



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE CARRERA

**TÍTULO DEL TFC:** Estudio y pruebas de campo de redes de sensores sin hilos

**TITULACIÓN:** Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Telemática

**AUTOR:** Víctor Cobos Melià

**DIRECTORA:** Mari Carmen Domingo Aladrén

**FECHA:** 23 de enero de 2003





**Título:** Estudio y pruebas de campo de redes de sensores sin hilos

**Autor:** Víctor Cobos Melià

**Directora:** Mari Carmen Domingo Aladrén

**Fecha:** 23 de enero de 2008

## Resumen

En este proyecto tratamos de introducir el concepto de las redes de sensores inalámbricas bajo tierra (Wireless Underground Sensor Networks, WUSN). Estas redes son un caso especial de WSN.

Las redes de sensores inalámbricas (Wireless Sensor Networks, WSNs), son redes heterogéneas compuestas por nodos inalámbricos que permiten tomar medidas continuamente del medio ambiente y los cambios que se producen en él.

En nuestro caso, describiremos las WUSNs. Éstas, son un sistema de WSNs pero bajo tierra. WUSNs puede ser utilizado para monitorizar una gran variedad de condiciones, como las propiedades de la tierra para aplicaciones de agricultura y sustancias tóxicas para el control medioambiental.

Los dispositivos de las WUSNs son desarrollados completamente bajo tierra y no requieren ninguna conexión mediante cable. Por ello, tienen un menor coste y la información circula vía radio.

Cada dispositivo contiene todos los componentes necesarios; memoria, un procesador, una antena, medio radio, y una fuente de energía, haciendo su desarrollo mucho más simple.

Este TFC proporciona una extensa visión general de aplicaciones, diseños para WUSNs, desafíos para los canales de comunicación bajo tierra, así como también nos introduce las ventajas y desventajas de las redes WUSNs.

Por último, se presentan los resultados de las pruebas en los diferentes escenarios que se utilizan para ver el funcionamiento de estas redes, las conclusiones extraídas y las líneas futuras.

**Title:** Study and testbed of wireless network sensors

**Author:** Víctor Cobos Melià

**Director:** Mari Carmen Domingo Aladrén

**Date:** January, 23th 2008

## **Overview**

In this project we try to introduce the concept of Wireless Underground Sensor Networks, WUSNs. These networks are a special case of WSNs.

The Wireless Sensor Networks (WSN), are heterogeneous networks composed by wireless nodes that allow taking measures continuously from the environment and their changes.

In our case, we will describe the WUSNs. They are WSNs that work underground. WUSNs can be used to monitor a variety of conditions like the soil properties for agriculture applications and toxics substances for the environmental control.

WUSN devices are completely developed underground and they don't require any wire connection. For this reason, they have a cheapest cost and the information circulates via radio.

Each device contains all the necessary components; memory, a processor, an antenna, a radio, and a source of energy, making its development very simple.

This TFC provides an extensive general vision of applications, designs for WUSNs, challenges for the underground communication channels, and it introduces the advantages and disadvantages of WUSNs as well.

Finally, this project presents the testbed results in the different scenarios that have been used to see the operation of these networks, the extracted conclusions and the further work.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. REDES DE SENSORES WIRELESS SUBTERRÁNEAS</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Aplicaciones</b> .....	<b>3</b>
1.1.1. Monitorización ambiental .....	<b>3</b>
1.1.2. Infraestructuras de monitorización .....	<b>5</b>
1.1.3. Localización determinada de objetos .....	<b>5</b>
1.1.4. Patrullas fronteras y monitorización de seguridad .....	<b>5</b>
<b>1.2 Desafíos en el diseño de WUSNs</b> .....	<b>6</b>
1.2.1. Conservación de la energía .....	<b>6</b>
1.2.2. Diseño de la topología .....	<b>7</b>
1.2.3. Diseño de la antena .....	<b>10</b>
1.2.4. Extremos medioambientales .....	
<b>1.3 Canal subterráneo wireless</b> .....	<b>11</b>
1.3.1. Propiedades del canal subterráneo .....	<b>11</b>
1.3.2. Modelos para predecir pérdidas de trayectoria (path loss) .....	<b>15</b>
1.3.3. Tecnologías alternativas de la capa física .....	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Dispositivos</b> .....	<b>17</b>
2.1.1. Moteworks .....	<b>18</b>
2.1.2. Nodo sensor .....	<b>19</b>
2.1.3. Estación base .....	<b>19</b>
<b>2.2 Software utilizado</b> .....	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3. ESCENARIOS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Medios físicos utilizados</b> .....	<b>26</b>
3.1.1. Aire libre .....	<b>26</b>
3.1.2. Tierra / Césped .....	<b>27</b>
3.1.3. Arena playa .....	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 Resultados aire libre</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2 Resultados Tierra / Césped</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3 Resultados arena playa (gateway visible)</b> .....	<b>35</b>

<b>4.4 Comparación diferentes medios .....</b>	<b>37</b>
<b>4.5 Resultados arena playa (gateway no visible) .....</b>	<b>40</b>
<b>4.6 Comparación arena playa (gateway visible y no visible).....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>45</b>
<b>IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES.....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>47</b>





# INTRODUCCIÓN

## Motivación

El interés personal por desarrollar este trabajo basado en WUSNs tiene las siguientes causas:

- El avance imparable que se está produciendo y desarrollando en el campo de las comunicaciones inalámbricas.
- Y, sobretodo, las oportunidades que la tecnología WSN / WUSN ofrece para poder diseñar redes eficaces, de bajo coste, y escalables.

## Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de unas pruebas de campo en diferentes escenarios. Es realizar medidas subterráneas con unos sensores adecuados a ello, y compararlas en estos diferentes medios. Estas pruebas de campo han sido diseñadas para poder estudiar como funciona la comunicación en redes de sensores bajo tierra y qué medidas pueden tomarse para que dicha comunicación pueda ser mejorada.

Estos dispositivos funcionan correctamente para monitorizar entornos subterráneos como por ejemplo, monitorizar condiciones de la tierra (contenidos minerales y de agua). También para adelantarse a posibles terremotos o comprobar la integridad de tuberías o cañerías etc.

La actual tecnología para sensores bajo tierra consiste en desarrollar sensores enterrados y conectarlos a un capturador de datos (data-logger) situado en la superficie que guarda lo que leen dichos sensores para luego obtener los datos.

Mientras la utilidad de estas aplicaciones de redes de sensores está clara, hay defectos que pueden impedir nuevos y más variados usos. Estos defectos o problemas y desafíos que pueden dificultar su despliegue incluyen: visibilidad, facilidad de desarrollo, tiempo de recepción de los datos, fiabilidad, y densidad de cobertura.

Estos defectos se podrían evitar utilizando redes de sensores subterráneas inalámbricas (WUSN), donde la mayoría de los dispositivos, incluyendo los sensores, se desarrollan totalmente bajo tierra (como su comunicación). De esta forma se pueden evitar robos y daños realizados en la superficie.

## Estructura

El trabajo está estructurado en cinco capítulos. El capítulo inicial pretende introducir al lector al mundo de las redes de sensores, así como sus

aplicaciones, limitaciones y funcionamiento. El segundo capítulo define los dispositivos seleccionados y el entorno de desarrollo que se ha utilizado para implementar los sensores. En el tercer capítulo conoceremos en que medios se han efectuado las pruebas, y en el cuarto veremos dichos resultados. El último capítulo contiene las conclusiones principales del trabajo, y sus líneas futuras.

# CAPÍTULO 1. REDES DE SENSORES WIRELESS SUBTERRÁNEAS

Como ya hemos comentado, definiremos las redes de sensores inalámbricas (WSNs), como redes heterogéneas compuestas por nodos inalámbricos que permiten tomar medidas continuamente del medio ambiente y los cambios que se producen en el mismo.

## 1.1 Aplicaciones

Actualmente clasificamos las potenciales aplicaciones bajo tierra en cuatro categorías: Monitorización medioambiental, infraestructuras de monitorización, localización determinada de objetos, y supervisión de patrullas fronteras y monitorización de seguridad. A continuación pasaremos a comentarlas.

### 1.1.1 Monitorización ambiental

Descrito ya un poco anteriormente, el tipo de sensor que se usa en la agricultura para monitorizar las condiciones de la tierra, como el agua y el contenido mineral, puede proporcionar datos apropiados para el riego y la fertilización. El sistema inalámbrico de sensores bajo tierra, sin embargo, puede proporcionar una mejora significativa del actual acceso para lograr un cuidado más eficiente de la tierra. Por ejemplo, como la instalación de WUSNs es más fácil que las soluciones del cableado existentes, pueden desarrollarse muchos más sensores para proporcionar datos locales más detallados. En vez de proceder al riego entero del campo como respuesta a datos poco precisos captados por sensores, podrían activarse aspersores individuales en localizaciones concretas basándose en la información de datos precisa obtenida por sensores en WUSNs.

La ocultación ofrecida por WUSNs también las hace más atractivas y las convierte en una solución más adecuada que las actuales WSNs terrestres. Las WUSNs son particularmente aplicables para monitorizar campos de deporte, donde también pueden ser usadas para monitorizar las condiciones de la tierra en los campos de golf, fútbol, béisbol... (Ver Fig. 1.1). Para todos estos deportes, un césped en malas condiciones generalmente crea unas condiciones de juego desfavorables; así pues el mantenimiento de la tierra es especialmente importante para asegurar una hierba en buen estado.

La monitorización de la presencia y concentración de varias sustancias tóxicas es otra importante aplicación. Ésta es especialmente importante para tierra cerca de ríos y acuíferos, donde los residuos químicos pueden contaminar el suministro del agua. En estos casos, es más deseable utilizar una red híbrida consistente en la combinación de sensores bajo tierra y sensores submarinos (que trabajan en el medio acuático).

Además de monitorizar propiedades de la tierra, las WUSNs pueden ser usadas para predecir movimientos de tierra. Los métodos actuales que predicen los corrimientos de tierras son costosos con un tiempo grande para desarrollarlos, evitando su uso en regiones pobres donde sería beneficiosa esta tecnología. Los dispositivos de WUSNs deberían ser económicos como los dispositivos de WSNs terrestres, y fáciles de desplegar, siendo únicamente necesario el enterrarlos. La tecnología de WUSNs permitirá desarrollar una mayor densidad de sensores para de esta forma poder predecir bien el movimiento de tierras y advertir con suficiente tiempo para poder realizar una posible evacuación.

Otra posible aplicación es la monitorización de la calidad del aire de las minas de carbón. La acumulación de metano y monóxido de carbono es un problema peligroso que puede llegar a producir explosiones o generar fuegos en las minas, donde la presencia de estos gases debería ser continuamente monitorizada. Esta aplicación necesitaría una arquitectura híbrida compuesta por sensores bajo tierra al aire libre y sensores incluidos bajo tierra entre la superficie y el techo del túnel de la mina. Esto permitiría encaminar rápidamente datos de los sensores de las minas para ser enviados hacia la superficie verticalmente, en vez de hacerlo a través de los túneles de larga distancia de las minas.

Otra aplicación para la minería incluye un sensor de audio (de poco consumo, resistente y alto nivel de sensibilidad), junto a la distribución de los nodos sensores bajo tierra para ayudar a la localización de mineros y rescatarlos en caso de que se quedaran atrapados. Los dispositivos de WUSNs con micrófono pueden ser también útiles para otras aplicaciones, como por ejemplo para estudiar los ruidos de los animales bajo tierra en su hábitat natural.

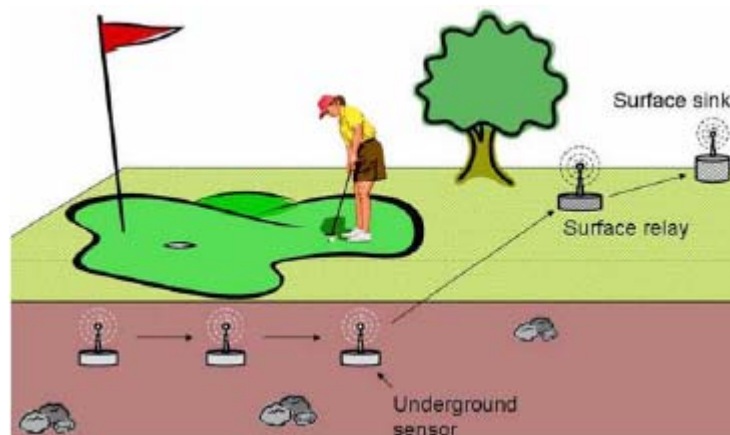


Fig. 1.1 Red WUSN desarrollada para monitorizar una competición de golf. Los sensores subterráneos pueden ser usados para monitorizar la salinidad de la tierra, el contenido de agua, y la temperatura.

### **1.1.2 Infraestructuras de monitorización**

Existen grandes cantidades de infraestructuras bajo tierra, como las cañerías, el cableado eléctrico, y depósitos para almacenar, donde las WUSNs pueden ser utilizadas para monitorización. Por ejemplo, hay estaciones donde se almacena combustible en depósitos subterráneos, que deben ser cuidadosamente monitorizadas para asegurar que no haya escapes y siempre haya la misma suma de combustible en el depósito. También son útiles para controlar que no se sobrecargue el tanque séptico de aquellos hogares ubicados en zonas que carecen de alcantarillas. El estado del tanque séptico debe monitorizarse para prevenir así su posible desbordamiento. Las WUSNs también serán útiles para monitorizar cañerías donde los sensores pueden ser colocados a lo largo de éstas para prevenir y localizar cualquier posible fuga.

Los sensores también son prácticos para monitorizar el estado de las estructuras de las edificaciones, puentes, presas etc, controlando así parámetros como las tensiones, fuerzas, etc.

Además, las WUSNs pueden ser usadas para aplicaciones militares donde existen infraestructuras bajo tierra, como los campos de minas. Las WUSNs deberían aumentar esta tecnología para permitir la comunicación de las minas cuando se desarrollan bajo tierra estando ocultas.

### **1.1.3 Localización determinada de objetos**

Los sensores bajo tierra que están enterrados y cuya localización es conocida, pueden ser usados como punto de control para ofrecer servicios de localización. Uno puede imaginar dispositivos desarrollados bajo la superficie de carreteras que se comuniquen con los coches y los conductores. Un posible servicio podría ser el de alertar a los conductores de una señal de tráfico próxima. El coche recibiría la información sobre la próxima señal y se retransmitiría a dicho conductor.

La tecnología de las WUSNs también puede ser usada para localizar gente en los edificios si ocurre algún derrumbamiento etc, aunque estas personas deberían llevar el dispositivo encima. Si ocurre algún contratiempo, el dispositivo del ocupante sería localizado en el lugar preciso de donde se encontrara del edificio al ponerse en contacto con otros dispositivos estacionarios. Aunque esta aplicación no es estrictamente bajo tierra, la densidad natural de los escombros del derrumbamiento plantea desafíos de comunicaciones wireless similares a los de bajo tierra.

### **1.1.4 Patrullas fronteras y monitorización de seguridad**

Las WUSNs se pueden usar para monitorizar encima de la superficie la presencia y movimiento de gente u objetos. Resulta parecido a determinar la localización de un objeto. Los dispositivos desarrollados deben ser estacionarios y debe conocerse su localización. A diferencia de la

determinación de una localización, donde un objeto anuncia su presencia comunicándose directamente con otros dispositivos, aquí se determina la presencia de un objeto o persona sobre la superficie gracias a la presencia de sensores de presión, acústicos o magnéticos. Esta aplicación es útil para casas y seguridad comercial, donde los sensores pueden ser desarrollados subterráneamente alrededor del perímetro del edificio en el cual se desean detectar intrusos.

