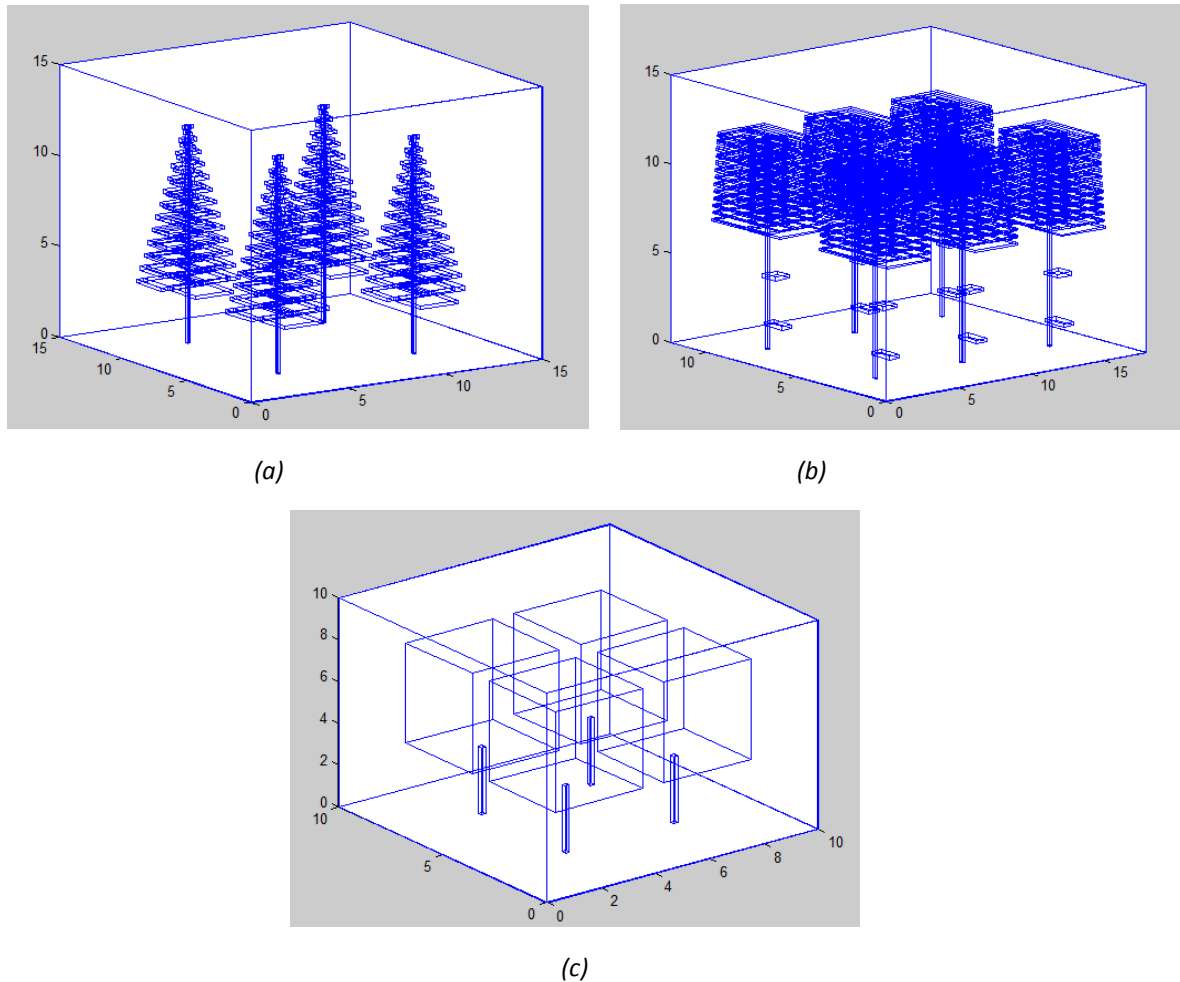


Figura 4.10: Recreación en Matlab de a) 4Pinos b) 6 Hayas c) 4 Robles.

Estos primeros escenarios simulados no tienen una mayor relevancia para la obtención de los resultados finales, ya que las áreas de estudio en estos casos serian excesivamente reducidas y no contemplarían la realidad. Aun así nos han resultado muy útiles para comprobar que nuevamente no surgió ningún tipo de error cuando generábamos más de un elemento en el escenario, y el comportamiento del medio en relación a la propagación de ondas radio empezaba a sugerir que estamos tratando un medio complicado, en el que la atenuación por el follaje es muy alta, y el scattering se deja ver aun simulando tan pocos árboles. El número de rebotes por celda aumentaba descontroladamente según creamos escenarios más y más grandes.

Tras generar estos primeros escenarios y comprobar que todo funcionaba correctamente y los resultados tenían sentido, comenzamos a incluir un mayor número de árboles.

Los escenarios que se presentan a continuación, sí se han tenido en cuenta para la obtención de resultados, ya que las áreas en las que nos movemos se asemejarían a posibles áreas de bosques reales.

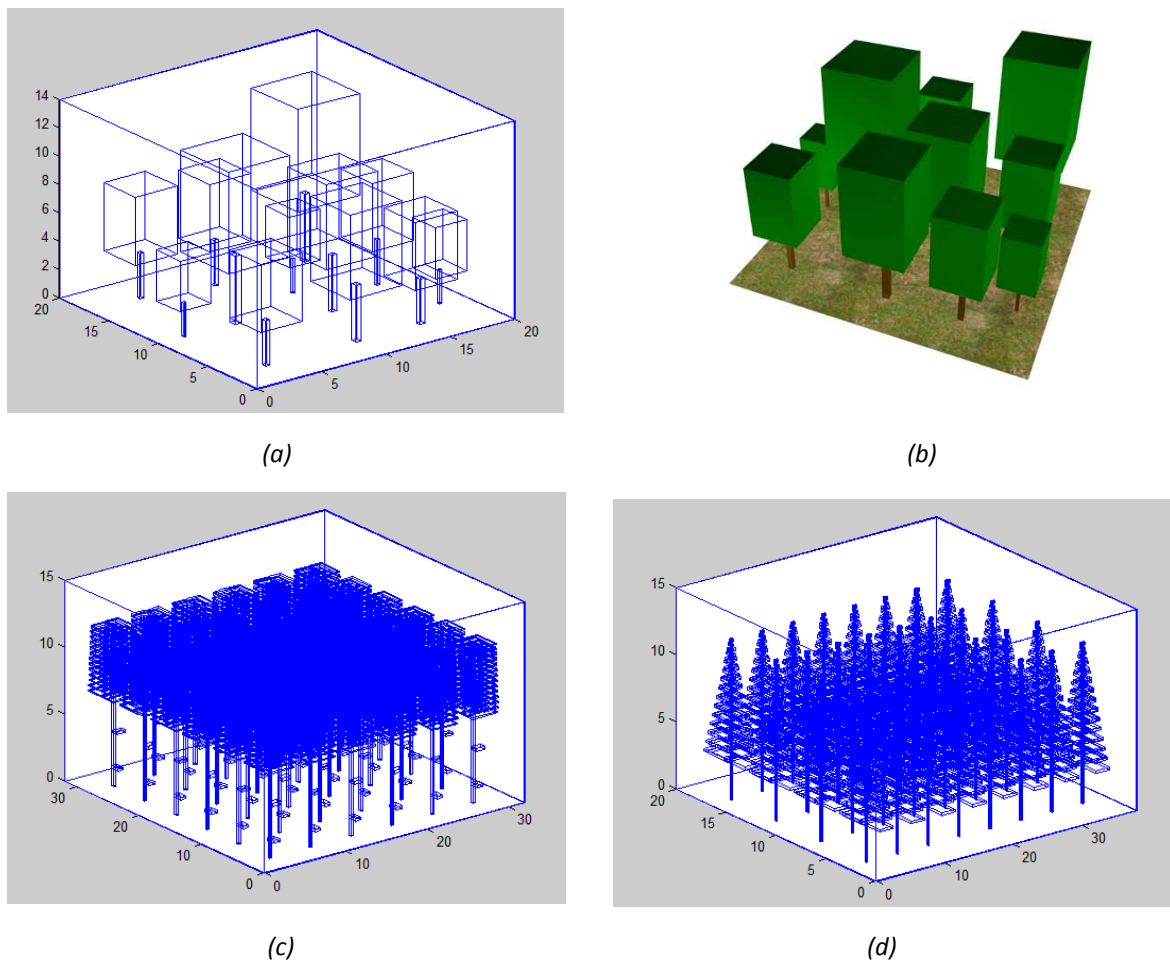


Figura 4.11: a) c) d) Creaciones en Matlab de escenarios simulados b) Representación 3D escenario 12 robles.

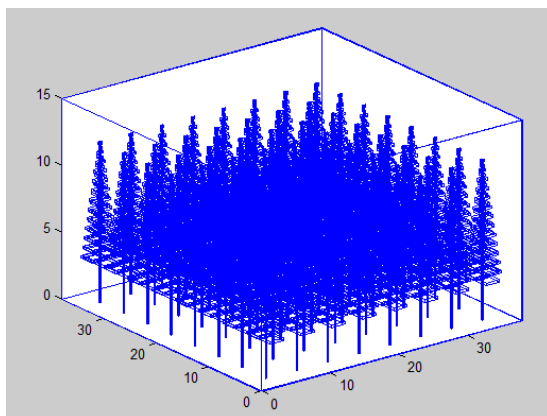
Como podemos ver en las imágenes, los escenarios de hayas y pinos son escenarios en los que aparece una simetría entre árboles y todos tienen unas mismas dimensiones, encontrar algo así en la realidad es casi imposible, aunque quizás lo más parecido son las choperas de la ribera. El generar estos escenarios de esta determinada forma, nos ha permitido sacar conclusiones sobre las alturas a las que debemos colocar los nodos sensores analizando los planos de potencia, ya que precisamente esta simetría nos proporciona planos de potencia limpios, es decir ausentes de posibles especies

vegetales que se encuentren a niveles intermedios de altura y puedan producir variaciones de la señal en las simulaciones pero no sean relevantes en un entorno real.

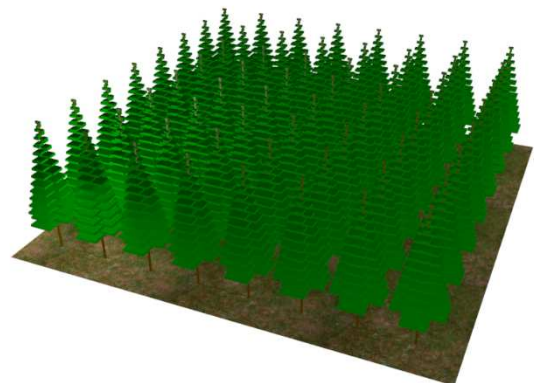
También podemos ver el escenario de los robles, donde encontramos doce robles que no guardan ninguna simetría entre ellos y cada uno es de una altura diferente y está posicionado de forma aleatoria en el escenario. Comentar que este es el escenario más grande que se ha simulado para robles, ya que estos árboles adquieren unas dimensiones muy grandes y con los resultados obtenidos son más que concluyentes para esta especie de árbol en particular.

Poco a poco los escenarios fueron creciendo en dimensiones y se incluían cada vez más y más árboles hasta llegar al punto en que mover los gráficos se hacía pesado para el software de trabajo. En las dos imágenes siguientes encontramos sesenta y cuatro hayas y pinos por separado, de nuevo generados con simetría entre árboles y unas mismas dimensiones para todos los árboles del escenario.

Gracias a estos escenarios hemos podido establecer resultados relacionados con la distancia máxima posible a establecer entre nodos sensores sin perder la conectividad entre ellos, uno de los parámetros más importantes a la hora de realizar un despliegue de una red WSN.



(a)



(b)

Figura 4.12: a) Modelado escenario 64 pinos b) Representación 3D del escenario.

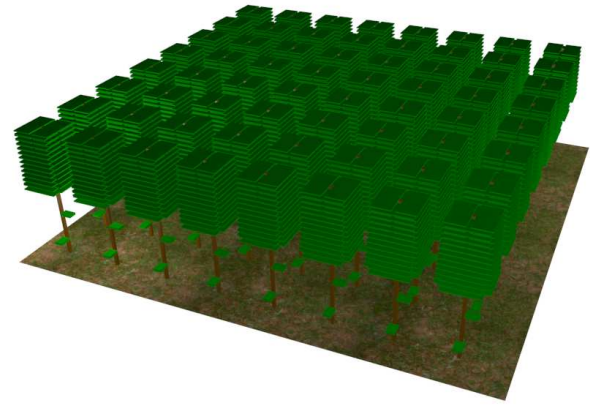
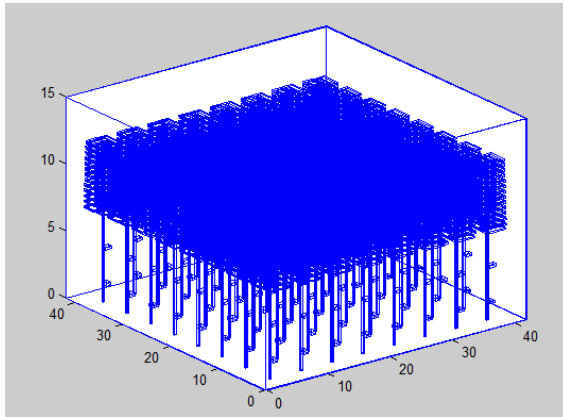


Figura 4.13: Modelado escenario 64 hayas y 3D.

Por último, se presentan los tres escenarios más importantes del proyecto, en ellos si se ha utilizado una generación aleatoria tanto de la situación de los arboles como de las dimensiones de los mismos. Son los escenarios que nos proporcionan los datos que más se asemejan a las medidas reales y por tanto los que nos han proporcionado los resultados más concluyentes.

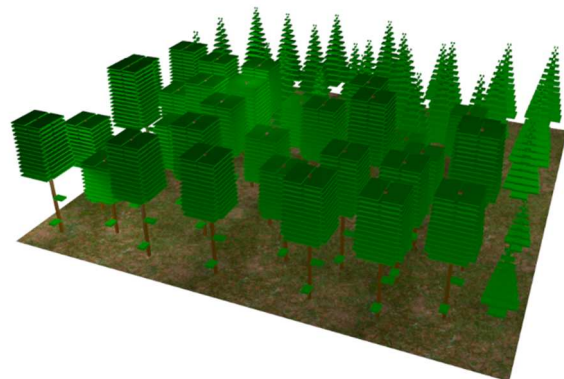
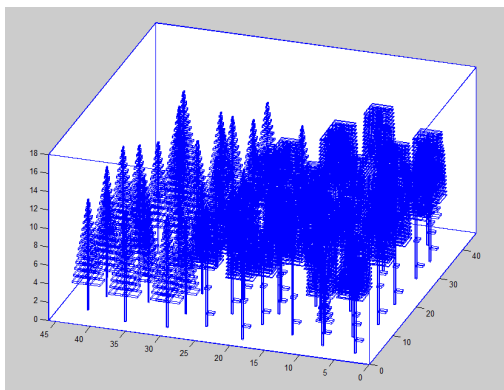


Figura 4.14: Modelado escenario mixto 32 pinos, 32 hayas y representación 3D.

El escenario de la gráfica anterior simula una sección de bosque donde hayas y pinos quedan divididos en los dos lados del escenario, y nos permite estudiar el comportamiento frente a las ondas radio de ambas especies. Dependiendo de la situación donde se coloca la antena para realizar la simulación, obtenemos unos resultados u otros ya que los pinos atenúan más en alturas bajas, y las hayas en alturas más altas, próximas a la altura de copa.

Para la creación del siguiente escenario se ha realizado una aleatorización en la posición de los árboles que componen el escenario anterior, por tanto las dimensiones de los árboles son las mismas, al igual que el número de ellos.

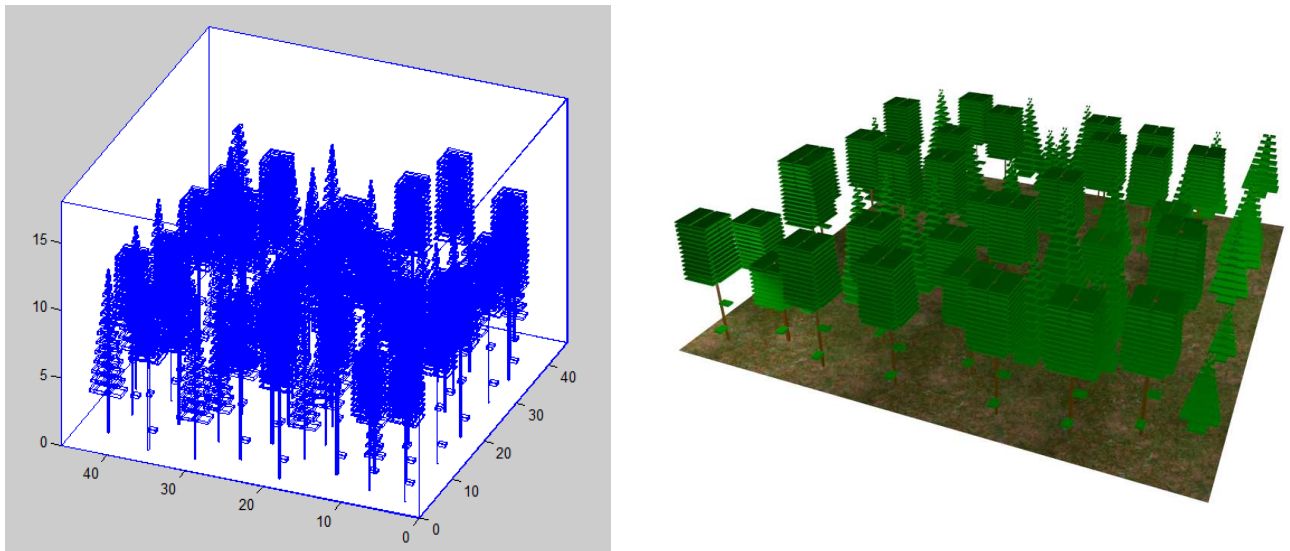


Figura 4.15: Modelado escenario final y representación 3D.

Como se aprecia en las imágenes, este escenario es una recreación lo más real posible de un área limitada de bosque formado por hayas y pinos, se han realizado simulaciones situando la antena de un nodo en diferentes posiciones y diferentes alturas, para obtener los resultados que a continuación se presentan en el apartado de simulaciones y resultados.

4.4 Resultados I: Primeras simulaciones

La finalidad de realizar estas primeras simulaciones, fue comprobar que no se producían errores en el código cuando generábamos escenarios más grandes de lo que habíamos probado hasta el momento, y los resultados que se obtenían no mostraban convergencia del código y eran acordes a lo esperado.

Estos escenarios tienen unas dimensiones iguales o muy parecidas a los escenarios finales de los cuales hemos obtenido los resultados más relevantes, por tanto nos han servido de guía para fijar varios parámetros necesarios para realizar las simulaciones correctamente. Un parámetro fundamental es la resolución, esta se fija en los ejes

(x, y, z) subdividiendo el escenario en cubos de (x, y, z) dimensiones, los resultados que se obtienen de las simulaciones, son la suma global del estudio individual de cada uno de estos cubos en los que se analiza la señal recibida en cada uno de ellos, y se muestran niveles de potencia recibida, número de revotes y potencia de estos en cada cubo, etc. Estas simulaciones, nos han ayudado también a determinar las alturas más propicias para la instalación de las antenas en los escenarios, para conseguir una propagación óptima con la menor atenuación posible.

A continuación se presentan tres escenarios, dos de ellos con distribuciones simétricas en relación a la posición de los árboles, y otro con una distribución aleatoria.

4.4.1 Primer escenario: 64 pinos

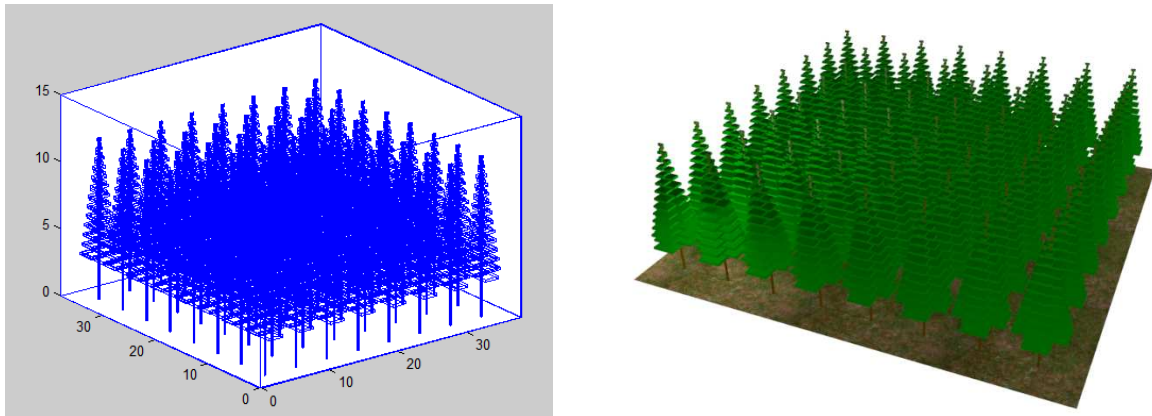


Figura 4.16: a) Modelado escenario 64 pinos b) Representación 3D del escenario.

En este primer escenario, se han simulado 64 pinos, con una altura de 12m cada uno de ellos, y dejando una separación mínima de 0.5m en el eje x, 0.3m en el eje y para recrear un escenario con una densidad de follaje muy alta. Con unas dimensiones de 38x38x15m, se asemeja mucho a una posible área en la que llevar a cabo medidas reales, y como ya se ha comentado muy próximo a las dimensiones del escenario final.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	2.4 GHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	1, 1, 1 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

Este escenario, se ha simulado colocando la antena en dos posiciones diferentes y a 8m de altura.

En las gráficas vemos una progresión en altura empezando en 4m hasta 10 de altura, con la antena centrada observamos que tenemos unos niveles de atenuación mucho mayores en la parte baja de los pinos que en la parte alta, ya que la estructura del pino es en forma de cono y las ramas bajas son de un tamaño bastante mayor y por tanto la densidad de follaje es mayor en alturas más próximas al suelo.

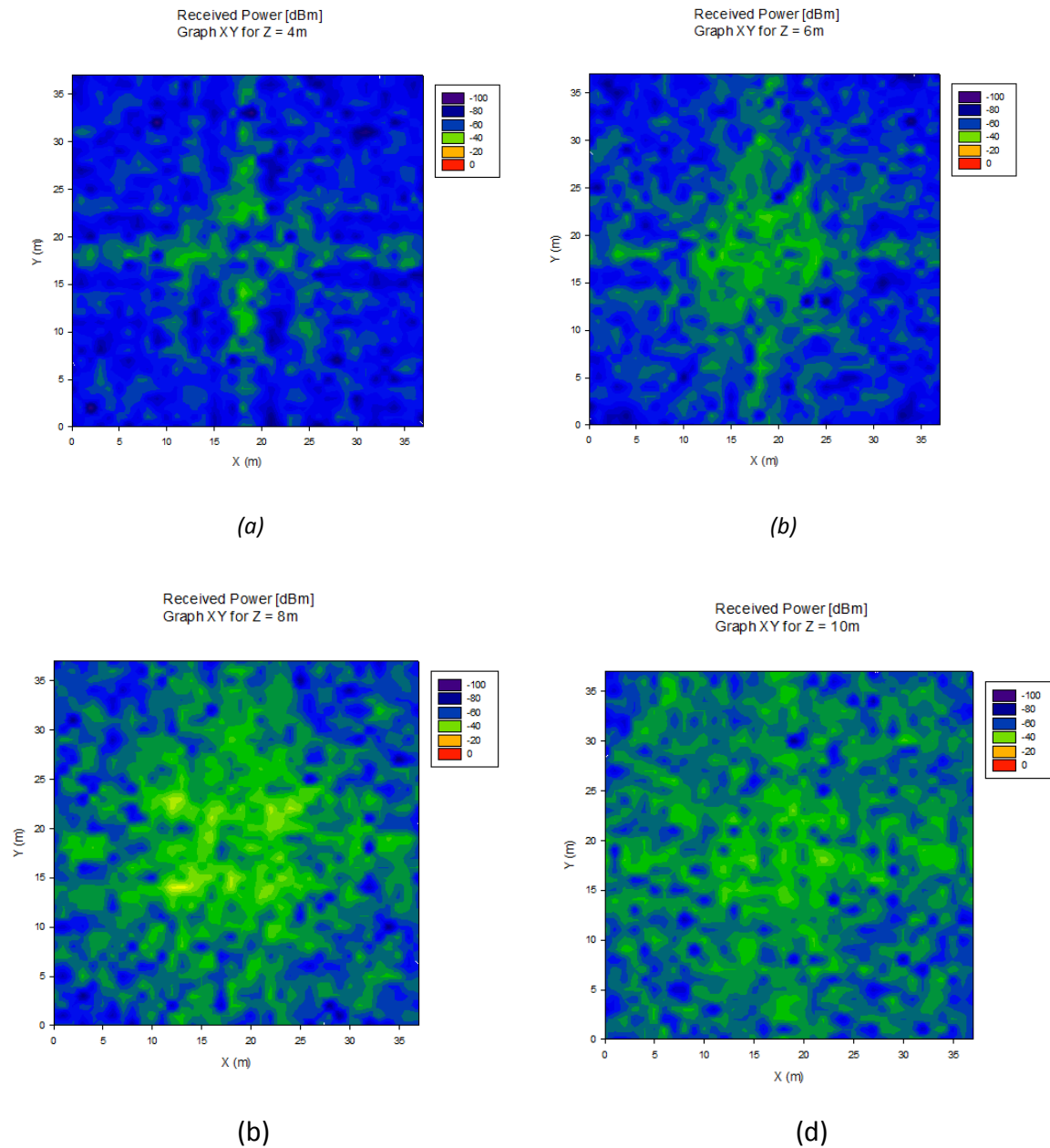


Figura 4.17: Diagramas de potencia para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

En las siguientes gráficas vemos los resultados con la antena cambiada de posición, al igual que en los resultados anteriores, vemos como en alturas superiores a la altura de antena la propagación se ve menos sometida a atenuación y por tanto conseguimos distancias mayores para poder instalar nuestros nodos sensores. También podemos ver como a consecuencia de la propagación multitrayecto destructiva aparecen nulos o puntos de muy baja potencia recibida dentro de la zona de cobertura

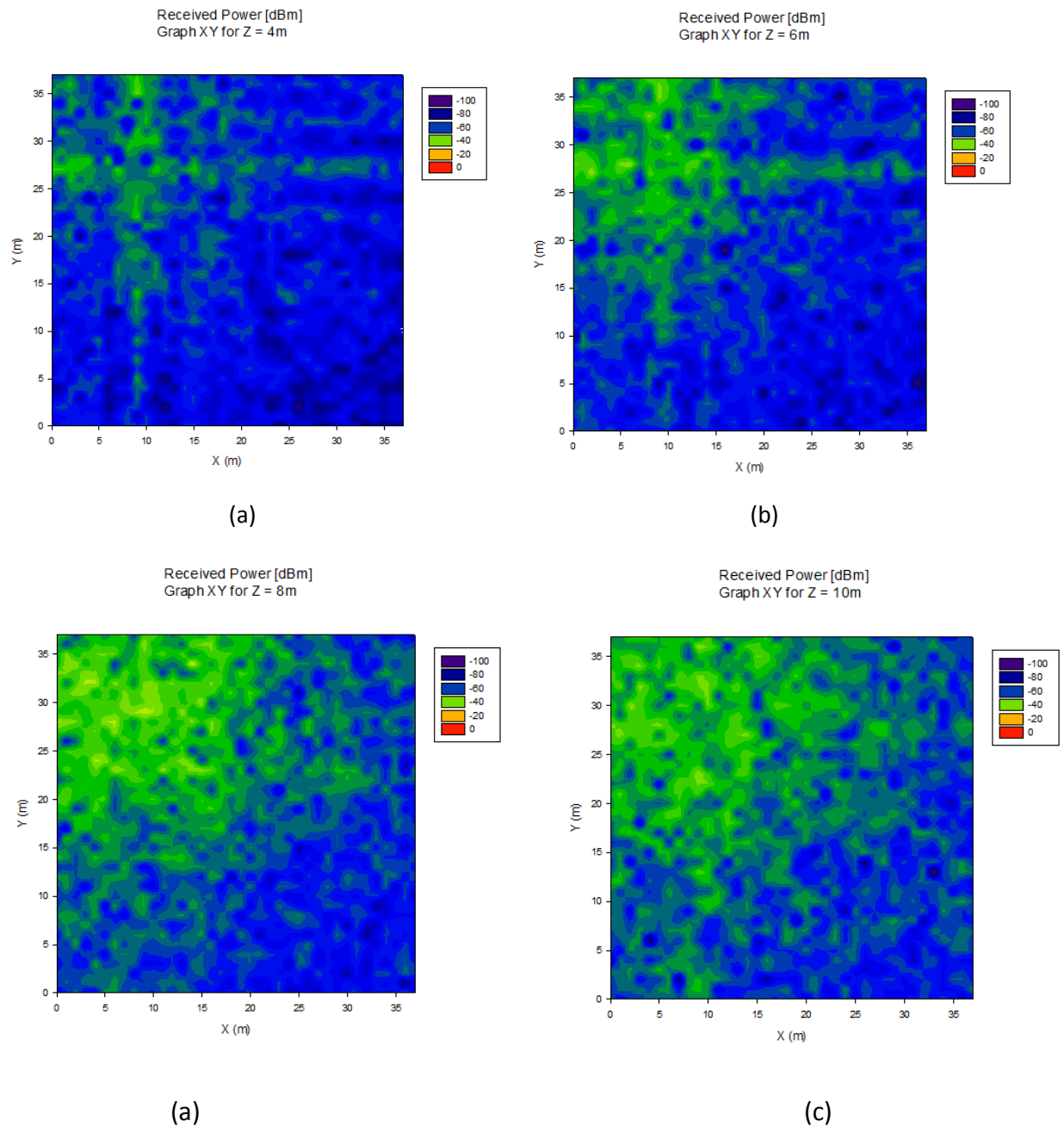


Figura 4.18 Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

En la siguiente gráfica, podemos ver los revotes que se producen en una celda en concreto del escenario para analizar el retardo de potencia que se produce, y como se puede ver debido a la propagación multitrayecto y el fenómeno de scattering que se produce en el follaje, el número de rayos que atraviesan la celda es bastante grande, ascendiendo hasta 180 revotes, los cuales se van atenuando en potencia paulatinamente, hasta el punto en que aparecen revotes con -200 dBm.

