

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA LA MEDICIÓN,  
ESTUDIO Y SEGUIMIENTO DE LA CAPA FREÁTICA MEDIANTE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA**

**CAMILO TRUJILLO MORALES  
OSCAR FERNEY AROCA TRUJILLO**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMAS INGENIERIA ELECTRONICA - AGRICOLA  
NEIVA - HUILA  
2011**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA LA MEDICIÓN,  
ESTUDIO Y SEGUIMIENTO DE LA CAPA FREÁTICA MEDIANTE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA**

**CAMILO TRUJILLO MORALES  
OSCAR FERNEY AROCA TRUJILLO**

**DIRECTOR:  
Ing. RAMIRO PERDOMO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al  
Título de Ingeniero Agrícola y de Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMAS INGENIERIA ELECTRONICA - AGRICOLA  
NEIVA - HUILA  
2011**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Neiva, Noviembre 22 de 2011**

## **DEDICATORIA**

“A Dios, que me permitió la vida, la salud y la capacidad para prepararme y cumplir mi sueño.

A mis padres Jorge Enrique Aroca y Mercedes Trujillo Méndez, por su amor y apoyo incondicional.

A mi hermano Jorge Luis Aroca, por su ánimo, entusiasmo y lealtad que guían su vida.

**Oscar Ferney Aroca Trujillo**

“A Dios, que bendice mi trabajo, hogar y toda aquella acción que realizo en su nombre.

A mi madre Claudia Patricia Morales R. por su paciencia, apoyo, amor y cariño que me brinda junto con las cosas que quiero.

A mi familia y grandes amigos que siempre llevo en mi corazón, porque me han enseñado que en el devenir de los seres humanos, siempre encontrare en ellos mi vida.

**Camilo Trujillo Morales**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

**Ing. RAMIRO PERDOMO.** Docente del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana por sus grandes consejos, profesionalismo y en especial por el gran aporte que como docente realiza para que el programa de Ingeniería Electrónica sea mejor.

**Ing. RODRIGO PACHON.** Docente del programa Ingeniería Agrícola de la Universidad Surcolombiana, por su colaboración, acompañamiento, apoyo y consejos que ayudaron a sacar adelante este trabajo.

A nuestros compañeros, amigos y aquellas personas que de una u otra forma aportaron y apoyaron la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>DESCRIPCION GENERAL DE SEGUIMIENTO Y ANALISIS DE NIVELES FREATICOS CONTENIDAS EN EL PROYECTO</b>	<b>15</b>
1.1 CAPA FREÁTICA	16
1.2 PROBLEMA DE UN NIVEL FREÁTICO ALTO	17
1.3 MEDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS (FREATIMETRÍA)	17
1.4 IMPORTANCIA DEL SEGUIMIENTO DE NIVEL FREATICO PARA UN DISEÑO HIDRAULICO	18
1.5 MATERIAL DE DISEÑO	19
1.5.1 Método de interpolación de KRIGING (Spatial Analyst)	19
1.5.2 Mapas de Isobatas e Isohipsas	20
1.5.3 Isolíneas	20
1.5.4 Hidrogramas	21
1.5.5 Gráficos de Superficie	22
1.5.6. Topografía del Terreno	22
1.5.7 Superficie Freática	23
1.6 TOPOLOGIAS DE RED	24
1.6.1 Topología en Estrella	24
1.6.2 Topología Clúster Tree	25
1.6.3 Topología Mesh	25
1.7 COMUNICACIÓN INALAMBRICA ZIGBEE	26
1.7.1 Características	26
1.7.2 Red ZigBee	27
<b>HARDWARE</b>	<b>28</b>
2. DISEÑO DE HARDWARE DEL NODO COORDINADOR	29

2.1.1	Circuito de la Fuente de Alimentación Eléctrica	30
2.1.2	Circuito del Teclado	31
2.1.3	Circuito de Control	31
2.1.4	Circuito de Visualización	32
2.1.5	Circuito del Sistema de Almacenamiento	33
2.1.6	Circuito del Reloj de Tiempo Real (DS1307)	34
2.1.7	Circuito RF de Comunicación Inalámbrica	35
2.2	NODO TERMINAL	36
2.2.1	Sensor de nivel	36
2.2.2	Circuito de control en los nodos terminales	37
2.2.3	Circuito RF de los Nodos Terminales	38
<b>CONFIGURACION Y COMUNICACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICA WSN</b>		<b>40</b>
3.1	CONFIGURACION DE LOS MODULSO XBEE	40
3.1.1	Configuración de la red de sensores inalámbrica WSN	41
3.1.2	Configuración del Modo de bajo consumo (Sleep Mode)	44
3.2	COMUNICACIÓN EN LA RED DE SENSORES INALAMBRICA WSN	45
3.2.1	Trama de Envío de comandos AT a un modulo remoto	46
3.2.2	Trama de respuesta de comando AT de un modulo remoto	47
3.2.3	Trama de petición de transmisión de datos serial a un modulo remoto con dirección de 16-bits	48
3.2.4	Trama de respuesta de estado de la transmisión	49
3.2.5	Trama de paquetes recibidos con dirección de 16-bits	49
<b>SOFTWARE APLICATIVO</b>		<b>51</b>
4.1	CUADROS DEL SOFTWARE	52
4.2	FUNCIONES DEL MENU SUPERIOR	54
4.3	PLANOS Y MAPAS	56
<b>RESULTADOS OBTENIDOS DE EL SISTEMA PUESTO A PRUEBA EN CAMPO</b>		<b>61</b>
5.1	GENERALIDADES	61
5.2	UBICACIÓN GEOGRAFICA	61

5.3 CARACTERISTICAS	63
5.4 INSTALACIÓN DEL SISTEMA.	65
5.5 PUESTA A PRUEBA	66
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Distribución Vertical de Aguas en el Subsuelo	<b>16</b>
<b>Figura 2.</b> Diagrama De Pozo Para Medición De Nivel Freático	<b>18</b>
<b>Figura 3.</b> Mapa de Isobatas e Isohipsas	<b>20</b>
<b>Figura 4.</b> Hidrograma de Nivel Freático	<b>22</b>
<b>Figura 5.</b> Topografía del terreno	<b>23</b>
<b>Figura 6.</b> Superficie nivel freático	<b>23</b>
<b>Figura 7.</b> Topologías de red	<b>24</b>
<b>Figura 8.</b> Módulo Zigbee	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b> Esquema del sistema	<b>28</b>
<b>Figura 10.</b> Nodo coordinador	<b>30</b>
<b>Figura 11.</b> Circuito de la fuente de alimentación eléctrica	<b>30</b>
<b>Figura 12.</b> Circuito del teclado	<b>31</b>
<b>Figura 13.</b> Circuito de control	<b>32</b>
<b>Figura 14.</b> Circuito de visualización	<b>32</b>
<b>Figura 15.</b> Circuito del sistema de almacenamiento	<b>33</b>
<b>Figura 16.</b> Información almacenada en la memoria EEPROM	<b>33</b>
<b>Figura 17.</b> Circuito del Reloj de Tiempo Real (DS1307)	<b>34</b>
<b>Figura 18.</b> Circuito RF de Comunicación Inalámbrica	<b>35</b>
<b>Figura 19.</b> Fotografía del Nodo Coordinador	<b>35</b>
<b>Figura 20.</b> Esquema Nodo Terminal	<b>36</b>
<b>Figura 21.</b> Etapa del Microcontrolador	<b>37</b>
<b>Figura 22.</b> Circuito RF de los nodos terminales	<b>38</b>
<b>Figura 23.</b> Fotografía del Nodo Terminal	<b>39</b>
<b>Figura 24.</b> Software X.CTU de Digi Internacional	<b>41</b>
<b>Figura 25.</b> Configuración Punto a Multipunto	<b>42</b>
<b>Figura 26.</b> Ejemplo de una trama API	<b>45</b>
<b>Figura 27.</b> Trama para envío de comandos AT a una Dirección Broadcast	<b>46</b>
<b>Figura 28.</b> Trama para envío de comandos AT a una dirección de 64-bits	<b>47</b>

<b>Figura 29.</b> Trama de respuesta de comandos AT	<b>48</b>
<b>Figura 30.</b> Trama de petición de datos serial	<b>48</b>
<b>Figura 31.</b> Respuesta de status de transmisión	<b>49</b>
<b>Figura 32</b> Trama recibida por el microcontrolador	<b>50</b>
<b>Figura 33.</b> Software (primer plano)	<b>51</b>
<b>Figura 34.</b> Especificación de cuadros y funciones del software	<b>52</b>
<b>Figura 35.</b> Comparación de planos con diferencia de puntos	<b>54</b>
<b>Figura 36.</b> Gráficos del software	<b>55</b>
<b>Figura 37.</b> Segundo plano del software, “Graficas”	<b>56</b>
<b>Figura 38.</b> Hidrograma	<b>57</b>
<b>Figura 39.</b> Topografía del Terreno	<b>57</b>
<b>Figura 40.</b> Superficie Freática	<b>58</b>
<b>Figura 41.</b> Plano Equipotencial 1	<b>58</b>
<b>Figura 42.</b> Plano Equipotencial 2	<b>59</b>
<b>Figura 43.</b> Plano Isoprofundidad 1	<b>59</b>
<b>Figura 44.</b> Plano Isoprofundidad 2	<b>60</b>
<b>Figura 45.</b> Fotografía del Predio la Guandinosa	<b>61</b>
<b>Figura 46:</b> Imagen satelital de la Vereda La Guandinosa	<b>62</b>
<b>Figura 47.</b> Curvas de nivel Predio la Guandinosa	<b>63</b>
<b>Figura 48.</b> Instalación de sensores y nodos en el pozo	<b>65</b>
<b>Figura 49.</b> Distribución de los pozos de observación	<b>66</b>
<b>Figura 50.</b> Tabulación obtenida desde el Nodo Central	<b>67</b>
<b>Figura 51.</b> Topografía del Terreno (prueba en campo)	<b>68</b>
<b>Figura 52.</b> Superficie Freática (prueba en campo)	<b>68</b>
<b>Figura 53.</b> Plano Equipotencial 1 (prueba en campo)	<b>69</b>
<b>Figura 54.</b> Plano Equipotencial 2 (prueba en campo)	<b>69</b>
<b>Figura 55.</b> Plano Isoprofundidad 1 (prueba en campo)	<b>70</b>
<b>Figura 56.</b> Plano Isoprofundidad 2 (prueba en campo)	<b>70</b>
<b>Figura 57.</b> Pantallazo del Software (prueba en campo)	<b>71</b>
<b>Figura 58.</b> Graficas de Seguimiento del Nivel Freático	<b>72</b>

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A</b> ESQUEMATICO Y CIRCUITO IMPRESO DE LOS NODOS DEL SISTEMA	<b>76</b>
<b>ANEXO B</b> CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS DISPOSITIVOS	<b>81</b>
<b>ANEXO C</b> PLANO DEL PREDIO LA GUANDINOSA Y SUS CURVAS DE NIIVEL	<b>89</b>

## RESUMEN

Este proyecto está basado en el desarrollo de un sistema de monitoreo inalámbrico con sensores de nivel para la medición de la capa freáticas en pozos de observación y el desarrollo de un software para la obtención de información gráfica a partir de datos recolectados, para el análisis y almacenamiento del registro histórico del comportamiento de la profundidad de la capa freática. El sistema se basa en una cuadrilla de nodos inalámbricos distribuidos e instaladas en cada uno de los pozos que contienen el sensor de ultrasonido que mide la profundidad del agua subterránea.

Se desarrollo una interface grafica de usuario en Matlab, para el procesamiento y almacenamiento de datos recolectados por los sensores instalados en cada nodo de la red inalámbrica sobre los pozos de observación. El software convierte esta información numérica en información grafica realizando una interpolación espacial a través de un método geoestadístico llamado método de Kriging para definir un comportamiento de la variable en el espacio. Con esta herramienta el programa realiza mapas de isobatas e isohipsas en un periodo estipulado por el usuario. Esta información es guardada por un nodo central que coordina la funcionalidad de la red inalámbrica WSN, dado esto los datos recolectados y la información numérica y grafica es almacenada en esta central donde se tiene acceso a la información a través de una computadora conectada vía USB.

Se desarrollo así un protocolo de funcionamiento para la obtención de datos y coordinación del sistema, para la realización de una prueba experimental en campo.

## **ABSTRACT**

This project is based on developing a wireless monitoring system with sensors for measuring groundwater levels in observation wells and the development of software for graphic information obtained from data collected for analysis and historical archiving of behavior of the depth of the water table. The system relies on a cadre of wireless nodes distributed and installed in each of the wells containing the ultrasonic sensor that measures the depth of groundwater.

We developed a graphical user interface in Matlab, for processing and storing data collected by sensors installed in each wireless network node on the observation wells. The software converts the numerical information in graphical information by performing a spatial interpolation method through a geostatistical method called kriging to define a variable behavior in space. With this tool, the program performs isobaths maps and contours in a period specified by the user. This information is stored by a central node that coordinates the functionality of the wireless network WSN, as it collected data and numerical and graphic information is stored in this plant which has access to information through a computer connected via USB.

We developed an operating protocol and for data collection and coordination of the system to perform an experimental field test.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de tecnologías en vista del desarrollo para la búsqueda de soluciones de problemas y mejoras de procesos hace parte de una innumerable mención positiva que puede tener la implementación y tecnificación de tareas en cualquier campo de acción. Es así que la agricultura, no debe ser ajena frente a la capacidad que tenemos como conocedores en el área de Ingeniería para aportar en el desarrollo de esta en el campo de la información y tecnología. De igual manera la ingeniería Agrícola y afines deben estar más sujetas a la implementación de tecnologías de comunicación y electrónicos, con el fin de visualizar e implementar soluciones, automatizar procesos que desvíen los altos consumos y errores en la producción, focalizar problemas y adquirir fortalezas en un campo que necesita de estas herramientas.

El sistema de medición para niveles freáticos que hemos desarrollado parte de la viabilidad que tiene el sistema comparado con los métodos artesanales por llamarlos de cierta manera, para la obtención de datos en los pozos de observación de aguas subsuperficiales presentes en los campos agrícolas. La tarea no es ajena a la búsqueda de soluciones para la corrección de problemas en campos con problemas de drenaje o aquellas estructuras que necesitan de un estudio a partir de la medición de aguas subterráneas, para su respectivo diseño y posible trazo de drenaje.

El sistema ofrece además la posibilidad que el usuario pueda obtener un resultado no solo numérico (mediciones del nivel freático), si no también representaciones graficas que resultan de tales mediciones en 7 diferentes representaciones de las que incluyen mapas de isobatas e isohipsas en 3 muestras diferentes, hidrograma y una vista en 3D de la capa freática y la topografía del terreno. El capítulo 3 SOFTWARE APLICATIVO se presentan cada una de las graficas nombradas anteriormente y explicación de cada uno de los componentes que conforman esta parte del sistema de mediciones de la capa freática.

Es así como no solo vemos la aplicabilidad a campos agrícolas (como principal prioridad), si no, aquella labor agrícola, civil, arquitectónica, donde un estudio de la capa freática resulte consecuente con el diseño de una obra.

## **1. DESCRIPCION GENERAL DE EL SEGUIMIENTO Y ANALISIS DE NIVELES FREATICOS.**

### **ANTECEDENTES**

Sensores y diferentes elementos electrónicos utilizados para medición de un comportamiento y/o procedimiento son encontrados fácilmente para la creación de un sistema para la ayuda de una tarea o trabajo. Es así como es utilizada una red de dispositivos electrónicos para medición de condiciones de un entorno y se establece una comunicación para la recolección de dicha información. Las Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) ilustran este tipo de tecnología con la ventaja que se establece mediante un trabajo individual y una comunicación inteligente que hace que un sistema logre una mejor eficiencia.

Se facilita entonces la medición de factores físicos, químicos, naturales, ambientales, y se avanza para el control de comportamientos sociales, en transporte, vigilancia, agricultura, etc.