A gran escala, las WUSNs pueden ser muy útiles para patrullas fronteras. La presión de los sensores desarrollados mediante wireless poco profundos a lo largo de cualquier perímetro, puede usarse para alertar a las autoridades de cualquier tipo de infracción. Cada sensor debería ser programado con información de la localización, permitiendo así la localización exacta del infractor y dar un área general en donde buscar por parte de las autoridades. Las áreas rurales son las que más necesitan esta seguridad, y la tecnología de las WUSNs debería permitir un sistema de monitorización fácil de desarrollar en estas áreas para que no necesitara ningún tipo de infraestructura.

## **1.2 Desafíos en el diseño de WUSNs**

Como el entorno terrestre es diferente al aire libre, en este apartado comentaremos cuatro características o consideraciones a tener en cuenta para poder desarrollar de una manera óptima las redes WUSNs: Conservación de energía, diseño de la topología, diseño de la antena y los extremos medioambientales.

### **1.2.1 Conservación de energía**

Dependiendo de la aplicación prevista, los dispositivos de WUSNs deberían tener un tiempo de vida de como mínimo varios años para que fueran eficientes con respecto al coste. Este desafío es complicado por las pérdidas del canal subterráneo, que requiere que los dispositivos de WUSNs tengan medio radio con una mayor potencia de transmisión que los dispositivos de WSNs terrestres. Como resultado, la conservación de energía es la preocupación principal del diseño de redes WUSNs.

Igual que en las WSNs, el tiempo de vida de WUSN es limitado dependiendo de la fuente de energía (batería) de cada dispositivo. Desafortunadamente, el acceso a dispositivos de WUSNs será mucho más difícil que los accesos a redes terrestres en muchos desarrollos, haciendo menos factible la recuperación de estos dispositivos para recargarlos o reemplazar su fuente de energía. Mientras que recargar los dispositivos desarrollados cerca de la superficie es posible con técnicas de inducción, recargar los dispositivos más profundos será mucho más difícil, si es que no es imposible. El desarrollo de nuevos dispositivos para reemplazar los deteriorados es también difícil. Además, los dispositivos terrestres de WSNs pueden ser equipados con una célula solar para complementar o reemplazar la tradicional fuente de energía, lo que obviamente no es una opción para los dispositivos de WUSNs. Hay

también diversas opciones de utilización de energías renovables para los dispositivos de WUSNs, como convertir las vibraciones sísmicas en energía, pero aún queda por ser explorado si estos métodos pueden proporcionar suficiente energía como para que un dispositivo opere por sí solo con la ausencia del tradicional suministro de energía.

La conservación de energía, por tanto, debería de ser el objetivo principal en el diseño de WUSNs. Aunque sea posible aumentar el tiempo de vida de los dispositivos adjuntando una gran fuente de reserva de energía, esto no es deseable debido a que aumentaría el coste y el tamaño de los sensores. Esta conservación de la energía puede ser conseguida utilizando un hardware que consume poca potencia y unos protocolos de comunicación adecuados.

### 1.2.2 Diseño de la topología

El diseño de una topología apropiada para las WUSNs es de una gran importancia para la fiabilidad de la red y la conservación de la energía. Las topologías de las redes WUSNs son significativamente diferentes a las de su homólogo terrestre WSNs. Por ejemplo, la localización de los dispositivos de WUSNs normalmente será cuidadosamente planeada, ya que se hace un gran esfuerzo para excavar y colocar los dispositivos. También las topologías tridimensionales serán comunes en las WUSNs, con sensores desarrollados a diferentes profundidades impuestos por la aplicación sensora.

La aplicación de las WUSNs jugará un papel importante a la hora de imponer cierta topología; sin embargo, el consumo de la mínima energía y el coste del desarrollo también serán considerados para su diseño. Debe ser alcanzado un equilibrio prudente entre estas consideraciones para tener una topología óptima. A continuación veremos consideraciones que se deben tener en cuenta para decidir cuál deber ser la topología de WUSNs.

- **Aplicación prevista:** Los dispositivos sensores deben ser localizados cerca del fenómeno que debe ser detectado, razón que influye en la profundidad con la cual los sensores deben ser enterrados. Varias aplicaciones requieren una densidad grande de sensores en un área física pequeña, mientras que otras podrían estar interesadas en detectar el fenómeno a través de un área física grande pero con menor densidad de dispositivos. Aplicaciones de seguridad, por ejemplo, requerirán una densidad grande de sensores de presión bajo tierra, mientras que las aplicaciones para monitorizar la tierra necesitarían menos dispositivos, puesto que las propiedades del suelo no suelen variar demasiado si las distancias son reducidas.
- **Minimización de energía:** El diseño de topología inteligente puede ayudar a conservar la energía en WUSNs. Como la atenuación es proporcional a la distancia entre el transmisor y receptor, la energía usada puede ser minimizada diseñando una topología con un número largo de saltos de cortas distancias y no con un número pequeño de saltos de largas distancias.

- Coste: A diferencia de los sensores terrestres, donde el desarrollo simplemente requiere una distribución física de los sensores, aquí el trabajo y por tanto el coste está relacionado con la excavación necesaria para desarrollar WUSNs. Cuanto mayor es la profundidad de un dispositivo sensor, más profundamente deberá excavar y mayor será su coste. Habrán costes adicionales cuando ocurra que las fuentes que suministran energía a cada dispositivo, se agoten y el dispositivo tenga que ser desenterrado para repararlo o reemplazarlo. De esta manera, cuando el coste es un factor a tener en cuenta, debe procurarse no enterrar sensores a mucha profundidad y el número de dispositivos debe ser menor. Sin embargo, minimizar el número de dispositivos puede entrar en conflicto con lo explicado anteriormente de aumentar la densidad de sensores para minimizar la potencia consumida; por este motivo, debe llegarse a un compromiso (o un equilibrio) entre ambas estrategias.

Con lo explicado anteriormente, y teniéndolo en cuenta, podemos suponer dos posibles topologías de WUSNs, que deberían servir para tratar muchas de las aplicaciones sensores subterráneas. Éstas son la topología subterránea y la topología híbrida.

- Topología subterránea: Ésta consiste en que todos los dispositivos sensores subterráneos sean desarrollados bajo tierra, menos el sensor destino (sink o sumidero), que sería desarrollado bajo tierra o bien sobre tierra como vemos en la Fig. 1.2. De forma similar a las redes terrestres WSNs, el destino en una WUSN es el nodo que recibe todos los datos de los sensores de la red. Las topologías subterráneas pueden estar colocados a una profundidad única (los sensores están a la misma profundidad; single-depth) ó estar colocados a varias profundidades (los sensores varían en su profundidad; multi-depth). Tanto los protocolos de comunicación como los dispositivos sensores hardware para redes multi-depth, requieren una especial consideración para asegurarse que los datos serán encaminados correctamente al sink (sumidero) de la superficie. La profundidad con que estos dispositivos son utilizados dependerá de la aplicación de la red. Por ejemplo, los sensores de presión deberán ser colocados cerca de la superficie, mientras que otros sensores de minerales etc, deberán de ser colocados cerca de las raíces de las plantas. Ésta topología minimiza el equipamiento sobre tierra, proporcionando una ocultación máxima de la red. Los dispositivos usados poco profundamente pueden ser capaces de usar un camino tierra-aire-tierra para el canal de comunicación, donde deberían producirse menos pérdidas que con el canal de comunicación tierra-tierra.



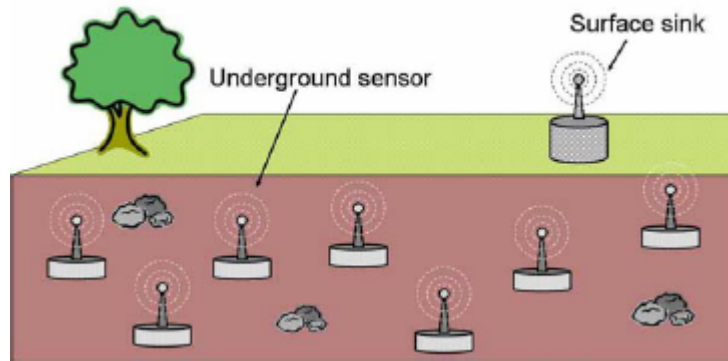


Fig. 1.2 Topología subterránea

- Topología híbrida: Ésta está compuesta por una mezcla de dispositivos subterráneos y sobre tierra como podemos ver en la Fig. 1.3. Como las señales inalámbricas son capaces de propagarse a través del aire con menos pérdidas que a través de la tierra, los sensores sobre tierra requieren una potencia de transmisión inferior para transmitir a las mismas distancias que los sensores de las redes subterráneas. Una topología híbrida permite que los datos sean enrutados fuera de bajo tierra en menos saltos, así que en vez de que todos los saltos sean bajo tierra y consuman mucha energía, se dan algunos saltos menos costosos en cuanto a energía en la superficie terrestre, como en las redes terrestres. Además, los dispositivos terrestres son más accesibles en cuanto al cambio o recarga de la energía de los sensores. Así pues, de poder elegir, para los gastos de energía, se deberían utilizar los dispositivos sensores colocados sobre la superficie y no los subterráneos. No obstante, la desventaja de una topología híbrida es que la red no es completamente oculta como la topología de red subterránea.

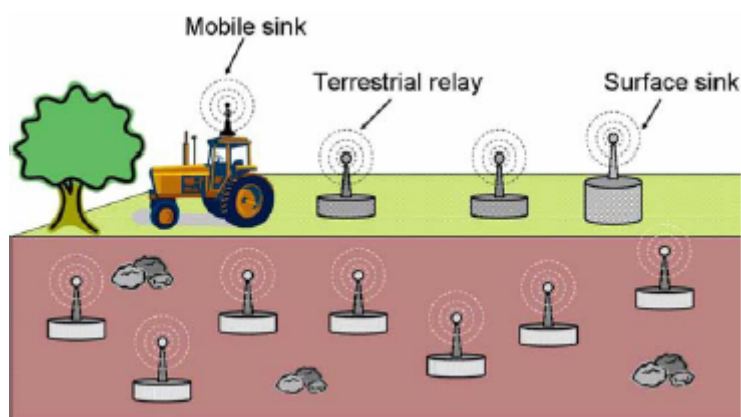


Fig. 1.3. Topología híbrida

La topología híbrida puede también consistir en sensores bajo tierra y un sink terrestre móvil. Este punto móvil, se mueve sobre la superficie de la red subterránea desarrollada y recolecta información de datos desde los sensores situados bajo tierra o de los nodos intermedios localizados sobre la superficie.

Si no hay nodos intermedios localizados sobre la superficie, los dispositivos más profundos pueden encaminar sus datos hacia un dispositivo poco profundo (que es capaz de comunicarse con ambos dispositivos; los subterráneos y los que se encuentran en la superficie), que almacenará los datos hasta que el sink móvil esté dentro de su cobertura radio. Ésta topología debería proporcionar un ahorro de energía en la red, reduciendo el número de saltos para llegar al destino, puesto que cada dispositivo poco profundo puede funcionar eficazmente como destino o sink. La pega de esta topología es la latencia introducida cuando se almacenan los datos hasta que el colector móvil está dentro del rango de cobertura.

### 1.2.3 Diseño de la antena

La selección de una antena apropiada para dispositivos de WUSNs es otro problema. En particular, los desafíos para el desarrollo de las antenas son los siguientes:

- **Requerimientos variables:** Diferentes dispositivos servirán para diferentes fines de comunicación, y por tanto se requerirán antenas con diferentes características. Por ejemplo, dispositivos colocados a algunos centímetros de la superficie, deberían tener una especial consideración debido a las reflexiones de las radiaciones EM (electromagnéticas) que suelen darse en las superficies tierra-aire. Además, estos dispositivos situados cerca de la superficie, como ya se ha dicho, actuarán como nodos intermedios o relays entre los dispositivos más profundos y los dispositivos situados en la superficie. Los dispositivos más profundos actuarán transmitiendo los datos de forma vertical hacia la superficie y requerirán antenas que enfoquen en ambas direcciones: vertical y horizontal.

Otro punto importante es el tamaño de las antenas. Deben de ser eficientes para poder transmitir y recibir todos los datos pero sin tener un tamaño excesivo. Naturalmente este es un gran desafío para las WUSNs, donde se han de diseñar dispositivos sensores pequeños.

- **Direccionamiento:** En investigaciones futuras veremos si para los dispositivos de WUSNs es más apropiado el direccionamiento de una antena omni-direccional o bien de un grupo de antenas direccionales independientes. Las comunicaciones con una única antena omni-direccional probablemente serán un desafío para las topologías de WUSNs donde pueden haber sensores localizados en distintas profundidades. Las antenas omni-direcciones con una orientación vertical presentan por ejemplo una comunicación pésima con dispositivos orientados encima y debajo. Este tema será resuelto equipando los dispositivos con antenas orientadas para comunicaciones verticales y horizontales.

El diseño de la antena dependerá también de la tecnología que se utilice en la capa física.

## 1.2.4 Extremos medioambientales

El medio ambiente subterráneo está lejos de ser una localización ideal para dispositivos electrónicos. Agua, temperaturas extremas, animales, insectos, todo esto representa una amenaza para los dispositivos de WUSNs, y deben ser provistos con una protección adecuada. Procesadores, radio, suministrador de energía, y otros componentes deben ser resistentes a estos factores. Además, el tamaño físico de los dispositivos de WUSNs debería mantenerse pequeño, por los gastos y el tiempo que requiere la excavación de grandes dispositivos. La tecnología de las baterías debe ser elegida cuidadosamente para ser apropiada para las temperaturas a las que van a estar expuestos los sensores mientras que debe existir un equilibrio entre la adaptación a las condiciones ambientales y las preocupaciones por el tamaño físico y su capacidad. Los dispositivos también estarán sujetos a la presión de la gente u objetos que se muevan por encima o, los dispositivos profundamente desarrollados, a la presión inherente de la tierra.

Los mismos factores medioambientales que convierten el medio subterráneo en un desafío para el hardware crean también unas condiciones extremas en los canales wireless bajo tierra, que serán expuestas a continuación.

## 1.3 Canal subterráneo wireless

El canal subterráneo wireless es uno de los factores principales que convierte el desarrollo de WUSNs en un desafío. Aunque las comunicaciones digitales en el subterráneo parecen no haber sido exploradas, la propagación de ondas EM a través del suelo sí que ha sido estudiada extensamente en el pasado.

A continuación describiremos las propiedades del canal EM subterráneo, el efecto de varias propiedades del suelo sobre este canal, y métodos para predecir pérdidas de camino (path losses) en un enlace de comunicación subterráneo. Además, describiremos tecnologías alternativas para la capa física que está por determinar si serán más adecuadas para redes WUSNs, y el trabajo existente sobre la comunicación digital inalámbrica subterránea.

### 1.3.1 Propiedades del canal subterráneo

Aunque la propagación de ondas EM ha sido estudiada, todavía no existe un modelo exhaustivo para el canal subterráneo. Sin embargo se identifican cinco factores principales que afectan a la comunicación con ondas EM en el subterráneo: pérdidas de camino extremas (extreme path loss), reflexión/refracción, atenuación por multicamino (fading), velocidad de propagación reducida y ruido.

- Pérdidas de camino extremas (extreme path loss): Las pérdidas de camino debido a la absorción material son una preocupación importante al usar ondas EM para comunicaciones subterráneas. Estas pérdidas son determinadas por la frecuencia de la onda y las propiedades del

suelo o piedras a través de las cuales se propagan. Las frecuencias bajas que se transmiten subterráneamente a una cierta distancia y condición del suelo, tienen menos atenuación que las altas frecuencias.