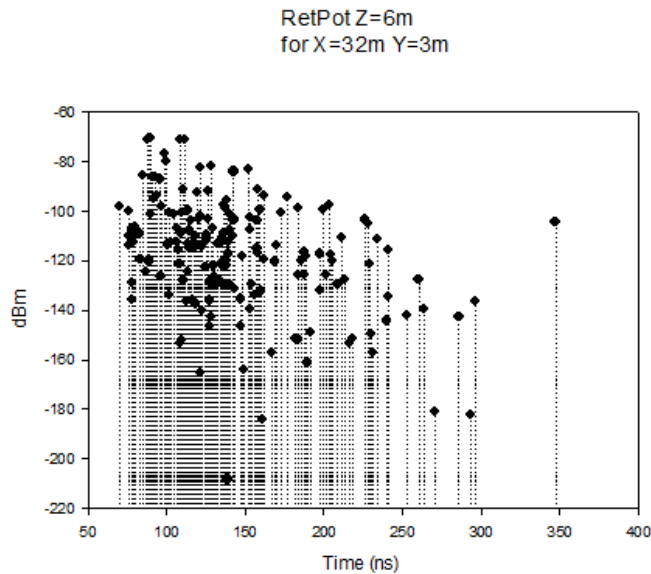


Figura 4.19: Retardo potencia para una celda del escenario.

Concluimos entonces con la ayuda de la simulación de este escenario, que en masas forestales o secundarias formadas por pinos únicamente y con una distribución simétrica, es conveniente instalar los nodos sensores aproximadamente a una altura media dependiendo de la altura de los árboles, y así obtendremos los radios de cobertura mayores.

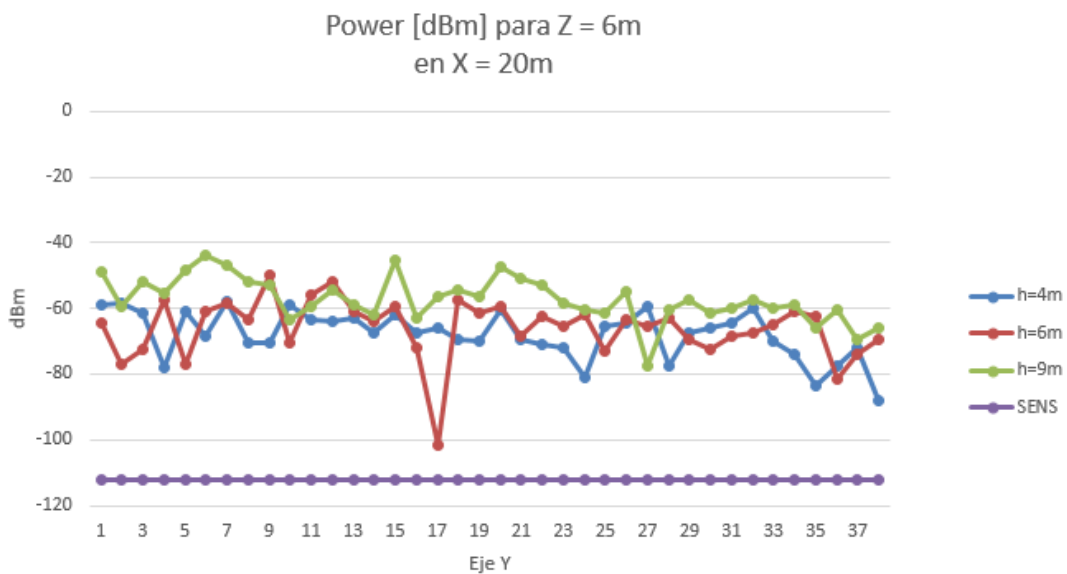


Figura 4.20: Radial de potencia para tres alturas diferentes.

En la gráfica anterior, podemos ver un corte o radial para diferentes alturas realizado en el centro del escenario, como se aprecia la variación de potencia que se experimenta no es demasiado relevante en distancias cortas como pueden ser estos 40 metros simulados, pero si es un valor a tener en cuenta ya que si comparamos el corte a 9 metros con el corte a 4m vemos variaciones de hasta 40 dBm, también se aprecia un

punto nulo en 17m, producido por la atenuación o anulación de la señal debido a los revotes producidos por la propagación multitrayecto.

4.4.2 Segundo escenario: 64 hayas

El segundo escenario analizado, y nuevamente utilizado para estudiar el comportamiento de una especie de árbol en concreto, ayudándonos a fijar los parámetros necesarios a tener en cuenta para escenarios finales, es el formado por 64 hayas, situadas de forma simétrica, y todas ellas con una altura de 12m. Cubre un área de 42X42X15m, donde podemos encontrar 8 filas y 8 columnas en el XY.

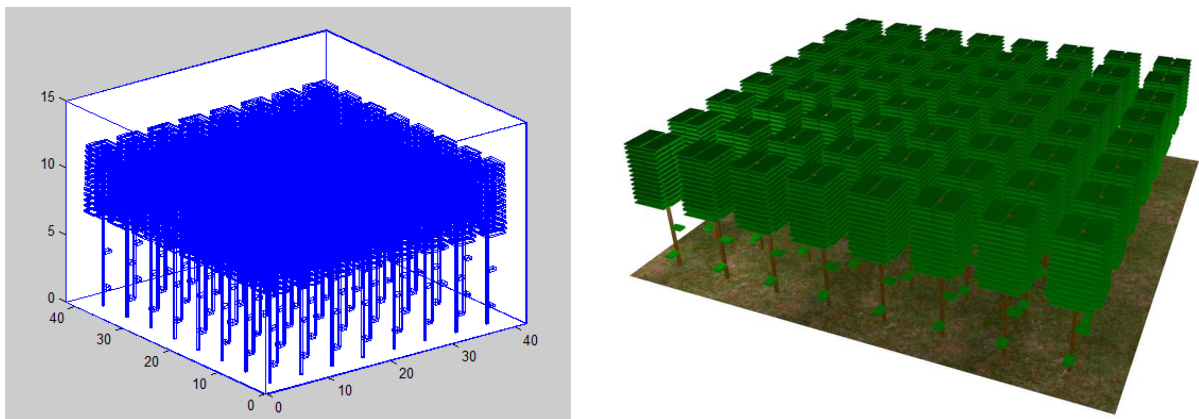


Figura 4.21: Modelado escenario 64 hayas y representación 3D.

A continuación se muestran los parámetros principales utilizados en la simulación:

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	2.4 GHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	2, 2, 2 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

En este caso se ha optado por simular con una resolución de dos metros, formando de esta forma cubos de 2x2x2m, y obteniendo resultados algo menos precisos que en el escenario anterior que tenía una resolución de 1m, pero debido a las características de este escenario donde en la parte baja de los arboles encontramos muchos menos elementos que los que podíamos encontrar en el escenario anterior, no es demasiado relevante a ver variado la resolución.

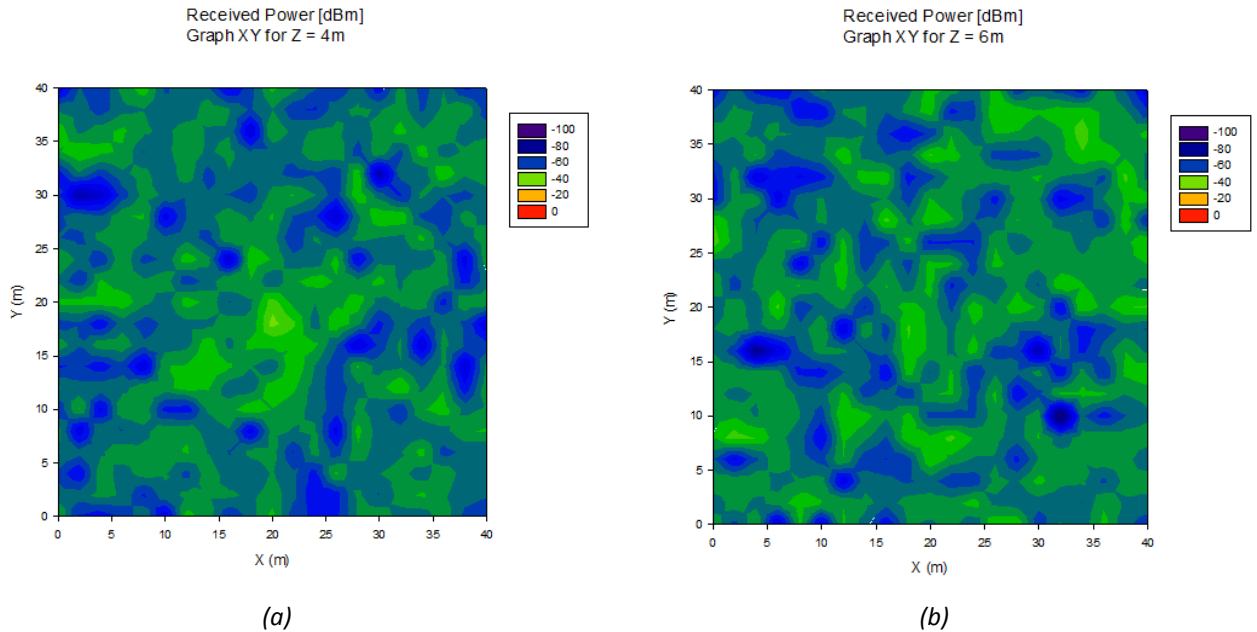


Figura 4.22 Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m.

Estas dos gráficas, representan cortes en el plano XY, donde podemos ver la potencia recibida en el escenario, como vemos aparece una distribución de potencia bastante más uniforme si la comparamos con el escenario anterior, para un área de 42x42m, un área considerable vemos como en los extremos del escenario tenemos niveles aproximados a -40, -50 dBm, esto es normal en parte, ya que el follaje en la parte baja de las hayas es mínimo y estas gráficas corresponden a 4m y 6m que es la altura de la antena. También se aprecian zonas en ocasiones puntos donde el nivel de señal es mucho más bajo, y esto es debido a el choque de las ondas con el tronco de las hayas, las cuales en parte se ven atenuadas, y también reflejadas, y por tanto nos deja la aparición de nulos no necesariamente por debajo de sensibilidad pero en los que la señal si se ve afectada de manera notable.

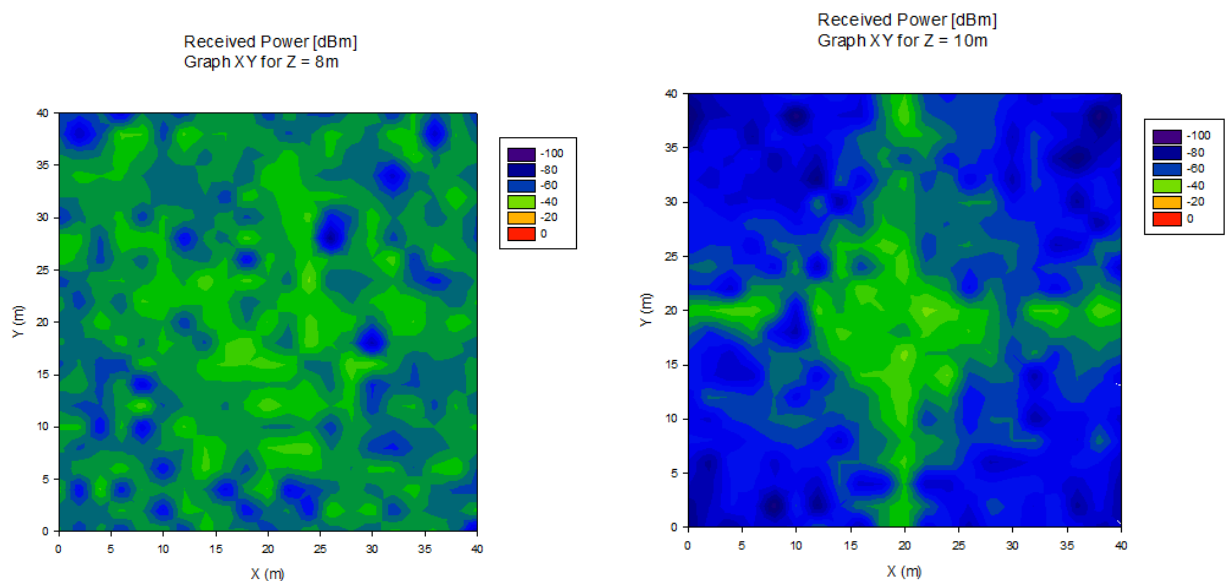


Figura 4.23 Diagramas de potencia en XY para alturas c) 8m d) 10m.

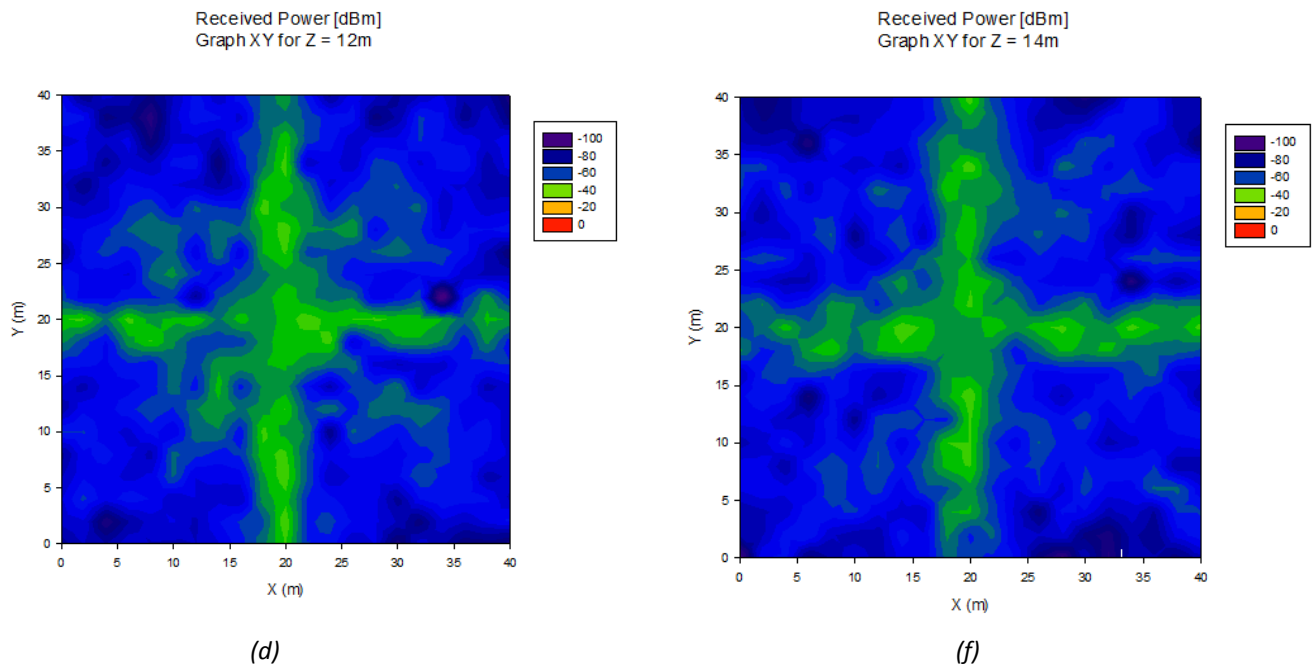


Figura 4.24: Diagramas de potencia en XY para alturas d) 12m f) 14m.

Si observamos las cuatro gráficas anteriores, se aprecia un cambio muy significativo entre la primera correspondiente a la altura de 8m y la última correspondiente a 14m, el plano de potencia recibida a 8m tiene una distribución parecida a los de 4m y 6m ya que como sucede casi siempre, las alturas óptimas para transmitir son altura de antena y hasta dos metros por debajo de antena y dos metros por encima, obteniendo los radios de cobertura mayores.

Este cambio del que hablamos es debido a la influencia de las copas de las hayas en el escenario, a partir de 9m aproximadamente empiezan a interferir en las ondas radio, atenuando de forma brutal su nivel de señal, ya que las copas de las hayas son muy frondosas, y como se ve en las gráficas la única parte que se ve representada en verde con un nivel de señal aproximado a -40 dBm son las calles XY donde está situada la antena, ya que está en el centro del escenario y por encima no encuentra resistencia alguna a la propagación.

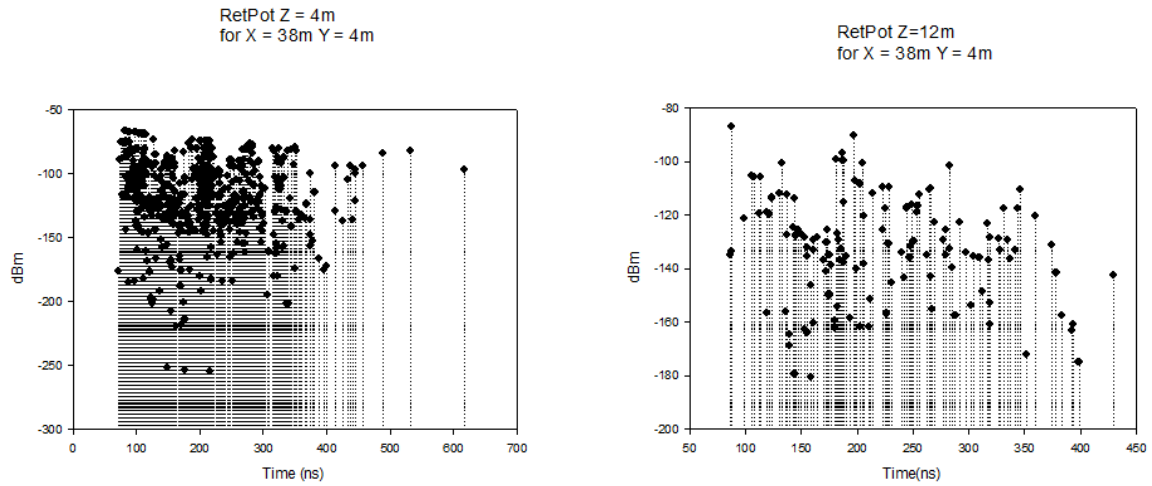


Figura 4.25: Retardo potencia para una celda en 4m y otra en 12m del escenario.

Si comparamos las dos graficas anteriores, para una celda cualquiera en alturas por debajo de 6m, el retardo de potencia nos deja ver un número de revotes muy alto, pudiendo alcanzar los 400 revotes, aunque si estos se discriminan para un nivel de señal por encima de -90 dBm, el número se reduce notablemente, por el contrario si analizamos el número de revotes para celdas situadas en alturas superiores entre 10 y 14m en este escenario, este número de revotes se reduce notablemente hasta los 140 aproximadamente aunque como se aprecia en la gráfica la mayoría de ellos se encuentran de nuevo por debajo de nivel de sensibilidad de los receptores, ya que a estas alturas las copas de las hayas atenúan fuertemente la señal.

Este escenario, también ha sido simulado para la frecuencia de 868 MHz, para realizar una comparación de los resultados si utilizamos 2.4 GHz, a continuación se presentan los resultados obtenidos simulando con los siguientes parámetros.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	868 MHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	2, 2, 2 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

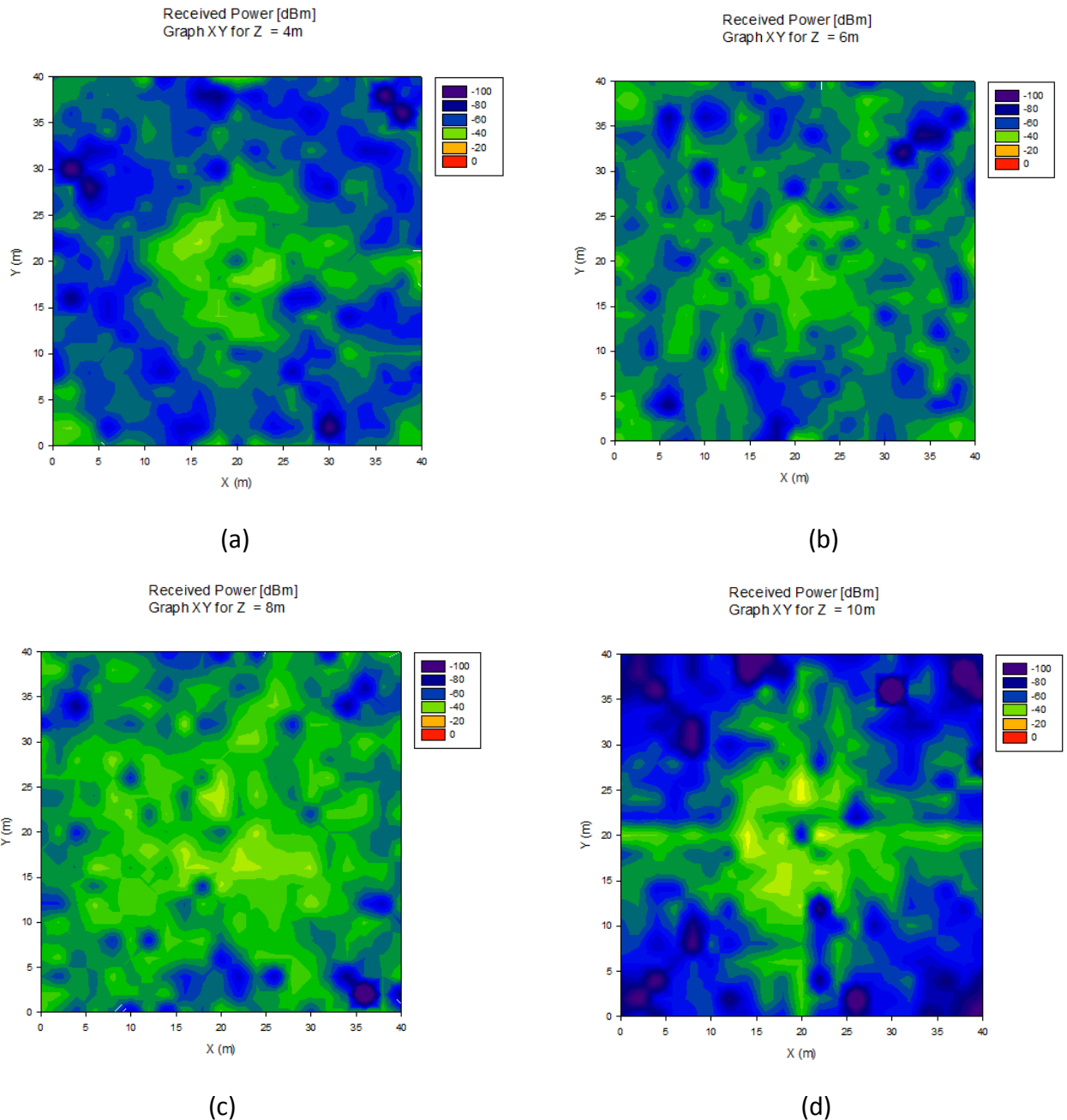


Figura 4.26: Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

Como vemos en las gráficas anteriores, en la frecuencia de 868 MHz las ondas se propagan con una mayor dificultad en alturas más bajas, ya que la longitud de onda crece y el impacto ante objetos como las hojas de una longitud similar afecta de manera más significativa a las ondas radio, y su atenuación es mayor. Claramente podemos verlo si comparamos la gráfica obtenida a una altura de 4m en la simulación a 2.4 GHz y en la simulación a 868 MHz. También podemos ver como en este caso la altura óptima para transmitir suponiendo la antena a 6m de altura, estaría en el rango de entre 6m y 8m donde las pérdidas se hacen menores, ya que nos encontramos por debajo de la capa

más espesa de vegetación que serían las copas de la hayas, como se dejan ver en la última gráfica, donde el corte en potencia recibida representa la altura de 10m, a la altura de la copa de las hayas y por tanto se nota claramente su influencia en la atenuación de las ondas.

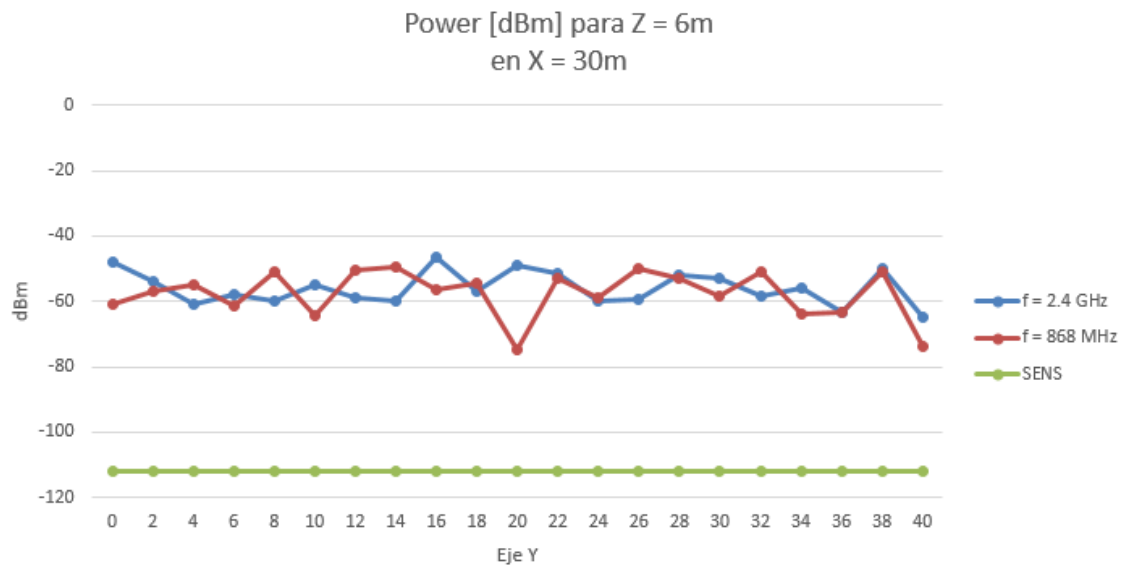


Figura 4.27: Radiales de potencia para dos frecuencias.