La agricultura constituye una de las áreas donde se prevé que pueda implantarse con mayor rapidez este tipo de tecnología. Por ejemplo, las redes de sensores favorecen una reducción en el consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden alertar sobre la llegada de heladas, así como ayudar en el trabajo de las cosechadoras. Gracias a los desarrollos que se han producido en las redes de sensores inalámbricos en los últimos años, especialmente la miniaturización de los dispositivos, han surgido nuevas tendencias en el sector agrícola como la llamada agricultura de precisión. Esta disciplina cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, árboles, flores y plantas, ganado, etc. Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades. Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros tales como el clima, la temperatura o la humedad de las hojas, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados. La gran ventaja del uso de esta tecnología es la detección a tiempo y la aplicación óptima de los pesticidas, únicamente en aquellas zonas donde resulta realmente necesario. (Ramos, F.)

El estudio freaticométrico representa en la agricultura un campo importante en campos con problema de presencia de aguas tanto subterráneas como superficiales. La posibilidad de conocer una condición y/o comportamiento característico de la capa freática en un terreno, facilita establecer una relación entre el juicio y seguimiento reflejado en un buen diseño (drenaje), además posibilita la hipótesis y crear una relación de factores impropios del terreno como lagos, ríos, canales, cercanía a zonas montañosas, etc.

La mayor ventaja de la implantación de una red de sensores inalámbricos para medición de niveles freáticos se refleja en la capacidad que puede tener el sistema para abarcar una comunicación en grandes aéreas. Además la cómoda instalación de sus componentes en campo ofreciendo al usuario la oportunidad de tener trabajando su sistema automáticamente y a bajos consumos de energía.

## 1.1 CAPA FREÁTICA

El nivel freático (NF) lo constituye el nivel superior de las aguas subterráneas libres que tiene una presión igual a la presión atmosférica (Cruz, R. 1995). Como se ilustra en la Figura 1. El nivel freático es el primer manto de agua que se encuentra al realizar un perfil o una perforación en el suelo.

**Figura 1.** Distribución Vertical de Aguas en el Subsuelo



**Fuente:** [http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc\\_sub\\_distribucion\\_agua.html](http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_distribucion_agua.html)



La profundidad de este sustrato compacto varía con el medio geológico, comprendiendo desde algunos centímetros hasta varias decenas de metros según la región (Fresina, M.).

## **1.2 PROBLEMA DE UN NIVEL FREÁTICO ALTO**

El drenaje de tierras agrícolas tiene como objeto eliminar los sobrantes de agua del suelo con el fin de mantener las condiciones necesarias de aireación y actividad biológica del mismo, para que las plantas puedan desarrollar los procesos de crecimiento de su sistema radical y, por ende, de su parte aérea (Colina, 1997).

Un nivel freático alto junto a un suelo mal drenado produce en el cultivo la reducción o eliminación del espacio con aire del suelo, evitando de esta manera la entrada de oxígeno atmosférico hacia las raíces, indispensable para sus funciones de respiración y crecimiento. Bajo tales circunstancias se limita el intercambio gaseoso en el suelo al no permitir la salida del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con lo cual el sistema radical de las plantas puede morir por asfixia produciéndose la pérdida del cultivo. Asimismo, las plantaciones establecidas en terrenos con mal drenaje no pueden hacer uso eficiente de los fertilizantes, ya que la energía derivada de la respiración dentro de la raíz es utilizada parcialmente en el proceso de absorción de nutrientes, y en estas condiciones dicha energía es mínima (Pazos, 2005).

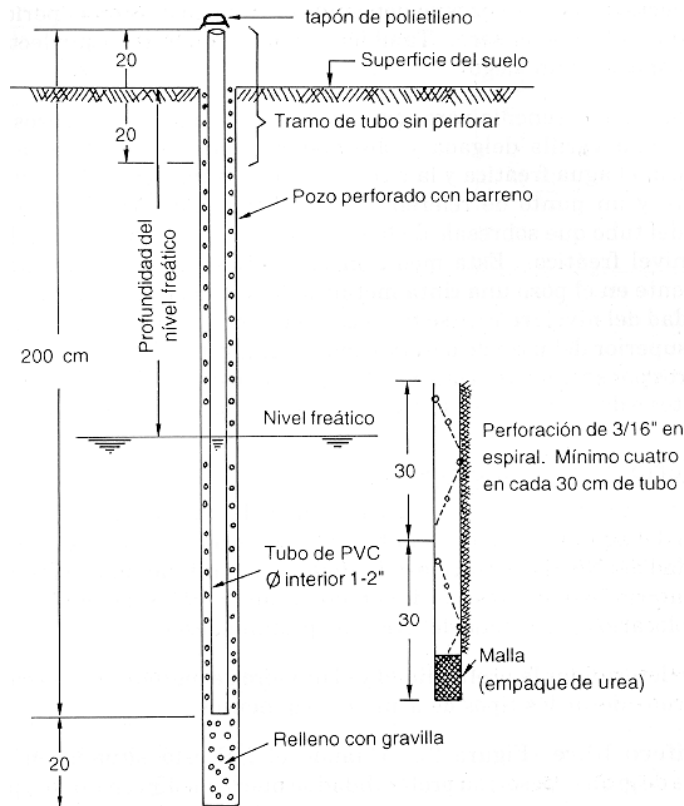
## **1.3 MEDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS (FREATIMETRÍA).**

El principio consiste en la medición del NF contenida en un tubo perforado que permita el acceso del agua contenida en el suelo, impidiendo el paso de partículas sólidas que taponen u obstruyan la medida precisa en el pozo, como lo ilustra la Figura 2.

Un pozo de observación puede ser un hoyo hasta una profundidad de importancia agronómica, entre 1.8m y 2.0m (Cruz, R. 1995). Este sistema o cuadrillas de pozos son instalados de forma que abarquen zonas críticas y de posible influencia de recarga en un terreno.

Los controles que se hacen en los pozos de manera rudimentaria, se realizan con ayuda de varillas, cintas metálicas, cuerdas, flotadores, etc. En este proyecto de grado se implementa el uso de sensores para medición de niveles freáticos.

**Figura 2. Diagrama De Pozo Para Medición De Nivel Freático**



Fuente: CRUZ, R. Drenajes 1995.

#### **1.4 IMPORTANCIA DEL SEGUIMIENTO DE NIVEL FREÁTICO PARA UN DISEÑO HIDRÁULICO.**

En el diseño de un sistema de drenaje deben considerarse factores edafológicos tales como: la topografía, textura y estructura de suelos, porosidad total y efectiva (macroporosidad), capacidad de retención de agua (microporosidad), y en especial la permeabilidad de los diferentes estratos que permitirá determinar la presencia de capas impermeables o poco permeables que influirán en forma decidida en la altura del nivel freático dentro del perfil (Soto, 1994).

El estudio de nivel freático es uno de los que aporta más elementos de juicio a la solución de un problema específico de drenaje (Pazos, 2005). Mediante la obtención de información en cada uno de los pozos instalados en el lugar de estudio, se determinará la altura y sentido de un flujo del nivel freático, detallando puntualmente zonas críticas o de posible influencia para la alimentación de estas aguas.

Este estudio no solo se especifica para casos agrícolas, la importancia radica además en el campo civil por ejemplo cuando se pretende levantar una estructura, el nivel freático y el terreno marcan en parte el dimensionamiento de las cimentaciones para la obra y la manera de evacuar estas aguas presentes en el suelo. La presencia de agua, en relación a los esfuerzos, produce una disminución de las propiedades y las características resistentes en suelos saturados.

## **1.5 MATERIAL DE DISEÑO**

Existe numerosos mapas o planos que pueden elaborarse a partir de los datos del agua subterránea, cada uno de los datos recolectados deben ser procesados de forma que permita un correcto trazado de las graficas, es decir, es necesaria la interpolación para encontrar puntos intermedios a partir de sus vecinos.

El material que se enseña a continuación hace parte de la información que permite visualizar en el software desarrollado en el proyecto.

### **1.5.1 Método de interpolación KRIGING (Spatial Analyst)**

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z.

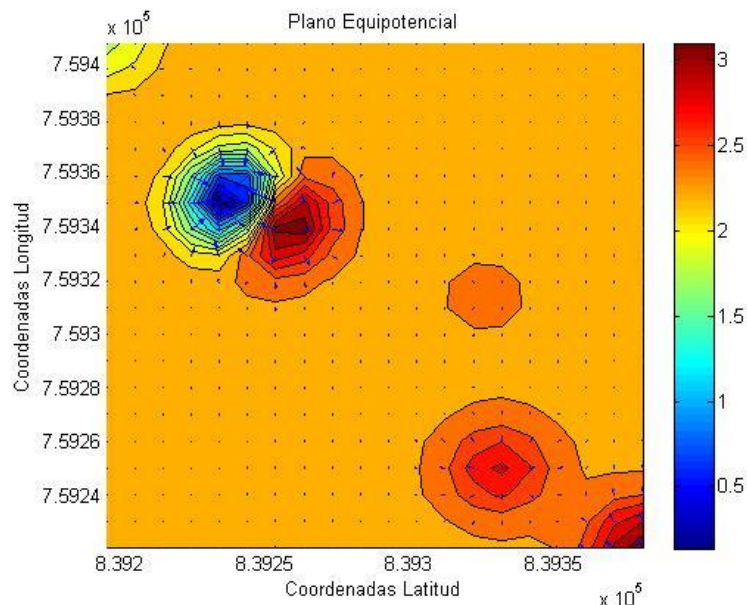
Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los

datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología.

### 1.5.2 Mapas de Isobatas e Isohipsas

Para el estudio de Niveles freáticos, los mapas de nivel freático son la conversión de toda información numérica recolectada en los pozos de observación, en proyecciones donde se ilustran las zonas con igual cota de nivel freático unidos mediante líneas llamadas Isobatas, y la dirección del flujo del agua en el momento que se registró la medida, en representación de flechas llamadas Isohipsas. Figura3



**Figura 3.** Mapa de Isobatas e Isohipsas.

### 1.5.3. Isolíneas

Las Isolíneas se expresan como la "curva que conecta los puntos en que la función tiene un mismo valor constante. Las Isolíneas que se representan en un mapa son líneas, rectas o curvas, que describen la intersección de una superficie real o hipotética con uno o más planos horizontales. La configuración de estas curvas

permite a los lectores del mapa inferir el gradiente relativo de la variable o parámetro y estimar un valor en un lugar determinado”.

Para este proyecto se realiza el trazo de dos tipos de Isolíneas contenidas dentro del marco de la geografía física, las cual son las Isobatas e Isohipsas, que se trazan con ayuda del software que fue creado en este proyecto.

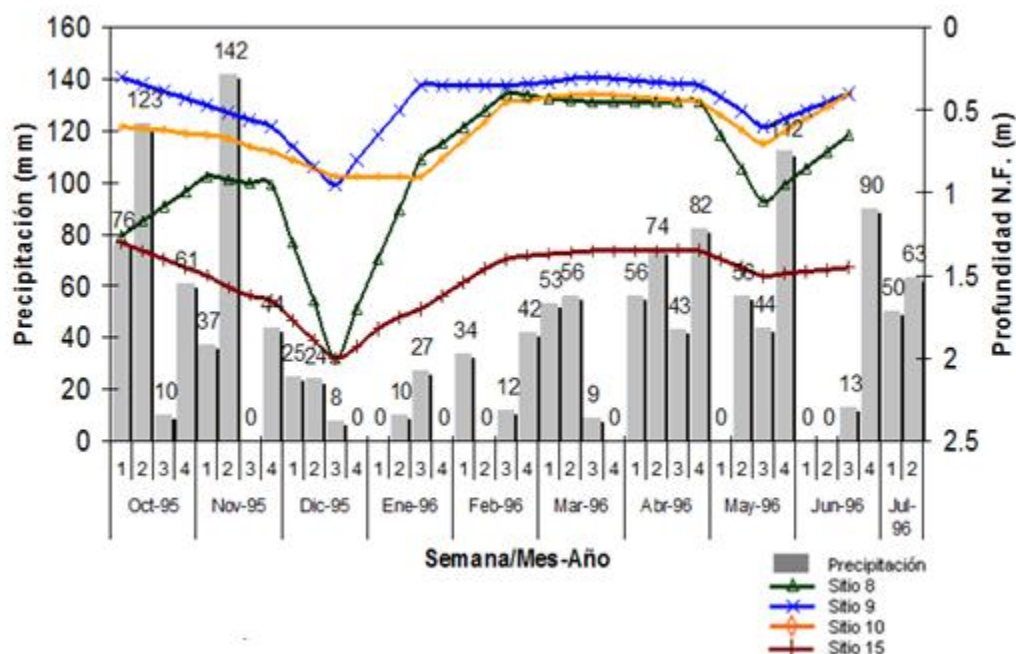
- Isobatas: Línea que une los puntos que han sufrido una misma elevación o descenso en una masa continental. También con respecto a un nivel de agua: ríos, lagos, presas, etc.
- Isohipsas: Altura sobre cualquier nivel de referencia (isohypsa) y si es sobre el nivel del mar, curvas de nivel. Es el método cartográfico más común para representar la altitud. A partir de las curvas, un sentido general del terreno puede ser determinado. Se utilizan en una variedad de escalas, desde la ingeniería a gran escala a los dibujos y planos de arquitectura, pasando por mapas topográficos hasta los mapas a escala continental.

#### **1.5.4. Hidrogramas**

Se define hidrograma como “un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, etc.”

Cuando la cantidad de agua subterránea en almacenamiento se incrementa, los niveles freáticos se elevan; cuando disminuye, los niveles freáticos bajan. Esta respuesta al nivel freático a los cambios en almacenamiento puede ser observada en un hidrograma (Figura 4). Las curvas de fluctuación de agua subterránea muestran las lecturas de los niveles de agua, convertidos a niveles de agua debajo de la superficie del suelo, contra su correspondiente tiempo.

**Figura 4. Hidrograma de Nivel Freático.**



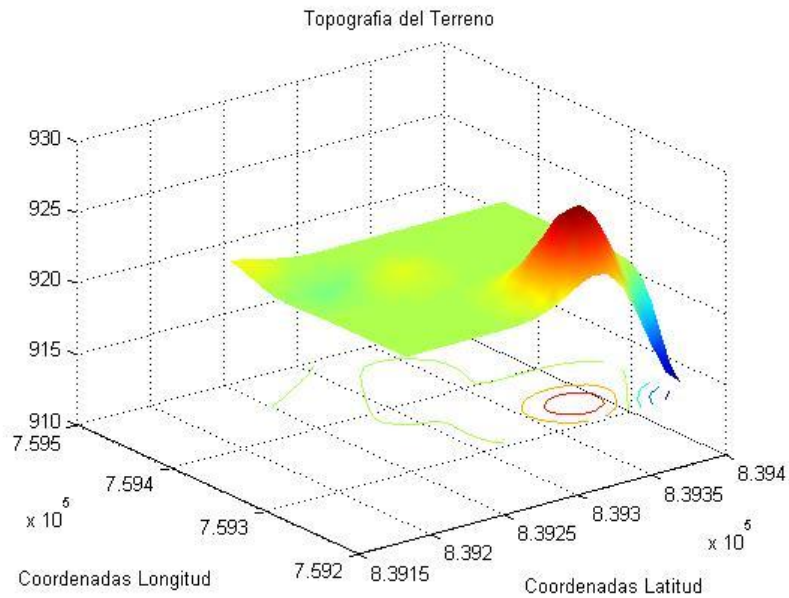
**Fuente:** EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO HIDRÁULICO Y FICIENCIA DE UN SISTEMA DE DRENAJE INTERNO ENTUBADO, CARLOS ALFREDO RAMÍREZ BEDOYA.

### 1.5.5. Gráficos de Superficie

Son representaciones que ofrece el software donde se ilustra la superficie en tres dimensiones para una mayor comprensión de la información que se registre.