Incluso frecuencias en el rango de MHz pueden sufrir una atenuación por encima de los 100 dB por metro dependiendo de las condiciones del suelo. Las pérdidas de camino dependen mucho del tipo de tierra o suelo y del contenido de agua. Los terrenos generalmente son clasificados dependiendo del tamaño de sus partículas. En orden de mayor a menor tamaño tenemos: arena, cieno, arcilla o una mezcla de ellos. Un terreno de arena generalmente es más favorable para la propagación de ondas electromagnéticas que los compuestos por arcilla. Además, un aumento de algún contenido de agua, produce un aumento también de la atenuación.

En la Fig. 1.4 podemos ver las pérdidas de camino (path loss) debido a la absorción material y al frente de onda esférico a una distancia de 1 metro para una composición de: 50% arena, un 35% de cieno, y el 15% de muestras de arcilla con los diversos contenidos volumétricos. Se muestra como referencia la curva demostrando las pérdidas cuando se propaga un frente de onda en espacio libre.

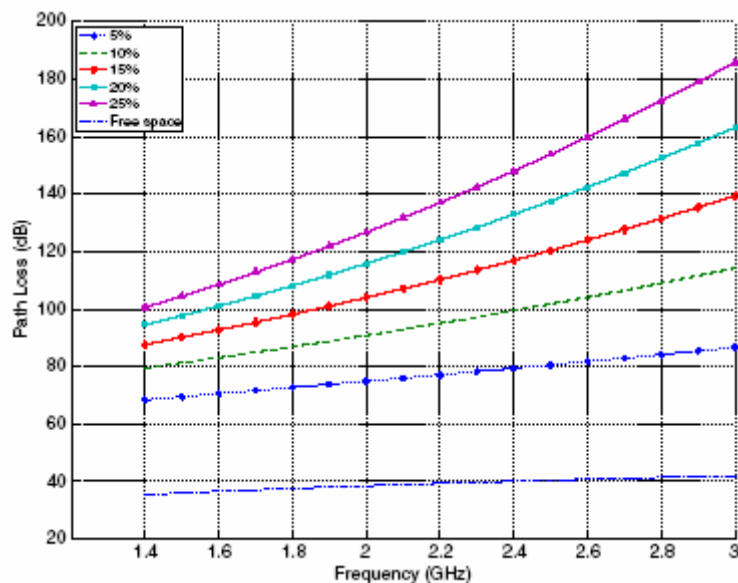


Fig. 1.4 Path loss respecto a la frecuencia

A continuación en la Fig. 1.5 vemos la atenuación de la señal por metro debido a la absorción material para una composición de: 50% de arena, 35 % de cieno, y el 15% de muestras de arcilla.

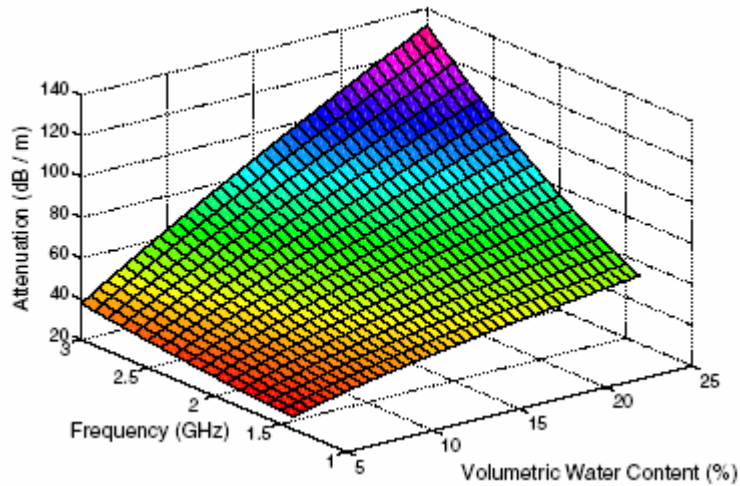


Fig. 1.5: Atenuación de la señal respecto la frecuencia y el % de contenido de agua.

En el último gráfico (Fig. 1.6) de este punto vemos la atenuación de la señal por metro debido a la absorción material para una señal de 2.4 GHZ en suelo, con un contenido volumétrico de agua del 5%.

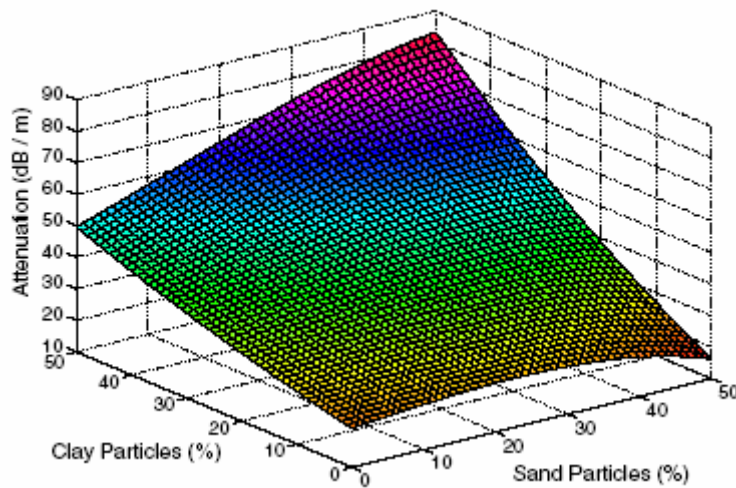


Fig. 1.6 Atenuación de la señal respecto el % de arena y arcilla

- Reflexión/refracción: Los dispositivos de WUSNs desarrollados cerca de la superficie son capaces de comunicarse con dispositivos subterráneos y superficiales, por ejemplo, un receptor de datos usando un medio radio. Esto significa que son necesarios enlaces de comunicaciones parcialmente subterráneos y parcialmente en el aire. Cuando las ondas EM propagadas alcanzan la interfaz tierra/aire, una parte será parcialmente reflejada en la tierra y otra parte se transmitirá hacia el aire, como con cualquier otro tipo de transición entre dos medios.
- Atenuación multicamino (fading): El mismo mecanismo descrito anteriormente, a través del cual las ondas en la transición entre los medios tierra/aire son parcialmente transmitidas y parcialmente reflejadas, también producirá atenuación multicamino. Este efecto será probablemente especialmente pronunciado para sensores desarrollados

cerca de la superficie, donde las ondas están cerca de esta interfaz tierra/aire. También las rocas y las raíces de las plantas, actuarán como dispersadores y también producirán atenuación, así como las variaciones de las características del suelo.

- **Velocidad de propagación reducida:** Las ondas EM que se propagan a través de materiales dieléctricos como pueden ser el suelo y la roca, experimentarán una reducción de la velocidad de propagación comparada con la del aire. Dado que muchos materiales tienen constantes dieléctricas en el rango de 1-80, esto supone que la mínima velocidad de propagación que se alcanzará será un 10% la velocidad de la luz.
- **Ruido:** Incluso el canal subterráneo no es inmune al ruido. Las fuentes de ruido subterráneo incluyen líneas eléctricas, relámpagos y motores eléctricos. Además, el ruido atmosférico está presente en terrenos subterráneos. Sin embargo, el ruido bajo tierra está generalmente limitado para frecuencias relativamente bajas (menos de 1 Khz.).

Las características descritas anteriormente de los canales subterráneos también son altamente dependientes de las propiedades de la tierra entre el transmisor y el receptor. Por lo tanto es necesario entender como los diferentes parámetros de la tierra afectan al canal.

- **Contenido de agua:** El contenido de agua en tierra es el parámetro más significativo a considerar para la predicción de la pérdida de señal en cualquier tipo de tierra. Algún incremento en el contenido de agua de la tierra hará que el canal tenga significativamente más pérdidas. El efecto de una subida en contenido de agua es altamente dependiente del tipo de tierra. Por ejemplo, la tierra arenosa muestra menos atenuación cuando aumenta el contenido de agua que la tierra de arcilla. Por ejemplo, las pérdidas a 900 MHz con un 40 % de contenido volumétrico de agua son de 20 y 55 dB por metro en tierra arenosa y de arcilla respectivamente. La atenuación causada por el contenido de agua en tierra depende también de la frecuencia usada. Bajas frecuencias experimentan menos atenuación para un contenido de agua concreto de agua en comparación con las altas.
- **Tamaño de las partículas:** Los terrenos son clasificados por el diámetro de sus componentes (partículas), y son generalmente descritos como una variación de arena, cieno o arcilla. La tierra arenosa produce la menor cantidad de pérdida, y la tierra con arcilla la máxima cantidad. Además, diferentes tipos de partícula en los terrenos responden de manera diferente a los cambios de contenido de agua.
- **Temperatura y densidad:** Incrementar la temperatura de la tierra cambia las propiedades dieléctricas y aumenta la atenuación de la señal. Además, los cambios de temperatura también afectarán a las propiedades dieléctricas de cualquier agua presente en la tierra. Incrementando la densidad del suelo, aumentan las pérdidas de

comunicación. Cuanta más densidad haya, mayor será la atenuación de la señal.

En la Fig. 1.7 podemos ver un resumen de las propiedades comentadas anteriormente:

Soil Properties and their effect on signal attenuation		
Parameter	Change	Effect on signal attenuation
Water content	↑	↑
Temperature	↑	↑
Soil bulk density	↑	↑
% Sand	↑	↓
% Clay	↑	↑

Fig. 1.7 Propiedades de la tierra y su efecto en la atenuación de señal.

### 1.3.2 Modelos para predecir pérdidas de trayectoria (path loss)

Como hemos visto previamente, el conocimiento de la constante dieléctrica compleja  $\epsilon_r$  del suelo o roca a través de la cual se propaga la onda, permite predecir la atenuación debido a la absorción del material usando relaciones electromagnéticas conocidas. Aunque no tenemos un modelo completo para los canales subterráneos, ésta nos puede dar una buena indicación de las condiciones del canal ya que la atenuación debido a la absorción del material es la mayor preocupación en las comunicaciones wireless subterráneas con ondas EM. De esta manera, un gran desafío para predecir la atenuación en un enlace subterráneo es el cálculo de la constante dieléctrica de la tierra en que los dispositivos WUSN son desarrollados.

Afortunadamente, algunos modelos son capaces de predecir con precisión  $\epsilon_r$ , con una muestra de tierra homogénea. Sin embargo, predecir pérdidas de camino para un canal subterráneo, continúa siendo un desafío debido a la naturaleza no homogénea de la tierra.

### 1.3.3 Tecnologías alternativas de la capa física

Está claro que un medio subterráneo no es óptimo para una comunicación usando ondas EM. La alta atenuación causada por las partículas del terreno y del agua en la superficie hace dificultosa una comunicación a distancias prácticas. Aunque de momento nos estamos basando en una comunicación basada en ondas EM (ya que existe mucha información de ello), existen otras opciones de capa física para WUSNs, más convenientes, pero mucho menos investigadas.

Una posible alternativa a las ondas EM para comunicaciones subterráneas es la Inducción Magnética (MI, Magnetic Induction). Usar MI para la capa física de una WUSN puede tener varios beneficios. Uno de ellos es que los medios

densos como la tierra y el agua causan pequeñas variaciones en la tasa de atenuación de los campos magnéticos en comparación con el aire, ya que la permeabilidad magnética de cada uno de estos materiales es similar. Generalmente es desfavorable para la comunicación al aire libre, dado que la potencia del campo magnético cae como  $1/R^3$ , donde R es la distancia desde el transmisor, comparado con  $1/R$  o  $1/R^2$  para ondas EM; no obstante, hay una reducción en las pérdidas de la señal causada por la propagación a través de la tierra en el canal subterráneo.

Otra interesante propiedad de MI es que no sufre atenuación multicamino. Además, la comunicación MI soluciona la cuestión del diseño de la antena para sensores subterráneos ya que en la transmisión y la recepción usan una pequeña bobina de cable. La fuerza del campo magnético producido por la bobina, es proporcional al número de vueltas del cable y a la permeabilidad magnética de cualquier material situada en el núcleo de la bobina. El uso de bobinas cableadas para la transmisión y recepción de MI representa un substancial beneficio sobre el uso de antenas para la propagación de ondas EM. Las bajas frecuencias necesarias para la propagación de ondas EM suponen la necesidad de usar largas antenas para obtener una eficiencia razonable, que obviamente se contradice con la necesidad de que los dispositivos sean pequeños.



## CAPÍTULO 2. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADO

### 2.1 Dispositivos

Para escoger los dispositivos, tuvimos que buscar componentes que soportaran las características adecuadas. La casa Crossbow es un fabricante de sensores y estuvimos barajando dos opciones para hacernos con estos sensores. La primera opción era el Kit MEP-SYS; en un principio nos pareció idóneo puesto que acaparaba las funciones necesarias y era bastante económico según el precio de la web. Por el contrario, a la hora de comprarlo el precio era diferente y nos costaba 3480 euros siendo muy caro. Los mismos fabricantes nos dijeron que tenían otro Kit, siendo ésta la segunda opción mencionada y comprada. Se llamaba STARTER KIT, y realizaba prácticamente las mismas funciones pero a un precio de 1170 euros. Además de ser más barato, trabajaba a frecuencias bajas (433MHz), con lo que era interesante para obtener una mayor longitud de onda y gastar menos energía.

Starter Kit de crossbow proporciona todos los componentes necesitados para desarrollar una red básica de sensores wireless (Fig. 2.1):

- Kit de iniciación para redes WSN.
- Nodos de sensores inalámbricos reprogramados para temperatura, humedad, presión atmosférica y luz ambiental.
- Software de red para formar Mesh Networks (Xmesh).
- Gateway para conectar redes de sensores inalámbricas con PC's o Internet
- Ayuda para diferentes Bandas de frecuencias.



Fig. 2.1 Starter Kit

La aplicación MoteView para PC's basados en Windows proporciona una interfaz gráfica intuitiva para monitorizar y gestionar la red de sensores inalámbrica. MoteView permite que el usuario entienda los datos de los sensores y de la red permitiendo una configuración fácil de los nodos del sensor. Esto se logra porque el programa muestra la topología de la red, gráficos, tablas, lecturas del sensor de una manera fácil.

### 2.1.1 Moteworks

La plataforma software de Moteworks de Crossbow, que está disponible en el kit, permite el desarrollo de las aplicaciones del sensor. Moteworks es específicamente optimizado para las redes con batería de baja potencia y proporciona ayuda para:

- Interfaz de usuario: Aplicación del cliente para el análisis, monitorización y supervisión remota, y configuración de la red de sensores.
- Dispositivos sensores: Pila de protocolos de la red y sistema operativo, soporte de los estándares (802.15.4) y herramientas de desarrollo.
- Servidores gateway: Un Software intermedio (middleware) para conectar redes de sensores inalámbricas pudiendo interpretar los sistemas de gestión e información.

La siguiente Fig. 2.2 muestra una posible configuración de la arquitectura del kit.

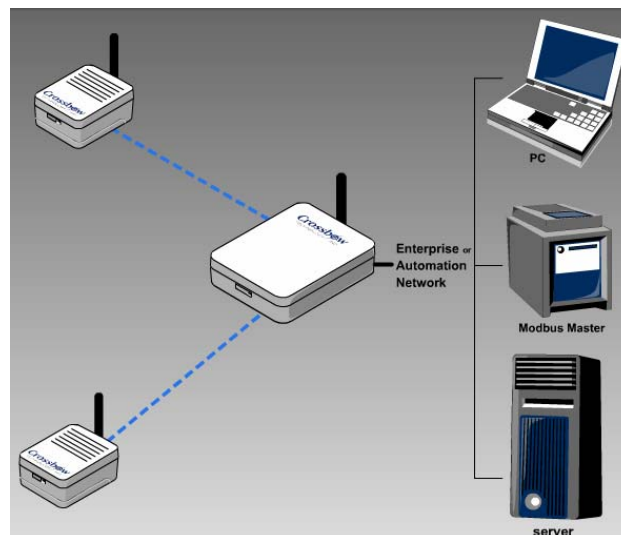


Fig. 2.2 Arquitectura kit

El PC tendrá un software para monitorizar las pruebas de campo. La aplicación del cliente Moteview podrá realizar medidas en tiempo real manteniendo un histórico de resultados de las medidas anteriores. Proporciona una interfaz de comando para las redes de los sensores, capacidad de exportación de los datos, mapa de la topología etc.