En este caso se muestra el mismo corte en el escenario para las dos frecuencias diferentes simuladas, en la gráfica podemos ver como la variación entre ambas señales es mínima, y los niveles de potencia que se experimentan a lo largo del eje Y exceptuando un pico en la parte central son prácticamente iguales en un rango de 10 dBm de variación aproximadamente, y por supuesto ambas señales cumplen con el nivel de sensibilidad requerido por el sistema para una transmisión efectiva.

4.4.3 Tercer escenario: 12 robles

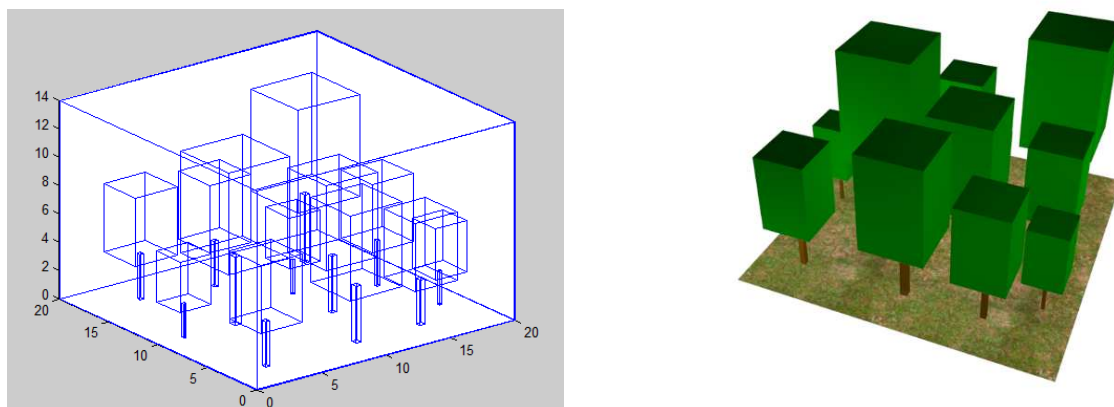


Figura 4.28: Modelado escenario 12 robles y representación 3D.

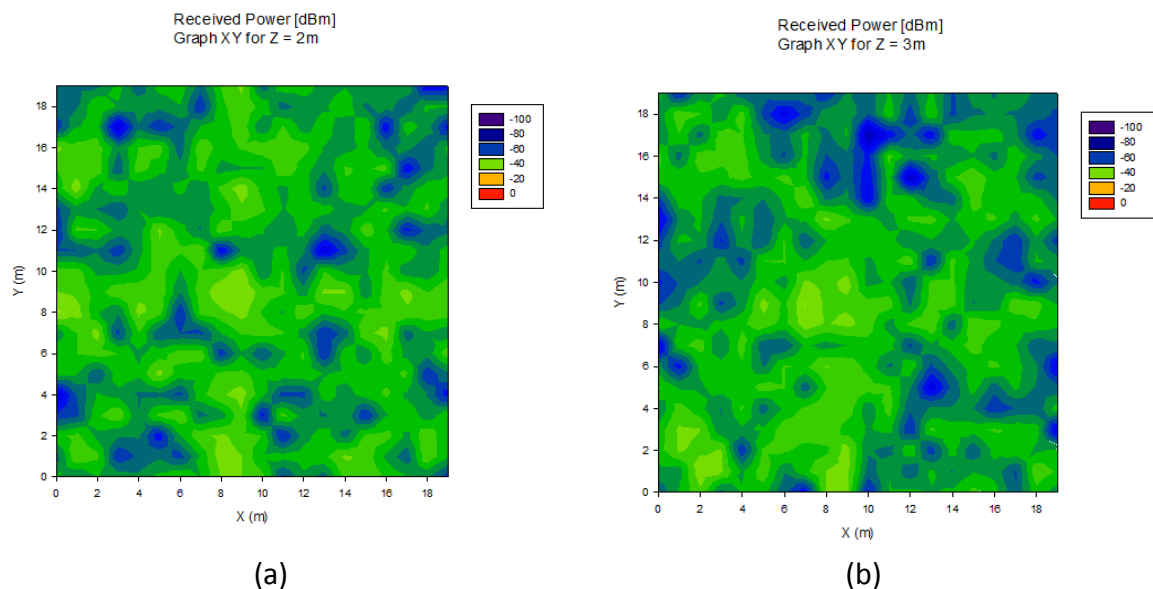
En este tercer escenario, se simulan un numero de 12 robles situados de forma aleatoria en un escenario de 20x20x14 m, y dotando a los arboles de unas dimensiones nuevamente aleatorias para intentar simular un área que se aproxime a la realidad lo máximo posible.

Los robles han sido la única especie modelada y no incluida en el escenario final, ya que tras analizar la composición de los bosques navarros, es más improbable encontrar formaciones de robles incluidas entre hayas o pinos que encontrar formaciones de hayas y pinos. El escenario se ha simulado utilizando dos resoluciones de 1 y 2 m.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	2.4 GHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	1, 1, 1 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

Para realizar la simulación, se ha optado por colocar la antena a 3m de altura ya que la altura del árbol más alto son 12m y vamos a encontrar las mayores dificultades para transmitir en alturas ocupadas por las copas de los árboles.



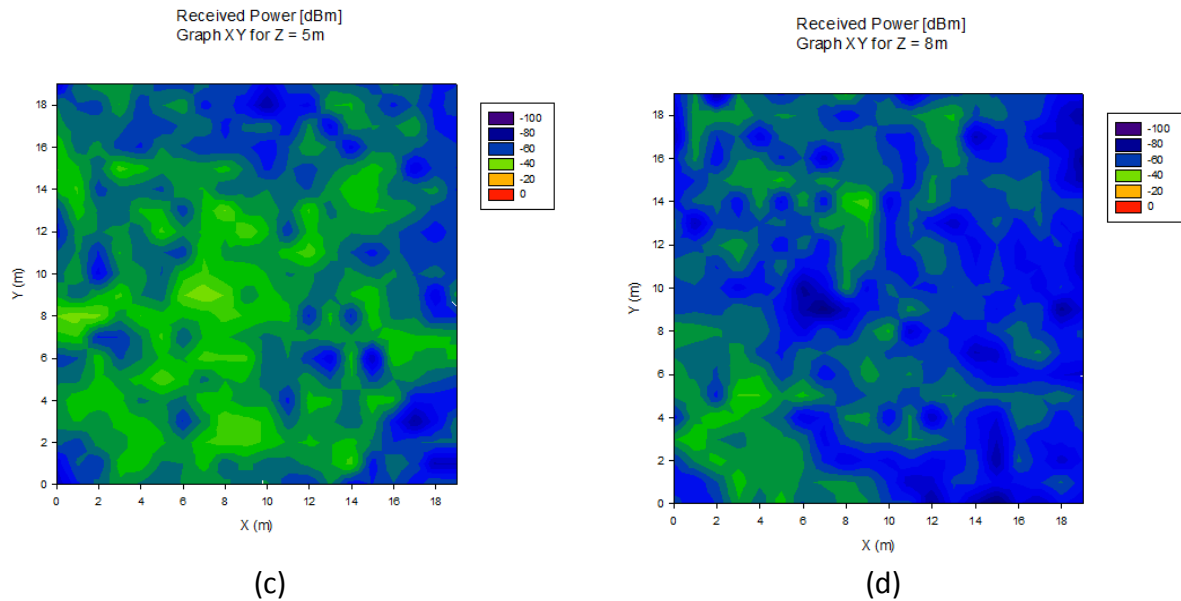


Figura 4.29 Diagramas de potencia en XY para alturas a) 2m b) 3m c) 5m d) 8m.

Podemos ver como en los diagramas de potencia recibida de las gráficas anteriores, como la señal se ve bastante más degradada en alturas situadas por encima de la antena, ya que en 3m no encontramos a penas elementos que nos atenúen la señal, sin embargo a partir de los 5, 6 m de altura van apareciendo copas de los arboles con menor altura y potencia de la señal transmitida se atenúa notablemente aun siendo un escenario relativamente pequeño. A continuación se presentan dos gráficas para alturas de 10 y 11 m, donde la atenuación producida por las copas de los robles se hace aún más notable.

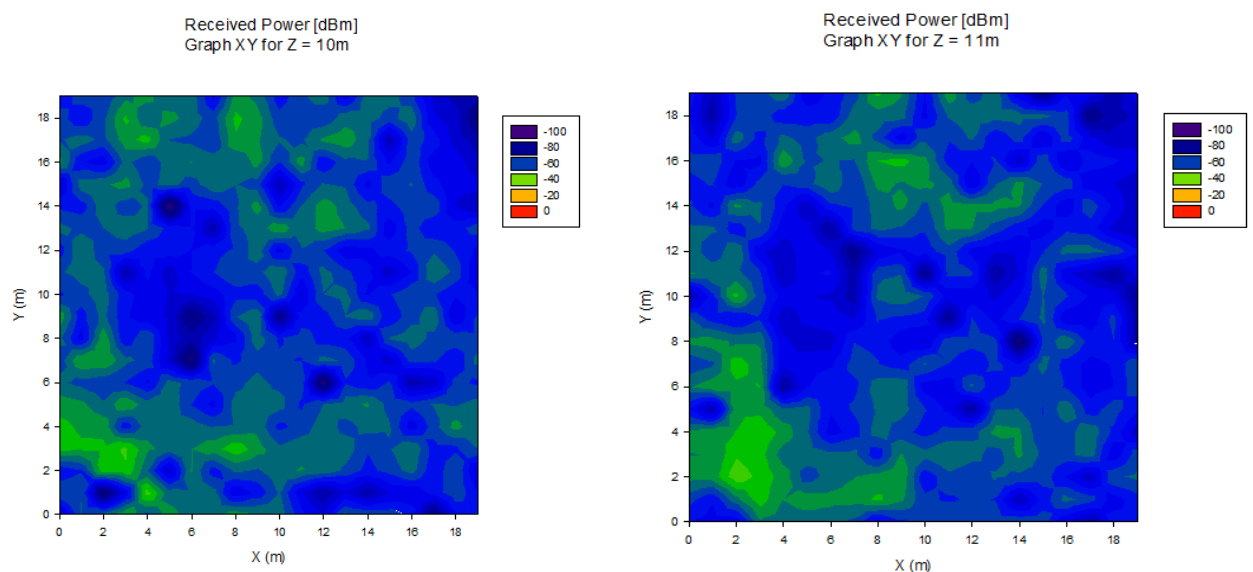


Figura 4.30: Diagramas de potencia en XY para alturas de 10 y 11m.

Como se comentaba anteriormente, a estas alturas la influencia de las copas de los árboles en la señal provoca una mayor atenuación, y como vemos los niveles de potencia caen rápidamente, sin nos fijamos detenidamente en las gráficas aparecen puntos de un azul más oscuro que en el resto de la gráfica, en estos puntos la señal cae por debajo de los niveles de sensibilidad y es debido a la reflexión de las ondas, que se produce en las copas causando la anulación de la señal en estos puntos.

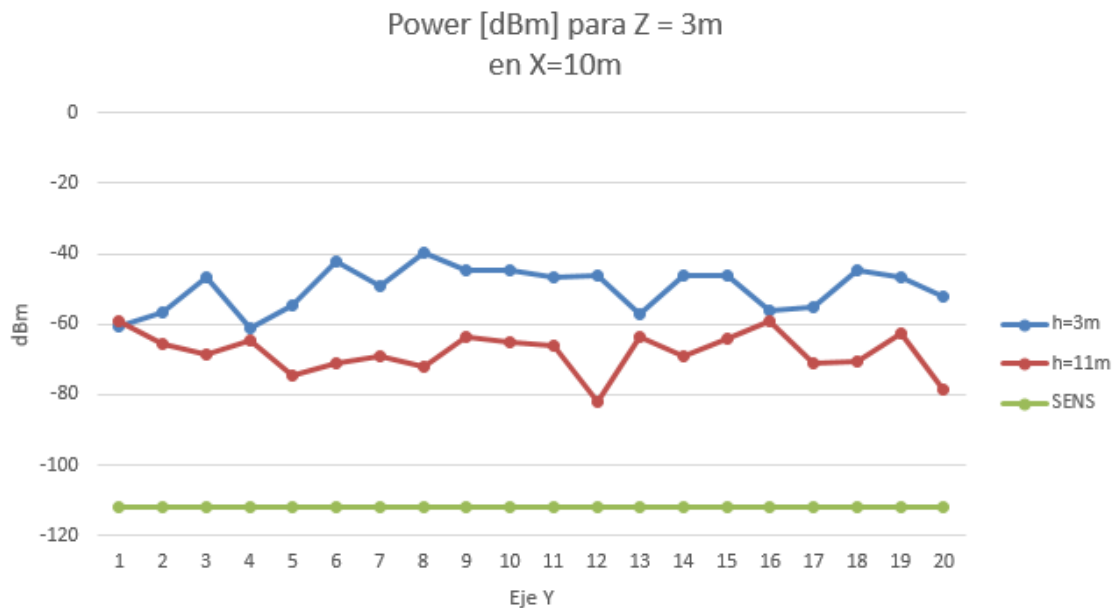


Figura 4.31: Radial de potencia para dos alturas.

Vemos ahora un corte en X = 10m, y analizamos la diferencia de potencia en 3 y 11m donde se aprecia una diferencia aproximada de uno 20 dm. Cumpliéndose los niveles de sensibilidad requeridos ya que el escenario no es muy grande, pero si podemos hacernos una idea aproximada de la atenuación producida por la frondosidad de las sopas de los robles.

Vemos ahora los resultados obtenidos con una resolución de 2m.

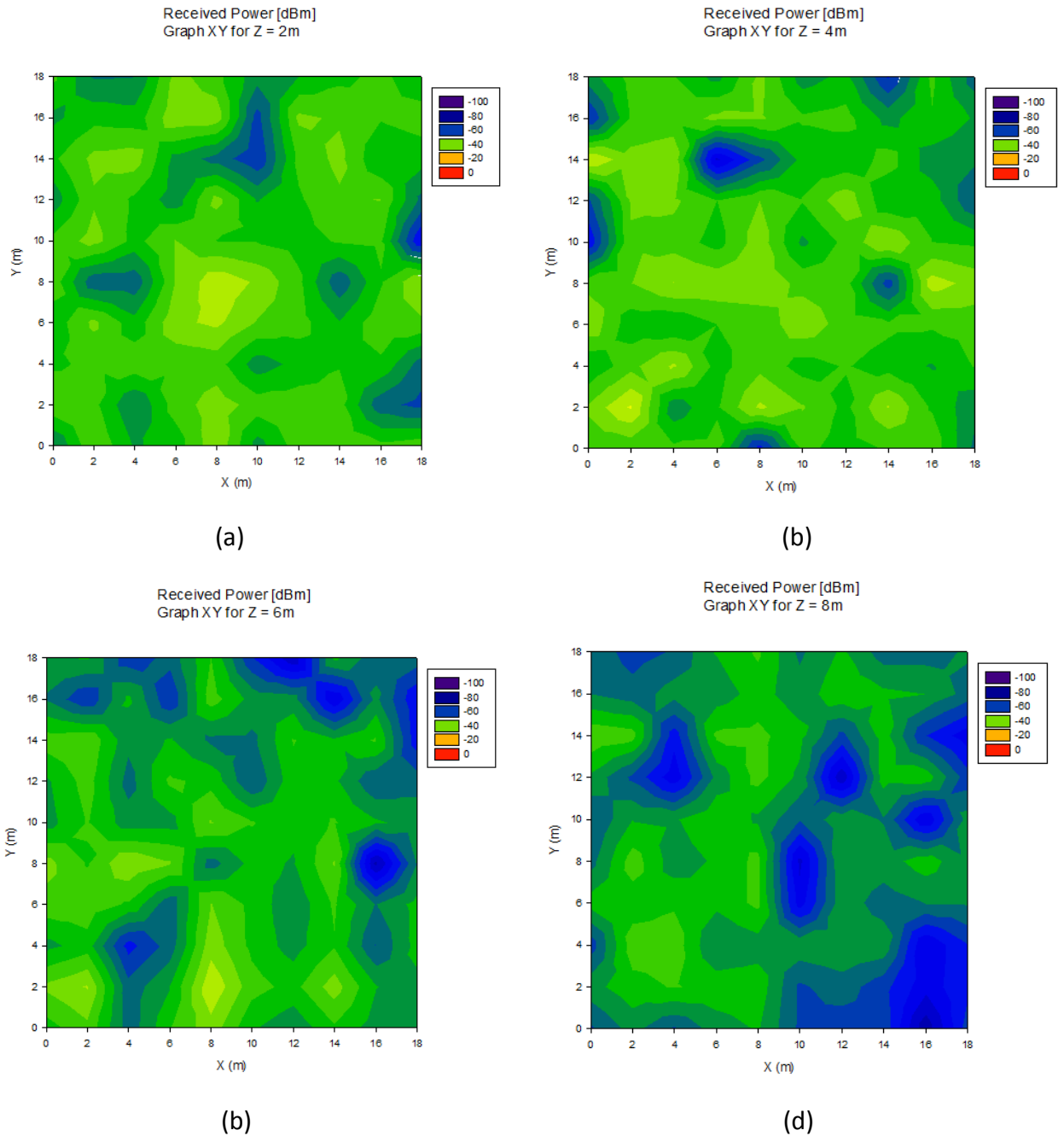


Figura 4.32: Diagramas de potencia para 6 y 8m.

Al aumentar la resolución, obtenemos resultados menos precisos que los anteriores obtenidos con 1m de resolución, pero aun así no dejan de ser útiles para observar el comportamiento de las ondas radio en el escenario. Como vemos en las cuatro graficas anteriores, al igual que veíamos anteriormente, en las zonas bajas las ondas encuentran menos obstáculos y la propagación de las ondas se ve menos afectada por obstáculos causando una atenuación menor que en las zonas altas, y dando lugar a una propagación multirrayecto con un numero de revotes muy similar tanto en zonas bajas como en zonas más altas, a consecuencia de que las dimensiones del escenario no son lo

suficientemente grandes para que la potencia de los revotes se atenúe a niveles despreciables .

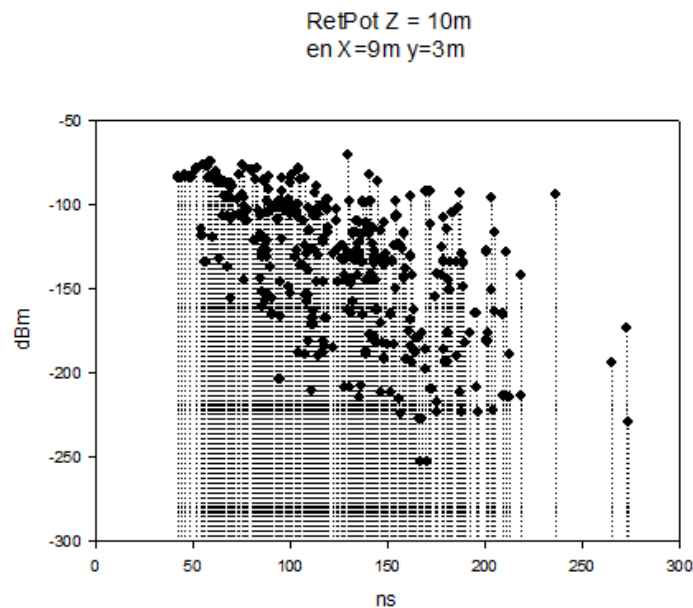


Figura 4.33: Retardo potencia para una celda en 10m.

Podemos ver en la gráfica anterior, como la mayor parte de los puntos que representan los revotes que se han producido en esa celda en concreto, están por debajo del nivel de sensibilidad fijado en unos -100 dBm, y por tanto no son relevantes para la transmisión de la señal más allá del ruido que pueden causar.

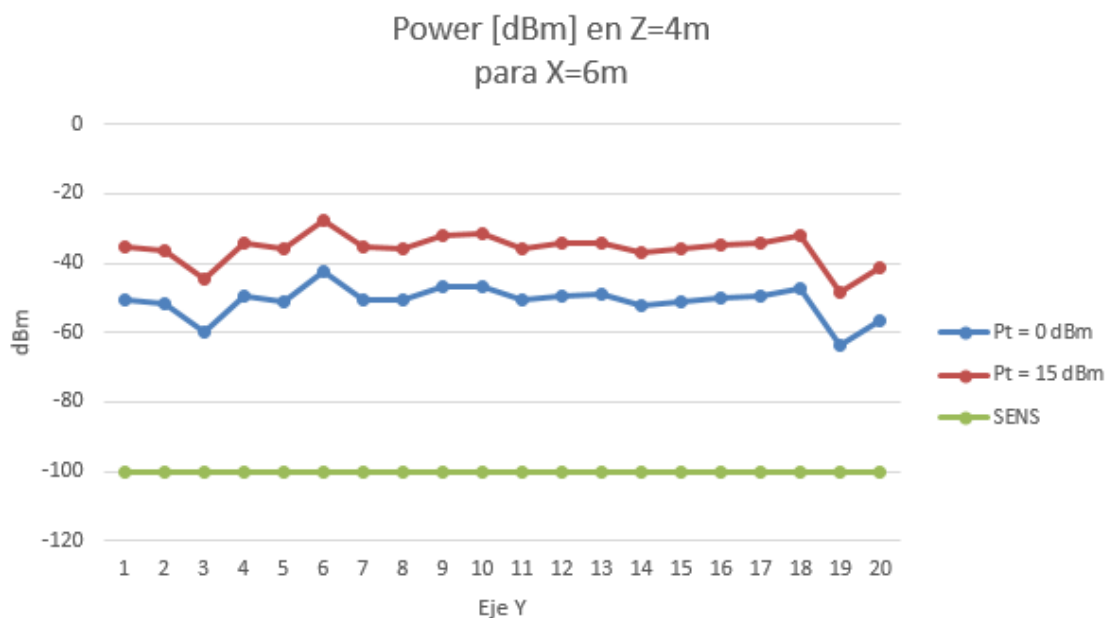


Figura 4.34: Radiales de potencia para dos de Ptx.

Para concluir con el estudio de este escenario, decir que es conveniente colocar los nodos sensores entre 2 y 5 m de altura para minimizar las perdidas en propagación debidas a la vegetación, y como vemos en la gráfica anterior, podemos transmitir con 0

dBm en distancias próximas a los 40m sin problemas cumpliendo los niveles de sensibilidad de los receptores. También decir que a consecuencia de que los robles tienen copas muy frondosas, la propagación multitrayecto causara zonas en las que la señal es destructiva y encontraremos nulos, y el número de revotes es muy próximo en zonas bajas y altas para áreas pequeñas, aunque este fenómeno desaparecerá con forme aumentamos el tamaño del escenario.

4.4.4 Cuarto escenario: 32 pinos, 32 hayas

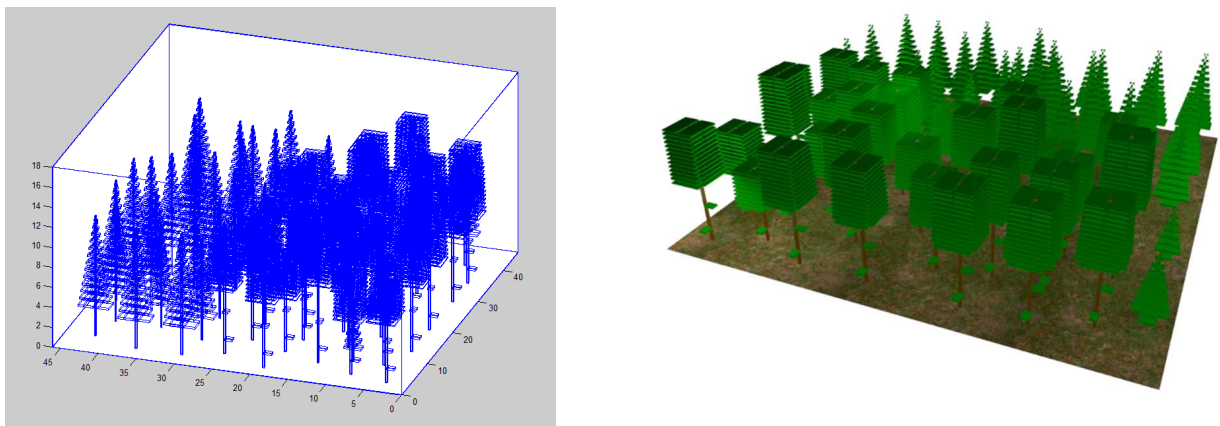


Figura 4.35: Modelado escenario mixto 32 pinos, 32 hayas y representación 3D.

Este es el último escenario creado para recoger datos útiles, y poder generar el escenario final con la mayor exactitud posible y poder simularlo con los parámetros que mejor se adaptan a este entorno. Como se aprecia en las imágenes que presentan el escenario, se ha optado por dividir claramente en dos zonas los tipos de árboles, en un lado encontramos todo pinos y en el otro vemos un conjunto de hayas. Esta distribución de los árboles se ha hecho así para poder analizar claramente las diferencias que encontramos cuando la señal se propaga entre pinos y cuando da el salto al otro lado del escenario y la propagación se produce a través de hayas.

Este escenario ha sido simulado únicamente para una resolución de 2m, pensando en que los resultados obtenidos son más claros, y a una frecuencia de 2.4 GHz generalmente la más utilizada.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	2.4 GHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	2, 2, 2 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

En este escenario se ha colocado la antena transmisora a una altura de 6m, y se han realizado simulaciones colocando la antena en 3 posiciones diferentes, para estudiar el comportamiento de la onda propagándose por el escenario.

Posición de antena 1:

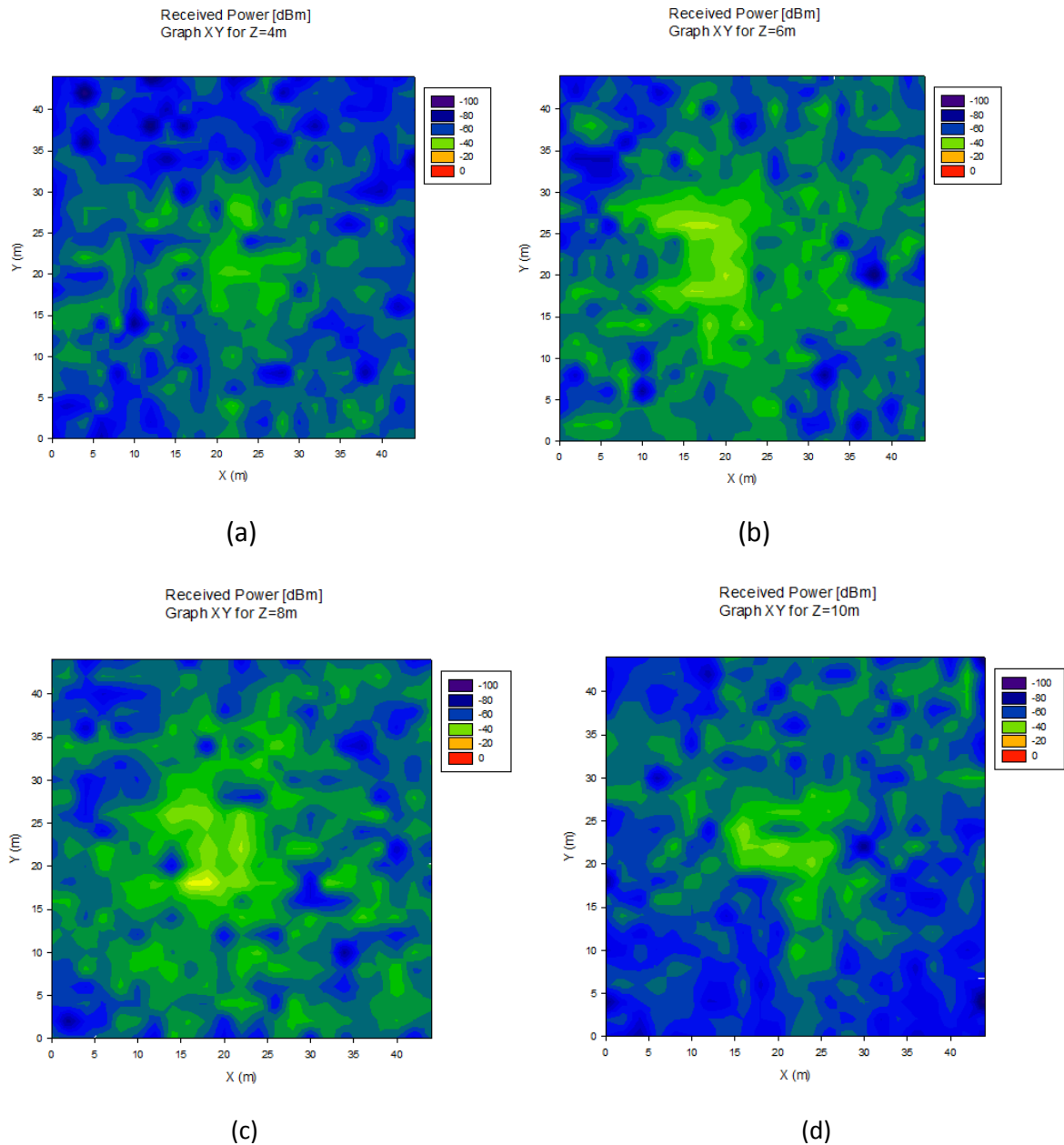


Figura 4.36: Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

Estos resultados pertenecen a la simulación realizada con la antena centrada en el escenario, como podemos ver en las gráficas alcanzamos el máximo nivel de cobertura en alturas entre 6 y 8 m, ya que la influencia de los árboles es menor como ya se ha comentado en los dos escenarios anteriores, donde veíamos que los pinos provocan unas pérdidas mayores en su parte baja y las hayas en su parte alta o copa. Una altura

media donde la densidad de los pinos es menor pero la señal no se ve aun influenciada por las copas de las hayas. Así mismo podemos observar como en 4m de altura aparece una mayor atenuación en el área cubierta por pinos y a partir de 9, 10 m de altura la señal se ve más afectada por las hayas.