### 1.5.6. Topografía del Terreno

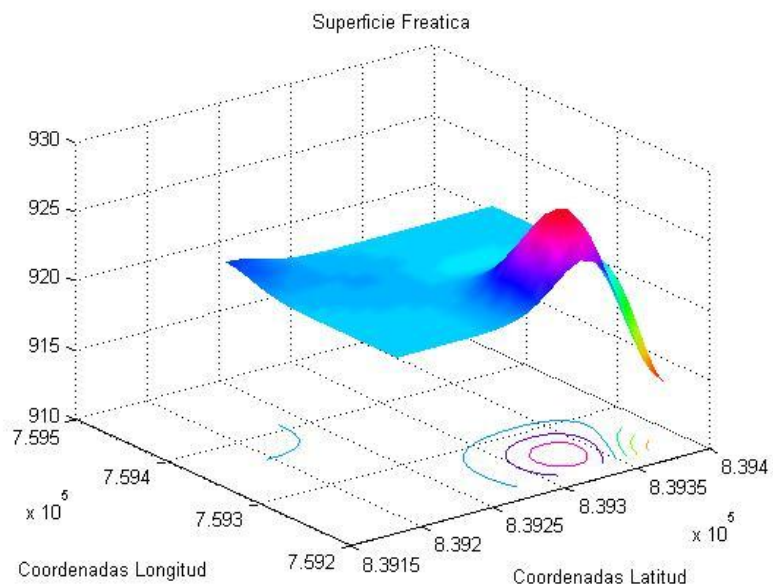
La topología del terreno se representara mediante un grafico de superficie, el cual proveerá de información real del área de estudio (Altura sobre el nivel del mar con sus respectivas coordenadas), dando un conocimiento de cómo está conformado el terreno; si existen pendientes o accidentes topográficos o por el contrario es un terreno plano (figura 5).



**Figura 5.** Topografía del terreno.

### 1.5.7. Superficie Freática

La representación del nivel freático se muestra en un grafico de superficie y evidencia la distribución del agua subterránea, dando una información rápida de la ubicación espacial de la capa freática (figura 6).



**Figura 6.** Superficie nivel freático.

Planos como los descritos anteriormente se disponen para indicar situaciones específicas tales como: delimitación del área afectada con problemas de drenaje; para conocer cuál es la profundidad del nivel freático durante ciertos períodos críticos del crecimiento de los cultivos o para programar algunas actividades agrícolas. Particularmente importante y útil puede ser el plano de la profundidad media anual o durante un período (estación) específico. Igualmente importante podría ser tener planos que indiquen las profundidades máximas y mínimas y a partir de ellos determinar las fluctuaciones del nivel freático (Salgado, L.).

## 1.10 TOPOLOGIA DE RED

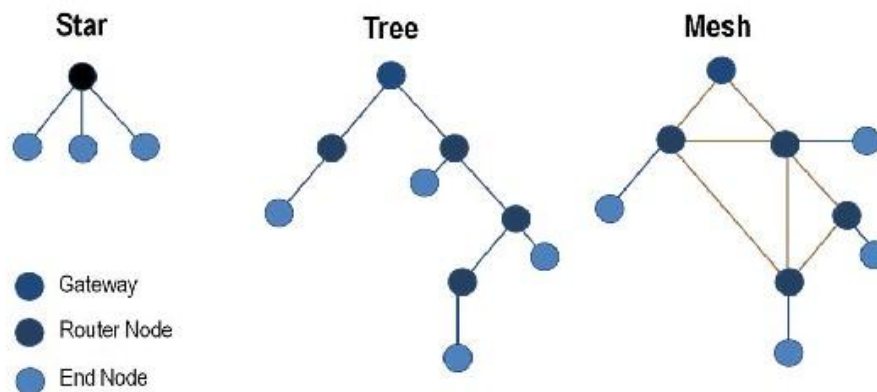
Las especificaciones de este estándar permiten tres diferentes topologías de red que pueden ser implementadas dependiendo de la aplicación, y éstas son:

### 1.10.1 Topología en Estrella

En una topología en estrella se tiene un único nodo trabajando como coordinador PAN, como se muestra en la Figura 18. Por lo tanto si un FFD está activado puede establecer su propia red y llegar a ser coordinador PAN, eligiendo un identificador de red. La comunicación en esta topología es centralizada, cada dispositivo (FFD o RFD) se unen a la red y si desea comunicarse con otros dispositivos debe enviar su información al coordinador PAN, el cual enviará esta información al dispositivo correspondiente.

FFD: *Dispositivo de funcionalidad completa*

RFD *Dispositivo de funcionalidad reducida*



**Figura 7.** Topologías de red



### **1.10.2 Topología Clúster Tree**

En esta topología de red se tiene la asociación de varias redes Figura 17 en donde:

El coordinador PAN:

- Forma el primer clúster y se establece a sí mismo como *Clúster Head* (CH) con su respectivo *Clúster Identifier* (CID) igual a cero.
- Elige un identificador PAN.
- Envía tramas *beacons* a todos los dispositivos vecinos.

Las redes que deseen asociarse al clúster 0 pueden hacerlo a través de cualquier dispositivo de su red. Además, los coordinadores deben establecerse como *Clúster Head* y tomar su respectivo CID.

### **1.10.3 Topología Mesh**

En esta configuración hay conectividad total de todos los FFDs que conforman la red con el FFD que actúa como coordinador PAN, según muestra la Figura 17.

Los RFDs pueden también participar en la red pero hay solamente conectividad con los FFD y no puede participar en enrutamiento. Las ventajas de esta topología es que son confiables y el rendimiento en el proceso de información en la red se debe a las múltiples trayectorias que pueden existir.

La configuración de la red es seleccionada es una red en estrella; la determinación de seleccionar esta configuración se debe a las características del área de estudio siendo la más adecuada debido a criterios como distancia entre el nodo terminal más lejano y el Coordinador, cantidad de nodos en la red y complejidad de la red.

## **1.11 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA ZIGBEE**

Los módulos Zigbee son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por Maxstream. Fueron desarrollados para satisfacer la creciente demanda de capacidad de red inalámbrica entre varios dispositivos de baja potencia.



**Figura 8.** Módulo Zigbee.

Su objetivo son las aplicaciones para redes Wireless que requieran comunicaciones seguras y fiables con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

### **1.11.1 Características**

- ZigBee, también conocido como "HomeRF Lite", es una tecnología inalámbrica con velocidades comprendidas entre 20 kB/s y 250 kB/s.
- Puede usar las bandas libres ISM (6) de 2,4 GHz (Mundial), 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU).
- Una red ZigBee puede estar formada por hasta 255 nodos los cuales tienen la mayor parte del tiempo el transceiver ZigBee dormido con objeto de consumir menos que otras tecnologías inalámbricas.
- Un sensor equipado con un transceiver ZigBee pueda ser alimentado con dos pilas AA durante al menos 6 meses y hasta 2 años.
- La fabricación de un transmisor ZigBee consta de menos circuitos analógicos de los que se necesitan habitualmente.
- Diferentes tipos de topologías como estrella, punto a punto, malla, árbol.
- Acceso de canal mediante CSMA/CA (7) (acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones).
- Escalabilidad de red: Un mejor soporte para las redes más grandes, ofreciendo más opciones de gestión, flexibilidad y desempeño.
- Fragmentación: Nueva capacidad para dividir mensajes más largos y permitir la interacción con otros protocolos y sistemas.
- Agilidad de frecuencia: Redes cambian los canales en forma dinámica en caso que ocurran interferencias.
- Gestión automatizada de direcciones de dispositivos - El conjunto fue optimizado para grandes redes con gestión de red agregada y herramientas de configuración.

- Localización grupal: Ofrece una optimización adicional de tráfico necesaria para las grandes redes.
- Puesta de servicio inalámbrico: El conjunto fue mejorado con capacidades seguras para poner en marcha el servicio inalámbrico.
- Recolección centralizada de datos: El conjunto fue sintonizado específicamente para optimizar el flujo de información en las grandes redes.

### **1.11.2 Red Zigbee**

La arquitectura de red en ZigBee define tres topologías de red. El máximo número de dispositivos que se puede tener es de 264 y se puede configurar una red con un máximo de 65.000 (2<sup>16</sup>) dispositivos. La formación y la asociación de la red están basadas en algunas suposiciones. Los dispositivos son pre-programados para su función de red. Los dispositivos finales siempre tratarán de asociarse a una red existente. Los coordinadores siempre tratarán de encontrar un canal sin usar de una red.

## 2. HARDWARE DEL SISTEMA

El presente capítulo describe las características principales de diseño de cada uno de los elementos del sistema de monitoreo de niveles freáticos, el esquema de funcionamiento del sistema y su respectiva explicación.

En el desarrollo del sistema se tomo en cuenta los siguientes requerimientos o características que debe satisfacer la Red de sensores inalámbrica WSN:

- Ahorro eficiente de energía para garantizar la disponibilidad de los nodos terminales en periodos de tiempo superior a 6 meses.
- Realizar con precisión la medición del nivel freático en los pozos de observación dispuestos para ello.
- Capturar y Almacenar la información adquirida por cada uno de los nodos terminales y transmitirla de manera inalámbrica al nodo coordinador.
- Garantizar la disponibilidad de los nodos terminales en condiciones adversas.

El esquema general del sistema implementado se muestra en la figura 21 consta de un (1) nodo coordinador y seis (6) nodos terminales distribuidos en el área de pruebas de 10.000 m<sup>2</sup>, a continuación se visualiza globalmente el sistema:

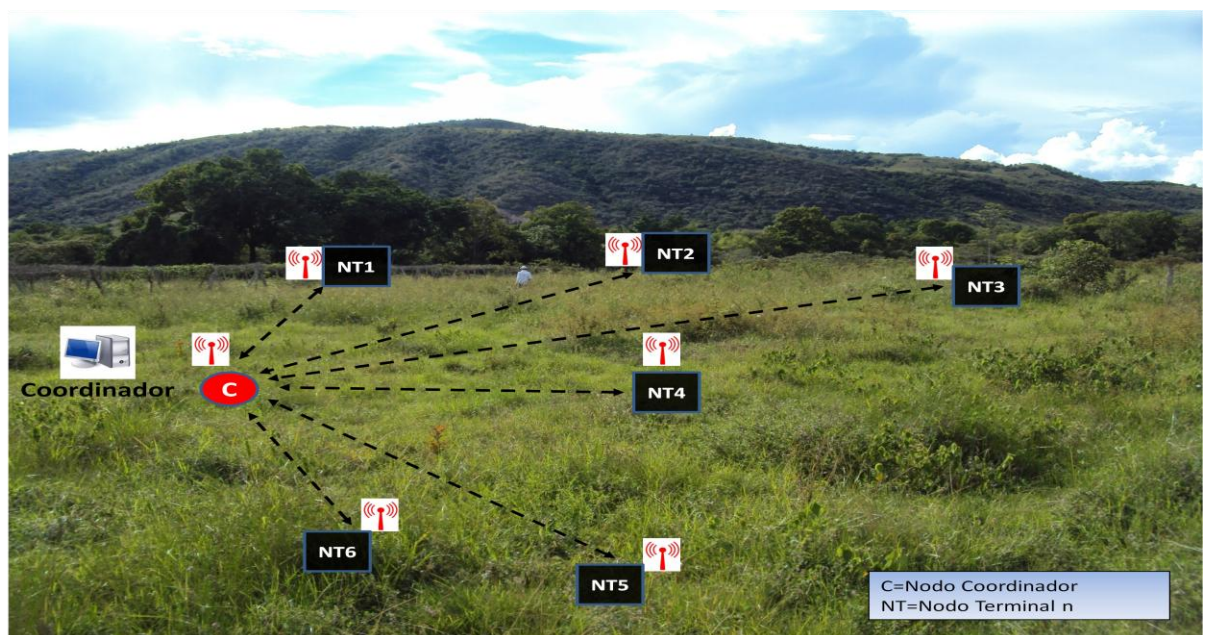


Figura 9. Esquema del sistema

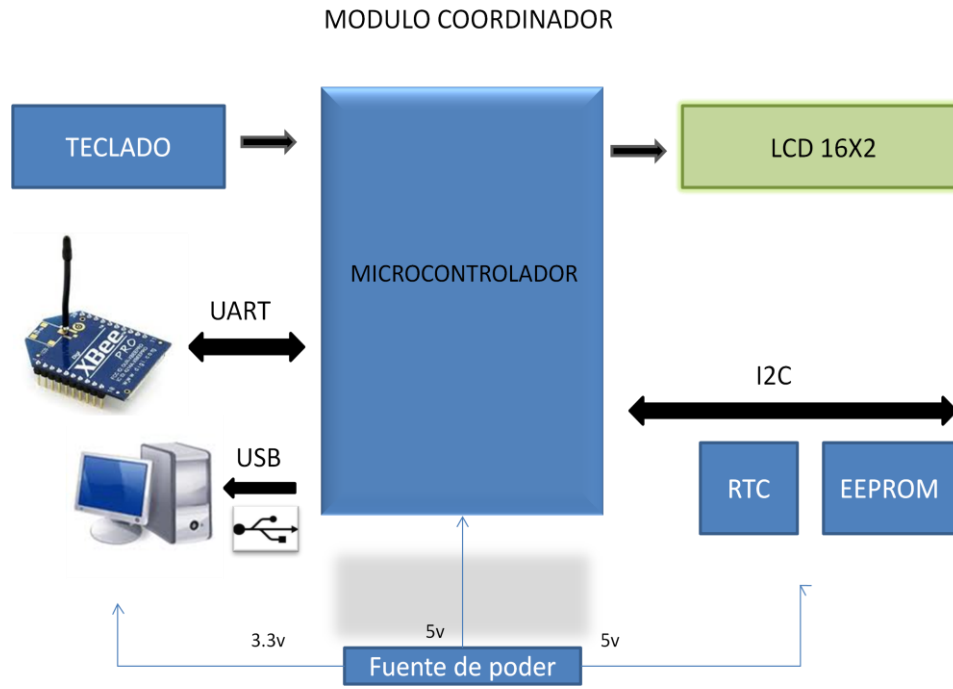
- **Nodo coordinador:** Se encarga del establecimiento de la red ZigBee identificando los dispositivos conectados a la red, enviar las solicitudes de adquisición de datos a los nodos terminales en los periodos de tiempo de la configuración inicial, almacenar los datos recolectados y transmitirlos al computador para el procesamiento y análisis.
- **Nodos terminales:** Encargados de realizar la medición del nivel en los pozos de observación y transmitirlos a al nodo coordinador.
- **Computador:** Se encarga de la recepción de los datos de los anteriores módulos donde se procesan los datos para almacenar el registro histórico de la variable del nivel freático y generar los histogramas.

## 2.1 DISEÑO DEL HARDWARE DEL NODO COORDINADOR

El nodo coordinador se encarga de administrar los nodos terminales, la red inalámbrica y de suministrarle al usuario los datos recopilados durante la observación por medio de una pantalla LCD o mediante la conexión con el programa de usuario en el computador.

Este modulo está compuesto por un microcontrolador PIC 18F4550, un modulo RF ZigBee para la comunicación con los nodos terminales, Un Reloj de tiempo real RTC con batería de respaldo, Una memoria serial para almacenar los datos recolectados hasta que sean descargado al computador, Teclado y una pantalla de cristal liquido LCD como interface entre el nodo coordinador y el usuario, además de los circuitos adicionales como la fuente de poder y otros.