### 2.1.2 Nodo sensor

La Fig. 2.3 nos muestra el contenido de las partes de los sensores utilizados en las pruebas de campo.

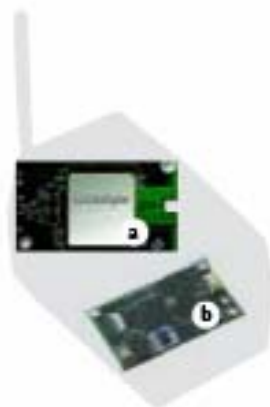


Fig. 2.3 Contenido nodo sensor.

#### a.- Procesador / Placa Radio

Módulos MICA para permitir un sistema de medidas para redes de sensores inalámbricos de baja potencia. Disponible a 868/916 Mhz.

#### b. Placa del sensor

Placa multisensor MTS400 permitiendo la monitorización de temperatura, humedad, presión barométrica y luz ambiente.

### 2.1.3. Estación base

La Fig. 2.4 nos muestra el contenido de las partes del gateway utilizado en las pruebas de campo. Este es el dispositivo que utilizaremos de gateway, y lo haremos funcionar como si fuera un sensor (sensor ficticio).

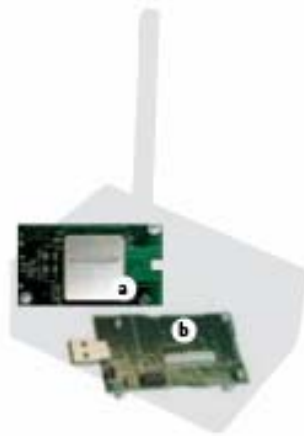


Fig. 2.4 Estación base

a.- Placa radio/ Procesador

El Módulo MICA funciona como una estación base cuando está conectado con la interfaz USB del PC.

b.- Placa de la interfaz USB del PC

El gateway MIB520 proporciona una interfaz USB para las comunicaciones de datos.

## 2.2 Software utilizado

Para poder realizar el testeo y las pruebas de campo, instalaremos en nuestro portátil el software que viene incluido en el kit de Crossbow. Una curiosidad es que se ha de instalar en un equipo que soporte NTFS. Si el sistema operativo utiliza el sistema de archivos FAT32, no podrá finalizar la instalación y el sistema operativo se ha de cambiar a NTFS.

Ya instalado el programa (llamado Moteview 1.4) y abierto, vemos una pantalla general como muestran las Fig. 2.5 y Fig. 2.6; aquí incluye los menús y las diversas opciones para poder realizar las configuraciones pertinentes.

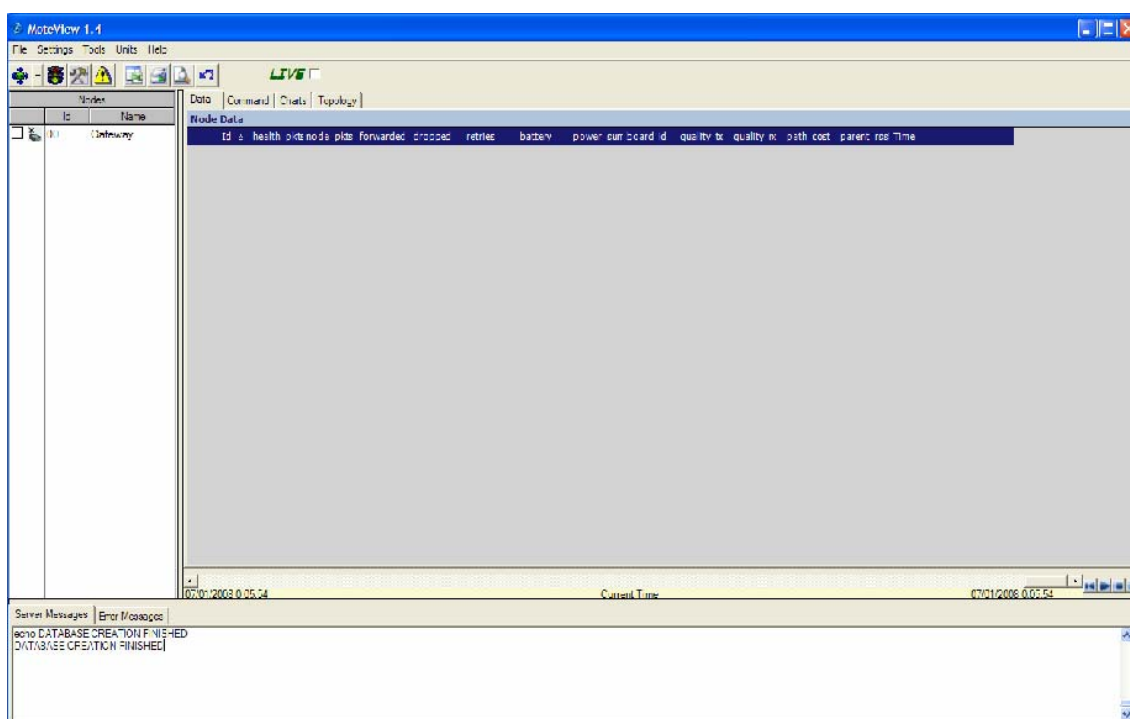


Fig. 2.5 Pantalla Moteview principal

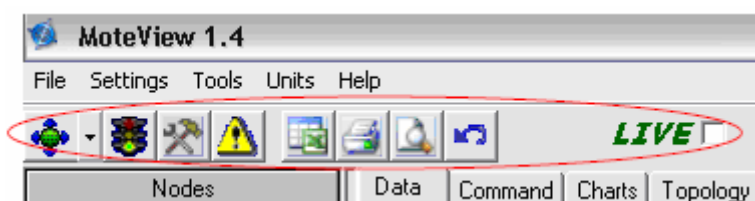


Fig. 2.6 Pantalla con las diferentes herramientas de Moteview

A continuación realizaremos las conexiones físicas y acabaremos la configuración. Conectamos cada extremo del cable de extensión, al puerto USB de nuestro portátil y a nuestra estación base (que en este caso actúa como sensor). De esta manera Windows detecta automáticamente que existe nuevo hardware y nos pide que busquemos una situación específica para acabar la instalación. Escogemos el CD que nos proporciona el Kit y seleccionamos “USB Drivers”.

Acabada la instalación Windows crea dos puertos virtuales COM asociados a nuestra estación base. Podemos ver en la Fig. 2.7, que en este caso nos ha asociado el COM3 y COM4 (resaltar que la numeración de los puertos puede ser diferente en cualquier ordenador). Estos puertos son asignados para dos funciones: el puerto con menor valor se utilizará para la programación de los sensores, y el de más valor será el de comunicación de los nodos.

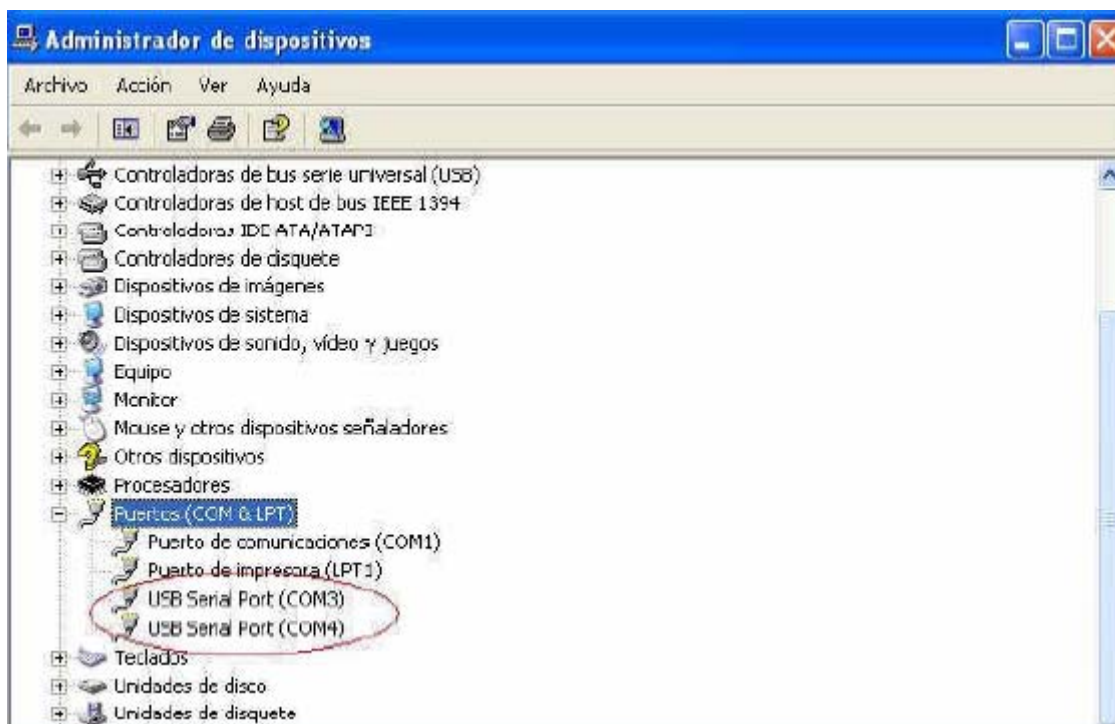


Fig 2.7. Puertos asignados (*Inicio>Panel de control>Sistema>Administrador dispositivos>Puertos(COM&LPT)*)

Para finalizar la configuración deberemos darle al interruptor ON que figura en los sensores (estos están provistos de pilas AA 1'5 V).

En este paso ya estamos listos y sólo falta poner en funcionamiento el programa para recibir datos de los sensores destinados al gateway. El gateway actúa como un sensor ficticio, y así lo funcionará en las pruebas. Colocamos la estación base como sensor por el siguiente motivo: El Kit nos obliga a que haya un gateway final para que se le envíen los datos visualizados en el monitor del portátil. Al tener esta obligación, el gateway debería colocarse al lado de uno de los dos sensores. De esta forma si ponemos el gateway directamente nos ahorramos un sensor, que lo situaremos junto al otro para realizar una media ponderada de las medidas y obtener así unos resultados más precisos.

Estando en la pantalla principal vista en la Fig. 2.5, realizaremos la conexión de los sensores. Seleccionamos *File> Connect> Connect to MIB510/MIB520/MIB600*, y nos aparecerá una pantalla donde podremos cambiar ciertos valores (Fig. 2.8).

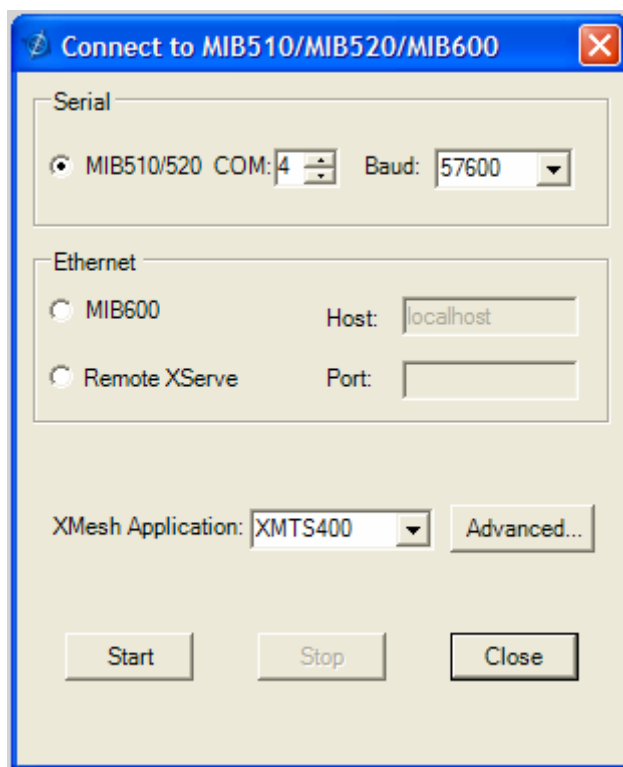


Fig. 2.8 Elección de valores

En esta elección de valores seleccionaremos el puerto COM más alto de los asignados anteriormente y escogeremos el valor por defecto de Baud: 57600. Como nuestro dispositivo soporta XMTS400 como aplicación Xmesh, será esta aplicación la que seleccionaremos.

En este paso, apretamos el botón Start y ya esperamos a que nos salgan los valores de los datos recibidos de los sensores. Como ejemplo podemos ver la Fig. 2.9, donde nos aparecen datos como: humedad, temperatura, Identificador y voltajes de los sensores etc (círculo de la derecha).

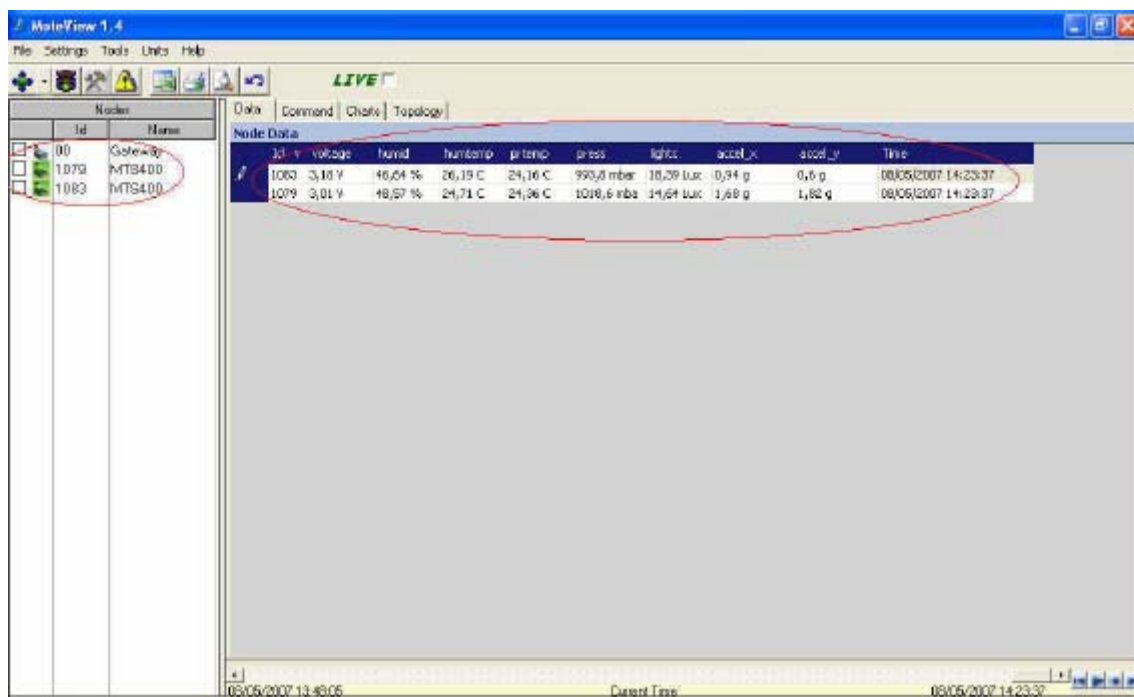


Fig 2.9 Datos recibidos por parte de los sensores

Si nos fijamos en el círculo de la izquierda, vemos el dibujo de un sensor en color verde. Este color nos indica si el gateway ha refrescado los datos cada cierto tiempo. Dependiendo del tiempo que lleve sin que le llegue información, estará de un color u otro. A continuación en la Fig. 2.10 vemos esta relación.