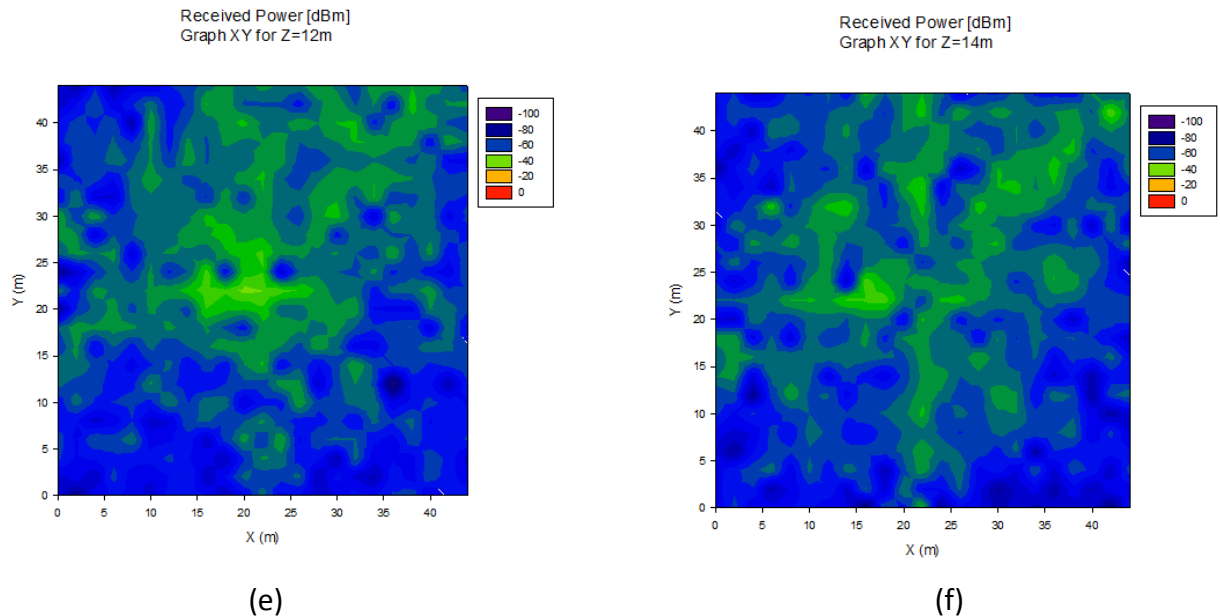
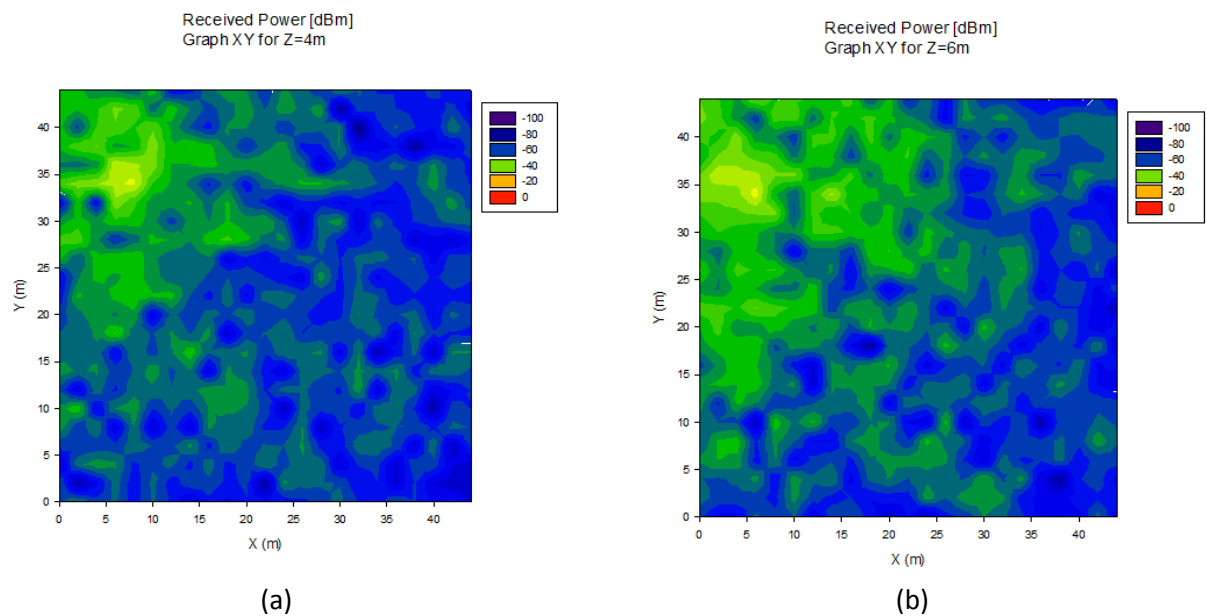


Figura 4.37: Diagramas de potencia en XY para alturas e) 12m f) 14m.

Como ya se ha visto en el escenario de los pinos anteriormente, aparecen puntos sueltos en las gráficas de un azul más oscuro, son nulos de potencia donde la propagación multitrayecto se vuelve destructiva causando la anulación de la señal.

Posición de antena 2:



En esta segunda simulación, se ha colocado la antena en la parte superior izquierda del escenario dentro de la zona formada por pinos, así se ha podido medir el nivel de potencia obtenido de la señal al llegar a la zona formada por hayas y saber que rango de cobertura se puede conseguir en un área de 46x46 m. Ya sabemos que en altura bajas la atenuación es mayor y como se aprecia en la gráfica a 4m el nivel de señal que llega a la zona de hayas bajo.

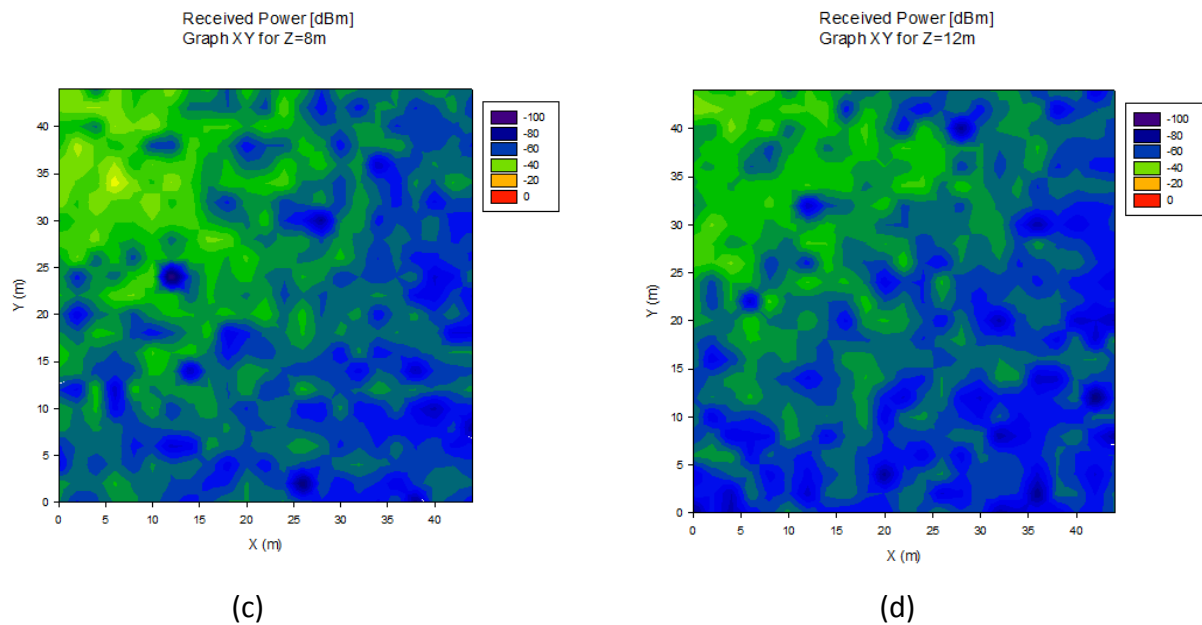


Figura 4.38: Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 12m.

Como vemos los niveles de potencia en el área de estudio son muy similares en todas las alturas, obteniendo los mejores niveles entre 6 y 8m. Estos niveles de potencia son bastante aceptables como vemos a continuación en el corte escogido para el estudio de cobertura realizado en 4m donde la señal se ve más degradada por la atenuación y la propagación multitrayecto.

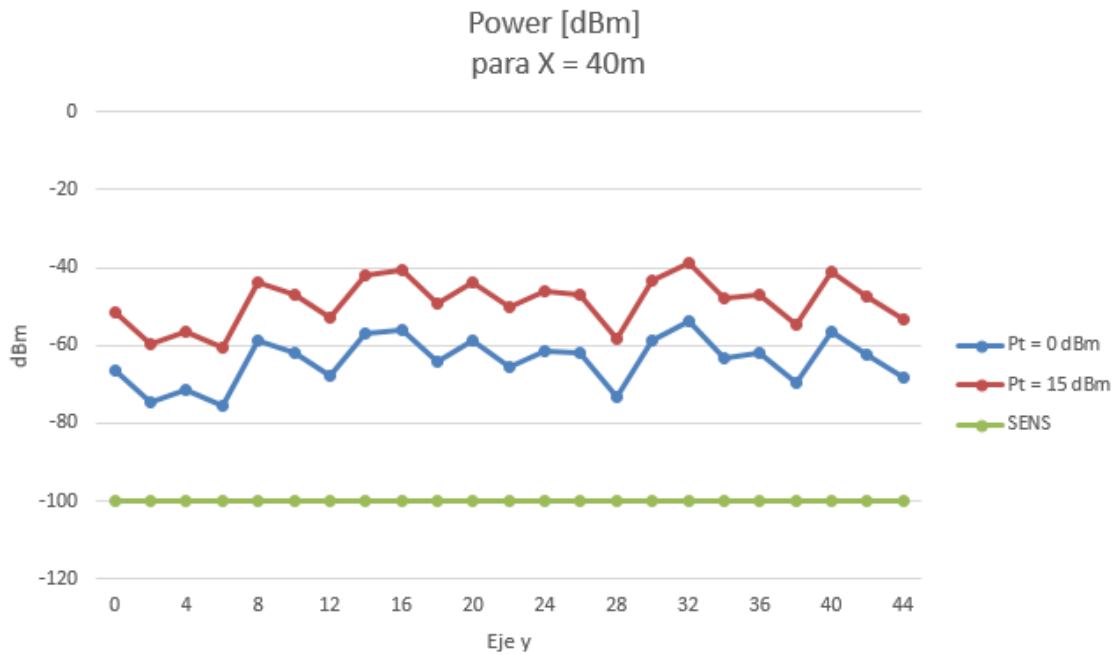


Figura 4.39: Radiales de potencia para dos niveles de P_{tx} .

Podemos ver como transmitiendo con 0 dB de potencia, la señal cumple con los requisitos de sensibilidad del sistema sin problema, y si lo comparamos con una transmisión a 15 dB de potencia pues el nivel claramente aumenta, dando lugar a una señal donde el radio de cobertura fácilmente puede extenderse hasta los 50 o 60 m.

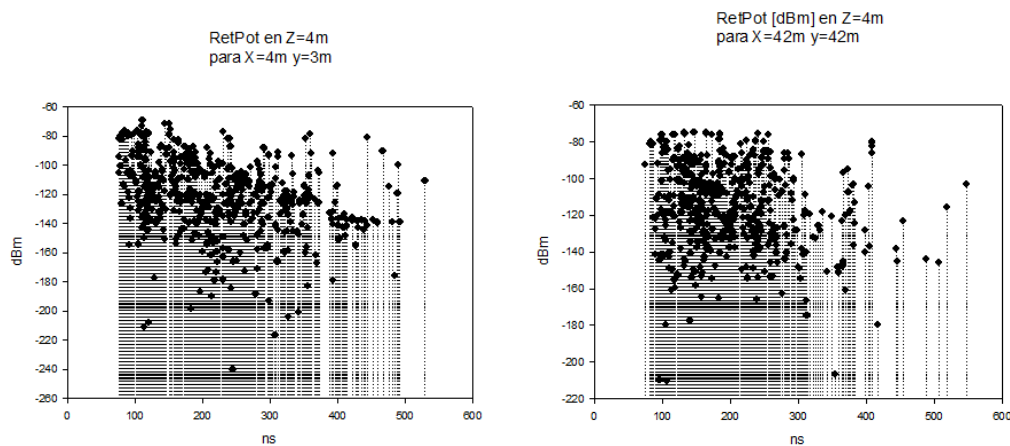


Figura 4.40: Retardo potencia para dos celdas en 4m pero en distinta posición XY.

Si estudiamos el Power delay profile en este escenario, al igual que nos sucedía en los anteriores tenemos un número de rebotes muy alto, destacar en este caso que en la gráfica a perteneciente a un celda situada en la zona formada por pinos, la mayor parte de los rebotes se encuentran por debajo del nivel de sensibilidad del sistema y por tanto no afectaran en gran medida, así mismo los rebotes se extienden en el tiempo en mayor número que en la gráfica b, ya que como se ha comentado la frondosidad de la parte

baja de los pinos presenta unas características propicias para una propagación multitrayecto donde las reflexiones de la señal se producen en gran medida. El número de rebotes capturado en la simulación supera los 400 rebotes, una cifra exageradamente alta pero claramente significativa de la importancia de este fenómeno en entornos tan complicados como los bosques para transmitir ondas de radio.

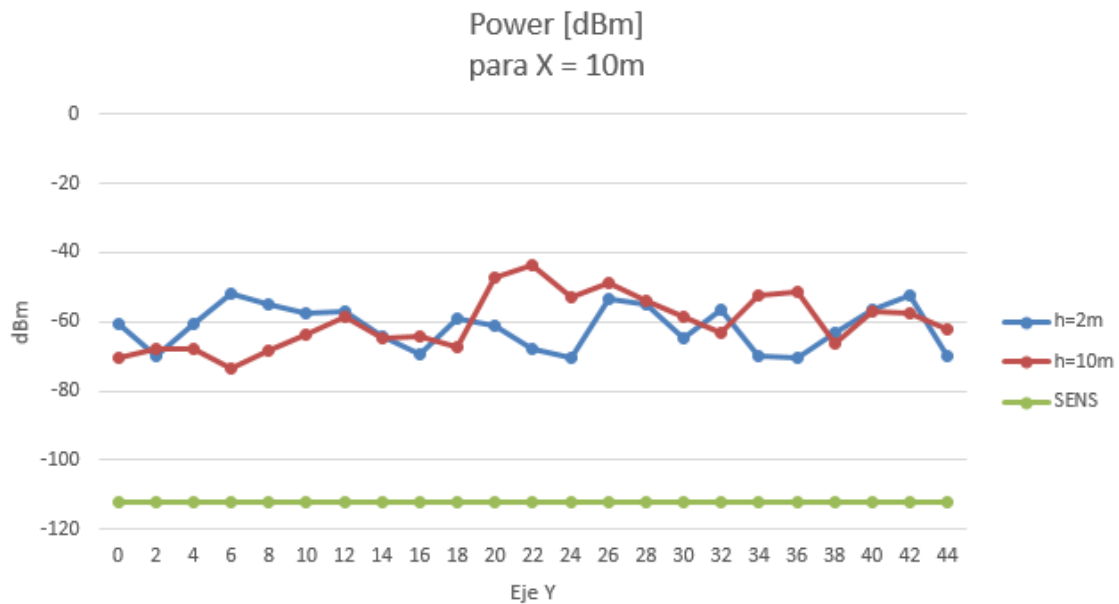


Figura 4.41: Radiales de potencia para dos alturas.

Como vemos los niveles de potencia recibida, son lo suficientemente bueno como para poder transmitir tanto en alturas bajas próximas al suelo, como en alturas mayores por debajo de las copas de los arboles sin siendo propicio colocar los nodos receptores en un rango de dos metros arriba o debajo del transmisor.

4.5 Resultados y análisis del escenario final

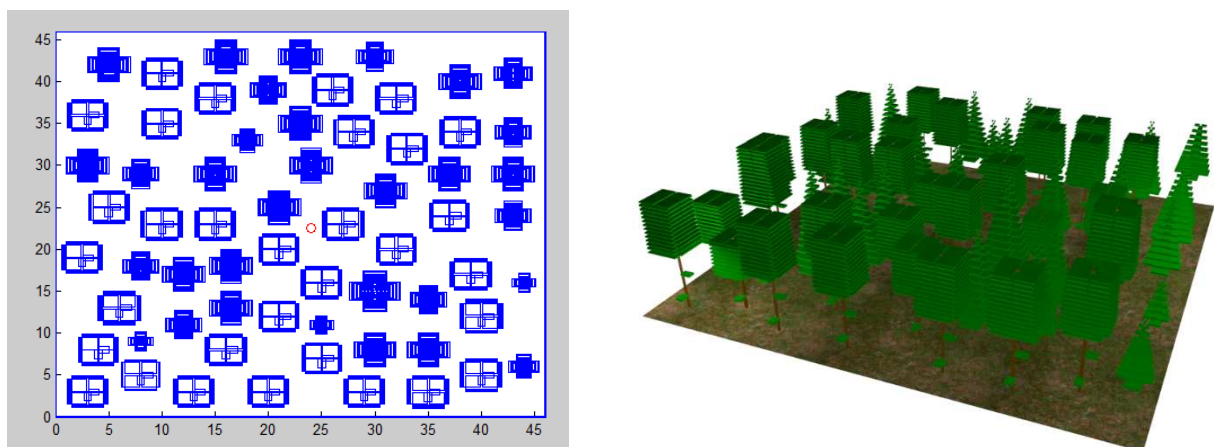


Figura 4.42: Modelado escenario final y representación 3D.

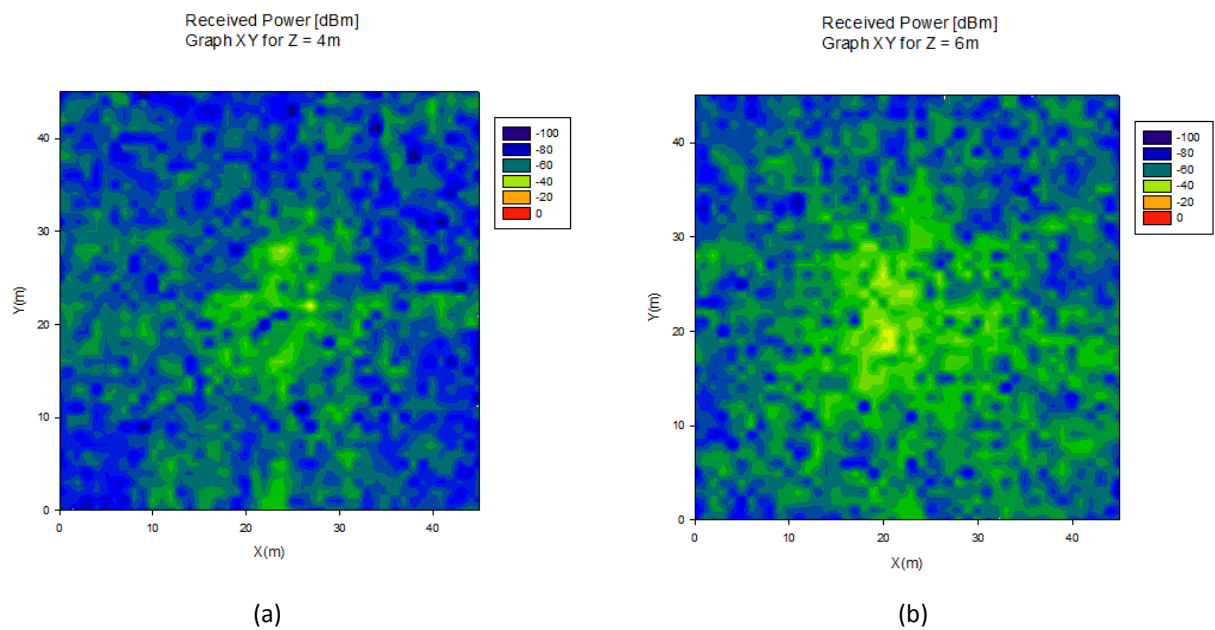
Este escenario como ya se ha comentado en el apartado 4.3 Creación de los escenarios simulados, es el más importante y del que hemos recopilado los datos más relevantes del proyecto, ya que es el escenario que más se puede asemejar a un área boscosa real. Como vemos en las imágenes en este caso el escenario es totalmente aleatorio, formado por hayas y pinos de diferentes alturas o edades y con posiciones aleatorias basadas en estudios sobre crecimiento natural de zonas boscosas.

Para realizar su análisis se han realizado simulaciones utilizando dos frecuencias, 868MHz y 2.4GHz, se han realizado pruebas colocando la antena en diferentes posiciones y alturas del escenario, también se han utilizado dos resoluciones diferentes para poder comparar los resultados, a saber 1 y 2m. Finalmente se han obtenido los siguientes resultados para un área de 46 x46x18m.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	2.4 GHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	1, 1, 1 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

Vemos en las siguientes gráficas los diagramas de potencia en el plano XY, con la antena transmisora situada en el centro del escenario y a una altura de 6m.



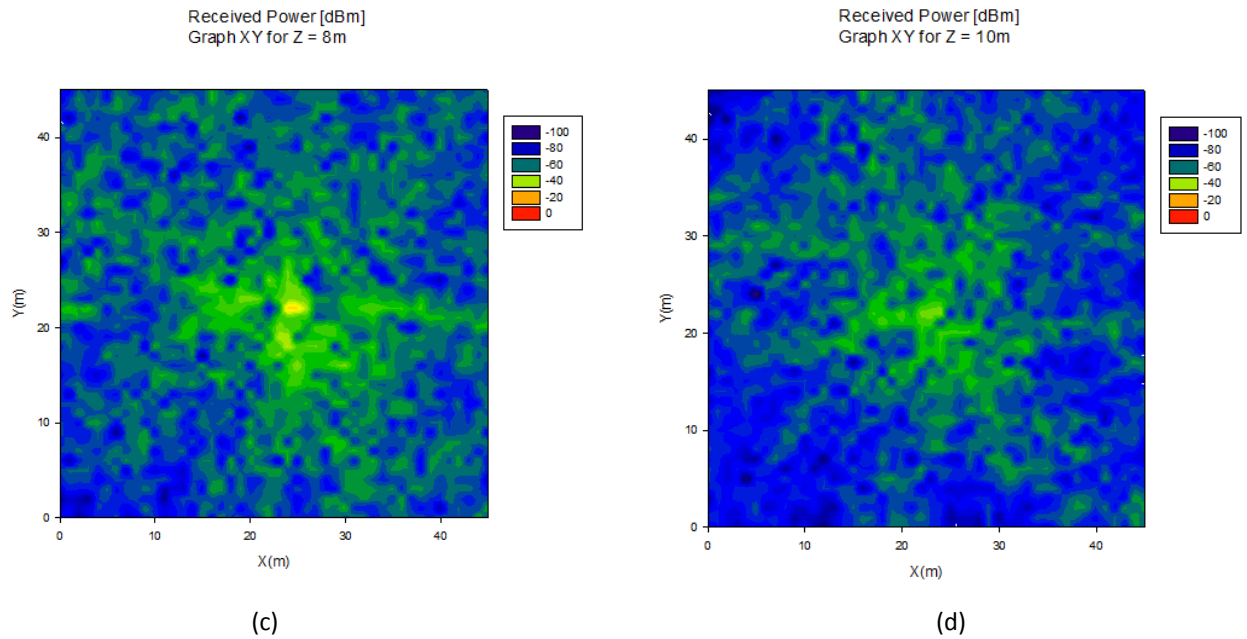


Figura 4.43: Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

Como podemos observar en la gráfica b, plano obtenido para 6m de altura o altura de antena, la distribución de potencia en el área es casi uniforme, y los niveles son bastante aceptables para un área de estas dimensiones el despliegue en primera instancia es algo viable. Vemos también como progresivamente vamos ascendiendo en altura la señal llega a los extremos del escenario con un nivel de potencia menor, atenuada a consecuencia de la masa vegetal.

Vamos a realizar ahora una comparación con la simulación realizada a la frecuencia de 868MHz para comprobar sus diferencias y las posibilidades que nos ofrece. En este caso se ha utilizado una resolución de 2m para simular a la frecuencia de 868MHz.