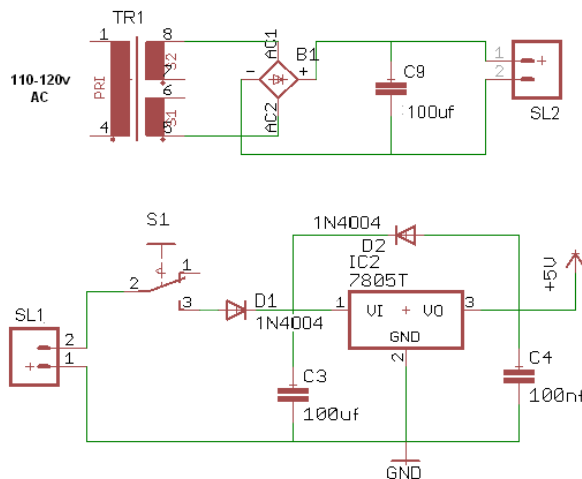
En la Figura 22 muestra los componentes que hacen parte del nodo coordinador.



**Figura 10.** Nodo coordinador

### 2.1.1 Circuito de la fuente de alimentación eléctrica

Los elementos del nodo coordinador son alimentados por una fuente regulada de 5 voltios fijos los cuales son entregados por un transformador conectado a la red eléctrica externa 110v AC y regulados por el Circuito integrado 7805, de igual manera tiene la posibilidad de conectar directamente alimentación por medio de batería.



**Figura 11.** Circuito de la Fuente de Alimentación Eléctrica

### 2.1.2 Circuito del Teclado

Para la navegación dentro del menú del nodo coordinador se realiza mediante un teclado con 4 botones que permiten moverse hacia arriba, abajo, aceptar (OK) y Cancelar (X), de esta manera se puede verificar la configuración y estado de los sensores, la conexión con el PC.

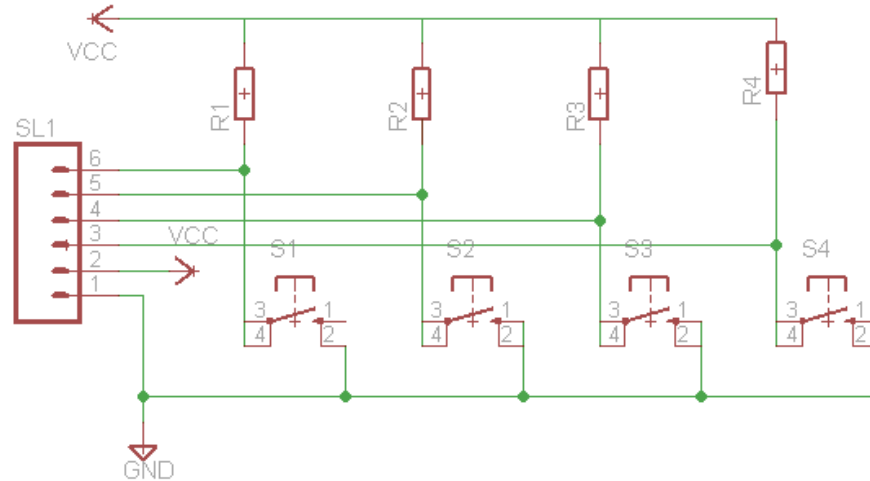


Figura 12. Circuito del teclado

### 2.1.3 Circuito de Control

El control principal del nodo coordinador es realizado por un microcontrolador PIC 18F4550 el cual es seleccionado teniendo en cuenta aspectos requeridos por el sistema como lo es el número de puertos I/O, puerto USB para la comunicación con el PC, el puerto serial para la comunicación con el modulo RF, de igual manera requiere controlar los periféricos del nodo coordinador como lo es la pantalla LCD, el teclado.

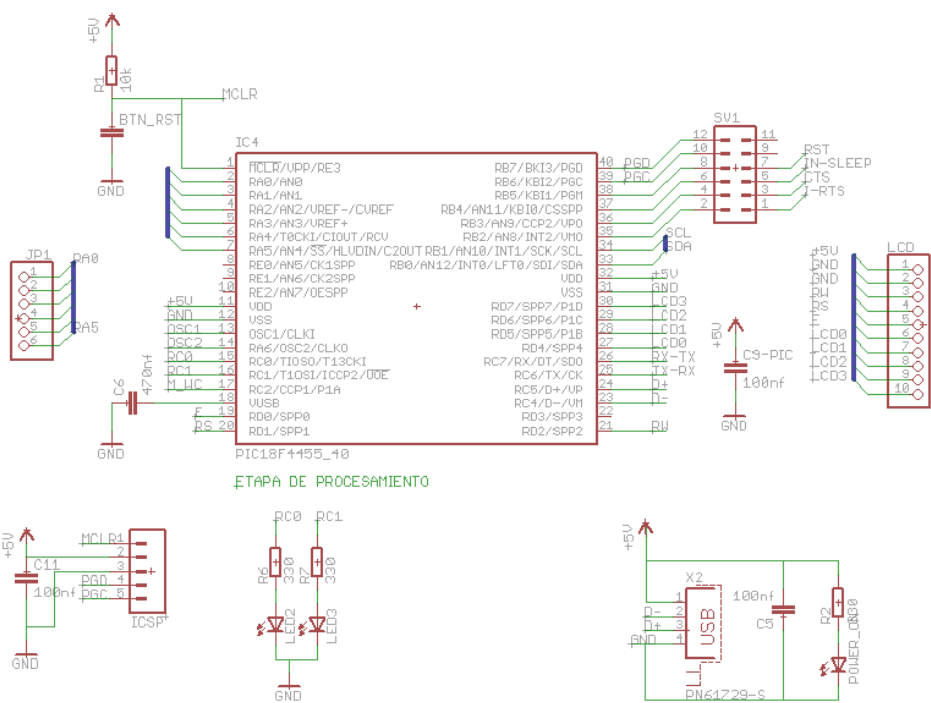


Figura 13. Circuito de control

### 2.1.4 Circuito de Visualización

La visualización del menú del sistema es mostrado por una pantalla de cristal liquido marca Hitachi LCD 16x2 la cual cuenta con 2 filas y 16 columnas, la conexión con el microcontrolador es a través de 7 pines del puerto D utilizando 4 pines de datos RD4 a RD7 y 3 pines de control RD0 a RD2.

#### ETAPA DE DISPLAY LCD

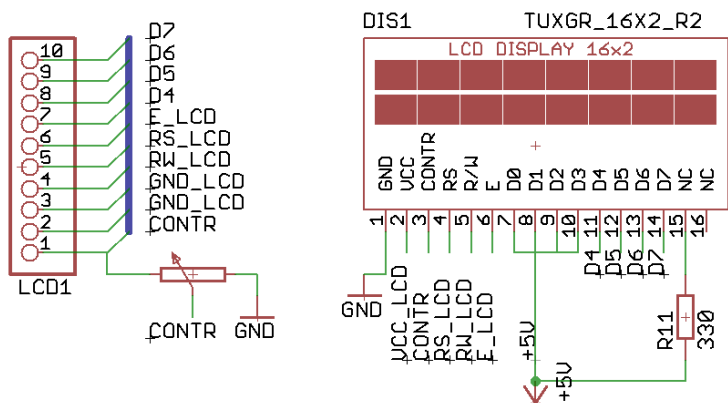
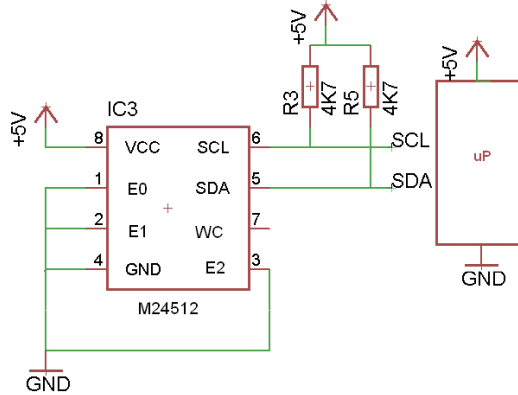


Figura 14. Circuito de visualización



### 2.1.5 Circuito del Sistema de Almacenamiento

Una de las principales características del nodo coordinador es la de almacenar permanentemente la información recolectada por la red de sensores inalámbrica WSN, por lo cual se ha seleccionado una memoria EEPROM Ref. M24512 con capacidad de 512Kbit y comunicación serial I2C.



**Figura 15.** Circuito del sistema de almacenamiento

La información almacenada en la memoria está dada por una cadena de 20 Bytes por cada muestra, es decir que cada registro de la información recolectada contiene los campos de Hora, Fecha, el ID identificador del nodo terminal y el dato adquirido por el sensor, además de los Bytes de Inicio (carácter 0) y Final de la cadena (carácter \*). Como lo muestra la Figura 27.

1 BYTE	3 BYTES			3 BYTES			1 BYTE	1 BYTE	1 BYTE	1 BYTE	1 BYTE	1 BYTE	1 BYTE
0	HORA	MIN	SEG	DIA	MES	AÑO	ID	DAT	...	...	ID 6	DAT 6	*
<b>INICIO</b>	<b>HORA</b>			<b>FECHA</b>			<b>SENSOR ID 1</b>	<b>DATO1</b>	...	...	<b>SENSOR ID 6</b>	<b>DATO 6</b>	<b>FIN</b>

**Figura 16.** Información almacenada en la memoria EEPROM

Calculo del número de registros posibles:

$$Memoria = 512Kbit \times \frac{1Byte}{8bits} = 64Kbyte$$

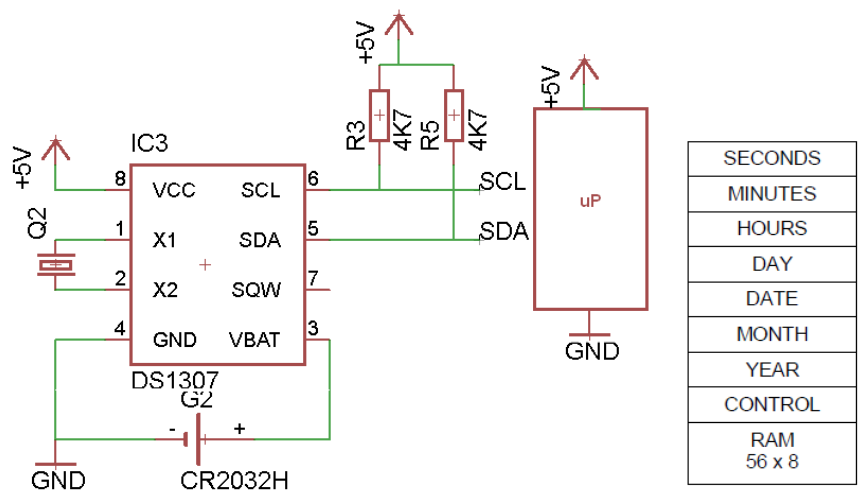
$$m = \text{numero\_de\_muestras}$$

$$m = \frac{64Kbyte}{20byte} = 3200muestras$$

Cada nodo terminal envía la información de su Identificador en la red (ID) y el valor del nivel freático medido por el sensor; esta información es enviada y almacenada en 2 Bytes, los 6 nodos de la red enviarán 12 Bytes con la Información descrita anteriormente, tenemos la posibilidad de almacenar 3200 mediciones o tomas de datos.

### 2.1.6 Circuito del Reloj de Tiempo Real (DS1307)

El nodo coordinador cuenta con circuito de Reloj en tiempo real o RTC, mediante un Circuito integrado Ref. DS1307 el cual entrega la hora del sistema, de esta manera se puede programar las fechas para realizar las tareas de adquisición de datos en los nodos terminales, Este CI es conectado al microcontrolador vía serial I2C y cuenta con una batería de litio de 3v de respaldo Ref. CR2032.



**Figura 17.** Circuito del Reloj de Tiempo Real (DS1307)

### 2.1.7 Circuito RF del Nodo Coordinador

El componente principal de la etapa de comunicación es el módulo de RF Zigbee referencia XBEE pro de MaxStream. Esta etapa funciona con una alimentación de 3v suministrados por un regulador de tensión de referencia L78L33CZ, el microcontrolador se comunica vía serial por el puerto UART con el módulo RF Xbee para el envío y recepción de datos desde y hacia el resto de la red.

Como características importantes del módulo Xbee tenemos el bajo consumo energético, conexión mínima para su funcionamiento, dimensiones pequeñas y bajo costo.

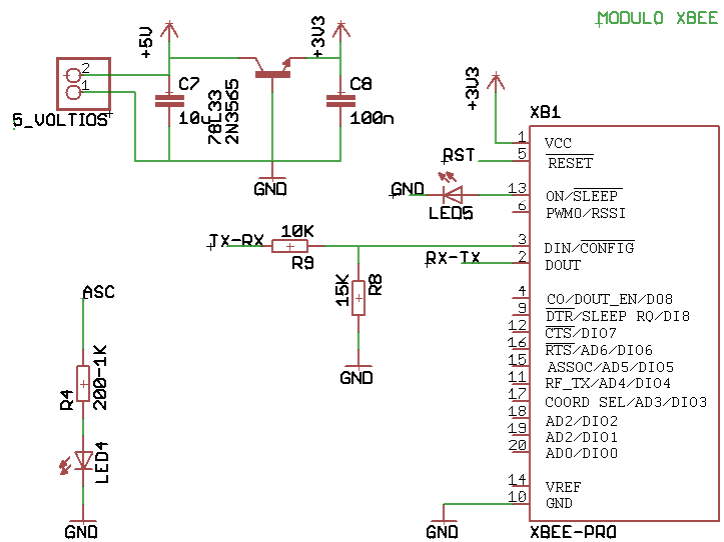


Figura 18. Circuito RF de Comunicación Inalámbrica

En la siguiente figura se muestra el circuito del nodo coordinador finalizado.

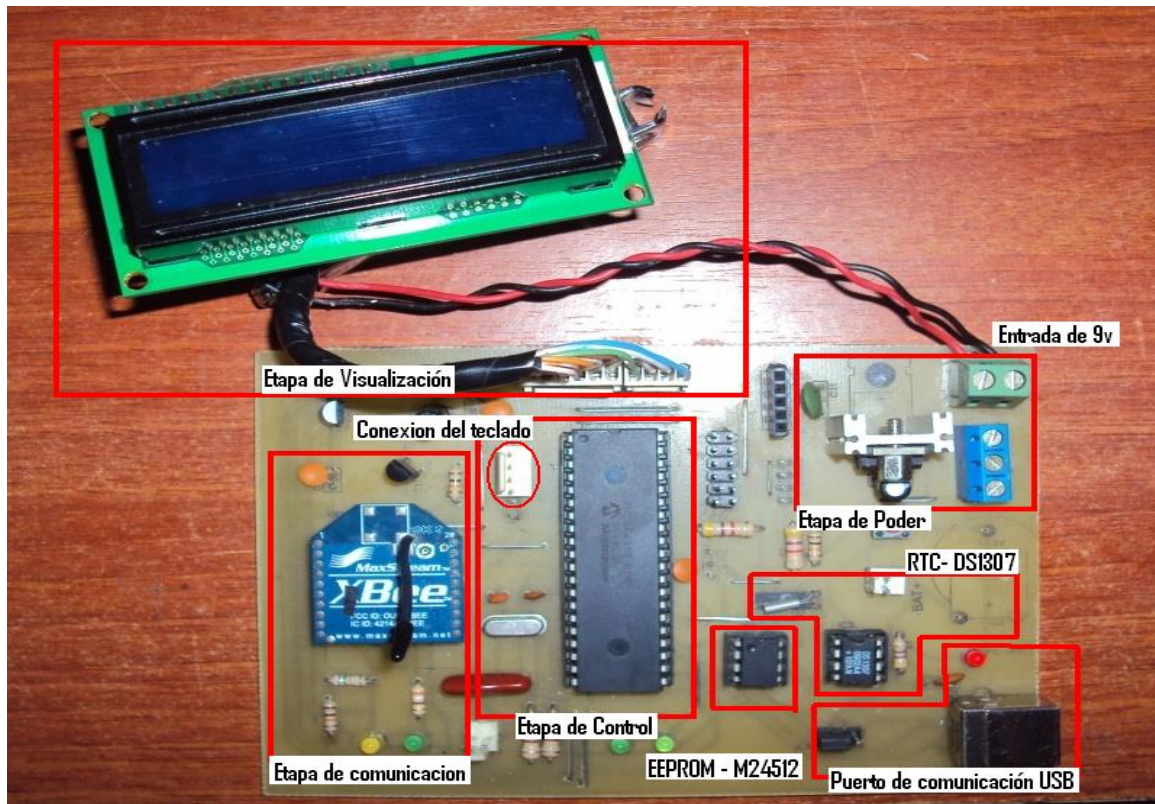
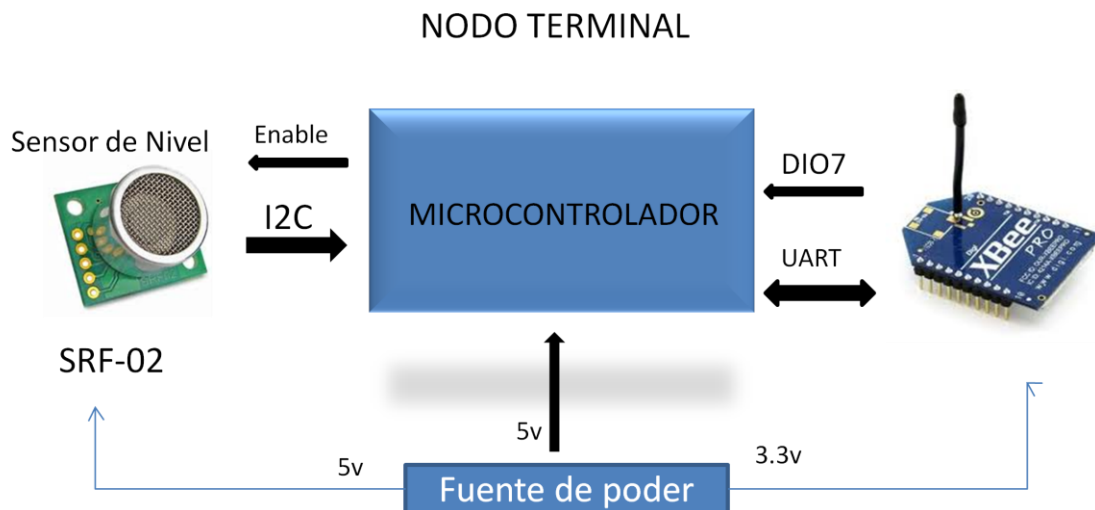