	Gray Mote icon	No results received
	Green Mote icon	Fresh results within the last 20 minutes
	Moss (light green) Mote icon	Results stale by >20 minutes
	Yellow Mote icon	Results stale by >40 minutes
	Orange Mote icon	Results stale by >60 minutes
	Red Mote icon	Results stale by more than a day

Fig. 2.10 Relación de información recibida con el tiempo.

En esta pantalla tenemos bastantes opciones a modificar o ver. Por ejemplo en vez de mostrar los valores en cada momento que envía el sensor, podemos realizar un gráfico que nos indica todos los valores desde que se han conectado los sensores al gateway. Para ello hemos de marcar la pestaña Charts (situada arriba de los datos), y seleccionar un valor a ver Fig. 2.11. Siendo muy importante para realizar este TFC, también podemos obtener valores de potencia, reintentos, pérdidas, calidad del enlace, etc. Para ello deberíamos cambiar la aplicación de Xmesh que habíamos seleccionado (Fig. 2.8) y elegir la aplicación Node Health (Fig. 2.12).



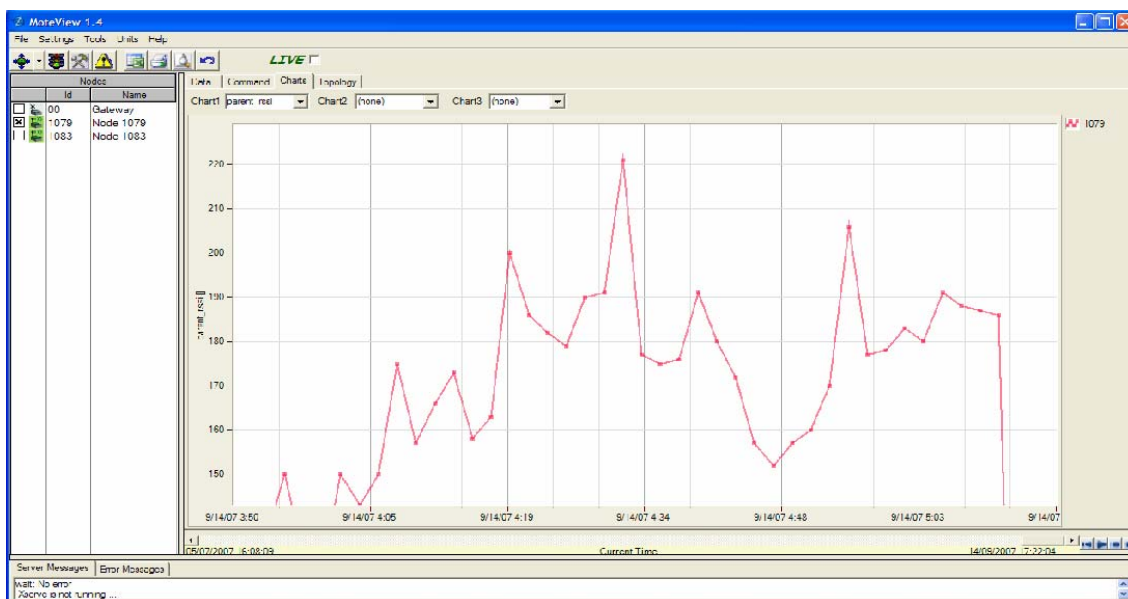


Fig. 2.11 Visualización gráfica de los valores obtenidos de potencia durante un tiempo determinado

id	health	pbs	node	pbs	forwarded	dropped	retries	battery	power	sun	board	id	quality	bc	quality	r/s	pcb	cost	parent	rssi	Time
1085	1,77 %	1004	0 %	87,69 %	538,02	3,1 v	0 mA	138	48,67 %	13,33 %	73	31	08/05/2007 14:23:32								
1079	1,71 %	1051	0 %	1,62 %	3,9 %	3 v	0 mA	133	100 %	100 %	4	159	08/05/2007 14:23:32								

Fig 2.12. Datos en modo Node Health

## CAPÍTULO 3. ESCENARIOS

En este capítulo nos centraremos y veremos los diferentes lugares utilizados en la realización de las pruebas. También aportaremos una pequeña comparación de los diferentes escenarios, donde en el siguiente capítulo lo veremos más detalladamente.

### 3.1 Medios físicos utilizados

En este caso, los diferentes lugares para realizar las medidas pueden ser muchos. Los escogidos son: al aire libre, en tierra / césped y arena de playa. Entre estos tres escenarios existen diferencias en su composición, y hacen posible ver las similitudes y diferencias en las comunicaciones.

Para los diferentes medios se ha utilizado el mismo material. Por un lado un portátil (con el software Moteview instalado) conectado mediante USB al gateway, y por otro los dos sensores que realizan las medidas.

Como ya hemos visto, los sensores tienen alguna que otra abertura. Para la realización de los escenarios, al tener que hundir los sensores en diferentes lugares (y en un caso en particular también el gateway), se han de proteger los dispositivos para no dañarlos. Los protegimos envolviéndolos con un plástico para evitar un malfuncionamiento posterior debido a la arena o tierra.

Se ha de decir que este plástico no afectó a las diversas comunicaciones. En el aire libre lo probamos con el plástico y sin el, y vimos que daba prácticamente el mismo resultado.

#### 3.1.1 Aire libre

El primer lugar escogido es al aire libre. Como es un medio ya bastante explotado, para empezar y tener un modelo a seguir y comparar, realizamos las medidas con los dispositivos adecuados. Estas medidas se realizaron dentro del Campus UPC de Castelldefels.

Como el medio es limpio y transparente sin ningún objeto ni componente que dificulte la comunicación en el medio radio, en principio (y como veremos), los datos enviados al gateway han de ser recibidos de manera satisfactoria y con una buena calidad del enlace.

### 3.1.2 Tierra / Césped

Para este lugar, escogimos la tierra / césped que hay a los alrededores del Campus UPC de Castelldefels.

Este lugar fue escogido debido a que la tierra presenta cierta humedad y diferentes componentes en el subsuelo. Esto hace que los sensores varíen su potencia como también la dificultad de transmitir con tierra u otros objetos de por medio. El terreno es irregular y la humedad aguanta bastante en estos lugares haciendo un 'mal' canal de comunicación. Por otro lado, sabemos que este escenario abunda en muchas partes, por lo que si se realiza un extenso estudio y se mejora, puede ser muy útil su utilización.

A continuación, en la Fig. 3.1, vemos como se realizó el montaje con los distintos dispositivos.



Fig. 3.1 Montaje en tierra / césped

### 3.1.3 Arena playa

Para este lugar, escogimos la playa de Castelldefels. La arena que contiene este escenario es mucho más uniforme que el escenario anterior de tierra o césped. No encontramos ningún otro tipo de objeto que no fuera arena ni ninguna otra sustancia como aparecía en la tierra. A priori, al estar la arena seca, y en un ambiente sin cambios en la recepción de datos, podremos deducir que se trata de un escenario con mejor comunicación. A continuación, en la Fig. 3.2, vemos como se realizó el montaje con los distintos dispositivos.



Fig. 3.2 Montaje arena playa

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

A continuación veremos los resultados obtenidos de las pruebas de campo en los diferentes lugares citados previamente. De las distintas características que nos proporciona el software, nos centraremos concretamente en dos de ellas. Veremos en las pruebas realizadas la potencia de recepción (la señal que recibe el gateway en cada medida) y los reintentos de paquetes que se producen en los sensores. Los reintentos son el número total de retransmisiones que el nodo ha de hacer debido a que no recibe el ACK correspondiente a nivel de enlace. Cuando un nodo realiza 8 intentos de reenvío, el paquete se descarta (dropped). Veremos la potencia y los reintentos en cada uno de los lugares y en cada medida (profundidad y longitud), y luego los podremos comparar entre ellos para dictaminar cual es el mejor medio para estos sensores.

La distribución de los dispositivos será la siguiente: El gateway (que actúa como un sensor) estará conectado mediante USB al portátil totalmente a ras de suelo. Los dos sensores se colocaran juntos en la medida correspondiente, tanto de longitud como de profundidad, y se cogerá la media de los resultados de ambos sensores (por lo tanto los sensores actúan como si de un único sensor se tratara y se dará por entendido que los resultados de cada medida son la media de los valores obtenidos separadamente por cada sensor).

En la Fig. 4.1 vemos como se hará la distribución de los diferentes dispositivos:

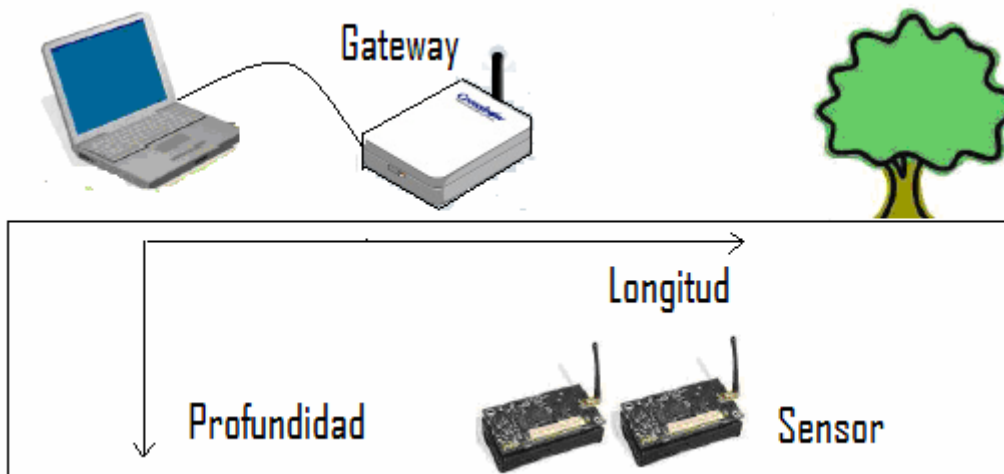


Fig. 4.1 Distribución del montaje

### 4.1 Resultados aire libre

Mediante las siguientes tablas y sus correspondientes gráficos, podemos ver los resultados de la potencia de recepción y reintentos hechos en el aire libre. En un principio, sensor y estación base están a una misma altura y longitud. El

procedimiento es ir separando la longitud entre el gateway que actúa como sensor y los dos sensores (cada 0.5 m hasta los 2m). A la vez, en cada separación y moviendo el par de sensores, realizaremos la misma medida en diferentes profundidades, que en este caso hemos considerado a 10, 20 y 30 cm.

La tabla 4.1 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, con las diferentes distancias y alturas con respecto del gateway que actúa como sensor. Cabe destacar que la altura a 0 m, significa que estamos a ras de suelo.

Altura sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	-61,77	-68,06	-75,58	-89,11	-98,96
10 cm	-65,54	-71,58	-79,15	-94,12	-102,84
20 cm	-73,84	-76,95	-86,54	-99,01	-108,52
30 cm	-80,44	-83,41	-91,84	-107,65	-117,16

Tabla 4.1 Valores de potencia al aire libre en dBm

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.2)

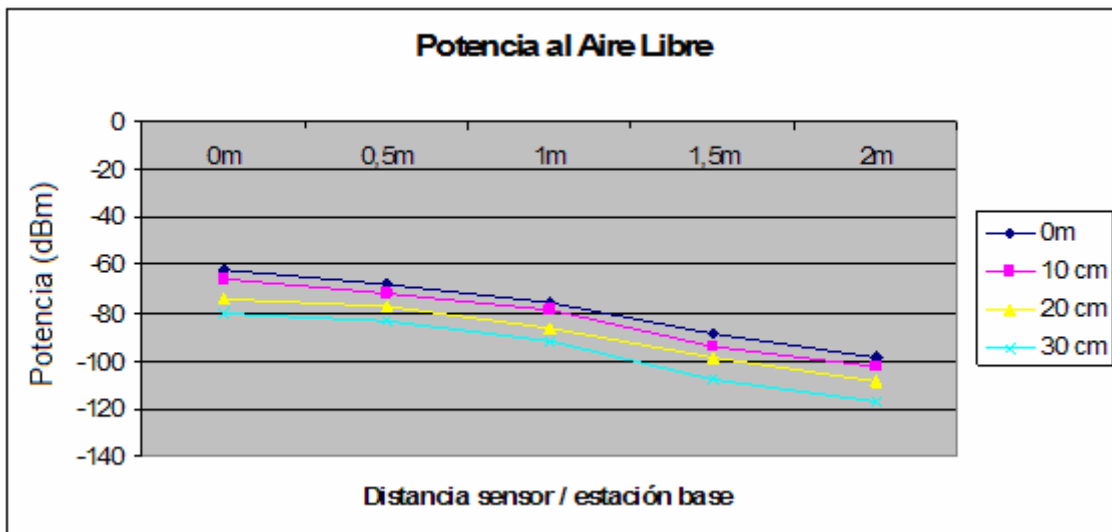


Fig. 4.2 Potencia recibida al aire libre en dBm

En el gráfico anterior vemos que los resultados se corresponden con la teoría. Si alejamos los dos sensores (que actúan como uno) del gateway, en cada medida que tomamos, la potencia recibida es menor. Así mismo, cuanto más altura hay entre éstos, menor es la potencia también. Como caso extremo si vemos el sensor situado a más profundidad y a más distancia del gateway, la potencia recibida es la peor entre todos los casos.

Por otro lado, decir también que nos encontramos en un medio sin obstáculo alguno entre dispositivos. La comunicación es directa, y por ello vemos que las

curvas son todas prácticamente lineales. Sigue un mismo patrón donde a más altura, menos potencia se recibe.

El otro punto que miraremos son las retransmisiones que se han realizado en esta comunicación.

La tabla 4.2 muestra los valores obtenidos del % de reintentos en la comunicación en arena de playa, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway. El % de reintentos es el número de paquetes vueltos a enviar respecto el número total de paquetes enviados.

Altura sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	0,63	0,89	1,12	1,11	1,11
10 cm	0,89	0,91	1,12	1,28	1,50
20 cm	0,98	1,07	1,31	1,46	1,57
30 cm	1,15	1,14	1,39	1,69	1,97

Tabla 4.2 Reintentos al aire libre

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.3)

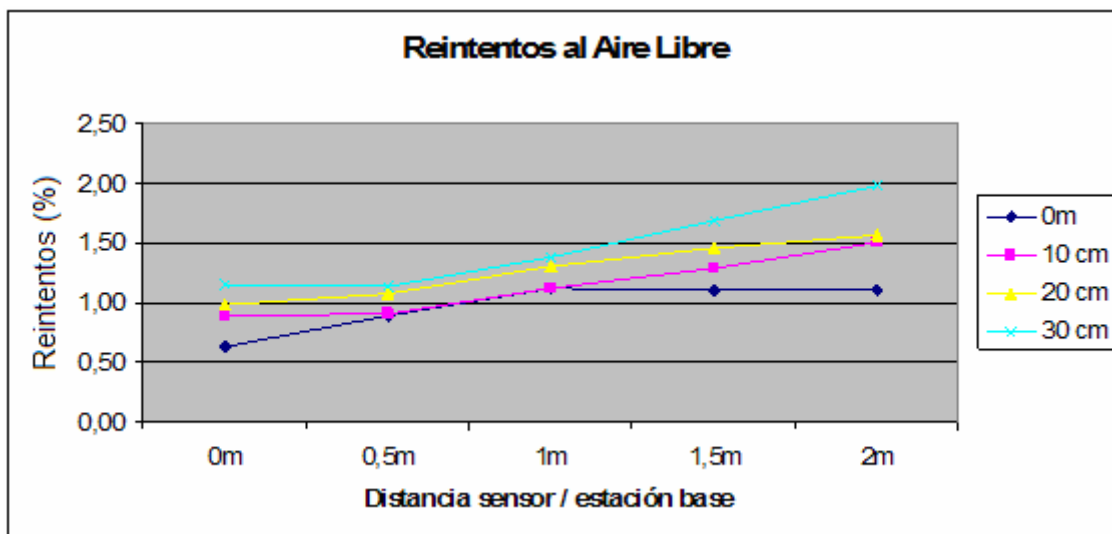


Fig. 4.3 Reintentos al aire libre en (%)

Observamos en general, que a medida que los sensores se alejan del gateway, el número de reintentos es mayor. Al igual que en profundidad, que cuanto a más altura se encuentran los sensores del gateway, mayor será el número de reintentos.