PARÁMETROS SIMULACIÓN

POTENCIA DE TRANSMISIÓN	0 dBm
FRECUENCIA	868MHz
RESOLUCIÓN CUBOIDE	2, 2, 2 m
REFLEXIONES	6
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO HORIZONTAL	1º
RESOLUCIÓN ANGULAR PLANO VERTICAL	1º

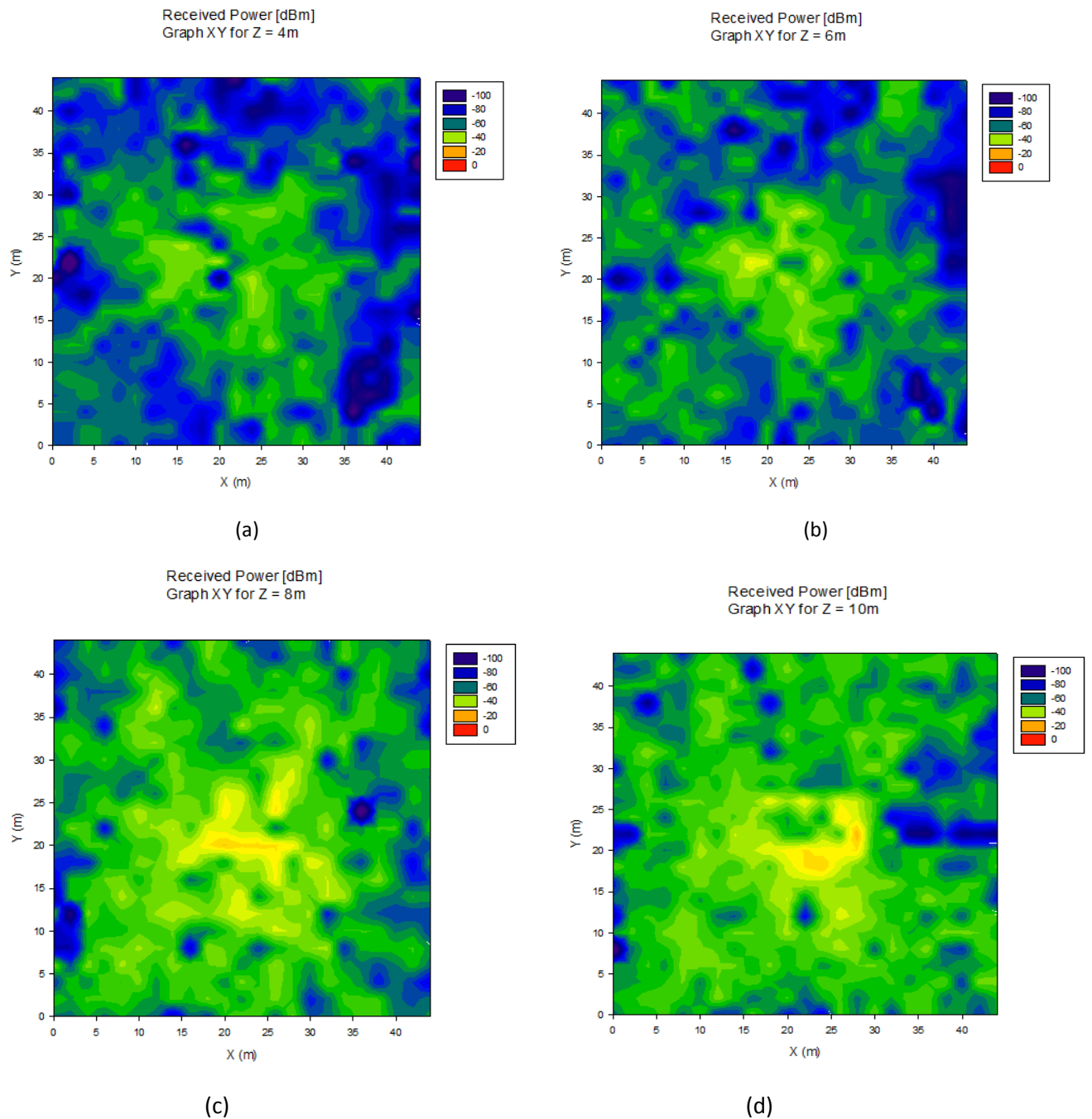


Figura 4.44: Diagramas de potencia en XY para alturas a) 4m b) 6m c) 8m d) 10m.

En las gráficas anteriores, podemos ver como aun siendo la resolución menor obtenemos unos datos bastante claros y concisos en relación a los niveles de potencia que obtenemos en el área, vemos claramente como en la simulación a 2.4GHz las perdidas por atenuación son bastante más altas que si utilizamos la frecuencia de 868MHz, sobre todo si miramos los planos obtenidos dos metros por encima de la altura de antena. En la simulación a 868MHz la antena se situaba a 8m de altura, por tanto nos fijamos en el plano a 10m y vemos que en los extremos del escenario encontramos niveles próximos a los -50 dBm, mientras que en la simulación a 2.4GHz la altura de

antena se situaba en 6m, y si nos fijamos en el plano a 8m los niveles de potencia son significativamente menores.

Vamos a comprobar ahora las diferencias entre situar la antena en 4, 8 o 10m de altura y lo que esto nos supone en relación a potencia recibida.

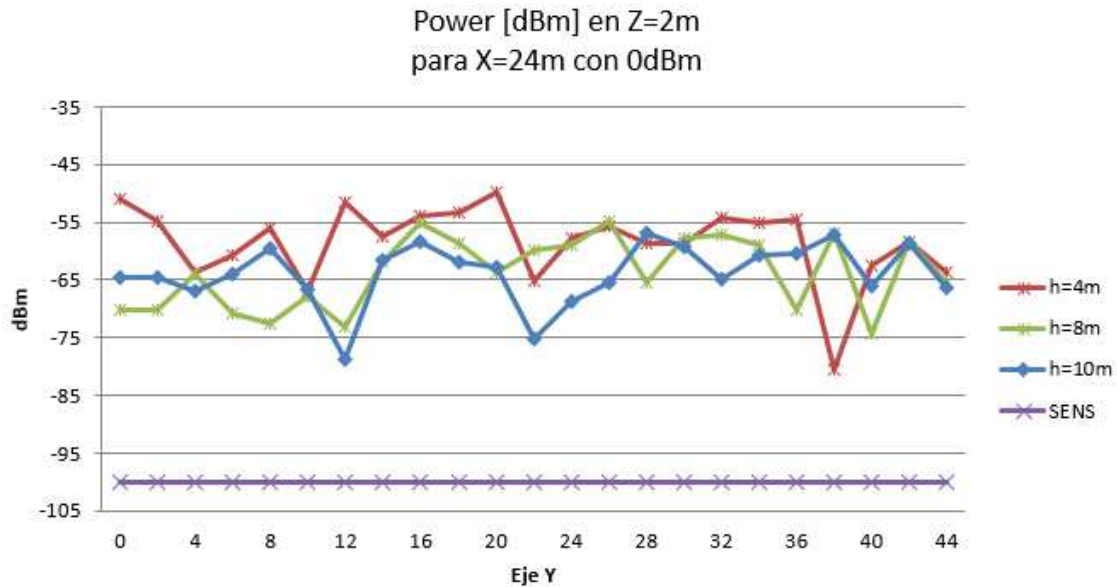


Figura 4.45: Radiales de potencia para tres alturas.

Comprobamos entonces que en alturas próximas al suelo en este caso en concreto a 2m, la atenuación a la que se ven sometidas las ondas radio, si colocamos la antena transmisora en 4, 8 o 10 no tiene mayor relevancia ya que todas cumplen con el nivel de sensibilidad requerido, pero si debemos plantearnos la posibilidad de tener un área de estudio mayor a 46x46m.

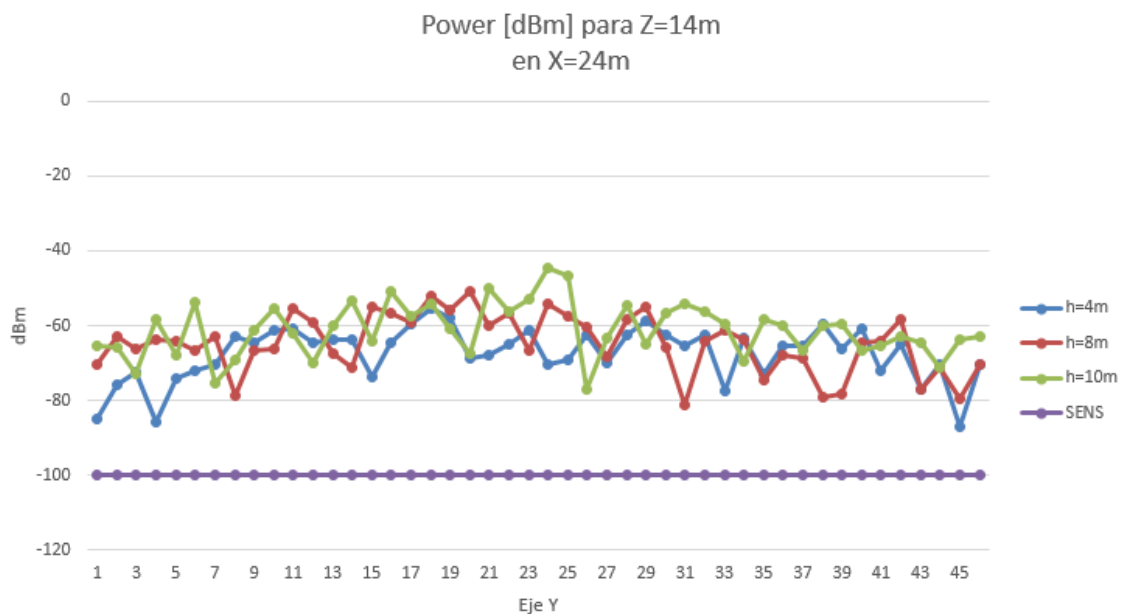


Figura 4.46: Radiales de potencia para tres alturas.

En este caso estudiamos la señal pero en alturas altas como son 14m, la antena nuevamente ha sido situada en tres alturas, 4, 8 y 10m, y vemos como la señal ha disminuido si nivel de potencia, pero las variaciones que se producen a consecuencia de la altura de antena no son demasiado representativas, ya que para las tres alturas la potencia recibida es muy similar, apreciando como en los extremos del escenario el nivel de potencia es menor para todas las alturas.

Vamos a comentar ahora las diferencias en nivel de potencia recibida pero variando la frecuencia, y no la altura de la antena.

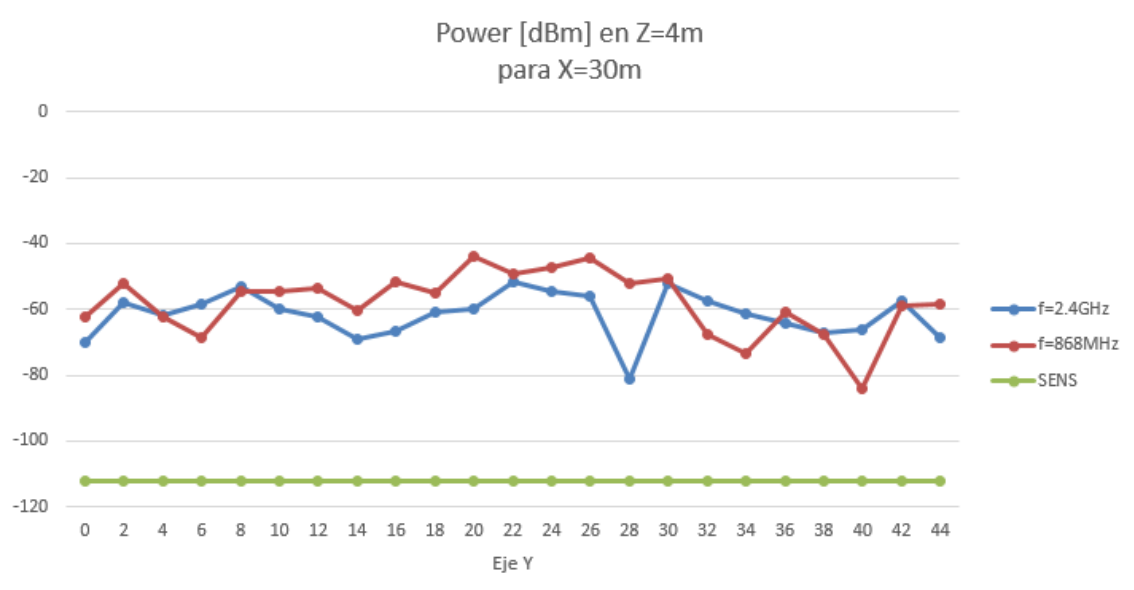


Figura 4.47: Radiales de potencia para dos frecuencias.

Podemos ver como para un mismo corte pero en simulaciones a diferentes frecuencias, los niveles de potencia recibida son de nuevo bastante similares, pero si podemos ver como para 868MHz la atenuación es algo menor en la mayor parte del área de estudio.

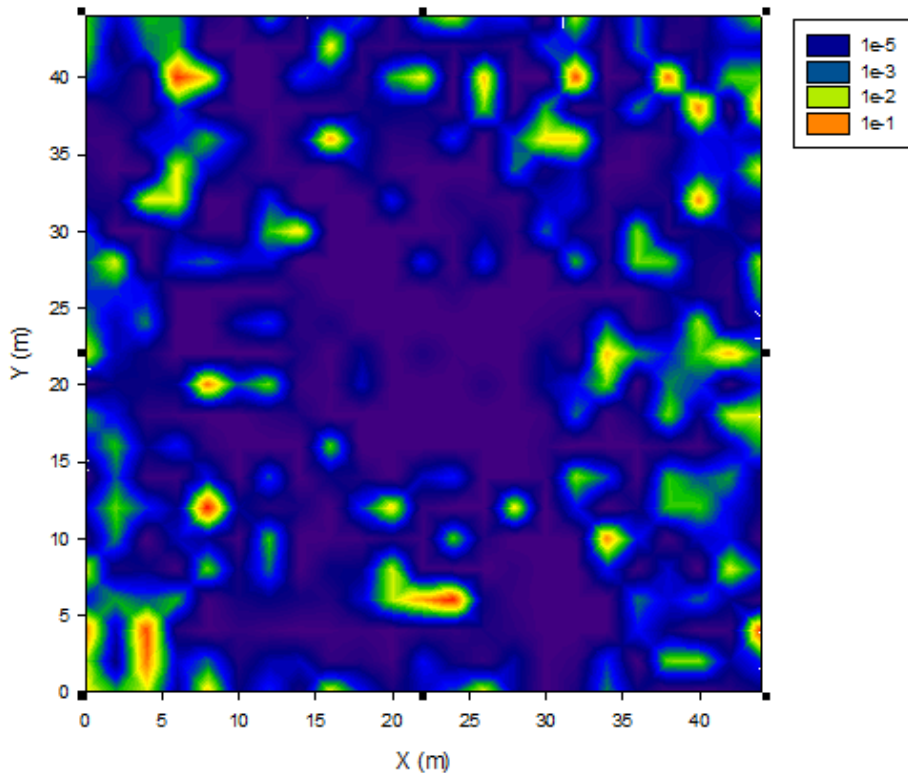
Probabilidad de Error
 para Z=8m


Figura 4.48: Probabilidad de error en el plano XY para 8m de altura y $f=2.4\text{GHz}$.

Analizando la probabilidad de error que podemos obtener si se transmite con una potencia de 0 dB, en un escenario donde la propagación multitrayecto esta tan ligada al entorno, además de que en las simulaciones se ha tenido en cuenta un numero de 6 rebotes para obtener los resultados, y por tanto aparecen zonas coloreadas de verde, donde la señal se anula a si misma a causa de los rebotes y el nivel de potencia es muy bajo, reflejándose directamente en la probabilidad de error.

Teniendo en cuenta este pequeño inconveniente, los resultados obtenidos son bastante bueno, con P_e del orden de e^{-7} en la parte central del escenario en un área de 25x25m aproximadamente, y aumentando esta P_e paulatinamente según nos alejamos a los extremos del escenario.

Para concluir con el análisis de resultados de este escenario vemos la influencia de la propagación multitrayecto, y el número de rebotes por celda que obtenemos que al igual que en otros escenarios anteriores es bastante alto, pero nos proporciona los datos necesarios para compararlo con el escenario medido in situ, teniendo en cuenta lo comentado anteriormente sobre el número de rebotes utilizado en la simulación y el entorno tan propicio para causar reflexiones de la señal.

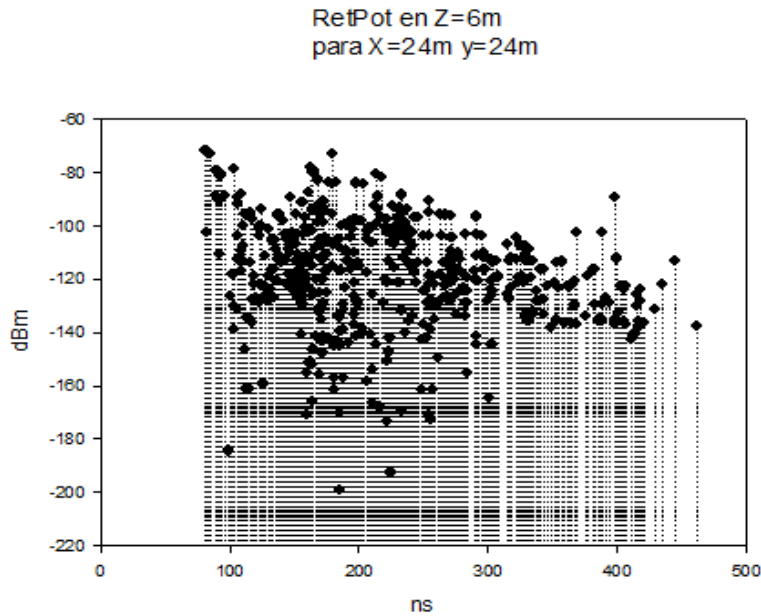


Figura 4.49: Retardo de potencia para una celda del escenario.

El número de rebotes por celda es muy alto, excesivamente alto como venimos viendo en todos los escenarios analizados, pero no supone una inquietud ya que sabemos los motivos principales por los que sucede. Y son debidos en gran medida al modelado en capas de las copas de los árboles que provocan un número de rebotes muy altos en una misma celda en un área muy reducida, y también el número de revotes utilizado para simular. De todas formas estos revotes no deben ser un inconveniente para el sistema, porque el nivel de potencia está por debajo de la sensibilidad de los receptores en la mayor parte de ellos.

Para reafirmar la influencia de la propagación multitrayecto en este tipo de entornos, se muestra las siguientes figuras del “Delay Spread” el cual representa la diferencia de retardos entre la primera componente de multitrayecto que atraviesa una celda y la última componente.

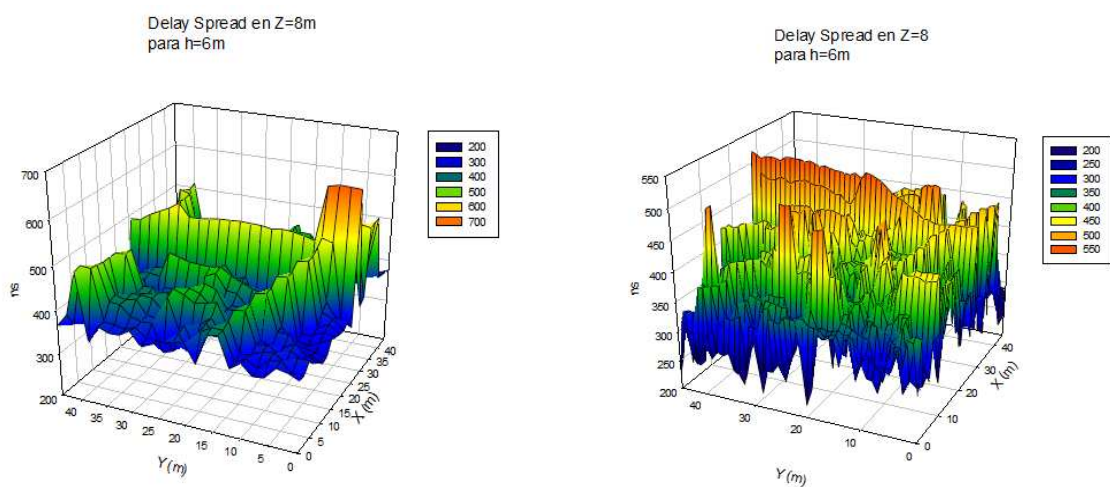


Figura 4.50: Delay Spread.

5. Conclusiones

La elección de un entorno tan cambiante como es un bosque para la realización del presente proyecto, nos ha presentado dificultades que a la vez se han convertido en retos para nosotros, salvando las situaciones de la mejor forma posible.

Para realizar un estudio radioeléctrico en un área tan extensa en terreno como es un bosque, nos hemos visto obligados a delimitar zonas de estudio para poder realizar las simulaciones de la forma más eficiente posible. Antes de crear los escenarios se realizó una búsqueda intensiva de información sobre el crecimiento y caracterización de los bosques en Navarra, así como las principales especies arbóreas que los forman para realizar los modelos y que se aproximasen lo máximo a la realidad.

Simulando cada uno de los modelos de los arboles generados por separado, se han descubierto efectos influyentes en la señal causados por todos ellos y también particulares de cada árbol.

Un ejemplo claro de ello son las reflexiones que se producen a consecuencia de la densidad arbórea, en formaciones de pinos las ondas radio se propagan con mayor facilidad por alturas medias y altas que por zonas bajas donde encuentran una mayor resistencia, no así en zonas pobladas de hayas donde la señal se ve más influenciada por las copas en la parte alta de los escenarios. Por tanto una buena forma de asegurar una atenuación mínima de la señal es teniendo en cuenta la altura media de los árboles y su especie, decidir la altura a la que colocar los nodos sensores.

Debemos tener en cuenta también que las simulaciones se han realizado con unos parámetros de temperatura y humedad para una época del año primavera-verano, y por supuesto que dependiendo de la estación en la que nos encontremos, el sistema se va a ver influenciado la mayor parte del tiempo de forma negativa por la climatología, el estado de los árboles y el suelo.

La propagación multitrayecto, es otro de los fenómenos más influyentes en un entorno como el bosque, y lo hemos podido comprobar en los resultados obtenidos de las simulaciones. La propagación multitrayecto destructiva causa nulos en los planos obtenidos, aunque también hay que decir que el número de rebotes obtenido en las simulaciones ha sido exageradamente alto a consecuencia del modelado de los árboles en planos superpuestos con alturas muy pequeñas, y el número de revotes utilizado.

En relación a las dimensiones de las áreas estudiadas, podemos concluir que los radios de cobertura para un sistema ZigBee transmitiendo con una potencia de 0 dB y colocando las antenas en alturas convenientes, abarca si problemas los 50m, sin traspasar el límite de sensibilidad del sistema en la mayor parte de los casos y con probabilidades de error bastante aceptables.

6. Líneas Futuras

Como líneas futuras para este proyecto debemos fijar un poco más el tema por el que continuar y enfocar todos los esfuerzos hacia esa posibilidad:

- Diseño total y despliegue de una red WSN
- Caracterización dieléctrica de los materiales que forman el entorno
- Ampliación del área geográfica de estudio
- Realizar mediciones in situ en el bosque de Urgui

Estas dos líneas futuras que se presentan deben realizarse en paralelo, ya que para realizar un despliegue óptimo vamos a necesitar conocer con mucha exactitud el comportamiento dieléctrico de los materiales que componen el entorno, y quizás la forma más eficaz de caracterizar estos materiales sea realizando análisis in situ periódicamente, puesto que ya existen estudios realizados en laboratorios.

El realizar un diseño viable de una red WSN es algo posible, pero realizar el despliegue total de la misma son palabras mayores, sería la culminación de un proyecto enfocado a las WSN, pero me temo que por cuestiones económicas es posible solo en contadas ocasiones.

Otra posibilidad es la de realizar mediciones en otros lugares geográficos, y hacer nuevas comparaciones con los resultados obtenidos en este proyecto, incluso incorporar nuevos modelos de árboles y realizar simulaciones nuevamente para poder tener una librería más amplia sobre zonas que se encuentran en riesgo de incendios y a la hora de realizar el despliegue tener esa información en cuenta.

Próximamente se llevarán a cabo unas medidas in situ en el bosque de Urgui al norte de Navarra para poder comparar los resultados.

7. Bibliografía

1. SERRADA, R. 2008. *Apuntes de Selvicultura*. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Madrid.
2. A Forest Fire Monitoring System Based on GPRS and ZigBee Wireless Sensor Network. Guozhu Wang, Junguo Zhang, Wenbin Li, Dongxu Cui, Ye Jing.
3. The Design of Forest Fire Monitoring System Based on Wireless Sensor Network. Guangxue Yang, Zheng Liu.
4. Implementing ZigBee Network in Forest Regions – Considerations, Modeling and Evaluations. Valeria Harvanova, Tibor Krajcovic.
5. Ultra-high frequency near-ground short-range propagation measurements in forest and plantation environments for wireless sensor networks. Thipparaju Rama Rao, Dhanavanthan Balachander, Nishesh Tiwari.
6. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Shahin Farahani.
7. *“handbook of Dielectric Properties of Material at Microwave Frequencies*. VYACHESLAV V.KOMAROV.
8. Shafiullah Khan, Al---Sakib Khan Pathan, Nabil Ali Alrajeh “Wireless Sensor Network”
9. “On Radio Wave Propagation in Forest Environments”. Theodor Tamir.
10. Estudio del crecimiento volumétrico de un árbol individual de *Pinus radiata* por F. CASTEDO; C. LÓPEZ; J. GORGOSO
11. Caracterización de los suelos de una cuenta forestal. Delia Rodríguez Aroz
12. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Dusan Klepac
13. Telecomunicaciones y medio ambiente. Telecomunicaciones en acción.
14. Estado del Medio Ambiente en Navarra 2010. Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente
15. Informes de estado de medio ambiente. Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente

Anexo I

Los equipos que se han utilizado para realizar las mediciones in situ son los siguientes:



(a)



(b)

a) *Agilent CSA Spectrum Analyzer N 1996A utilizado como generador. (b) Antena RS ECOM5-2400 de 2.4GHz.*

(a)



Analizador RF Field Fox N9912A utilizado para recepción.



Leica GST20-9 Wooden Telescopic Tripod



Módulo XBee-Pro.

- Frecuencia de operación: Banda ISM 2.4 GHz.
- Alcance en entornos interiores o urbanos: 300 metros.
- Alcance en entornos exteriores con línea de visión despejada: 1.600 m.
- Potencia transmitida máxima: 18 dBm (63 mW).
- Sensibilidad: -100 dBm.
- Máxima tasa de datos: 250 Kbps.
- Posibilidad de usar retransmisiones y ACKs.
- Comunicación unicast y broadcast.
- Modo de comunicación Non-beacon (sin tramas piloto).
- Soporta topologías en malla, árbol y estrella.
- Bajo consumo de energía:
- Pico de corriente en transmisión: 250 mA.
- Mínimo consumo de corriente en recepción (Idle): 55 mA.
- Están optimizados para su uso en EEUU, Canadá, Australia, Japón y Europa.

Anexo II

Equipamiento de red para el despliegue de una WSN.



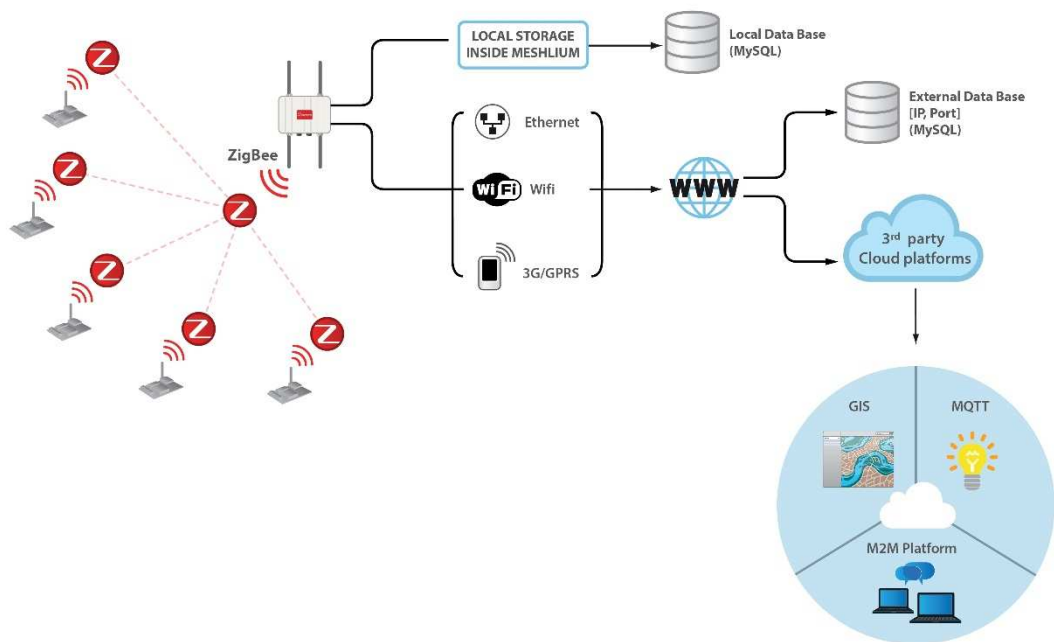
Wasp mote "Libelium.com"



Plug and sense "Libelium.com"



Meshlium “Libelium.com”



WSN “Libelum.com”

Anexo III

Simulación 12 robles, resolución 1m. Altura de antena 3m.