Figura 19. Fotografía del circuito del nodo Coordinador

## 2.2 NODO TERMINAL

Los nodos terminales cuentan con una configuración básica para cumplir con las siguientes tareas:

- Tomar la medición del nivel freático en el pozo de observación mediante la lectura del sensor de nivel por ultrasonido SRF-02 conectado a través del puerto serie I2C del microcontrolador PIC 16F873A.
- Almacenar los datos en la memoria EEPROM del PIC y enviarlos al nodo coordinador cuando sean solicitados.
- Comunicarse con el nodo coordinador para transmitir las lecturas realizadas.
- Debe permanecer en modo SLEEP hasta que sea activado nuevamente por el coordinador, esto como estrategia de ahorro energético.



**Figura 20.** Esquema Nodo Terminal

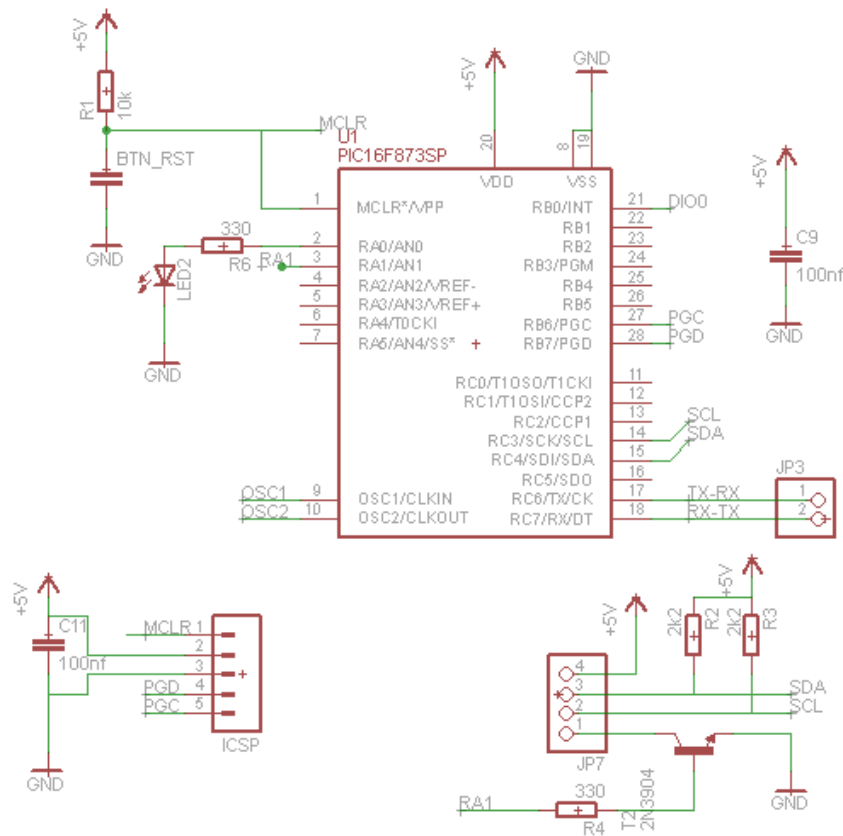
### 2.2.1 Sensor de nivel

La medición del nivel freático se realiza de manera directa sobre los pozos de observación mediante un sensor de nivel por ultrasonido SFR-02 con el cual obtenemos la medida con un margen de error menor al 2% probados.

El rango de variación del nivel agua en un pozo de observación es fácilmente medido por el sensor SRF02; en teoría el sensor registra desde los 15cm hasta 600cm en espacio abierto y en un tubo con diámetro de 55mm la radiación del haz registra máximo hasta los 245cm en línea recta, el nivel más bajo en un pozo de observación se encuentra a 200cm de la superficie del suelo hacia abajo, fácilmente cubierto por el sensor de nivel.

Otra característica destacable de este sensor es la posibilidad de configurarse para que el dato del nivel sea dado en Centímetros, de igual manera puede entregar su resultado en pulgadas o microsegundos.

### 2.2.2 Circuito de control en los nodos terminales



**Figura 21.** Etapa del Microcontrolador

El microcontrolador PIC16F873A es el encargado realizar las tareas de adquisición, estructuración y transmisión de las tramas de datos hacia el nodo coordinador.

Como requisito esencial para la selección del microcontrolador se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos requeridos:

- Puerto para la comunicación serial I2C con el sensor SFR02.
- Capacidad de memoria de Datos EEPROM.
- Costo.

### 2.2.3 Circuito RF de los Nodos Terminales

El modulo ZigBee se encargara de establecer la comunicación con el coordinador, asegurar la trasmisión de datos y despertar al microcontrolador del modo Sleep lo cual se realiza mediante el cambio de estado de la salida digital D7 del Xbee que está conectada a un transistor NPN para generar la señal de interrupción externa por RB0 del microcontrolador PIC y cambiarlo del modo Sleep al modo normal.

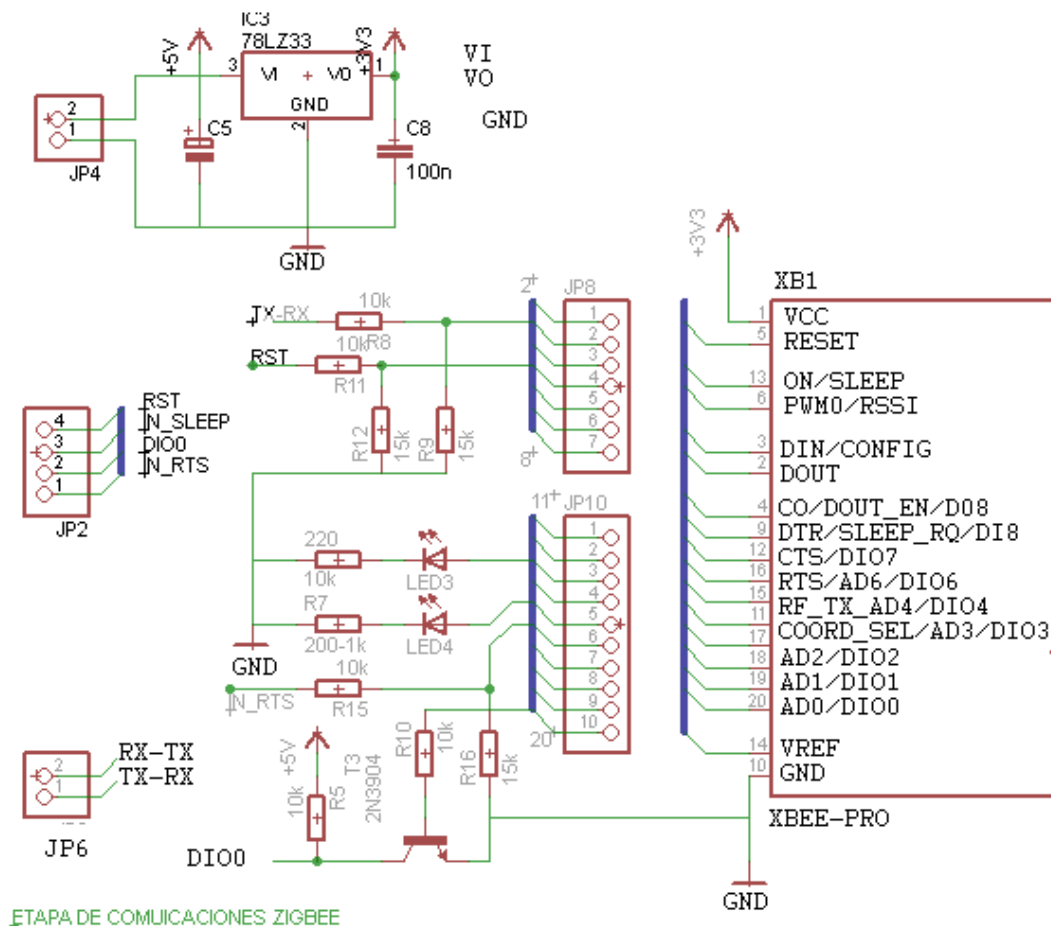
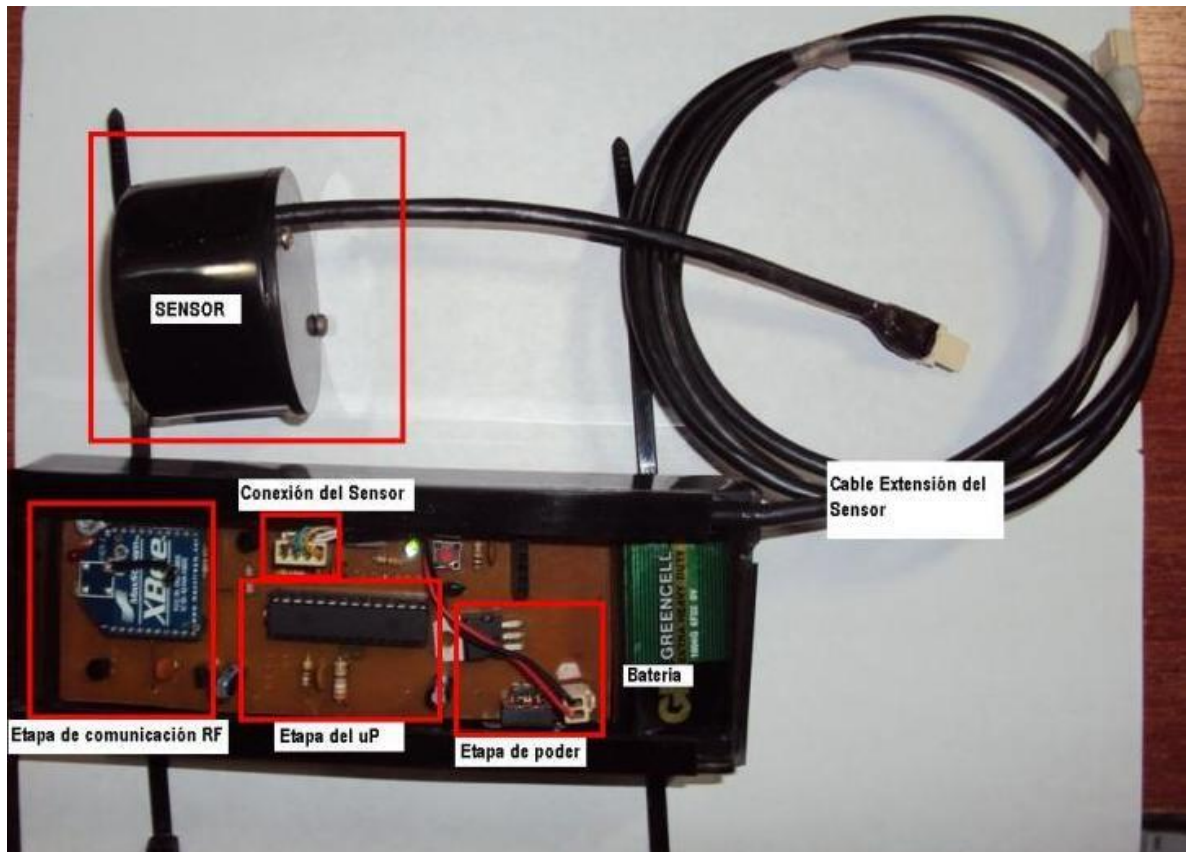


Figura 22. Circuito RF de los nodos terminales

En la siguiente figura se muestra la imagen de un nodo terminal finalizado.



**Figura 23** Fotografía del Nodo Terminal

### 3 CONFIGURACION Y COMUNICACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICA WSN

En este apartado se expone el proceso de configuración dispositivos de comunicación Xbee y la red inalámbrica, de igual manera se presenta en diagramas de flujo el algoritmo del nodo coordinador para el control del sistema y el algoritmo de los nodos terminales.

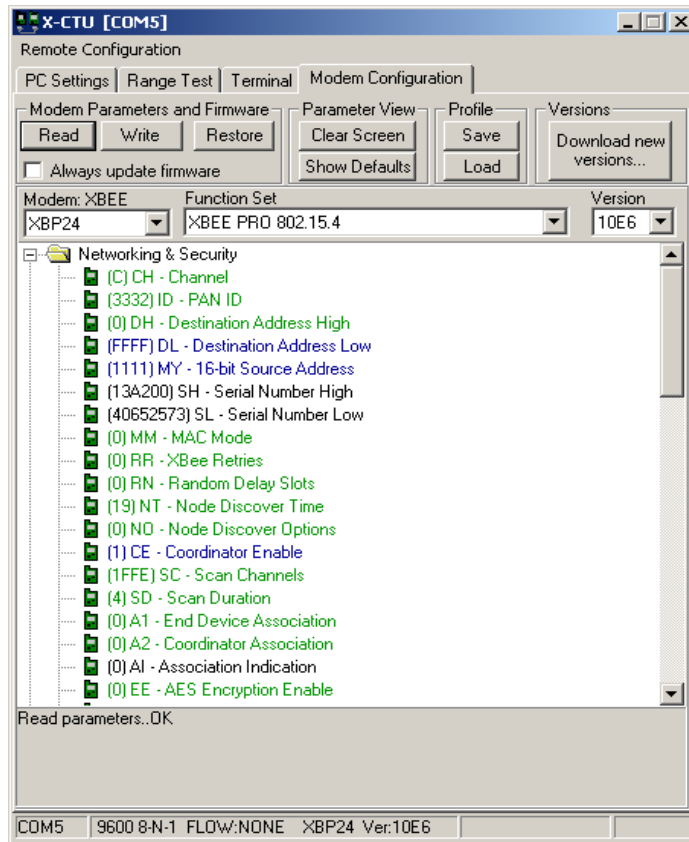
#### 3.1 CONFIGURACION DE LOS MODULOS XBEE

La configuración de los dispositivos Xbee puede realizarse mediante el Hiperterminal de Windows ingresando comandos AT o mediante el programa X-CTU desarrollado por Digi el cual permite modificar el firmware y todos los parámetros de configuración de los módulos Xbee, además realizar pruebas de funcionamiento.