Como valor máximo vemos que se llega al 1'97% de retransmisiones (2 metros de distancia y 30 cm de profundidad). Este valor es muy pequeño y se puede considerar que este medio es favorable para las comunicaciones radio. Vemos también que los datos entre el punto 0,5 y 1m son prácticamente iguales, y tampoco varían mucho entre el resto. Esto es debido a que no hay ningún obstáculo en medio de la comunicación y la altura entre los dispositivos no es

lo suficientemente grande como para que se vean mayores diferencias. Así pues los resultados son correctos y coinciden con lo esperado.

## 4.2 Resultados Tierra / Césped

Mediante las siguientes tablas y sus correspondientes gráficos, podemos ver los resultados de la potencia y reintentos para el escenario de tierra / césped. En un principio, sensor y estación base están colocados a una cierta altura y longitud. Como ya hemos comentado, y moviendo el par de sensores, el procedimiento es ir separando la longitud (cada 0.5 m hasta los 2m), y en cada separación hacer la misma medida a diferentes profundidades (que en este caso hemos considerado a 10, 20 y 30 cm).

La tabla 4.3 muestra los valores obtenidos de potencia de recepción en dBm, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway que actúa como sensor. Cabe destacar que la profundidad a 0 m, significa que estamos a ras de suelo.

Profundidad sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	-61,77	-68,06	-75,58	-89,11	-98,96
10 cm	-78,09	-86,24	-96,09	-106,07	-120,83
20 cm	-100,46	-119,31	-143,27	Sin señal	Sin señal
30 cm	-117,71	-165,68	-189,25	Sin señal	Sin señal

Tabla 4.3. Valores de potencia en tierra / césped en dBm

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad los resultados, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.4)

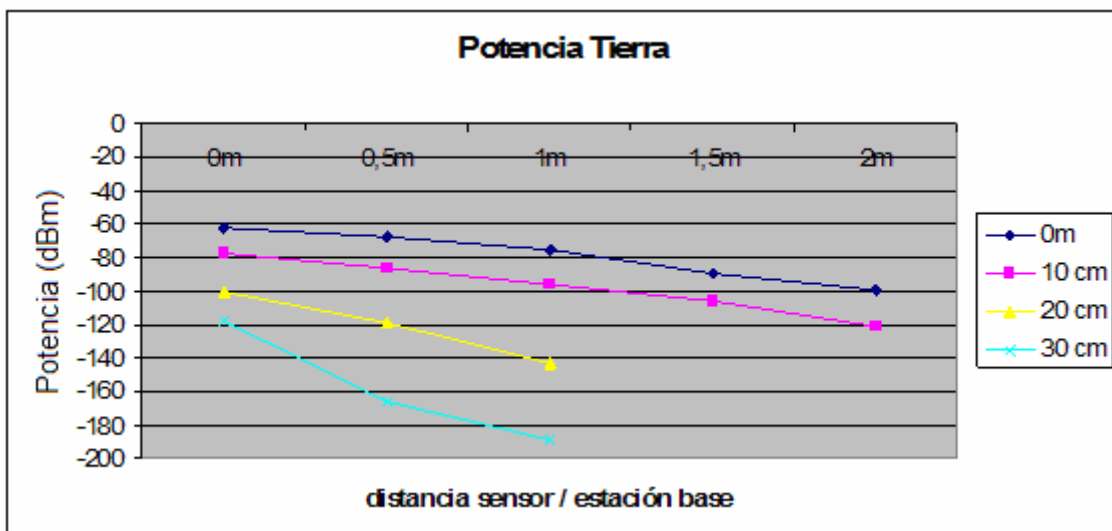


Fig. 4.4 Potencia recibida Tierra en dBm

En la Fig. 4.4 anterior vemos como a medida que alejamos el sensor del gateway, en cada medida que tomamos, la potencia recibida es menor. Así mismo, cuanto más profundidad hay entre éstos, también es menor la potencia.



A primera vista vemos que tenemos dos curvas prácticamente con la misma pendiente. Eso sí, para una profundidad de 10 cm se recibe menos potencia que cuando el sensor se encuentra a una profundidad de 0 cm. Si miramos la profundidad a 20 cm, vemos que hace un salto en cuanto a potencia recibida. Si luego la comparamos con la medida de 30 cm, vemos que la diferencia es mucho más grande que con las dos primeras. Esto es debido a los materiales que hay en la composición de la tierra y que hay mucha más tierra de por medio.

Si nos fijamos vemos que a partir de un metro de distancia a profundidades de 20 y 30 cm no se recibe señal en el gateway y se pierde la comunicación. Viéndolo prácticamente, decir que no era realmente a un metro, sino a 80 cm donde se empezaba a perder la señal. En el gráfico está puesto a 1 m para poder hacer las comparaciones posteriormente entre diferentes medios.

Así pues, podemos decir que los valores son los esperados, ya que a mayor profundidad y longitud, menor potencia de recepción es la que tenemos. También podemos decir que cuanto más profundidad hay, más cae en picado la potencia recibida por los factores comentados anteriormente.

El otro punto que miraremos son las retransmisiones que se han realizado en esta comunicación.

La tabla 4.4 muestra los valores obtenidos del % de reintentos en la comunicación en arena de playa, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway.

Profundidad sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	0,63	1,11	1,12	1,11	1,11
10 cm	4,45	3,43	3,24	10,42	27,04
20 cm	22,28	41,26	54,44	Sin señal	Sin señal
30 cm	41,18	51,08	67,67	Sin señal	Sin señal

Tabla 4.4 Reintentos en tierra / césped

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.5)

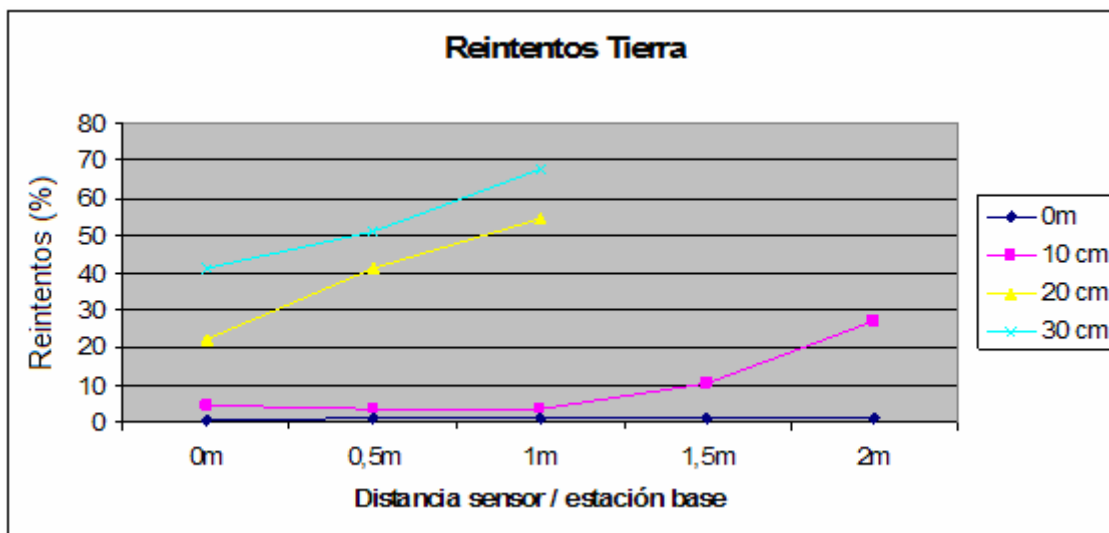


Fig. 4.5 Reintentos en tierra / césped

Observamos en general, que a medida que los sensores se alejan del gateway, el número de reintentos es mayor. Al igual que en profundidad, que cuanto más lejos se encuentren los sensores, los reintentos aumentan.

En este medio, podemos ver como el % de reintentos varía bastante dependiendo de la profundidad. A 0 cm prácticamente no hay reintentos, y a medida que lo vamos hundiendo la comunicación entre los sensores y el gateway va siendo peor.

La próxima medida es a 10 cm. Mirando el gráfico podemos decir que para esta profundidad aun podemos establecer una comunicación aceptable entre los dispositivos. Hasta la distancia de 1 m entre el par de sensores y el gateway que hace de sensor, el medio estudiado es ideal sin muchos reintentos, pero a partir de 1'5 o 2m, los reintentos se hacen mayores, hasta incluso llegando al 30% de reintentos.

En profundidades de 20 o 30 cm, la comunicación es mucho peor. Para la de 20 cm, a 0 m de distancia ya hay un 22% de reintentos. Viendo la siguiente medida a 0'5 metros tenemos un 41%. Con estos datos vemos que no sería recomendable en este medio separar los sensores más allá de 0'5 m porque sino habría mucho tráfico en la red debido a las retransmisiones y se produciría mucha congestión. Para 30 cm de profundidad sólo podríamos poner como mucho, el sensor a la misma altura que el gateway. En esta posición obtenemos el 41% de reintentos con lo cual, más allá de esta distancia el tráfico en la red se hace insostenible.

Viéndolo prácticamente, decir que no era realmente a un metro, sino a 80 cm donde se empezaba a perder la señal. En el gráfico está puesto a 1 m para poder hacer las comparaciones posteriormente entre diferentes medios.

Estos resultados nos indican que los valores obtenidos en tierra son correctos, ya que aumentando profundidad y distancia, el % de reintentos es mayor. En este escenario el porcentaje de reintentos a partir de cierta profundidad es muy elevado. Esto hace que se pueda perder la comunicación a cierta distancia, e

incluso no recomendar su uso por el alto número de reintentos aunque sea posible dicha comunicación.

### 4.3 Resultados arena playa (gateway visible)

Mediante las siguientes tablas y sus correspondientes gráficos, podemos ver los resultados de la potencia de recepción y reintentos hechos en arena de playa. En un principio, sensor y estación base están a una misma altura y longitud. Como ya hemos comentado en los dos casos anteriores, el procedimiento es ir separando la longitud (cada 0.5 m hasta los 2 m), y en cada separación hacer la misma medida en diferentes profundidades (que en este caso hemos considerado a 10, 20 y 30 cm).

La tabla 4.5 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway que actúa como sensor. Cabe destacar que la profundidad a 0 m, significa que estamos a ras de suelo.

Profundidad sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	-61,77	-68,06	-75,58	-89,11	-98,96
10 cm	-69,52	-79,41	-86,46	-92,12	-110,03
20 cm	-80,75	-98,27	-95,95	-113,86	-124,80
30 cm	-107,20	-138,61	-157,06	-152,41	Sin señal

Tabla 4.5 Valores de potencia en Arena Playa en dBm

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.6)

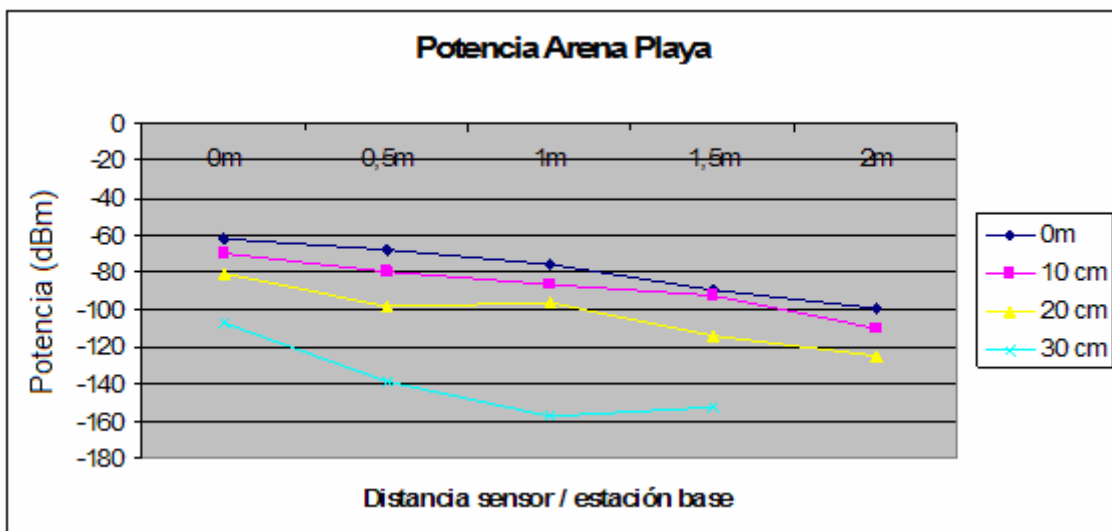


Fig. 4.6 Potencia recibida Arena Playa en dBm

En la Fig. 4.6 anterior vemos como a medida que alejamos el sensor del gateway, en cada medida que tomamos, la potencia recibida es menor. Así

mismo, cuanto más profundidad hay entre éstos, también es menor la potencia. Esto indica que los valores obtenidos son correctos.

También podemos ver que los valores a 0 y 10 cm de profundidad son bastante parecidos. A partir de aquí la comunicación ya se hace más difícil y se recibe menos potencia. Como observamos, a partir de una distancia de 1,5 m para una profundidad de 30 cm, ya no existe señal ni comunicación. Con la cantidad de arena depositada encima de los sensores a una profundidad de 30 cm, la potencia en este punto cae en picado ya que la arena la obstaculiza llegando a la dicha 'no comunicación'.

Sin embargo, los valores obtenidos son los que esperábamos ya que a mayor profundidad y longitud, menor potencia es la que tenemos.

El otro punto que miraremos son las retransmisiones que se han realizado en esta comunicación. La tabla 4.6 muestra los valores obtenidos del % de reintentos en la comunicación en arena de playa, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway.

Profundidad sensores (cm)	Distancia entre gateway y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	0,63	1,11	1,12	1,11	1,11
10 cm	1,25	1,86	2,99	3,48	4,69
20 cm	2,79	2,83	5,76	10,30	14,63
30 cm	15,95	20,87	36,73	48,41	Sin señal

Tabla 4.6 Reintentos arena playa

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.7)

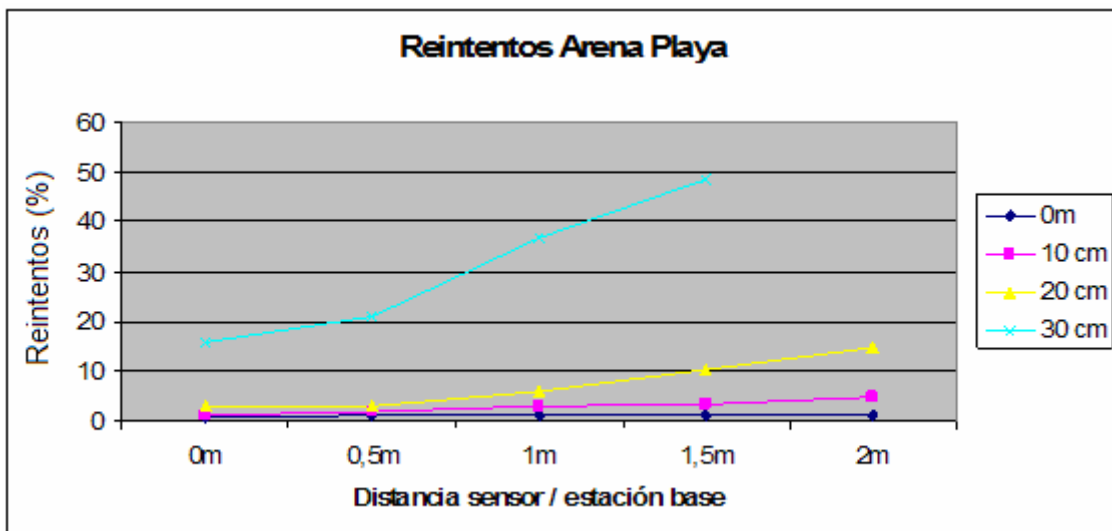


Fig. 4.7 Reintentos arena playa en (%)

Observamos en general, que a medida que los sensores se alejan del gateway, el número de reintentos es mayor. Al igual que en profundidad, que cuanto más lejanos se encuentren los sensores, los reintentos aumentan, y como viene

siendo habitual, a partir de cierta profundidad estas retransmisiones se disparan.