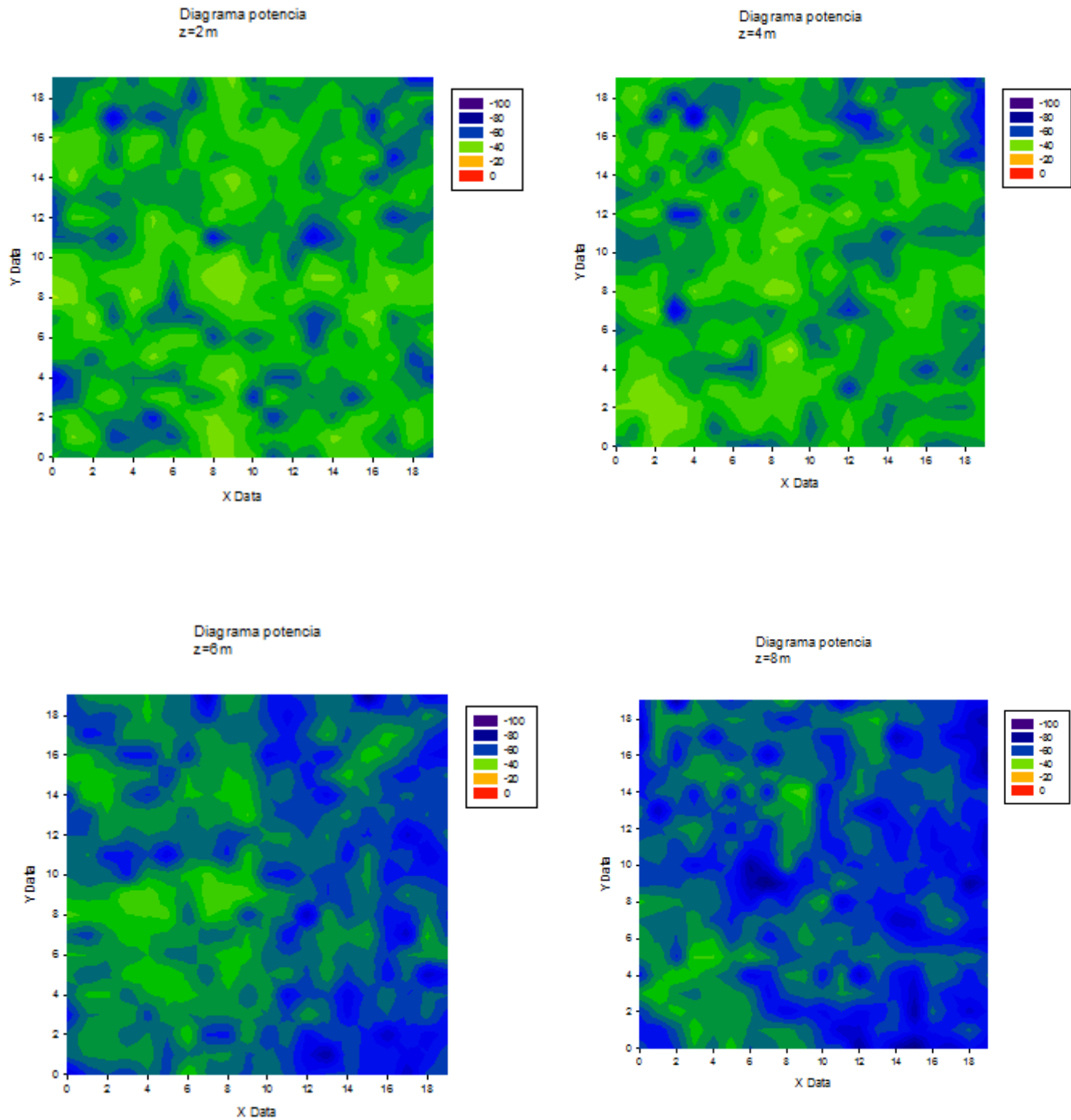


Diagrama potencia
 z=10m

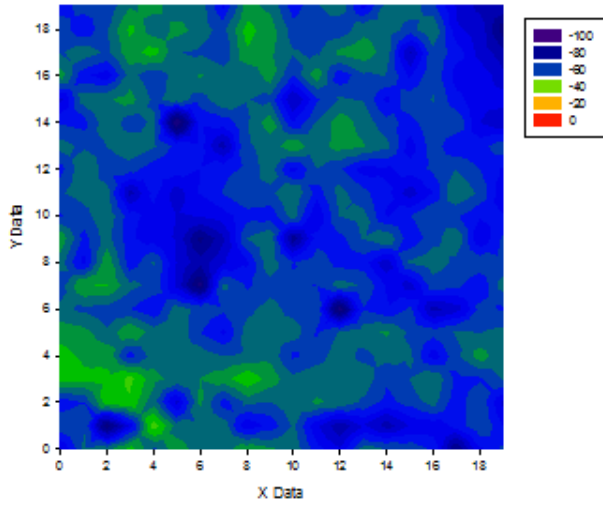
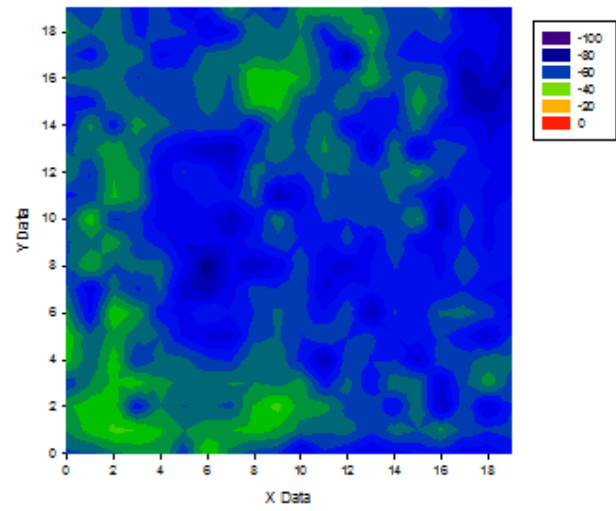


Diagrama potencia
 z=12m



Simulación 12 robles, resolución 2m. Altura de antena 3m.

Diagrama potencia
 z=2m

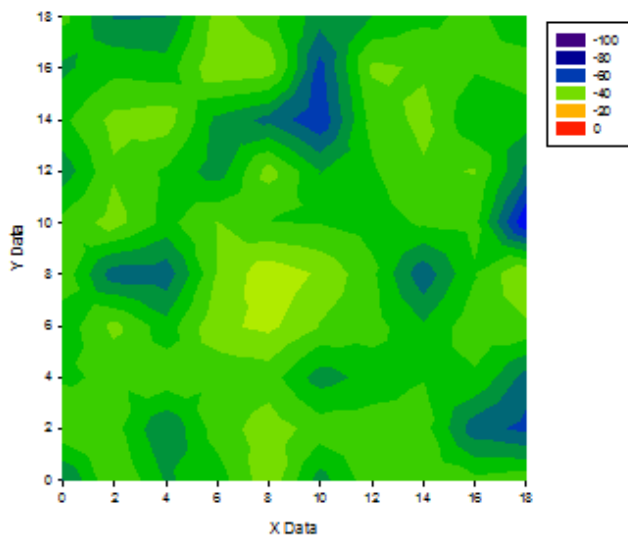


Diagrama potencia
 z=4m

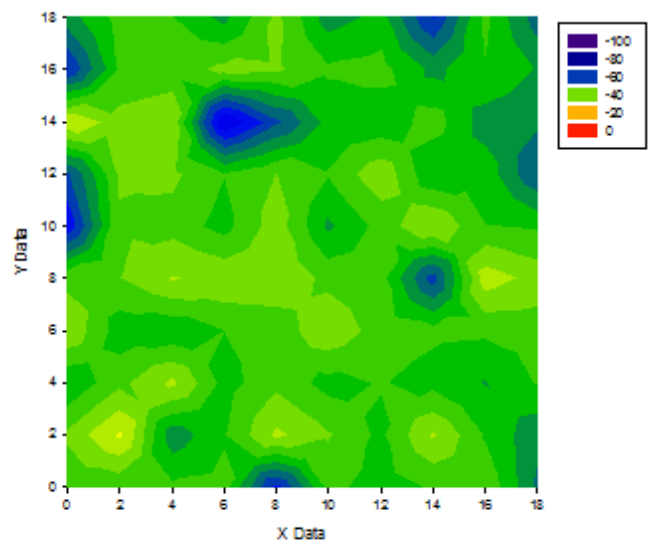


Diagrama potencia
 z=6m

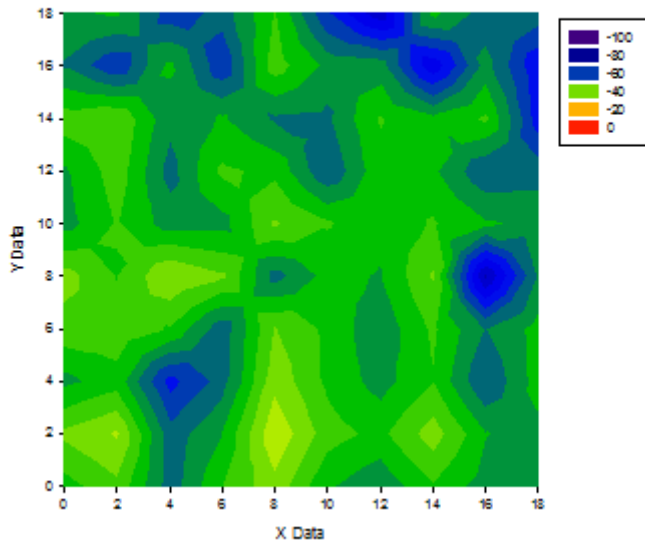


Diagrama potencia
 z=8m

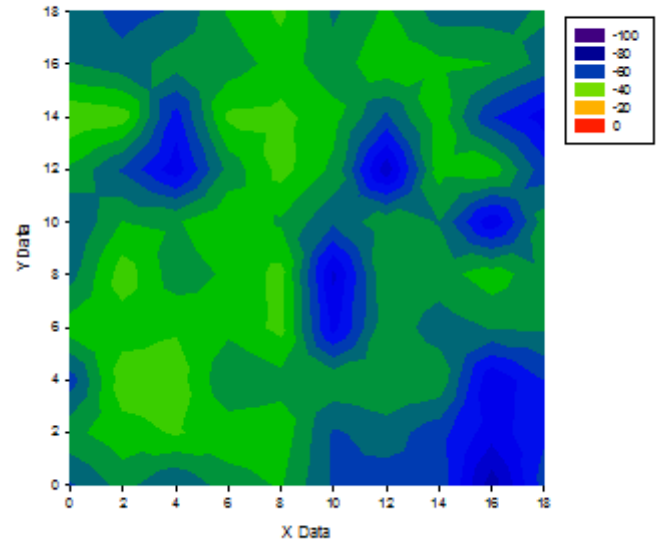


Diagrama potencia
 z=10m

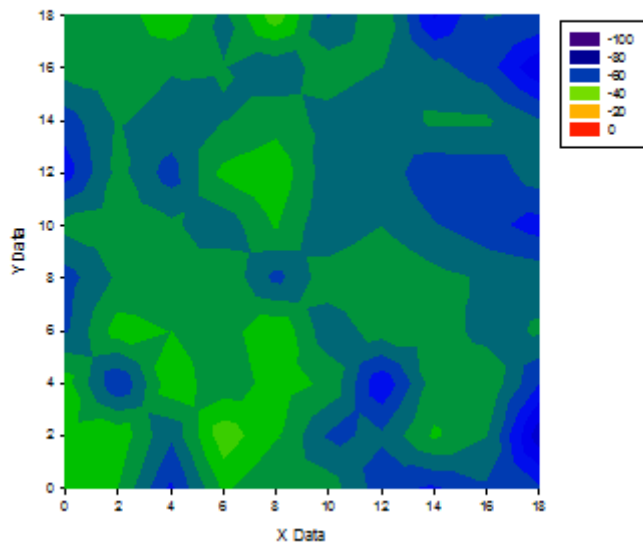
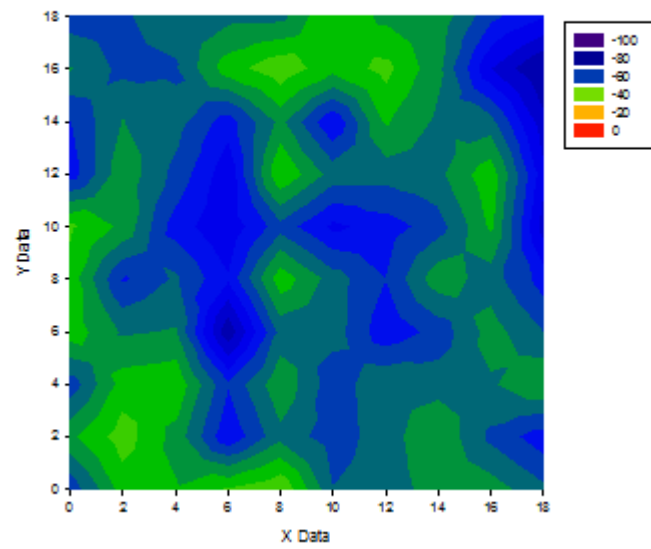


Diagrama potencia
 z=12m



Simulación 32 pinos, resolución 1m, altura de antena 8m.

diagrama de potencia
 z=4m

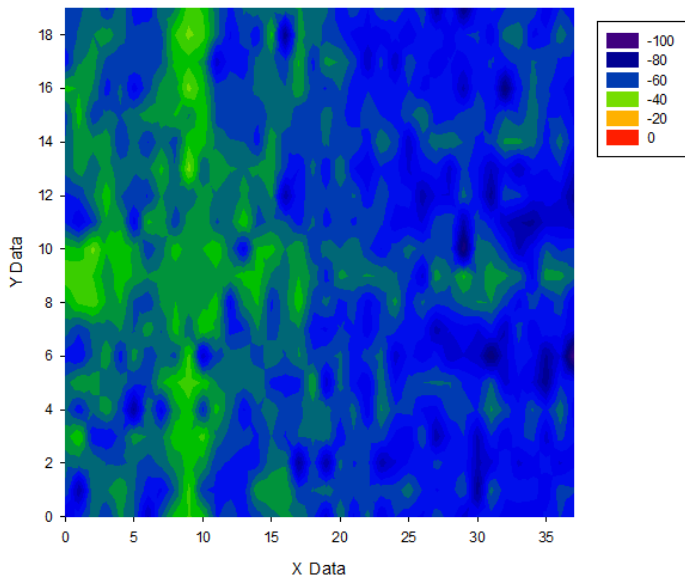


diagrama de potencia
 z=6m

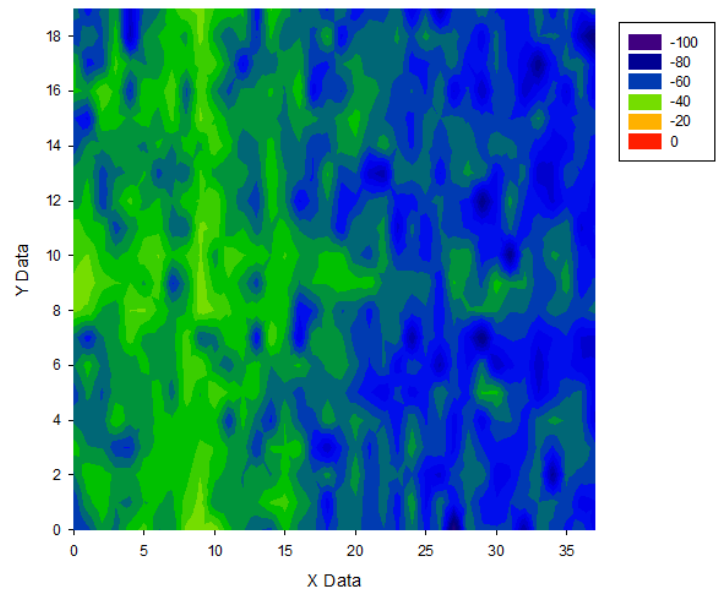


diagrama de potencia
 z=8m

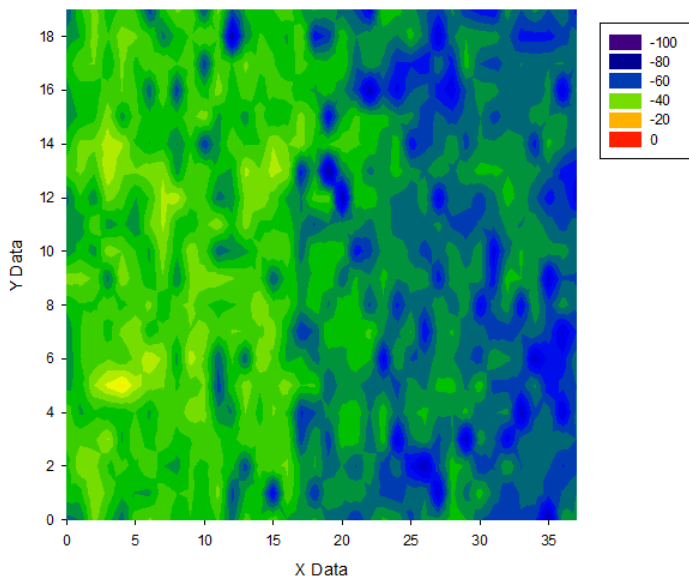
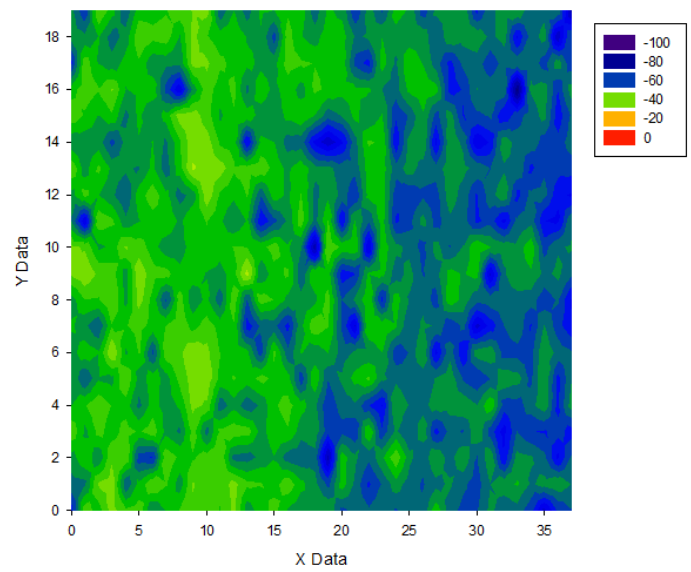


diagrama de potencia
 z=10m



Simulación 32 pinos, resolución 2m, altura de antena 8m.

Diagrama potencia
z=4m

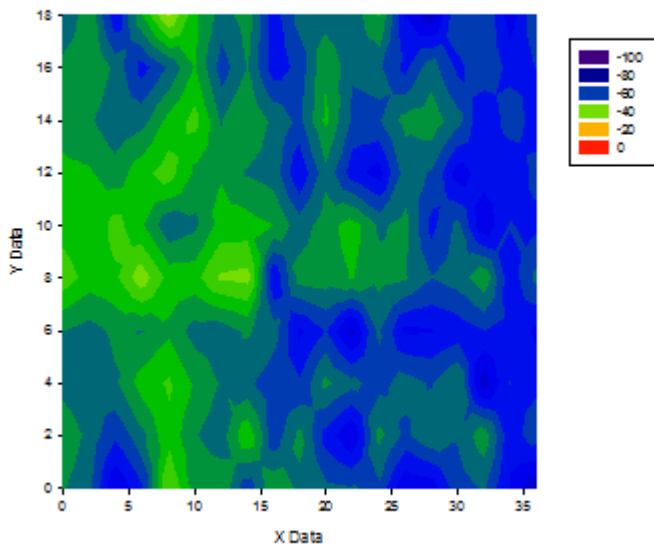


Diagrama potencia
z=6m

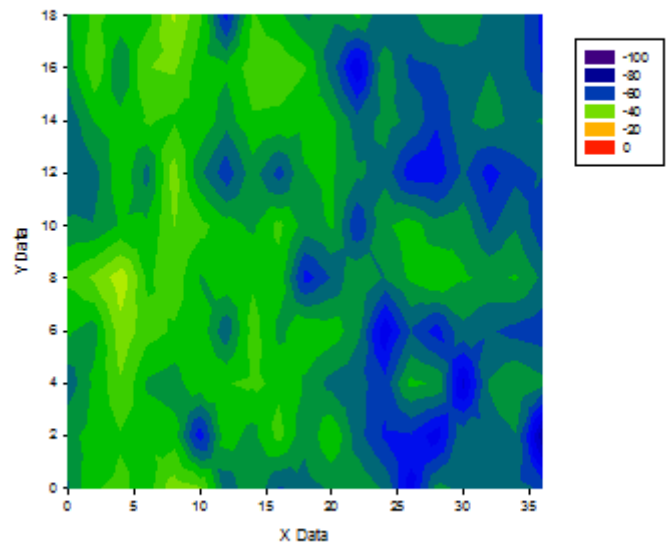


Diagrama potencia
z=8m

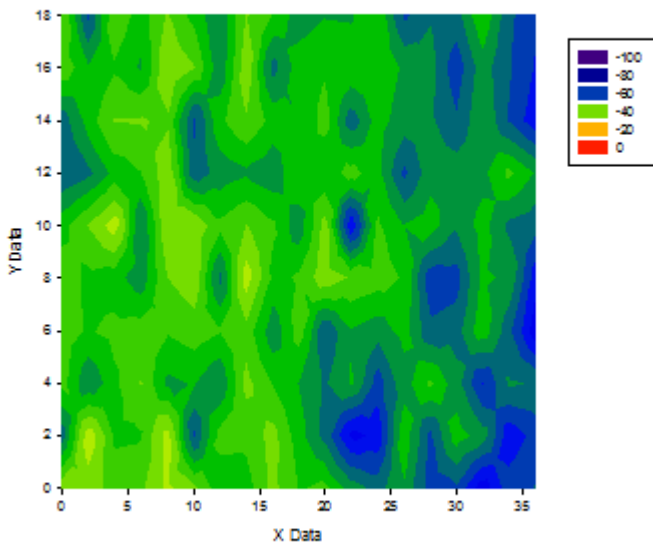
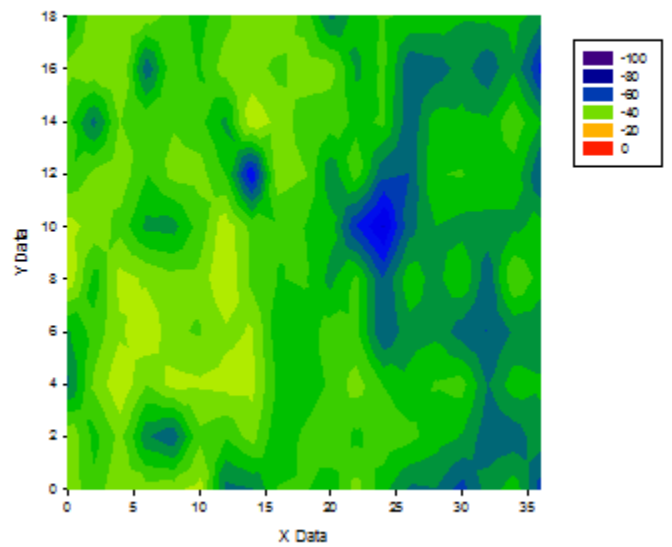


Diagrama potencia
z=10m



Simulación 32 pinos, 32 hayas, resolución 2m, altura de antena 6m.

Diagrama potencia
 Z=4m

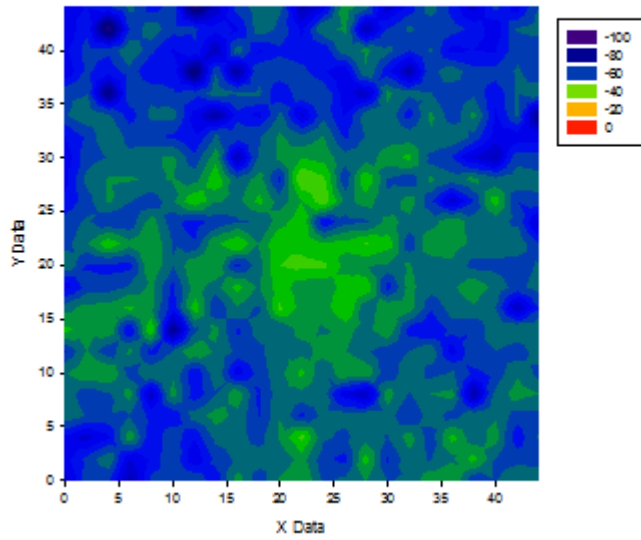


Diagrama potencia
 Z=6m

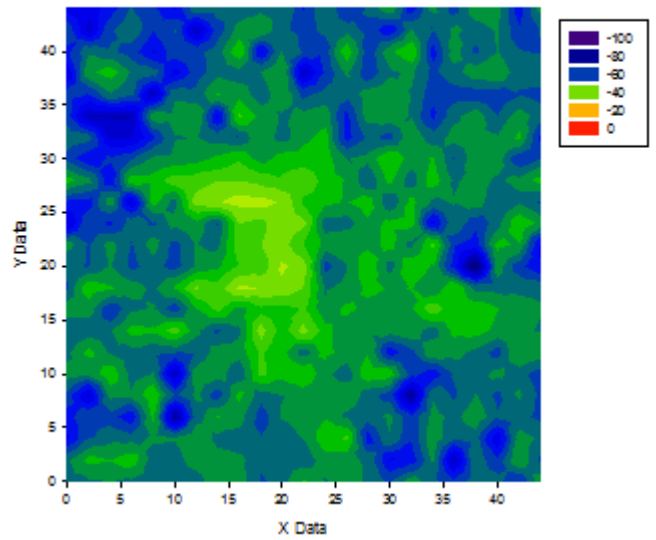


Diagrama potencia
 Z=8m

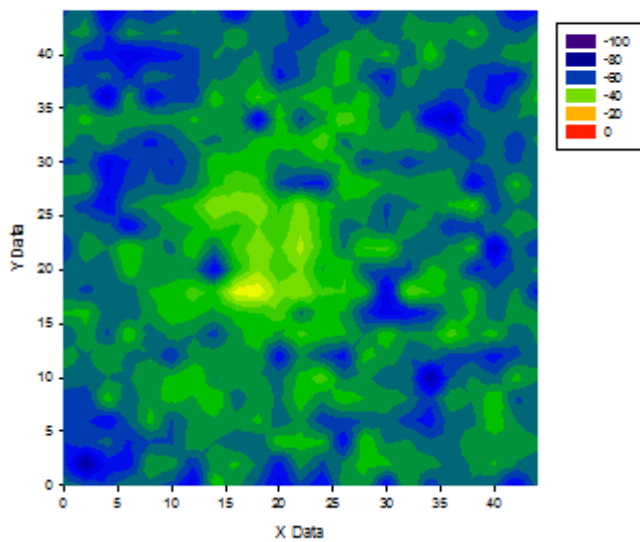
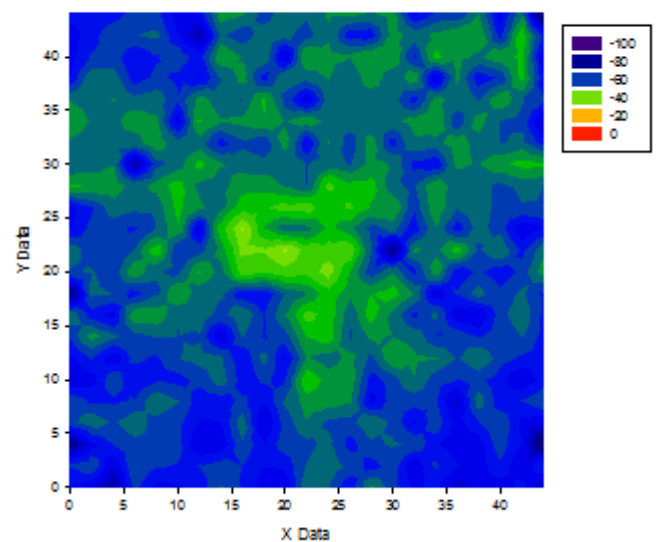


Diagrama potencia
 Z=10m



Simulación 36 hayas, resolución 2m, altura de antena 6m.