El programa X-CTU es una aplicación basada en Windows tiene 4 pestañas que permiten:

- **PC Settings:** Verificar la conexión con el PC del Xbee Explorer seleccionando el puerto COM.
- **Range Test:** Realizar pruebas de comunicación entre 2 módulos, tales como verificación de envío y recepción de paquetes.
- **Terminal:** Ventana de comandos similar al Hiperterminal de Windows que permite acceder al puerto COM para el envío de comandos AT de configuración así como también transmisión de paquetes.
- **Modem Configuration:** muestra una interface de todos los parámetros posibles de configuración de los diferentes productos Zigbee de MaxStream, las opciones de escritura, lectura y de actualización del Firmware de los dispositivos.



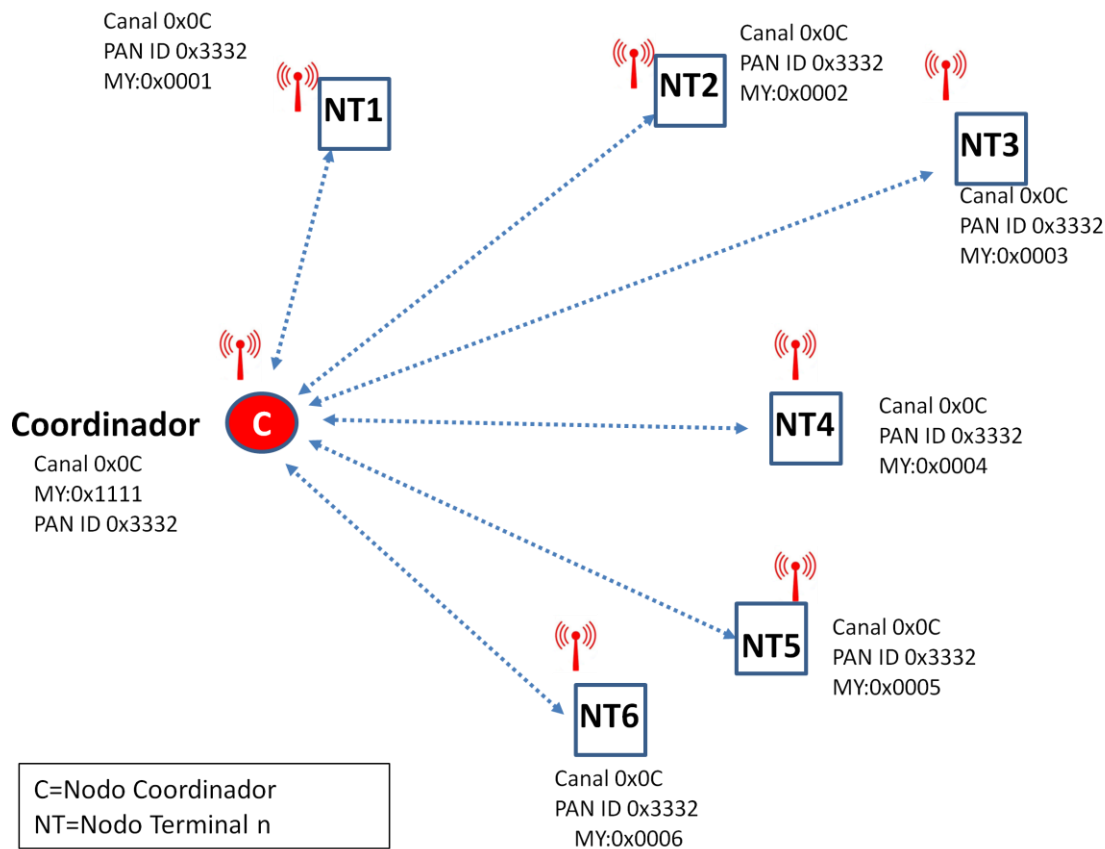


**Figura 24.** Software X-CTU de Digi Internacional

### 3.1.1 Configuración de la red de sensores inalámbrica WSN

Los módulos inalámbricos Xbee pueden ser configurados para comunicaciones punto a punto, punto a multipunto o peer to peer; para el establecimiento de la Red del sistema se ha determinado realizar una red con topología en estrella de manera que la comunicación será punto a multipunto y Half duplex, donde el nodo coordinador envía peticiones hacia uno o varios de los nodos terminales y estos a su vez transmiten una respuesta hacia el nodo coordinador.

En la siguiente figura se muestra la topología de la red de sensores inalámbricas que fue configurada en el sistema, los parámetros de configuración de red de cada dispositivo donde cada nodo tendrá configurado el mismo Canal (**CH**), igual identificador de red (**PAN ID**), variando únicamente la dirección de 16 bits del modulo de origen (**MY**).



**Figura 25.** Configuración Punto a Multipunto

A demás de los parámetros de la red CH, PAN ID y la dirección MY, se debe configurar otras opciones tales como habilitar el modo de conexión API, el parámetro CE que diferencia al nodo coordinador de los nodos terminal y habilitar las salidas digitales en los nodos terminales.

A continuación se muestra en conjunto la configuración realizada a cada uno de los nodos de la red, es de aclarar que cada uno de los parámetros está dado en valores hexadecimales.

PARAMETROS DE COFIGURACION							
PARAME-TROS	COORDI-NADOR	NODOS TERMINALES					
	NCO	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5	NT6
CH	C	C	C	C	C	C	C
ID	3332	3332	3332	3332	3332	3332	3332
DH	0	0	0	0	0	0	0
DL	FFFF	1111	1111	1111	1111	1111	1111
MY	1111	0001	0002	0003	0004	0005	0006
SH	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
SL	40652573	40332E79	40332E86	4065257C	403BAC97	404BAC80	404BACFF
CE	1	0	0	0	0	0	0
AP	1	1	1	1	1	1	1
D7	0	4	4	4	4	4	4

**Cuadro 1:** parámetros de configuración WSN

Description de los parámetros

- **CH** : **CANAL**, Número de Canal de comunicación entre módulos RF
- **ID**: **PAN ID**, Configura la identificación de la red de área personal PAN (Personal Área Network), Rango : 0 - 0xFFFF y por Defecto (0x3332)
- **DH**: 32-bits más altos de la dirección de 64-bits de destino.
- **DL**: 32-bits más Bajos de la dirección de 64-bits de destino.
- **MY**: Dirección de origen de 16-bit
- **SH**: Numero de Serie Alto 32-bit, configurado de fabrica y no modificable.
- **SL**: Numero de Serie Bajo de 32-bit, configurado de fabrica y no modificable.
- **CE**: Selección del modulo Xbee como coordinador, 0 para dispositivos terminales y 1 para Coordinador
- **AP**: Configuración del modo de operación API (Interface de aplicación para programación).
- **D7**: Configuración del Pin 12 DIO7

### 3.1.2 Configuración del Modo de bajo consumo (Sleep Mode)

Como estrategia para el ahorro energético de la red se determinó que los módulos Xbee realicen periodos cíclicos de sueño, esto se hace modificando los parámetros que muestra la siguiente tabla, de igual manera fue determinado que durante la mayoría de tiempo el microcontrolador de los nodos terminales se encuentre funcionando en modo sleep hasta que el nodo coordinador ordene el cambio de estado al modo de funcionamiento normal; el microcontrolador es despertado por una interrupción externa por RB0 generada por el modulo Xbee del nodo terminal.

A continuación se muestra las posibles opciones de configuración del modo sleep en un modulo Xbee.

MODO	TRANSICION A MODO SLEEP	TRANSICION PARA SALIR DEL MODO SLEEP	CARACTERISTICAS	COMANDOS RELACIONADOS	CONSUMO
HIBERNAR SM = 1	Sleep_RQ (High) PIN9 = 1	Sleep_RQ (Low) PIN9 = 0	Controlado por Pin, mínimo consumo y solo para sistemas NonBeacon	(SM)	< 10 $\mu$ A @3 Vcc
DOZE SM = 2	Sleep_RQ (High) PIN9 = 1	Sleep_RQ (Low) PIN9 = 0	Controlado por Pin, / solo para sistemas NonBeacon / Despertar Rápido	(SM)	< 50 $\mu$ A
DORMIR CICLICAME NTE SM = 4 SM = 5	Transicion automática definida por SM (Salep Mode) ST (Tiempo antes de dormir)	Ocurre después del intervalo de tiempo definido por el parámetro SP (Ciclic sleep Period)	Despierta en el intervalo de tiempo predeterminado para detectar datos RF presentes. SM = 5 para sistemas NonBeacon	(SM), SP, ST	< 50 $\mu$ A Cuando esta dormido

**Cuadro 2:** Configuración del modo sleep

Los módulos vienen configurados por defecto con el modo sleep desactivado (SM = 0), En los nodos terminales los módulos están configurados para que ingresen al

modo Cíclico de sueño (SM = 4), es decir que estará dormido por periodos de tiempo indicado por el parámetro SP.

### 3.2 COMUNICACIÓN EN LA RED DE SENSORES INALAMBRICA WSN

Los módulos ZigBee tienen 2 modos de comunicación, una de ellas es la transmisión serial transparente (modo AT) configurada por defecto y el modo API (Interface de aplicación para la programación), en el modo AT la comunicación es transparente al usuario puesto que todo lo que se transmite por el puerto serial al Xbee es enviado inmediatamente hacia los módulos remotos, por otra parte en el modo API utiliza Tramas de datos establecidas para realizar diferentes tareas de operación y control de los módulos Xbee el cual tiene ventajas frente al modo AT, permitiendo una comunicación más efectiva y segura, además también permite de enviar comandos AT en tramas hacia los módulos.

En total hay 18 estructuras API, en el modo API todos los datos seriales que no tengan la estructura son ignorados por los módulos Xbee, en la siguiente figura se muestra la estructura típica de una trama API usada para modificar la salida digital de un modulo a distancia, hay que tener en cuenta que los comandos que conforman la trama API están dados en valores Hexadecimal.

Inicio	Longitud	CUERPO DE LA TRAMA															Checksum	
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4 – n															Byte n+1	
7E	00 10	17	05	00	13	A2	00	40	3B	AC	97	FF	FE	02	44	37	05	F1

**Figura 26.** Ejemplo de una Trama API

**INICIO:** Corresponde a la cabecera de la trama, todas las tramas API inician con el valor 0x7E y cualquier valor diferente es ignorado.

**LONGITUD:** Los bytes 2 y 3 de la trama indican la longitud del cuerpo de la trama es decir el numero de bytes que componen los datos de la trama en la figura anterior son 16 Bytes (Decimal) es decir 0x10 Hex.

**CUERPO DE LA TRAMA:** Corresponde al resto de Bytes hasta el Checksum, dependiendo del tipo de comando API será el numero de bytes de datos de la trama.

**CHECKSUM:** Este valor corresponde a la resta de 0xFF menos la sumatoria del valor de todos los bytes de los datos de la trama.

Por ejemplo:

$$0xFF - (0x17 + 0x05 + 0x13 + 0xA2 + 0x40 + 0x38 + 0xAC + 0x97 + 0xFF + 0xFE + 0x02 + 0x44 + 0x37 + 0x05) = F1$$

Toda la comunicación inalámbrica de la red de sensores inalámbrica está dada por las siguientes tramas:

- Trama de Envío de comandos AT a un modulo remoto (API ID 0x17)
- Trama de respuesta de comando AT de un modulo remoto (API ID 0x97)
- Trama de petición de transmisión de datos serial a un modulo remoto con dirección de 16-bits (API ID 0x01)
- Trama de respuesta de estado de la transmisión (API ID 0x89)
- Trama de paquetes recibidos con dirección de 16-bits (API ID 0x81)

### 3.2.1 Trama de Envío de comandos AT a un modulo remoto (API ID 0x17)

Esta trama envía el comando D7 = 5 a todos los módulos Xbee para despertar los nodos terminales de la red, los módulos Xbee envían automáticamente una respuesta de acuso de recibo (ACK) la cual contiene en los byte 6 al 13 la identificación de los módulos con la dirección de 64-bits, con la cual se almacena en el nodo coordinador la tabla de dispositivos de la red identificando de esta manera los nodos conectados y activos.

Debido que se requiere tener la información de los dispositivos de la red se envía el comando D7=5 a la dirección Broadcast, la cual es:

DL: 0x00000000

DH: 0x0000FFFF

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA																Checksum									
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4-19																Byte 20									
7E	00 10	17	05	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	FF	FF	FF	FE	02	44	37	05	66

**Figura 27.** Trama para envío de comandos AT a una dirección Broadcast

7E : INICIO

00 10 : LONGITUD DE LA TRAMA  
 17 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
 05 : IDENTIFICADOR DE TRAMA (Si es "0" no enviará comando AT de respuesta)  
 00 00 00 00 : DIRECCION DE DESTINO ALTA DE 64bits  
 00 00 FF FF : DIRECCION DE DESTINO BAJA DE 64bits Dirección Broadcast  
 FF FE : DIRECCION DE DESTINO 16bits  
 02 : OPCIONES DEL COMANDO (02 para Aplicar inmediatamente)  
 44 37 : COMANDO AT (**D7**)  
 05 : SALIDA DIGITAL 7 EN ALTO  
 66 : CHECKSUM

Una vez se tiene las direcciones almacenadas de los nodos terminales es posible transmitir la información a cualquier nodo con el que se quiera establecer comunicación, con esto se logra que el sistema identifique nodos adicionales en la red.

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA																Checksum
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4-19																Byte 20
7E	00 10	17	05	00	13	A2	00	40	3B	AC	97	FF	FE	02	44	37	05	F1

**Figura 28.** Trama para envío de comandos AT a una dirección de 64-bits

7E : INICIO  
 00 10 : LONGITUD DE LA TRAMA  
 17 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
 05 : IDENTIFICADOR DE TRAMA (Si es "0" no enviará comando AT de respuesta)  
 00 13 A2 00 : DIRECCION DE DESTINO ALTA DE 64bits  
 40 3B AC 97 : DIRECCION DE DESTINO BAJA DE 64bits  
 FF FE : DIRECCION DE DESTINO 16bits  
 02 : OPCIONES DEL COMANDO (02 para Aplicar inmediatamente)  
 44 37 : COMANDO AT (**D7**)  
 05 : SALIDA DIGITAL 7 EN ALTO  
 F1 : CHECKSUM

### 3.2.2 Trama de respuesta de comando AT de un modulo remoto (API ID 0x97)

La siguiente trama es devuelta al coordinador por cada uno de los nodos terminales que reciben el comando AT indicando que el comando se ejecuto satisfactoriamente, de esta trama es posible extraer como se explico

anteriormente la dirección de cada uno de los módulos activos en la red la cual se encuentra en los Bytes 6 al 13.

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA															Checksum
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4 – 18															Byte 19
7E	00 OF	97	05	00	13	A2	00	40	3B	AC	97	00	00	44	37	00	75

**Figura 29.** Trama de respuesta de comandos AT

7E : INICIO  
 00 OF : LONGITUD DE LA TRAMA  
 97 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
 05 : IDENTIFICADOR DE TRAMA (Si es "0" no enviará comando AT de respuesta)  
 00 13 A2 00 : DIRECCION DE DESTINO ALTA DE 64bits  
 40 3B AC 97 : DIRECCION DE DESTINO BAJA DE 64bits  
 00 00 : DIRECCION DE 16bits  
 44 37 : COMANDO AT (D7)  
 00 : ESTADO OK  
 75 : CHECKSUM

### 3.2.3 Trama de petición de transmisión de datos serial a un modulo remoto con dirección de 16-bits (API ID 0x01)

La estructura de esta trama es formada por el microcontrolador de los nodos terminales para enviar los datos adquiridos por el sensor de nivel hacia el nodo coordinador, en el byte 9 se encuentra el valor en hexadecimal del nivel sensado.