El porcentaje de reintentos para 0 y 10 cm de profundidad son prácticamente iguales. Estos valores son bajos y esto significa que existe una buena comunicación entre los dispositivos. Para una profundidad de 20 cm, los reintentos se duplican o triplican respecto las otras medidas. De todas formas, tampoco son unos valores excesivos y la comunicación se podría llevar a cabo. En cambio para una profundidad de 30 cm, el número de reintentos es preocupante. Para esta medida, los reintentos suben rápidamente. De hecho, a partir de 1'5 m, ya no le llega ninguna señal a la estación base que actúa como sensor. Como vemos, para esta profundidad no sería aconsejable colocar los sensores a más distancia de 0'5 m para no tener congestión de red. Más allá de 0,5 m la comunicación sería muy poco eficiente pues el % de reintentos de paquetes resultará ser excesivo.

Estos resultados nos indican que los valores obtenidos en arena de playa son correctos, ya que aumentando profundidad y distancia, el % de reintentos es mayor. En este escenario el porcentaje de reintentos a partir de cierta profundidad es muy elevado. Esto hace que se pueda perder la comunicación a cierta distancia, e incluso no se debe recomendar su uso por el alto número de reintentos aunque sea posible dicha comunicación.

#### 4.4 Comparación diferentes medios

A continuación realizaremos la comparativa de resultados en los diferentes escenarios presentados anteriormente. La comparativa será de la potencia recibida y de las retransmisiones necesarias en ciertas distancias. Concretamente empezaremos con la comparación de potencia recibida con los sensores separados entre sí, con una distancia de 0 m y de 1'5 m.

La tabla 4.7 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, con los diferentes medios respecto del gateway. La distancia seleccionada es a 0 m.

Diferentes Medios	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Aire Libre	-61,77	-65,54	-73,84	-80,44
Tierra	-61,77	-78,09	-100,46	-117,71
Arena	-61,77	-69,52	-80,75	-107,20

Tabla 4.7 Potencia recibida diferentes medios a 0m de distancia

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.8)

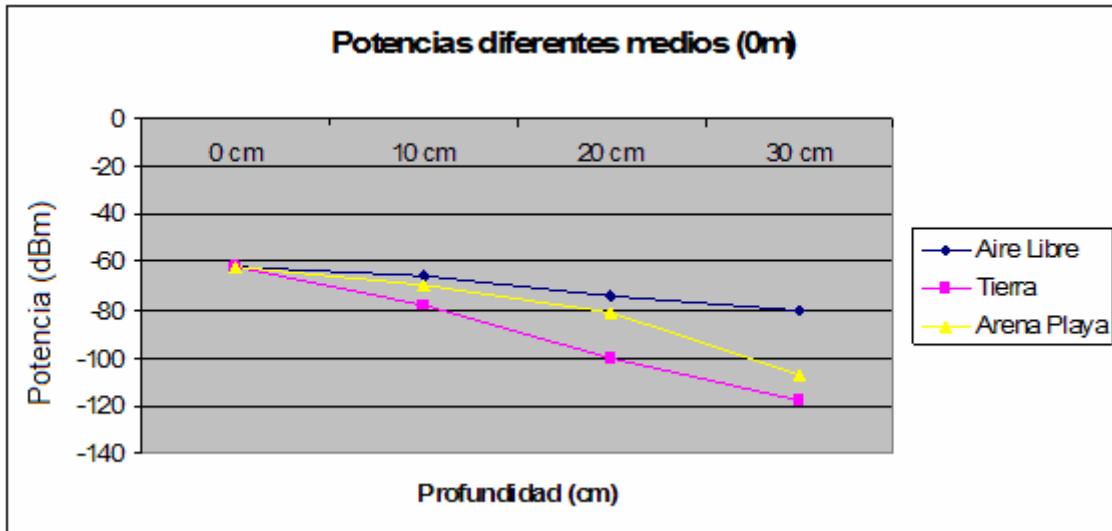


Fig 4.8. Representación de la potencia recibida en distintos medios a 0m distancia

La tabla 4.8 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, con los diferentes medios respecto del gateway. La distancia seleccionada es a 1'5 m.

Diferentes Medios	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Aire Libre	-89,11	-94,12	-99,01	-107,65
Tierra	-89,11	-106,07	Sin señal	Sin señal
Arena	-89,11	-92,12	-113,86	-152,41

Tabla 4.8 Potencia recibida diferentes medios a 1'5 m de distancia

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.9)

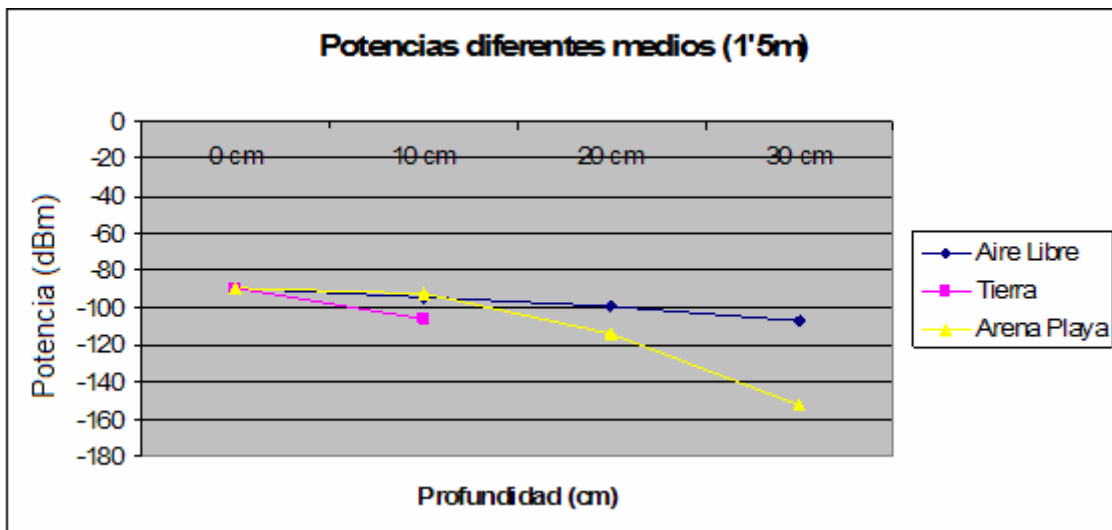


Fig 4.9. Representación de la potencia recibida en distintos medios a 1'5m distancia

Como vemos en las dos gráficas anteriores (Fig 4.8 y Fig 4.9), en cuanto a potencia, el mejor medio para una buena comunicación es el aire libre, y el peor es la tierra / césped. Entre medio de ambos tenemos la arena de la playa. Cuando pasamos de una profundidad de 20 a 30 cm (0 m de distancia), en arena de playa baja bastante la potencia de recepción obtenida. Esto es debido

a que ya se acumula mucha profundidad para tener una buena comunicación. De todas formas el escenario de tierra es el que peor comportamiento presenta.

La segunda gráfica de comparación, sigue la misma tónica. A partir de cierta profundidad la curva de potencia baja mucho. Un punto a resaltar es que a esta distancia (1,5 m), una comunicación con los sensores a más de 10 cm de profundidad no es posible realizarla cuando tratamos el medio de tierra / césped.

A continuación haremos el mismo procedimiento pero comparando los reintentos necesarios en las mismas distancias entre los sensores (0 m y 1'5 m).

La tabla 4.9 muestra los valores obtenidos de reintentos, con los diferentes medios respecto del gateway. La distancia seleccionada es a 0 m.

Diferentes Medios	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Aire Libre	0,63	0,89	0,98	1,15
Tierra	0,63	4,45	22,28	41,18
Arena Playa	0,63	1,25	2,79	15,95

Tabla 4.9 Retransmisiones en diferentes medios a 0m de distancia

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.10).

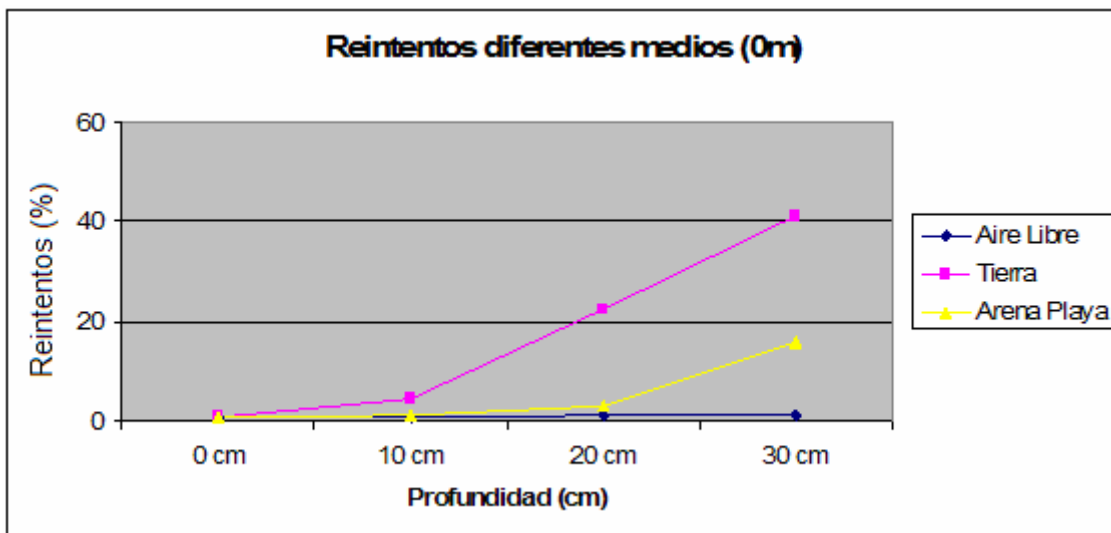


Fig 4.10. Representación de los reintentos en distintos medios a 0m distancia

La tabla 4.10 muestra los valores obtenidos de reintentos, con los diferentes medios respecto del gateway. La distancia seleccionada es a 1'5 m

Diferentes Medios	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Aire Libre	1,108	1,284	1,455	1,687
Tierra	1,11	10,42	Sin señal	Sin señal
Arena	0,63	3,475	10,303	48,408

Tabla 4.10 Retransmisiones en diferentes medios a 1'5m de distancia

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.11).

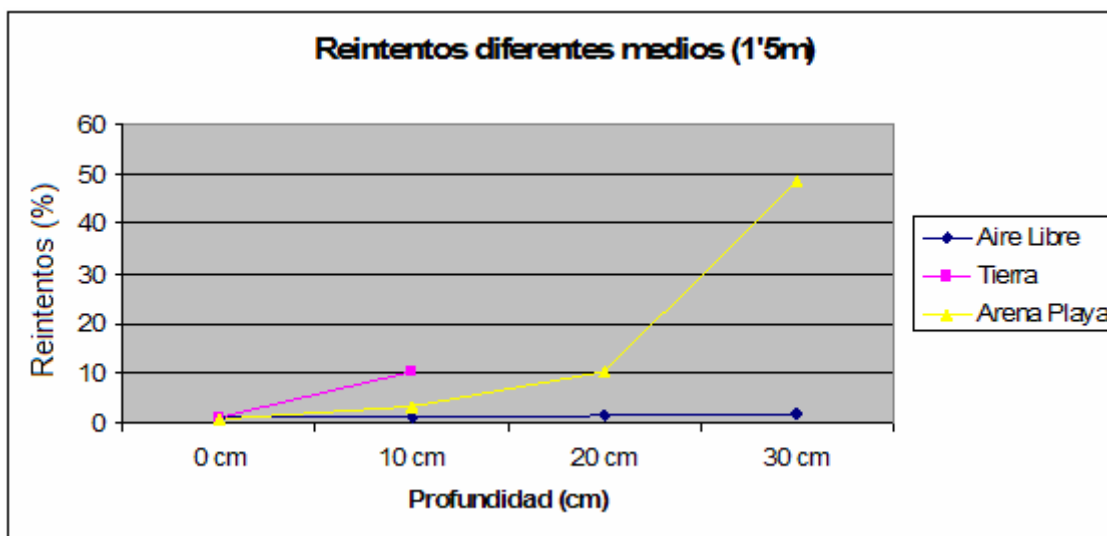


Fig 4.11. Representación de los reintentos en distintos medios a 1'5m distancia

Observando ambas gráficas vemos que el número de reintentos aumenta cuanto mayor es la profundidad de los sensores.

Vemos que para los tres escenarios hasta los 10 cm de profundidad se presentan niveles de reintentos aceptables. A partir de aquí, para la tierra o césped aumentan mucho, y en arena de playa no es tan pronunciada la subida. Si queremos que haya una buena comunicación entre dispositivos situados en el medio tierra / césped no deberíamos superar los 10 cm de profundidad, y en arena de playa los 20 cm. Si superásemos estos valores no se podría desarrollar esta tecnología porque el número de reintentos sería muy elevado, mermando así la red de sensores inalámbricos. Para el medio de aire libre, con las pruebas realizadas, podemos concluir que la comunicación será exitosa en cualquiera de sus medidas, pudiendo poner los sensores en cualquier punto de los comentados.

#### 4.5 Resultados arena playa (gateway no visible)

A continuación veremos otra prueba realizada en arena de playa. Se trata exactamente de hacer las mismas pruebas de potencia y reintentos pero con el gateway enterrado 10 cm. Resaltar que la punta de la antena queda enterrada a escasos 2 cm, pues podemos concluir que las pruebas serán simplemente con el gateway y los sensores enterrados. Como ventaja vemos que de esta forma no habrá nada visible, será más seguro y menos molesto.



La tabla 4.11 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, con las diferentes distancias y profundidades con respecto del gateway.

Profundidad sensor (cm)	Distancia entre gateway (10 cm bajo tierra) y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	-70,12	-82,08	-99,01	-115,34	-125,23
10 cm	-81,86	-90,04	-111,45	-130,99	-151,87
20 cm	-94,77	-109,17	-141,54	Sin señal	Sin señal
30 cm	-132,01	-159,69	Sin señal	Sin señal	Sin señal

Fig. 4.11 Potencia recibida Arena Playa en dBm

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig.4.12).