Diagrama potencia
Z=4m

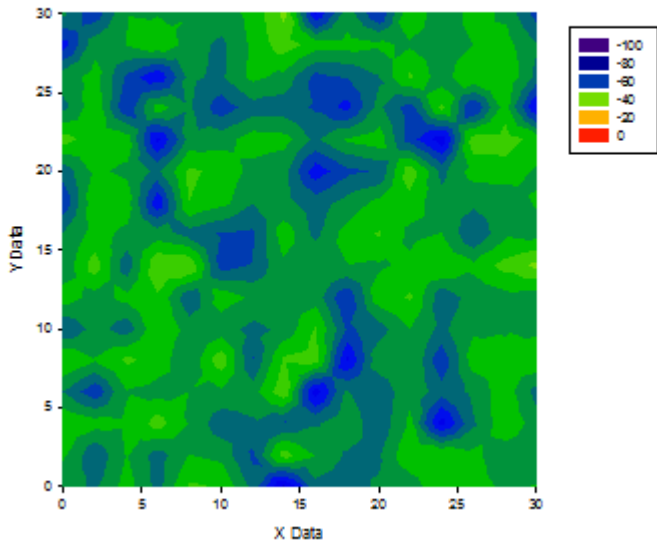


Diagrama potencia
Z=6m

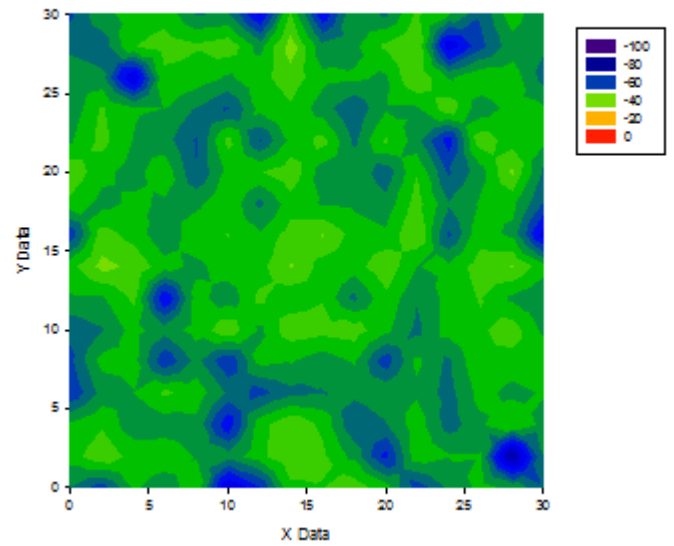


Diagrama potencia
Z=8m

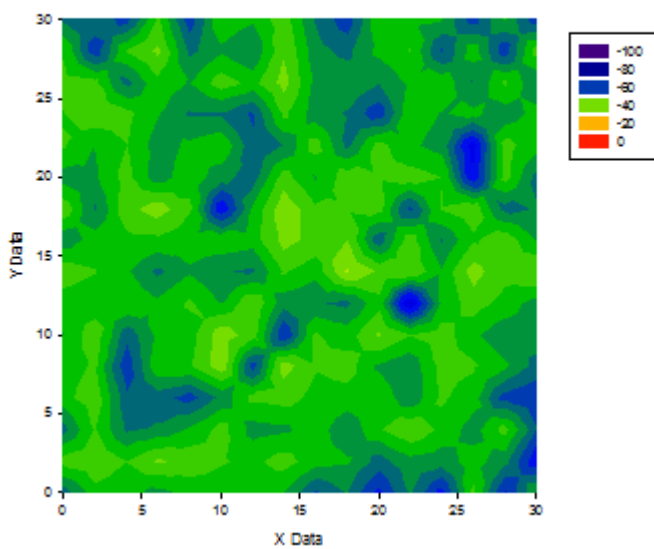
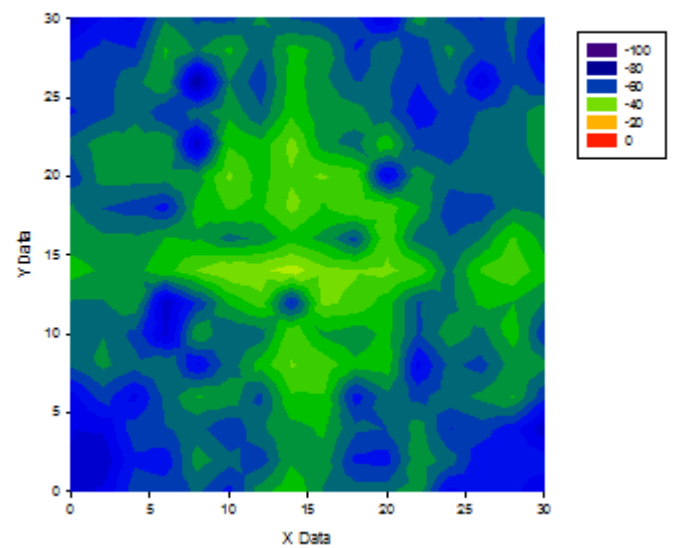


Diagrama potencia
Z=10m



Simulación 64 hayas, resolución 1m, altura de antena 8m.

Diagrama potencia
z=4 m

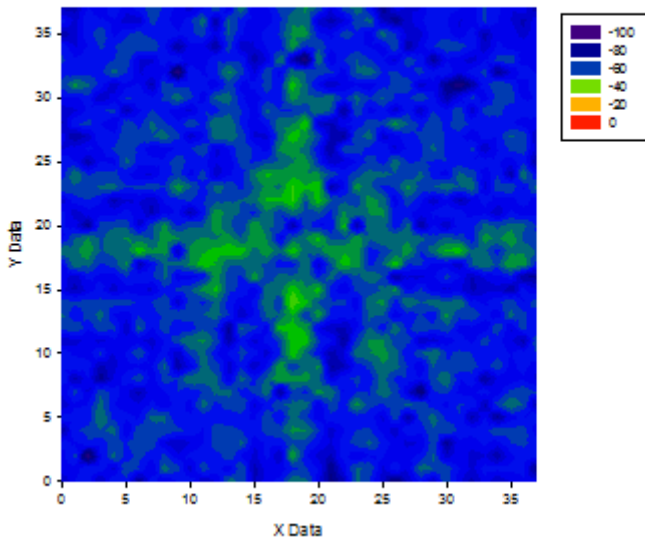


Diagrama potencia
z=6 m

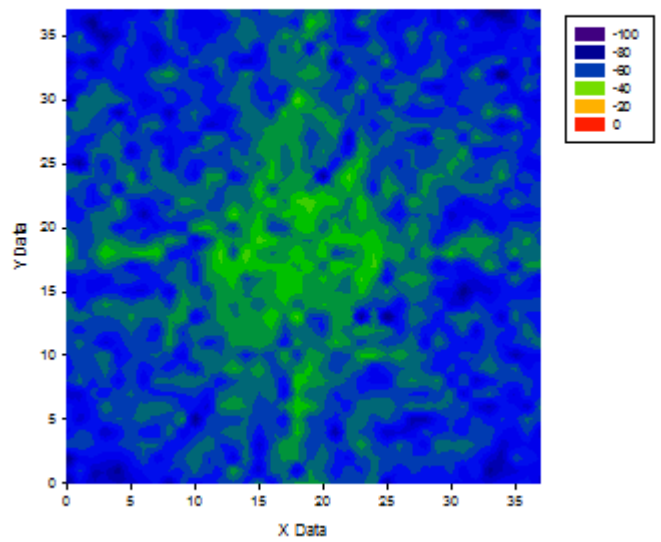


Diagrama potencia
z=8 m

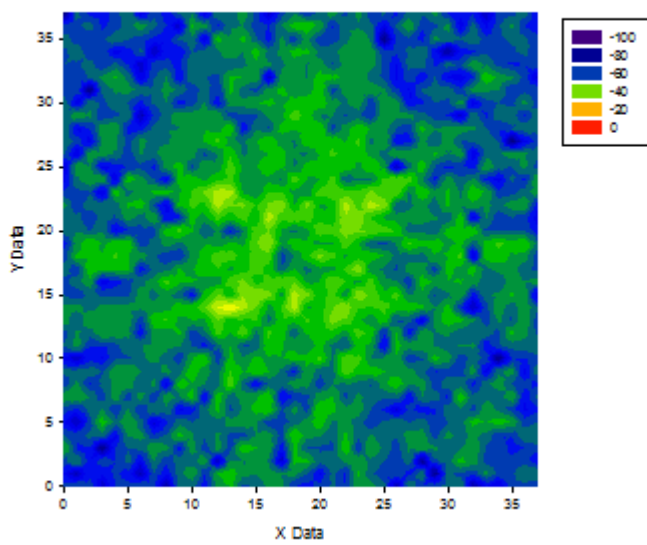
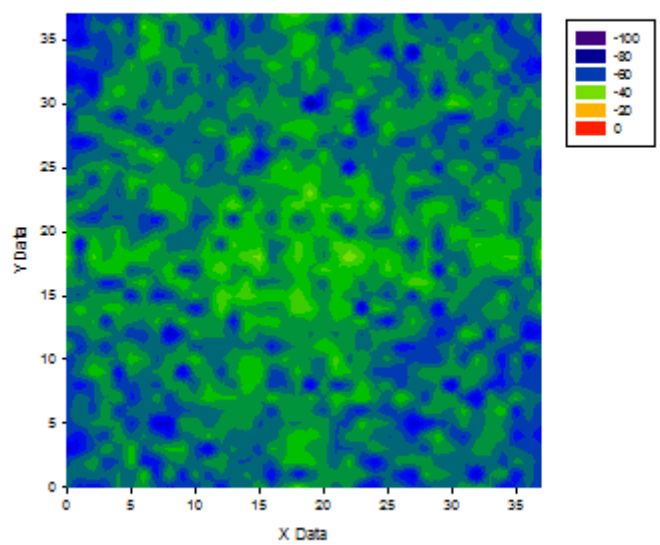


Diagrama potencia
z=10m



Simulación 64 hayas, resolución 2m, altura de antena 8m.

Diagrama Potencia
Z=4m

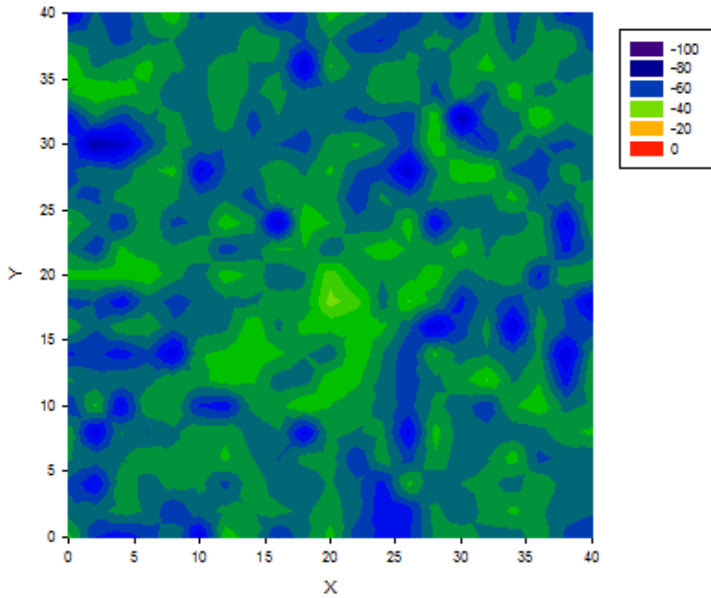


Diagrama Potencia
Z=6m

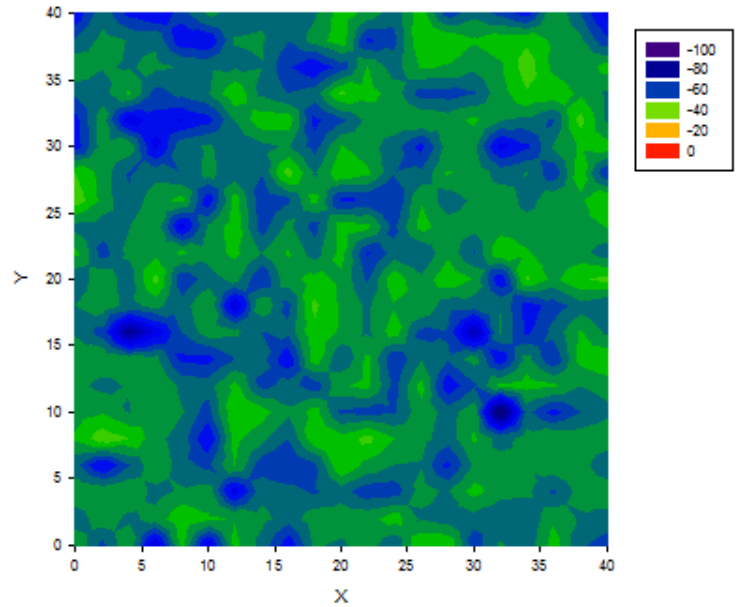


Diagrama Potencia
Z=8m

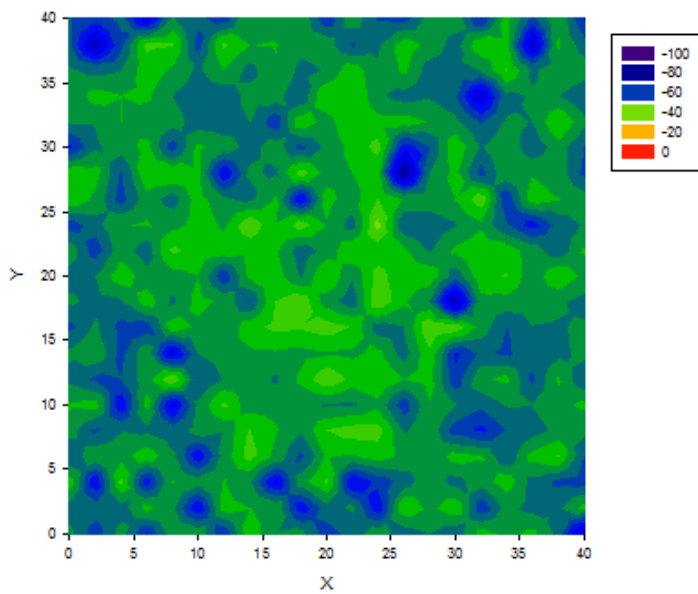
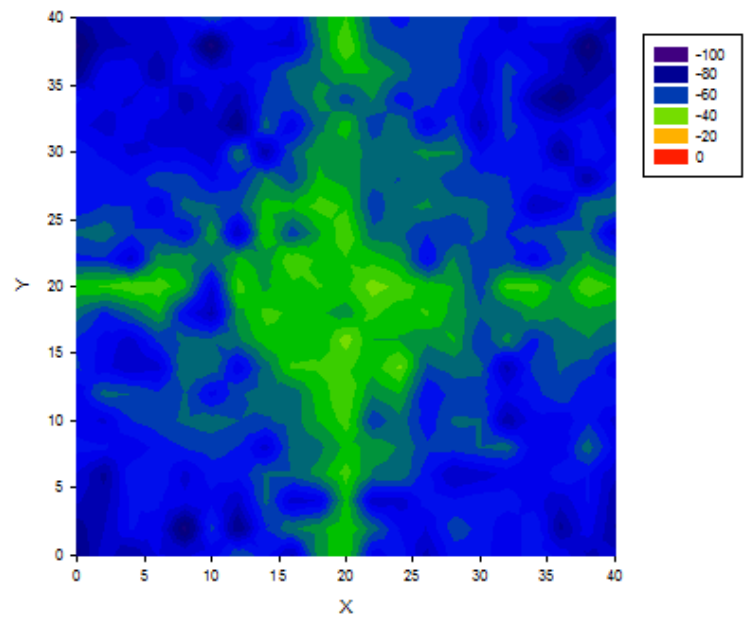


Diagrama Potencia
Z=10m



Simulación final, resolución 1m, altura de antena 6m.

Diagrama Potencia
 Z=4m

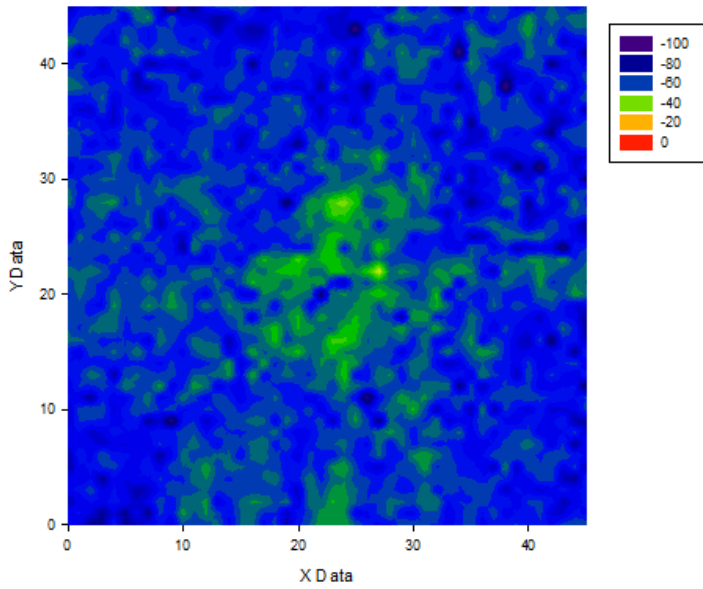


Diagrama Potencia
 Z=6m

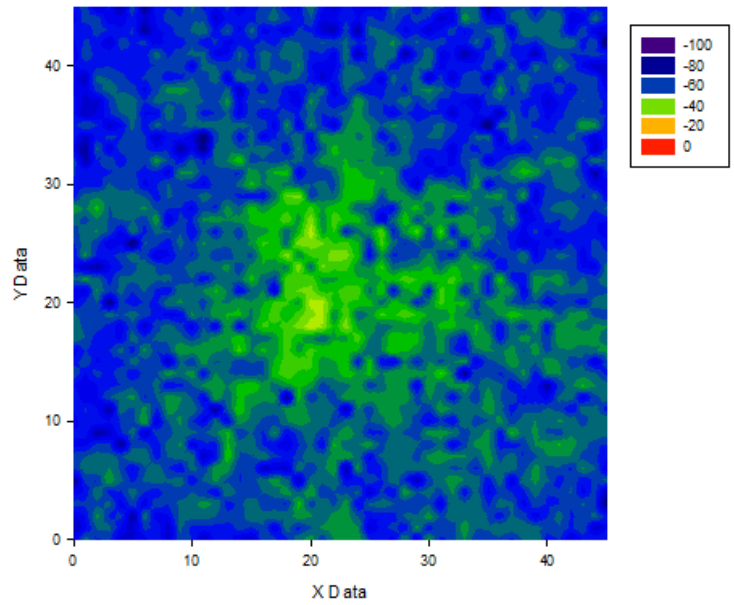


Diagrama Potencia
 Z=8m

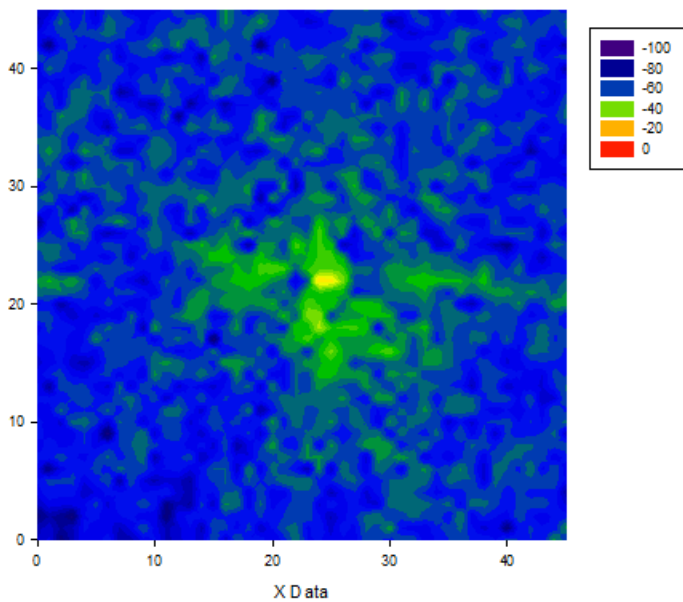
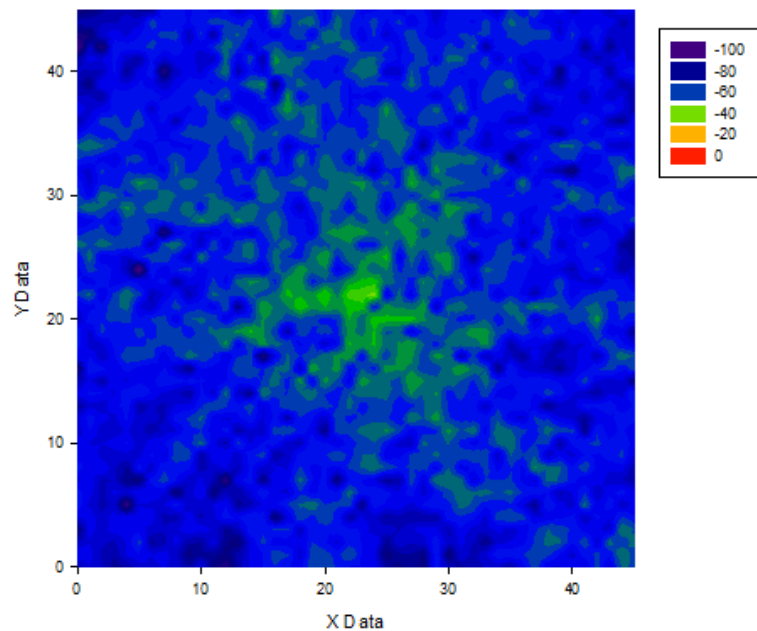


Diagrama Potencia
 Z=10m



Simulación final, resolución 2m, altura de antena 6m.

Diagrama potencia
 Z=4m

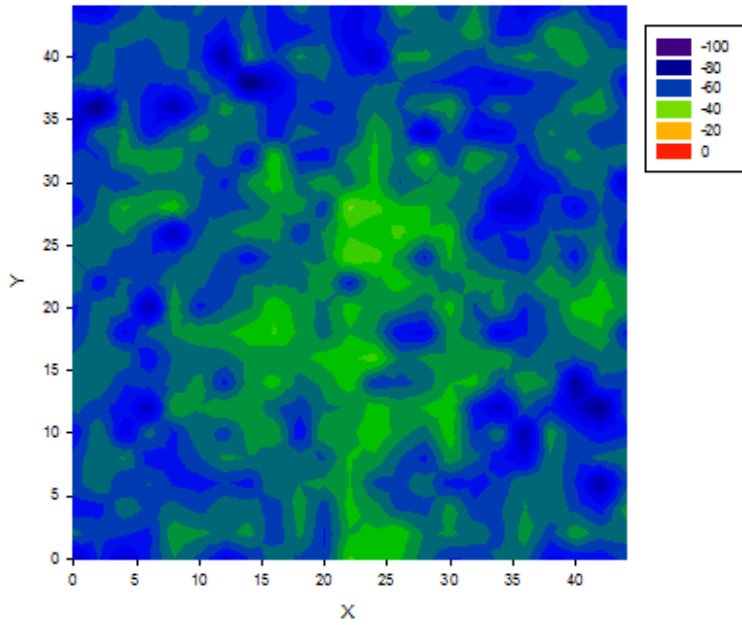


Diagrama potencia
 Z=6m

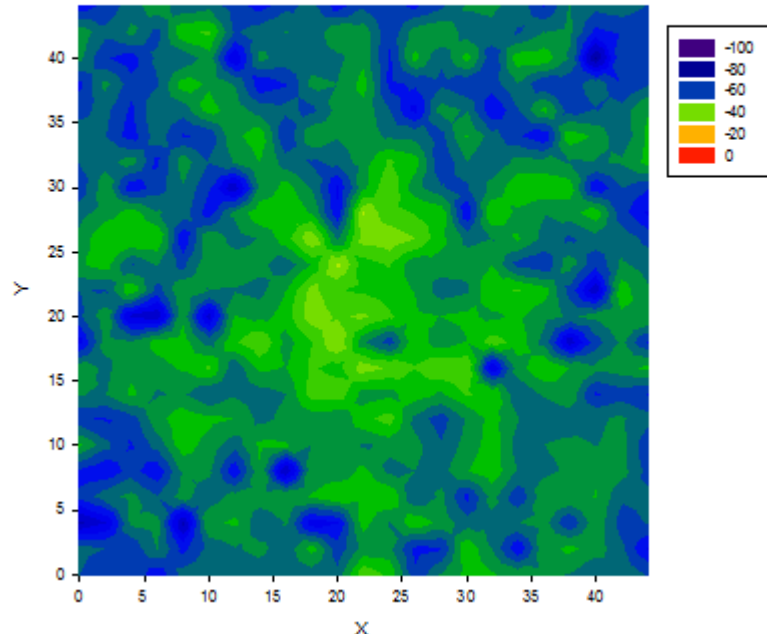


Diagrama potencia
 Z=8m

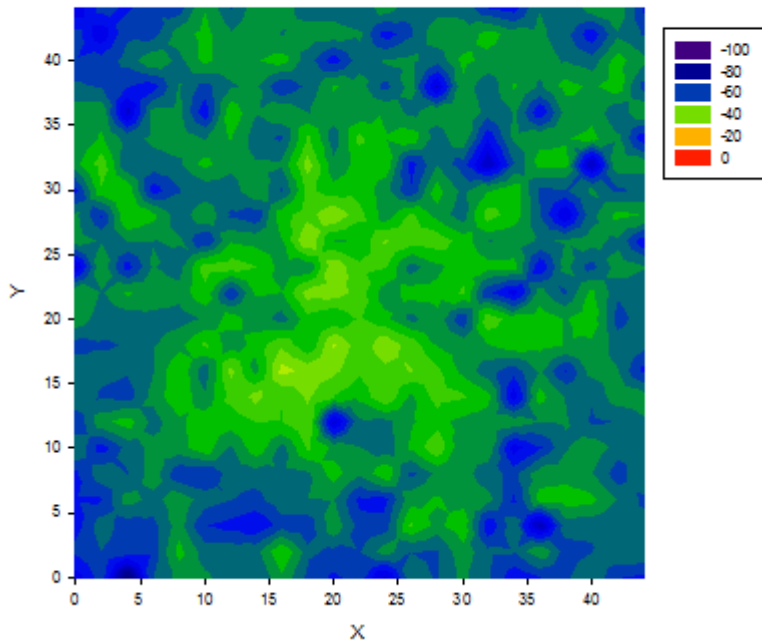
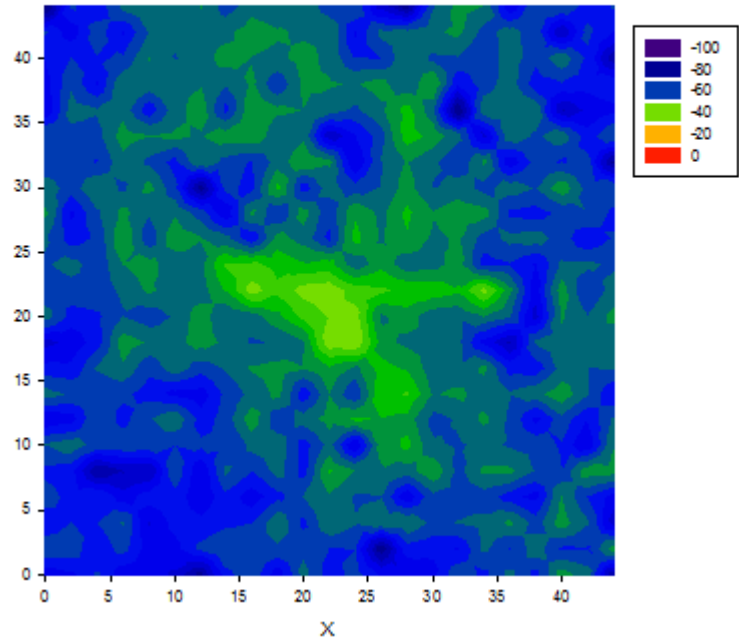


Diagrama potencia
 Z=10m



Simulación final, 868 MHz, resolución 1m, altura de antena 8m.