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA							Checksum
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4 – 9							Byte 10
7E	00 06	01	05	11	11	04	48	8B	

**Figura 30.** Trama de petición de datos serial

7E : INICIO  
 00 06 : LONGITUD DE LA TRAMA  
 01 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
 05 : IDENTIFICADOR DE TRAMA (Si es "0" no enviará comando AT de respuesta)  
 11 11 : DIRECCION DE 16bits DEL NODO COORDINADOR  
 04 : ENVIO DE PAQUETES CON BROADCAST PAN ID  
 48 : VALOR HEXADECIMAL DEL NIVEL SENSADO  
 8B : CHECKSUM



### 3.2.4 Trama de respuesta de estado de la transmisión (API ID 0x89)

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA	Checksum
Byte 1	Byte 2-3	Byte 4-6	Byte 7
7E	00 03	89 05 00	71

**Figura 31.** Respuesta de status de transmisión

7E : INICIO  
00 03 : LONGITUD DE LA TRAMA  
89 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
05 : IDENTIFICADOR DE TRAMA (Si es "0" no enviará comando AT de respuesta)  
00 : STATUS - TRANSMISION EXITOSA  
71 : CHECKSUM

En el Byte 6 de esta trama se encuentra la confirmación de que el dato enviado por el nodo terminal fue entregado satisfactoriamente al nodo coordinador.

De igual manera se puede recibir un estado no satisfactorio como sigue:

- STATUS = 0, TX exitosa.
- STATUS = 1, Ocurre cuando los intentos han terminado y no hay confirmación de recibido (ACK).
- STATUS = 2, Si se transmite a una dirección Broadcast
- STATUS = 3, Se produce con el tiempo de espera del Coordinador es excedido en una transmisión indirecta; el tiempo de espera se define como  $(2.5 \times SP)$  (cíclica del sueño período).

### 3.2.5 Trama de paquetes recibidos con dirección de 16-bits (API ID 0x81)

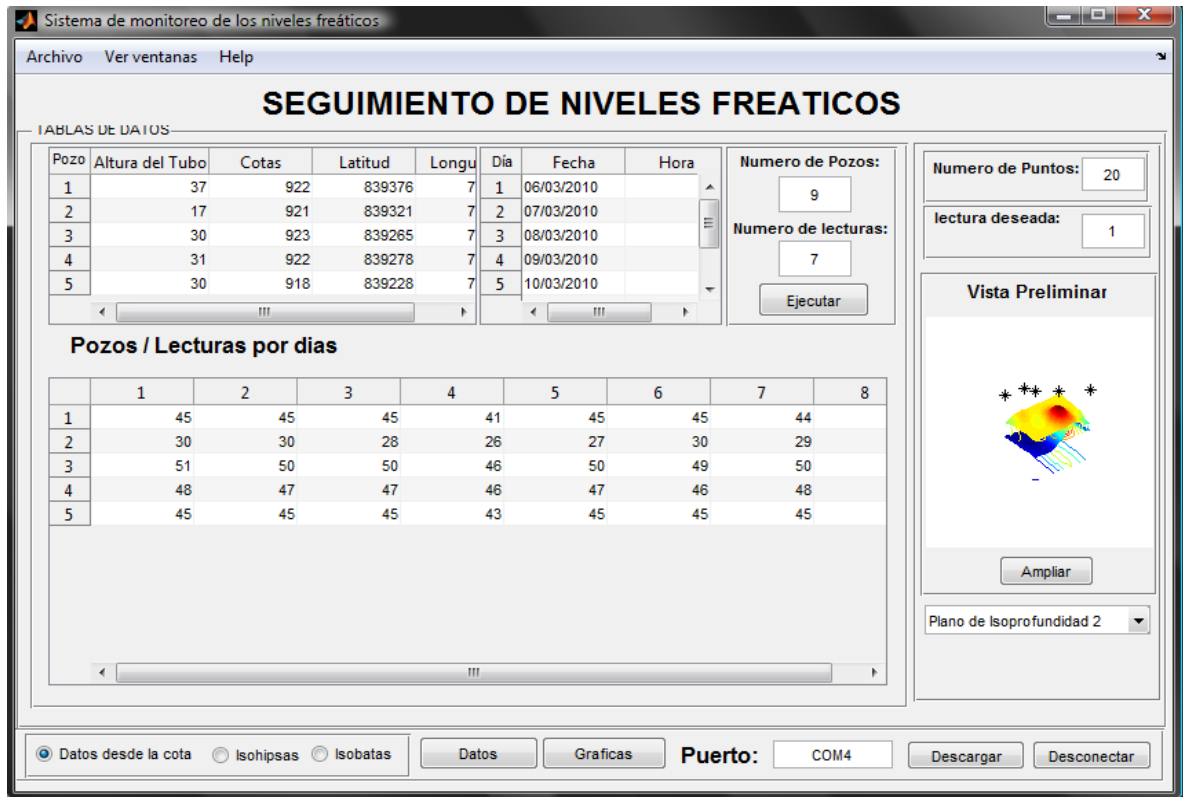
Esta trama de datos es puesta en el buffer serial del Xbee en el coordinador para ser leída por el microcontrolador, contiene en el byte 9 el valor sensado por el nodo terminal con dirección 0x0001.

Inicio	Longitud	DATOS DE LA TRAMA							Checksum
Byte 1	Byte 2-3		Byte 4 – 9						Byte 10
7E	00	06	81	00	01	34	00	48	4A

**Figura 32** Trama recibida por el microcontrolador

7E : INICIO  
 00 06 : LONGITUD DE LA TRAMA  
 81 : IDENTIFICADOR TIPO DE TRAMA API  
 00 01 : DIRECCION DE 16bits  
 34 : INDICADOR DE INTENSIDAD DE LA SEÑAL  
 00 : RESERVADO  
 48 : VALOR HEXADECIMAL DEL NIVEL SENSADO  
 4A : CHECKSUM

## 4 SOFTWARE APLICATIVO (Sistema de Monitoreo de Niveles Freáticos)



**Figura 33.** Software (primer plano)

El software diseñado tiene como objetivo principal la representación de la variabilidad que se registra a través del tiempo, el comportamiento del nivel freático. A partir de esos datos que se registran con ayuda de los Nodos Centrales el software brinde la información en cualquier momento, y además represente una información numérica convertida en información grafica (la representación de isobatas e isohipsas).

El primer plano del software como lo ilustra la Figura 41 es la pantalla de inicio donde se recopila toda la información necesaria para dar paso al desarrollo del segundo plano que corresponde a las representaciones graficas del seguimiento de la capa freática.

En la siguiente Figura 33 el primer plano del software (plano principal) se encuentra dividido para explicar cada uno de los cuadros y funciones que serán explicados en los subcapítulos 3.1 y 3.2 respectivamente.



**Figura 34.** Especificación de cuadros y funciones del software

#### 4.1 CUADROS DEL SOFTWARE

El primer plano del software (Figura 42) contiene seis cuadros donde la mayoría de ellos son informativos cuyos datos contenidos en ellos son arrojados por medio del Controlador del Sistema (Nodo Central).

**Cuadro 1, Pozos:** En este están contenidos uno de los datos importantes para el funcionamiento del software. Contiene en general la descripción y caracterización de cada uno de los Pozos de observación con los que trabaja el usuario. Se deben especificar en este cuadro la altura de tubería que sobresale de la superficie y la cota de altura sobre el nivel del mar (metros). Por último las coordenadas geográficas planas donde se encuentra localizado el pozo. Generalmente los datos anteriormente mencionados se descargan con ayuda de un GPS.

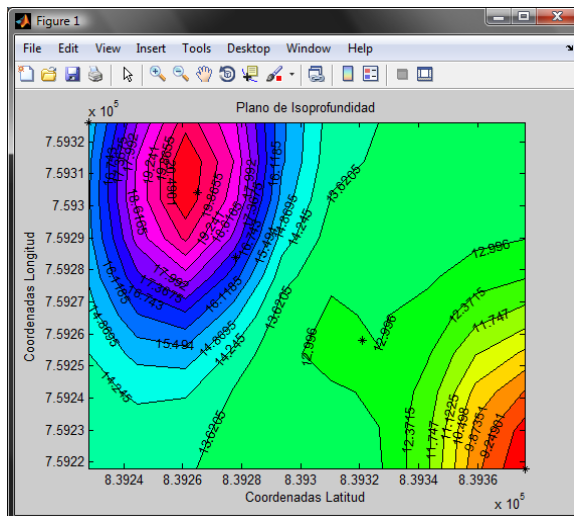
Es importante que esta información este especificada cuando el Nodo Central empiece su trabajo de medición y procesamiento de información.

**Cuadro 2, Calendario:** En este se contiene el registro de fechas y horas cuando el Nodo Central hizo trabajar el sistema.

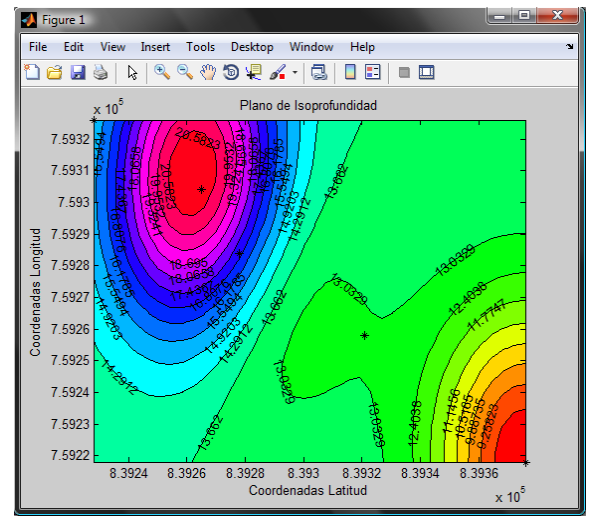
**Cuadro 3, Tabulación:** Este precisa la información que va contener el software dando la orden y modificando el numero de columnas y filas que necesita el usuario para trabajar. El Cuadro 3 se hace importante cuando el usuario desea registrar la información de forma manual, de otra forma cargando la información directamente del nodo central en mismo programa modificara la tabulación de tal manera que se disponga ordenadamente los datos que contiene el Controlador.

**Cuadro 4, Nivel Freático:** En este cuadro esta contenido todas las mediciones del Nivel Freático, tiene una barra superior que corresponde al día de la medición que también es referenciado en el cuadro 2 de calendario. Y una barra lateral izquierda que corresponde al Pozo cuyas características están en el cuadro 1.

**Cuadro 5, Número de Puntos:** Corresponde al número de puntos que parte de la interpolación, en este caso Método de Kriging Universal, presupone que hay un componente estructural presente y que la tendencia local varía de una ubicación a otra. La varianza del ráster de predicción de salida opcional contiene la varianza de Kriging en cada celda del ráster de salida. En nuestro caso marcamos un valor que corresponde al ráster donde el usuario tendrá la posibilidad de mejorar una grafica aumentado o disminuyendo el valor de puntos. Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 34.



Numero de Puntos:



Numero de Puntos:

**Figura 35.** Comparación de planos con diferencia de puntos.

Una imagen rasterizada, también llamada mapa de bits, imagen matricial o bitmap, es una estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color, denominada ráster, que se puede visualizar en un monitor de ordenador, papel u otro dispositivo de representación.

A las imágenes rasterizadas se las suele caracterizar por su altura y anchura (en pixels) y por su profundidad de color (en bits por pixel), que determina el número de colores distintos que se pueden almacenar en cada pixel, y por lo tanto, en gran medida, la calidad del color de la imagen.

**Cuadro 6, Vista Preliminar:** Es el espacio donde es representado el grafico que el usuario establece gracias a la función 4 descrita más adelante.

## 4.2 FUNCIONES DEL MENU SUPERIOR

El primer plano de software contiene cuatro funciones principales. Estas funciones son todo comando que el usuario puede cambiar para generar un resultado.

**Función 1, Archivo:** La función de este componente son tres básicamente; "Nuevo" que se trata limpiar un documento ya abierto o trabajado por el software, "Cargar Datos" y el "Guardar Como" un trabajo que el usuario haya trabajado.

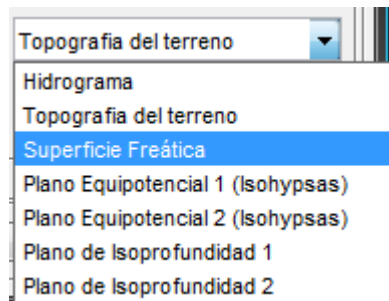
**Función 2, Unidades:** El software contiene tres puntos importantes dentro de esta función, la cual enseña al usuario la medida tomada por los Sensores en tres manifestaciones. La primera son “Datos desde la cota” que es el valor de la medida real que toma el sensor. En este caso la medida es indiferente a la altura del pozo que sobresale de la superficie.

En segundo lugar la presentación de la medida en vista a las isohipsas. Recordemos que las isohipsas son la representación del nivel freático, por tanto su valor se asemeja al comportamiento de las curvas de nivel del terreno, es por esto que el valor se ilustra en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Y en tercer lugar el valor de las Isobatas es simplemente el valor real de la profundidad del nivel freático, teniendo como punto cero (0) la superficie del terreno.

**Función 3, Lectura Deseada:** Es la especificación del día con que el usuario quiere trabajar para generar los mapas.

**Función 4, Selección de Grafico.** Esta función brinda al usuario los siete gráficos (capítulo 3.3) que puede generar el software a partir de los datos contenidos en el mismo.



**Figura 36.** Gráficos del software

**Función 5, Graficas:** Esta función es la puerta para pasar al segundo plan o que contiene este Software. Como lo ilustra la Figura 36 en él se pueden reunir un total de ocho planos equipotenciales, que permite al tiempo una representación general de estos mapas, en un mismo plano.

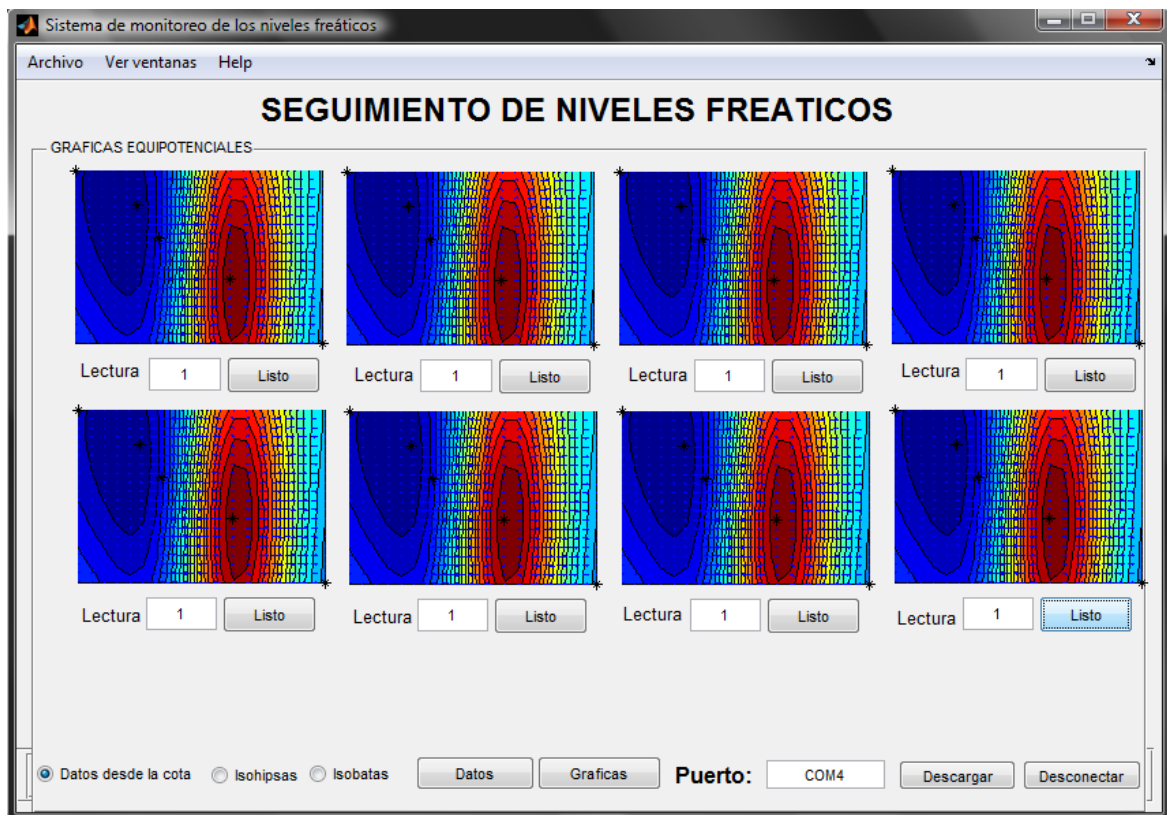


Figura 37. Segundo plano del software, "Graficas".