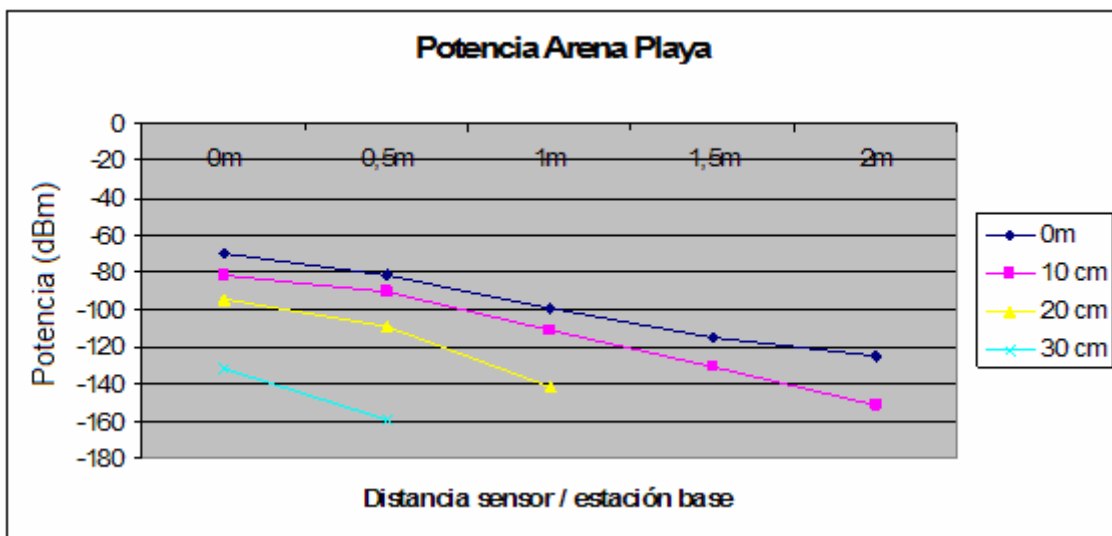


Fig. 4.12 Potencia recibida Arena Playa en dBm

La tabla 4.12 muestra los valores obtenidos del % de reintentos en la comunicación en arena de playa, con las diferentes distancias y profundidades respecto del gateway.

Profundidad sensor (cm)	Distancia entre gateway (10cm bajo tierra) y sensores (m)				
	0m	0,5m	1m	1,5m	2m
0m	1,51	2,57	4,00	5,34	7,41
10 cm	5,23	7,18	10,42	17,90	16,26
20 cm	8,19	17,20	24,96	Sin señal	Sin señal
30 cm	40,12	79,49	Sin señal	Sin señal	Sin señal

Tabla 4.12 Reintentos arena playa

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.13).

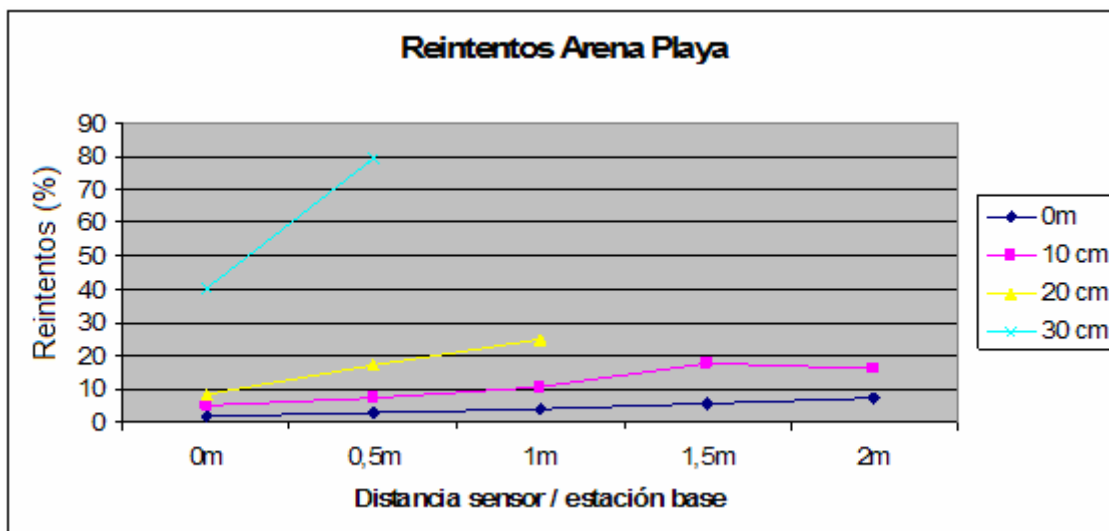


Fig. 4.13 Reintentos arena playa en (%)

Observamos en general, que a medida que los sensores se alejan del gateway, el número de reintentos es mayor y la potencia disminuye. Al igual que en profundidad, que cuanto más lejanos se encuentren los sensores, los reintentos aumentan, y a partir de cierta profundidad estas retransmisiones se disparan. Por ejemplo, tener los sensores a 30 cm de profundidad y el gateway a 10 cm, no es rentable aunque haya una comunicación entre los dispositivos (a excepción de a 0 metros de distancia).

#### 4.6 Comparación arena playa (gateway visible y no visible)

Dado que se ha considerado oportuno realizar las pruebas con el sensor enterrado en arena de playa, compararemos en este escenario la viabilidad de tener el gateway enterrado o no. Realizaremos la comparación cuando el gateway y los sensores se hallan separados a una distancia de 0 y 1 metro y miraremos cual es la potencia de recepción que se obtiene.

La tabla 4.13 muestra los valores obtenidos de potencia en dBm, comparando la misma situación con el gateway visible y no visible.

Gateway	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Superficie (0m)	-61,77	-69,52	-80,75	-107,2
Enterrado 10 cm (0m)	-70,12	-81,86	-94,77	-132,01
Superficie (1m)	-75,58	-86,46	-95,95	-157,06
Enterrado 10 cm (1m)	-99,01	-111,45	-141,54	Sin señal

Tabla 4.13 Comparación de potencia Gateway / Gateway enterrado

Para poder mostrarlo de una manera más visual y ver con mayor claridad las diferencias, a partir de esta tabla obtenemos el siguiente gráfico (Fig. 4.14).

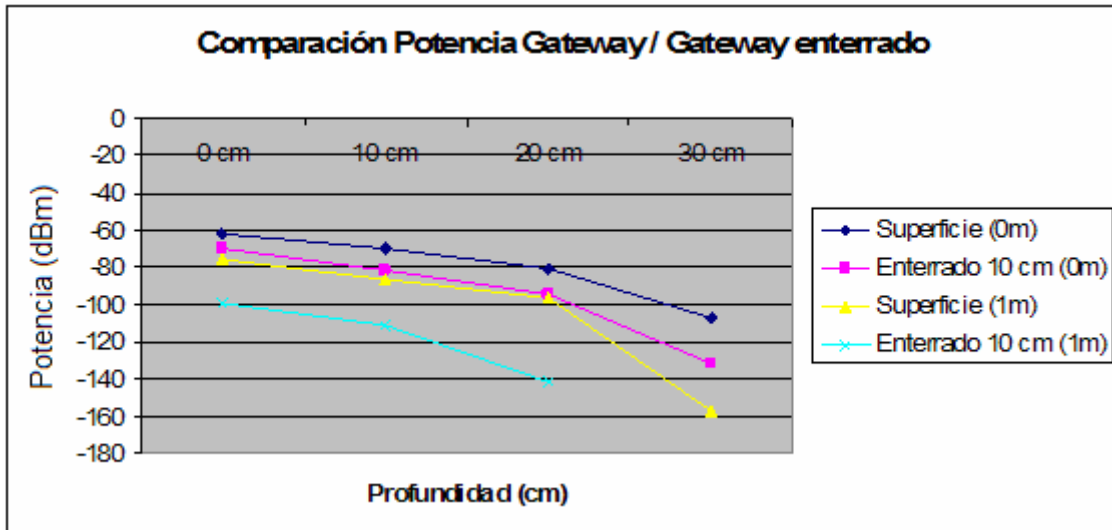


Fig. 4.14 Comparación de potencia recibida con el gateway en superficie y enterrado

La tabla 4.14 y figura 4.15 muestran la comparación a 0 y 1 metro de distancia horizontal de los reintentos realizados.

Gateway	Profundidad sensor			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Superficie (0m)	0,63	1,25	2,79	15,95
Enterrado 10 cm (0m)	1,51	5,23	8,19	40,12
Superficie (1m)	1,12	2,99	5,76	36,73
Enterrado 10 cm (1m)	4	10,42	24,96	Sin señal

Tabla 4.14 Comparación de reintentos Gateway / Gateway enterrado

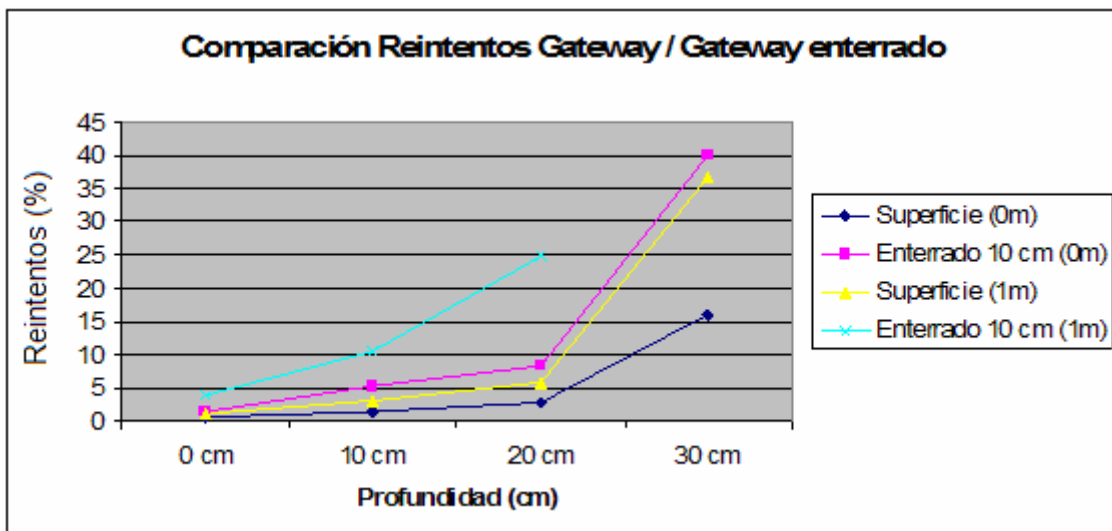


Fig. 4.15 Comparación de reintentos con el gateway en superficie y enterrado

En este caso, se debía probar la comunicación con ambos dispositivos enterrados. Como indican los gráficos, sí que existe una comunicación aunque más deteriorada que con el gateway en el exterior. Con el gateway enterrado hay menos cobertura para la señal y teniendo los sensores a 30 cm, sólo le permite una distancia horizontal de separación de hasta 0'5m (véase la Fig.

4.12) (aunque no sea recomendable por los reintentos que se realizan (véase la Fig. 4.13).

Los resultados de este apartado son los esperados, ya que vemos que hay peor comunicación con los sensores teniendo el gateway enterrado que de manera visible.

Como curiosidad decir que prácticamente tiene el mismo efecto en la comunicación tener el gateway en la superficie y los sensores enterrados a 1 metro de distancia, que tener el gateway enterrado, y los sensores situados a una distancia de 0 metros. La comunicación en ambos casos se comporta de una manera muy parecida.

También podemos ver que con el gateway enterrado, con una distancia de los sensores a un metro, la comunicación sólo llega con los sensores enterrados como máximo a 20 cm. Por otro lado, realizando la misma prueba pero con el gateway estando visible, la comunicación si que llega a los 30 cm de profundidad.

Aunque teniendo el gateway enterrado hay menos zona de cobertura para los sensores, una gran ventaja como hemos comentado, es que no tenemos nada visible y es mucho más seguro.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este proyecto se ha presentado una evaluación del funcionamiento de las redes WSNs adaptadas subterráneamente. Es decir, un estudio de las redes WUSNs analizando las posibilidades que ofrece este tipo de red.

Como se ha comentado ya, estas comunicaciones inalámbricas (tanto WSNs como WUSNs), están siendo un foco claro de investigación y despiertan mucho interés por sus futuras aplicaciones.

Centrándonos en este TFC, lo que se ha pretendido es analizar en detalle la parte teórica y realizar la parte práctica de los conceptos explicados anteriormente. Se ha mirado la conectividad entre sensores enterrados y un gateway en los distintos medios.

Los resultados han sido todos satisfactorios ya que se ha establecido comunicación entre los dispositivos. Hemos podido observar también, las limitaciones de cobertura que tienen a diversas profundidades, y las carencias o ventajas que presenta cada uno de los diferentes escenarios. Se ha cumplido el objetivo del trabajo, sin saber a ciencia cierta si iba a funcionar al inicio del TFC. Estos resultados están expuestos en el capítulo anterior.

Cabe decir que esta tecnología aun está por explotar e investigar, y por ello se están empezando a llevar a cabo experimentos cómo los realizados (estos son los segundos experimentos de este tipo que se han realizado en todo el mundo) y con otro tipo de sensores. Estas redes permitirán mucha escalabilidad dado que no necesitan cableado.

Se podrán monitorizar diferentes parámetros, para poder ahorrar o prevenir diferentes situaciones. Entre muchas de estas, se podrán prevenir terremotos, fugas de gas tóxico, o inclusive ahorrar agua en cualquier jardín. Otro tipo de redes a utilizar en un futuro, podrían ser las redes de sensores submarinas, para así poder monitorizar el estado de aguas, ríos y mares y poder saber si se ha producido algún tipo de contaminación.

Con esta tecnología (WUSN), dentro de un futuro no muy lejano, se trabajará habitualmente como con cualquier otra tecnología, tras una previa adaptación e investigación.

## IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

El trabajo desarrollado no presenta ningún impacto medioambiental, es totalmente inofensivo ya que las aplicaciones creadas no generan ningún tipo de residuo. Se podría decir que es un trabajo limpio y respetuoso con el medio ambiente.

No obstante los sensores con los que hemos trabajado, consumen baterías eléctricas, pilas del tipo AA. Y si no son depositadas en el contenedor correspondiente para su reciclado o correcto almacenamiento pueden causar trastornos en los ecosistemas donde se depositen. Incluso pueden llegar a afectar a los seres humanos.

Las pilas ofrecen una fuente de energía cómoda y portátil, aunque tan solo son capaces de almacenar una pequeña parte de la energía que se emplea en su fabricación. Alguno de los componentes de las pilas, como el cadmio, mercurio o zinc, pueden ser gravemente perjudiciales para el medio ambiente si no reciben el tratamiento adecuado.

Los fabricantes de pilas han conseguido reducir notablemente los componentes peligrosos como el mercurio. Además, han empezado a desarrollar tecnologías para la recuperación de los componentes de las pilas cuando se agotan, aunque, de hecho, existen muy pocos proyectos de reciclado real de pilas. Es por ello, que aunque hemos de estar agradecidos a las ventajas de utilizar pilas, deberíamos reciclarlas para cuidar nuestro medio ambiente.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Wireless Underground Sensor Networks using Commodity TerrestrialMotes  
<http://www.eng.buffalo.edu/~tmelodia/papers/Secon06-UG.pdf>
- [2] CrossBow  
<http://www.xbow.com>
- [3] Wireless underground sensor networks: Research challenges  
<http://users.ece.gatech.edu/~eps/publications/underground.pdf>
- [4] WSN Started Kit Dataste  
[http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/WSN\\_START\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/WSN_START_Datasheet.pdf)
- [5] Sensor node For Wireless sensor networks  
[http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/Sensor\\_Node\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/Sensor_Node_Datasheet.pdf)
- [6] Technical Support  
<http://www.xbow.com/Support/wTechnicalSupport.aspx>
- [7] Carlos López, “Aplicaciones de sensado: emulación de RFID activo y medición en tiempo real”, EPSC, Enero 2006
- [8] Redes inalámbricas de sensores (WSN)  
<http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/Oct06Marzo07/ComInalam/TRabajos/TRABAJO3/G1/PROYECTO%203%20-%20GRUPO%201.ppt>
- [9] L. Li, M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, "Characteristics of Underground Channel for Wireless Underground Sensor Networks", Proc. Med-Hoc-Net '07, Corfu, Greece, June 13-15, 2007.