Diagrama Potencia
Z=2m para h=8m

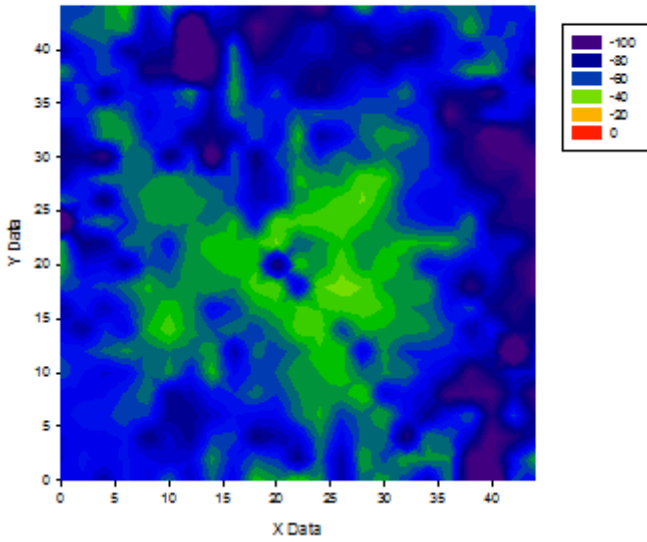


Diagrama Potencia
Z=6m para h=8m

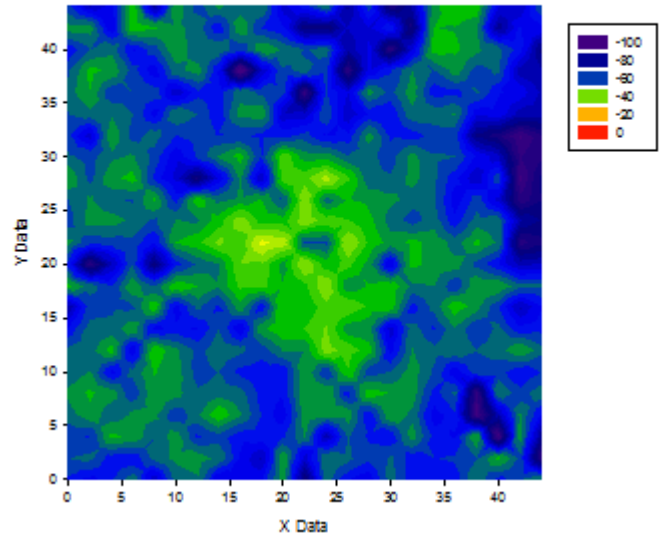


Diagrama Potencia
Z=8m para h=8m

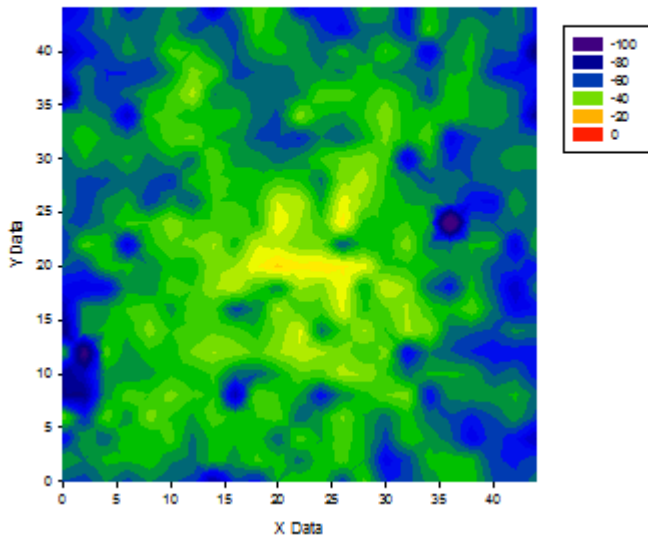
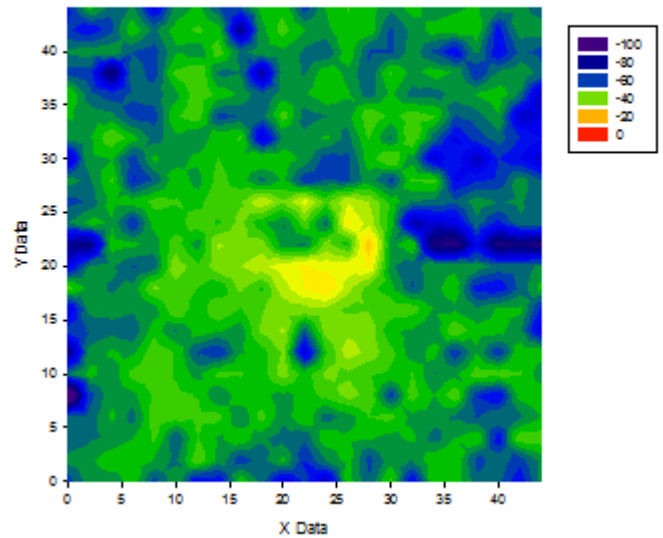


Diagrama Potencia
Z=10m para h=8m



Simulación final, 868 MHz, resolución 1m, altura de antena 4m.

Diagrama Potencia
 Z=2m para h=4m

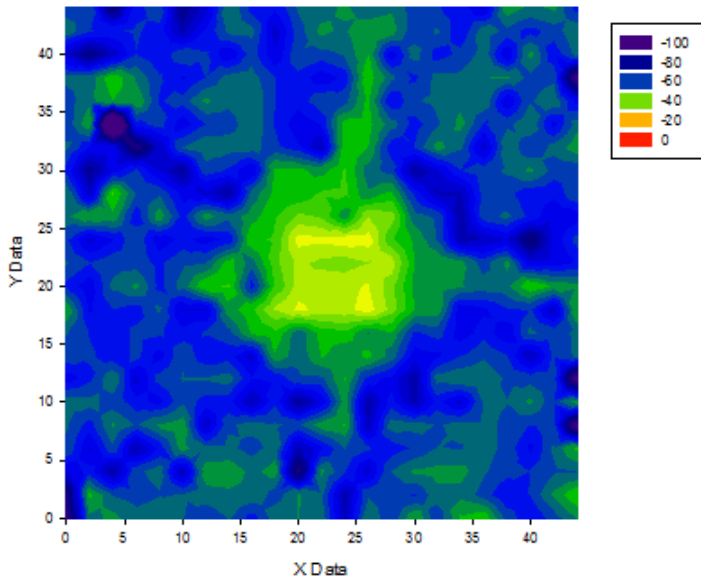


Diagrama Potencia
 Z=4m para h=4m

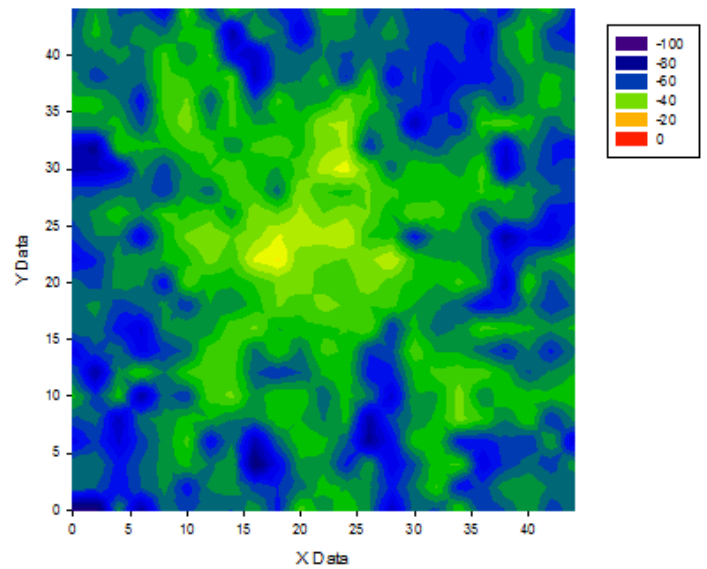


Diagrama Potencia
 Z=6m para h=4m

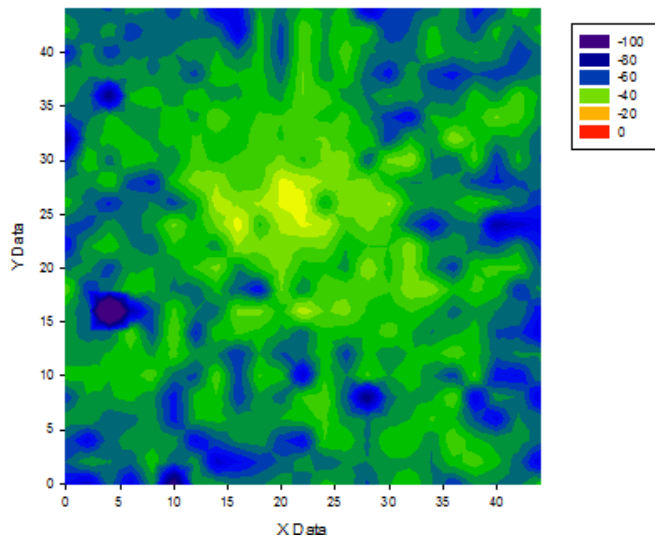
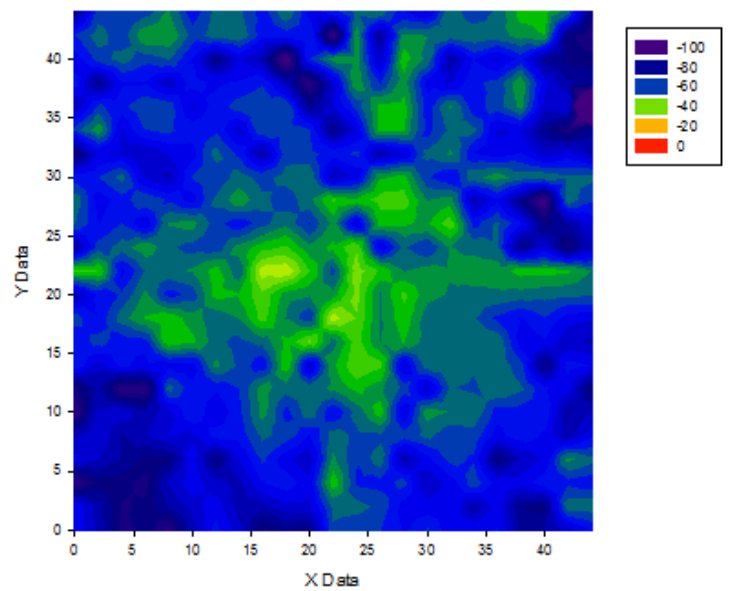


Diagrama Potencia
 Z=10m para h=4m



Simulación 32 árboles aleatorios 868MHz, resolución 2m, altura de antena 4m.

Diagrama Potencia
 Z = 2m para h=4m

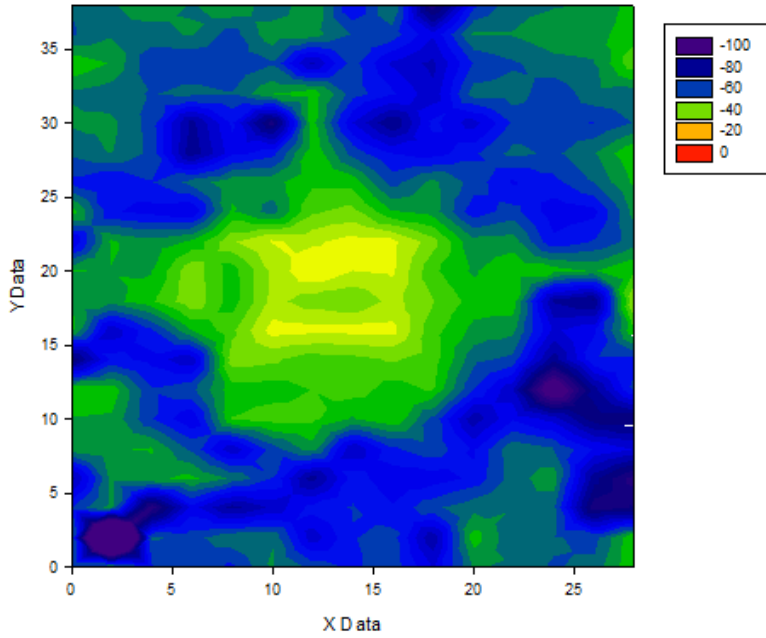


Diagrama Potencia
 Z = 4m para h=4m

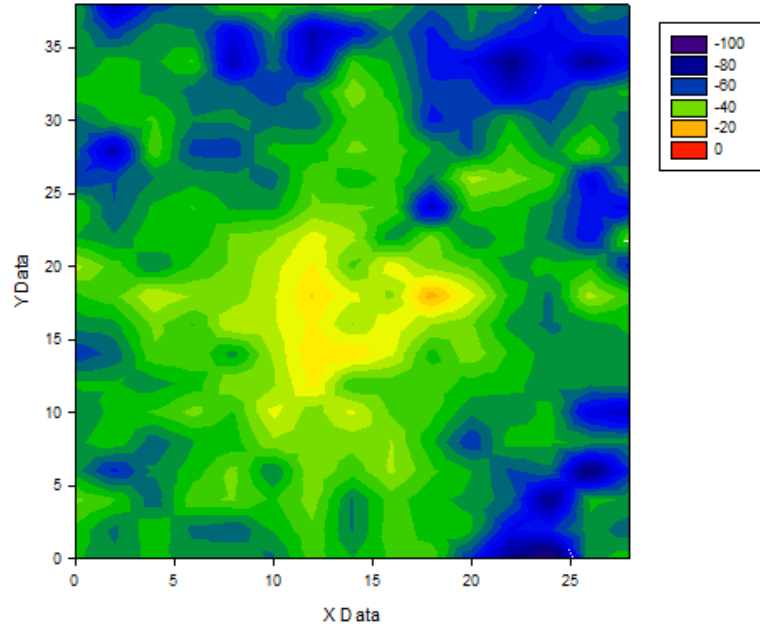


Diagrama Potencia
 Z = 6m para h=4m

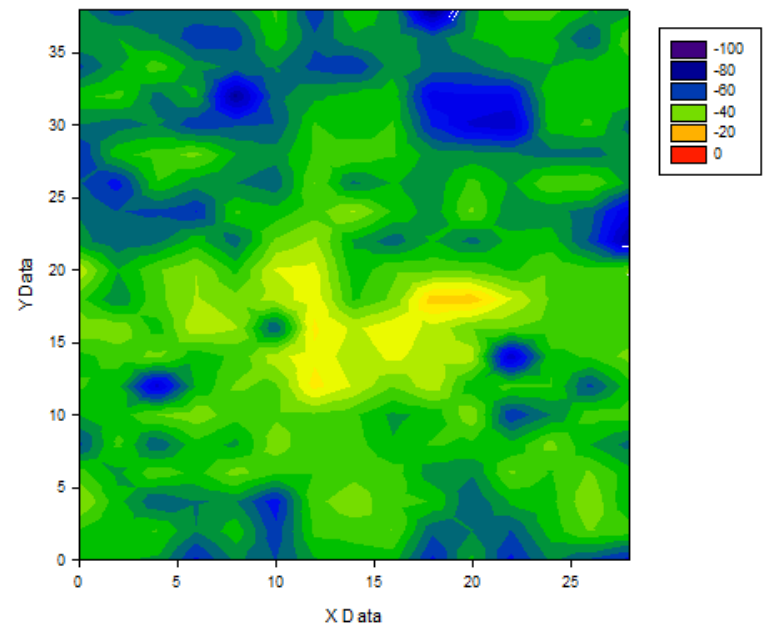
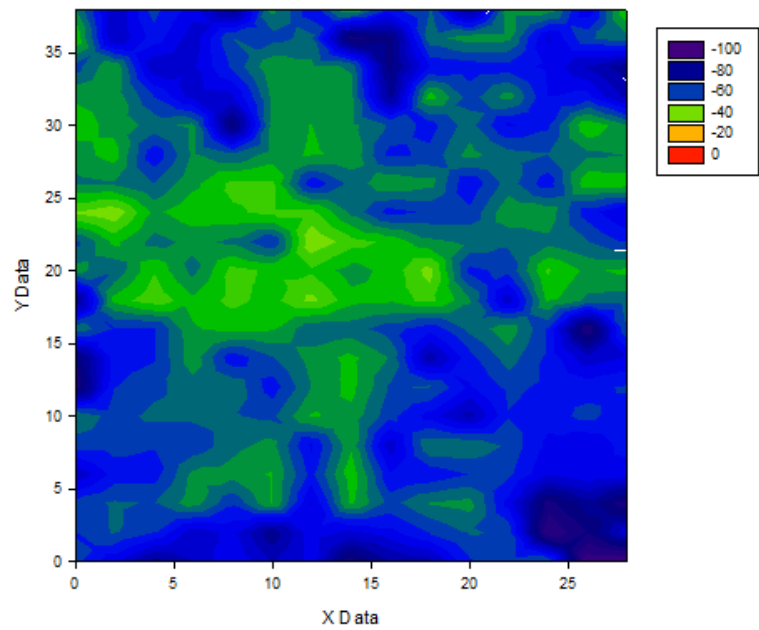


Diagrama Potencia
 Z = 10m para h=4m



Simulación 32 árboles aleatorios 868MHz, resolución 2m, altura de antena 8m.

Diagrama Potencia
 Z = 4m para h=8m

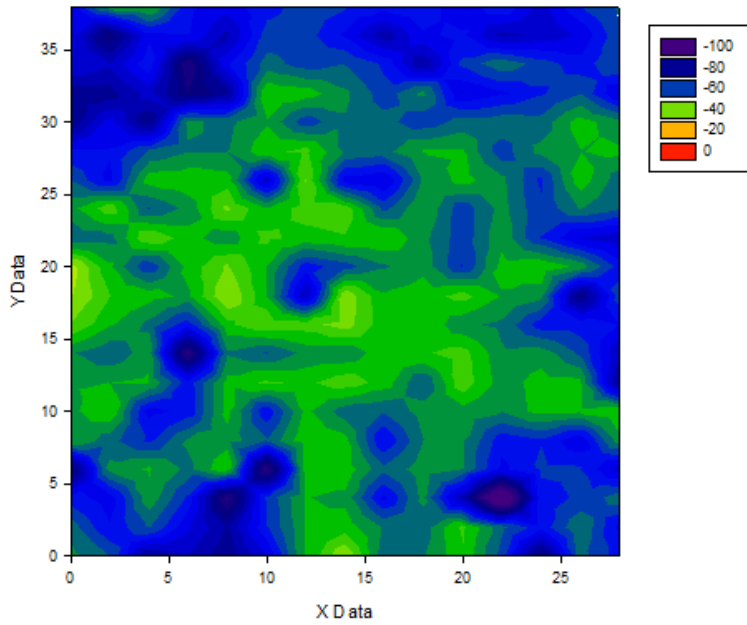


Diagrama Potencia
 Z = 6m para h=8m

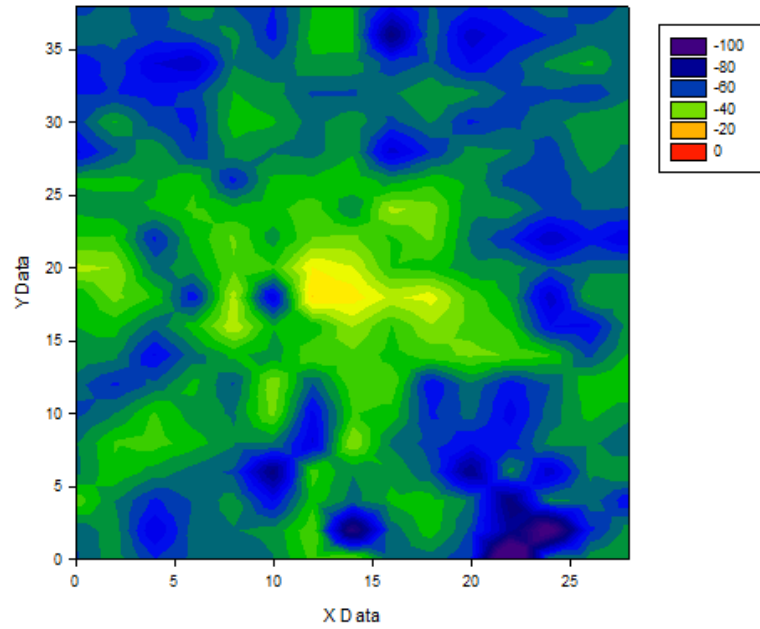


Diagrama Potencia
 Z = 8m para h=8m

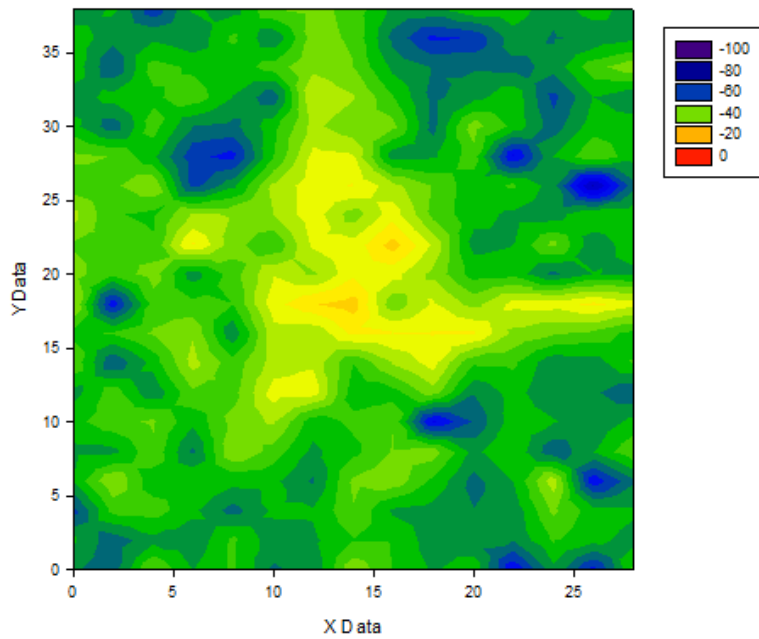
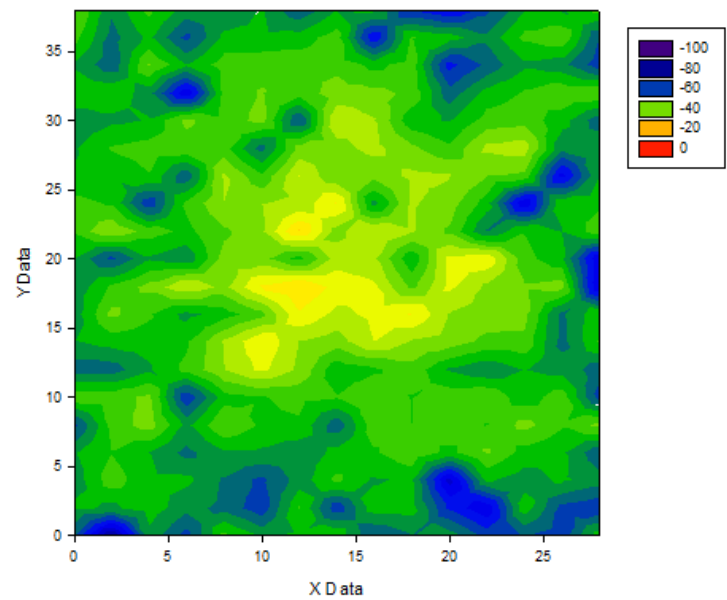


Diagrama Potencia
 Z = 10m para h=8m



Simulación final, 868 MHz, resolución 1m, altura de antena 10m.

Diagrama Potencia
 Z = 6 m para h=10m

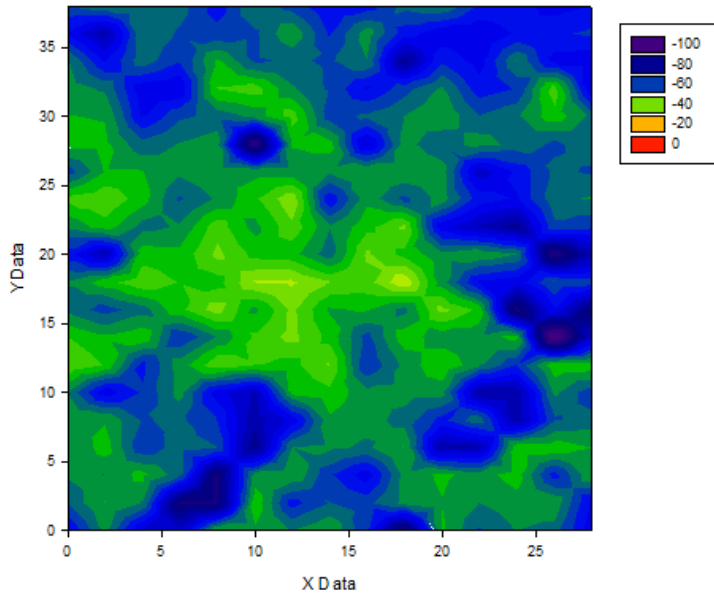


Diagrama Potencia
 Z = 8 m para h=10m

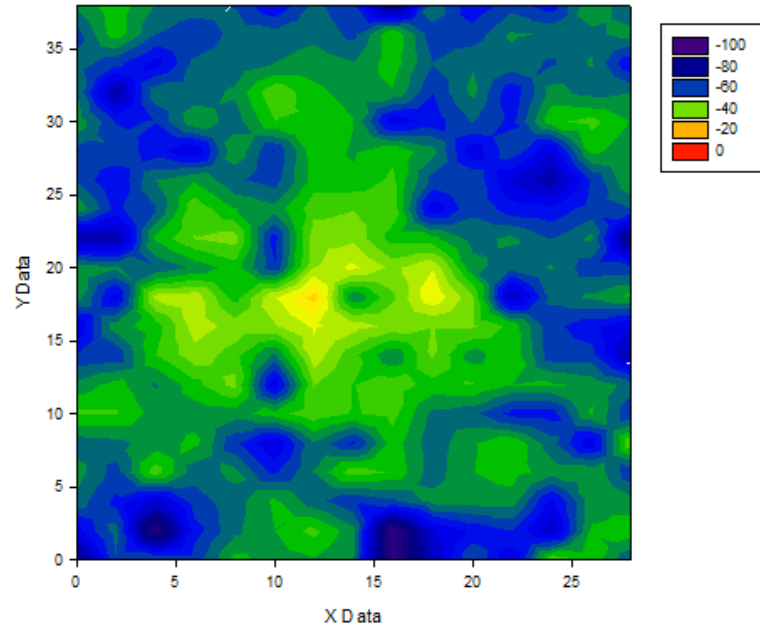


Diagrama Potencia
 Z = 10 m para h=10m

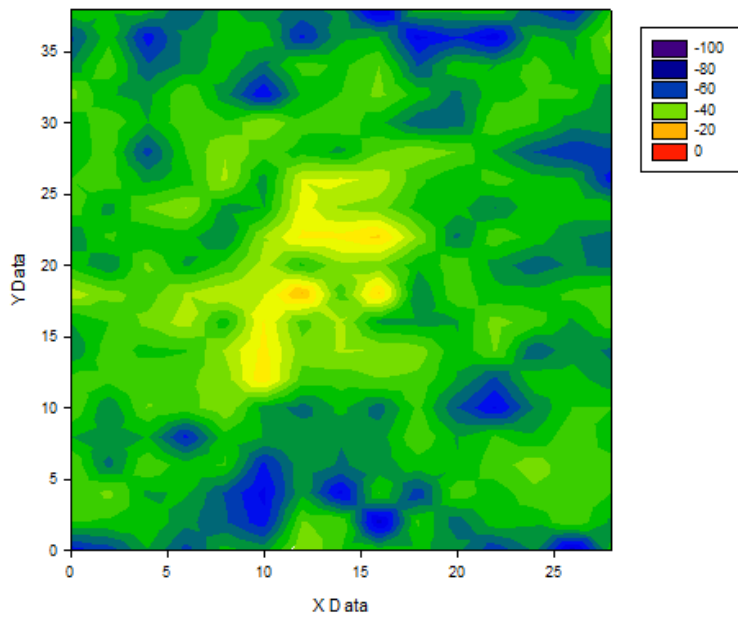


Diagrama Potencia
 Z = 12 m para h=10m