El usuario debe registrar la lectura deseada, es decir el día que quiera que se ilustre en el cuadro deseado.

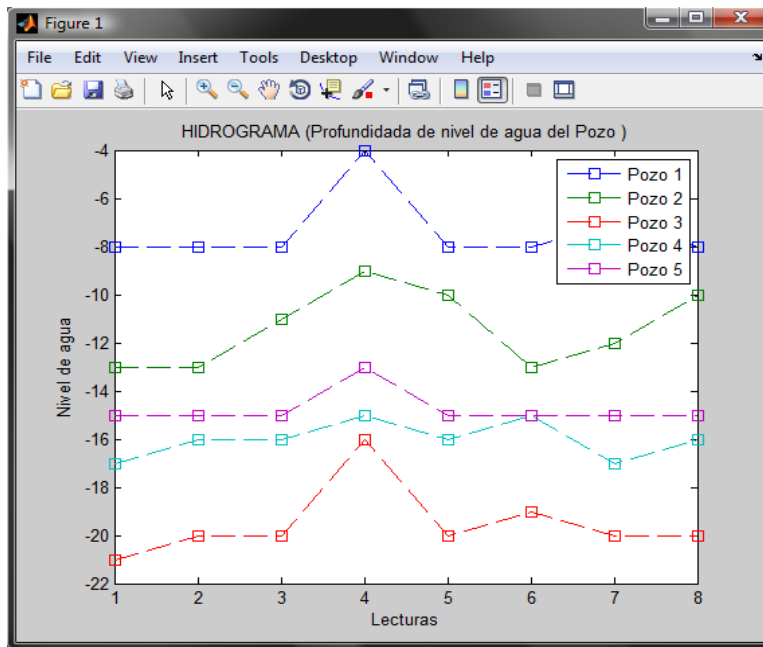
### 1.3 PLANOS Y MAPAS

Esta función contiene la recopilación del objetivo que tiene el Software en general. Se trata de las representaciones graficas de mapas y planos que ilustran el comportamiento de la capa freática, con ayuda de los datos numéricos que fueron recolectados por el sistema de medición o por otro lado información que el usuario directamente quiera registrar.

En total son 7 gráficos que pueden ser ilustrados por el Software.

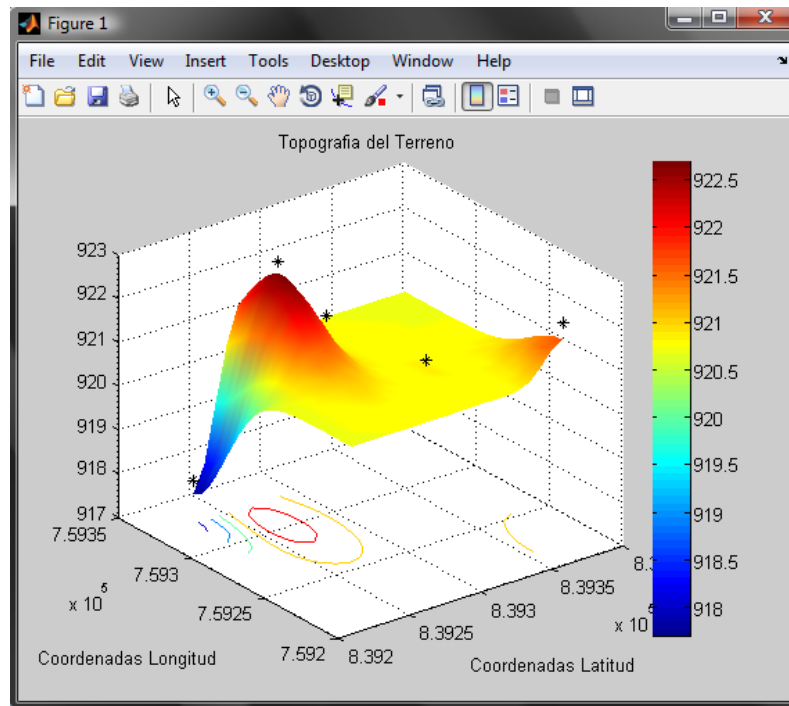
**Hidrogramas:** Grafico de líneas donde se ilustra el comportamiento individual de cada pozo en un plano de profundidad Vs. Lectura. Ver Figura 37.





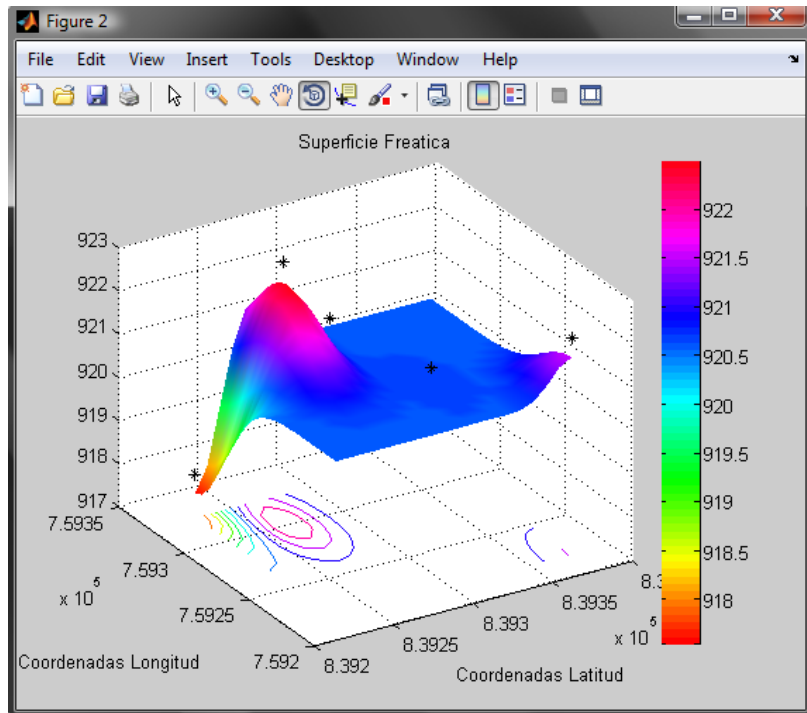
**Figura 38. Hidrograma**

**Topografía del Terreno:** Es una simulación en 3 dimensiones donde traza la superficie del terreno. Ver Figura 38.



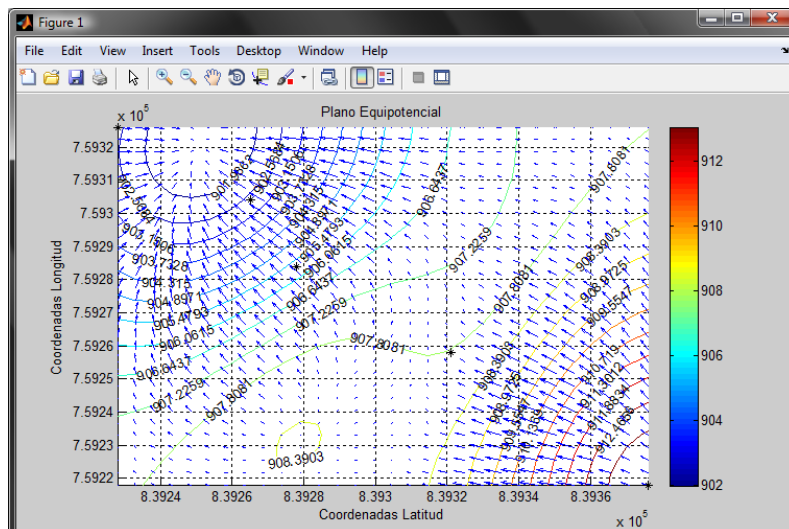
**Figura 39. Topografía del Terreno**

**Superficie Freática:** Es una simulación de la capa freática en 3 dimensiones. Ver Figura 38.



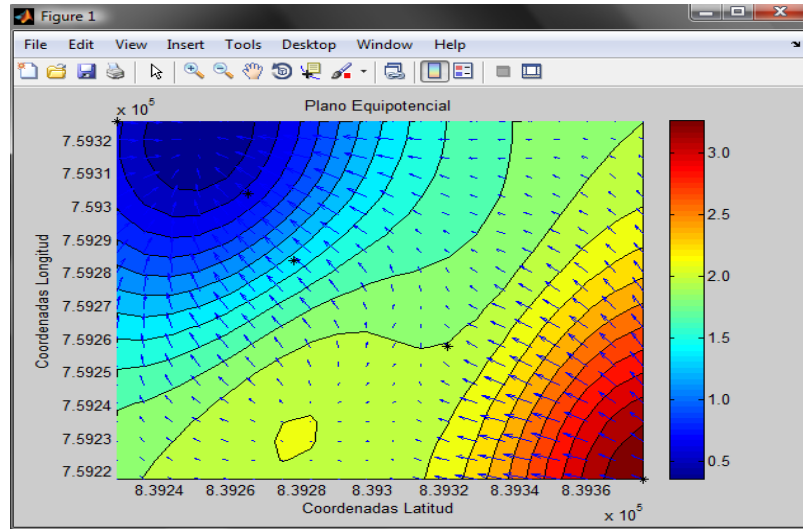
**Figura 40.** Superficie Freática

**Plano Equipotencial 1:** En este plano se ilustran las isobatas e isohipsas con un único fondo donde las curvas de las isobatas se encuentran referenciadas en altura sobre nivel del mar. Ver Figura 39.



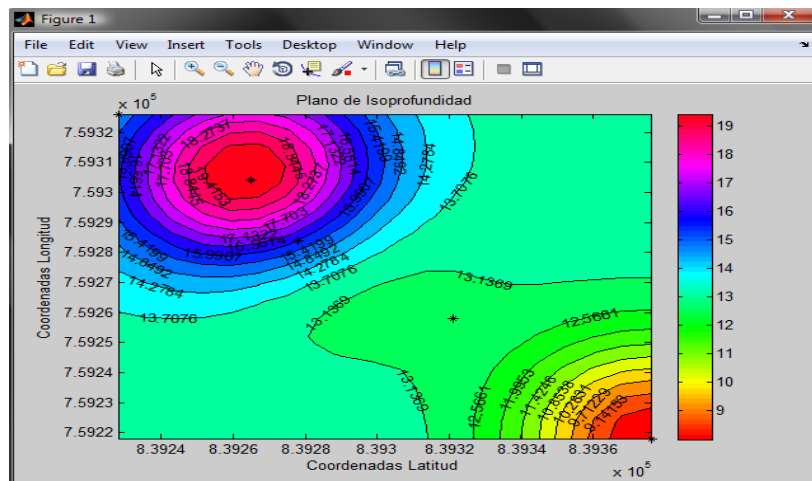
**Figura 41.** Plano Equipotencial 1

**Plano Equipotencial 2:** Este plano contiene la misma información del plano anterior (Plano Equipotencial 1), con la diferencia que un contorno de matices marca la diferencia de la profundidad del N.F. (isobatas e isohipsas). Ver Figura 40.



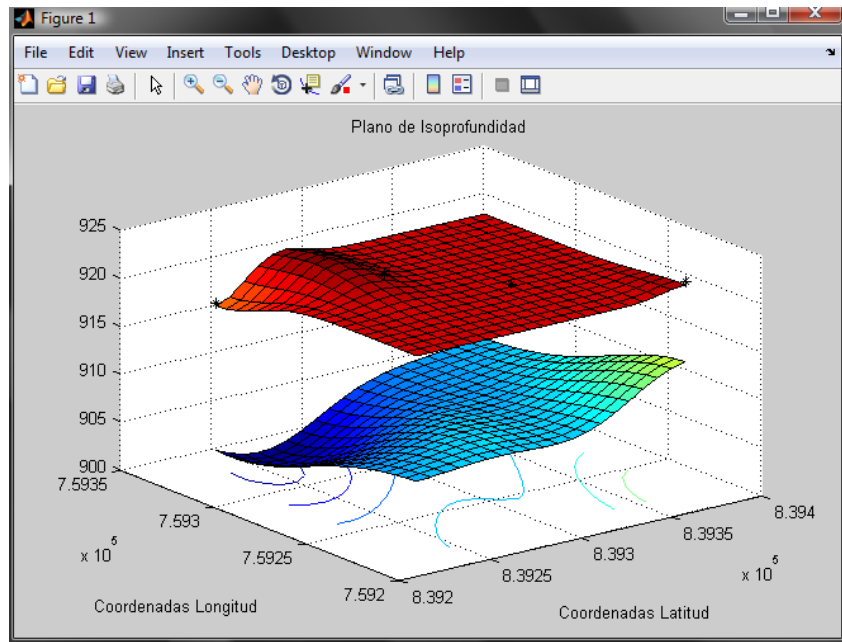
**Figura 42. Plano Equipotencial 2**

**Plano Isopropundidad 1:** Representación de las isobatas donde le proporciona al usuario la información del nivel, con un matiz de colores además cada curva contiene especificado el valor correspondiente. Ver Figura 41.



**Figura 43. Plano Isopropundidad 1**

**Plano Isopropundidad 2:** Es una simulación en 3 dimensiones de la topografía del terreno junto la capa freática del lugar. Figura 42.



**Figura 44.** Plano Isoprofundidad 2.

## 5 RESULTADOS OBTENIDOS DE EL SISTEMA PUESTO A PRUEBA EN CAMPO



**Figura 45.** Fotografía del Predio la Guandinosa.

El proyecto se traslado a campo con cuatro objetivos específicos:

- Establecimiento de un criterio o experiencia de la instalación del sistema.
- Comprobación de la efectividad de la comunicación de la red inalámbrica.
- Confirmación de las mediciones tomadas con el sensor en cada uno de los pozos instalados en campo.
- Una demostración efectiva del proyecto.

### 5.1 LOCALIZACIÓN

El proyecto se instalo en el predio la Guandinosa (Figura 43) en la vereda que lleva por igual nombre La Guandinosa, situada a 2 kilómetros y 30 metros de la carretera Nacional, entrando al municipio de Gigante, desviándose por la carretera que conduce al corregimiento de potrerrillos.

### 5.2 UBICACIÓN GEOGRAFICA

El sistema se instalo en las siguientes coordenadas geográficas:

Este: 839537

Norte: 759070

Altura: 920 m.s.n.m.

### 5.3 CARACTERISTICAS

Este predio de 1 hectárea aproximadamente se caracteriza por niveles freáticos altos, donde parece ser se alimentan de colinas y zonas montañosas cercanas a la finca como se demuestra en la Figura 44, además al parecer repercute la presencia de un lago muy cercano a los linderos del área estudiada. Actualmente el lote no está cultivado puesto que la presencia de encharcamientos es abundantemente significativa en el lote, cuenta con unos canales sin mantenimiento cuyo trabajo consideramos no es relevante.

**Figura 46: Imagen satelital de la Vereda La Guandinosa.**



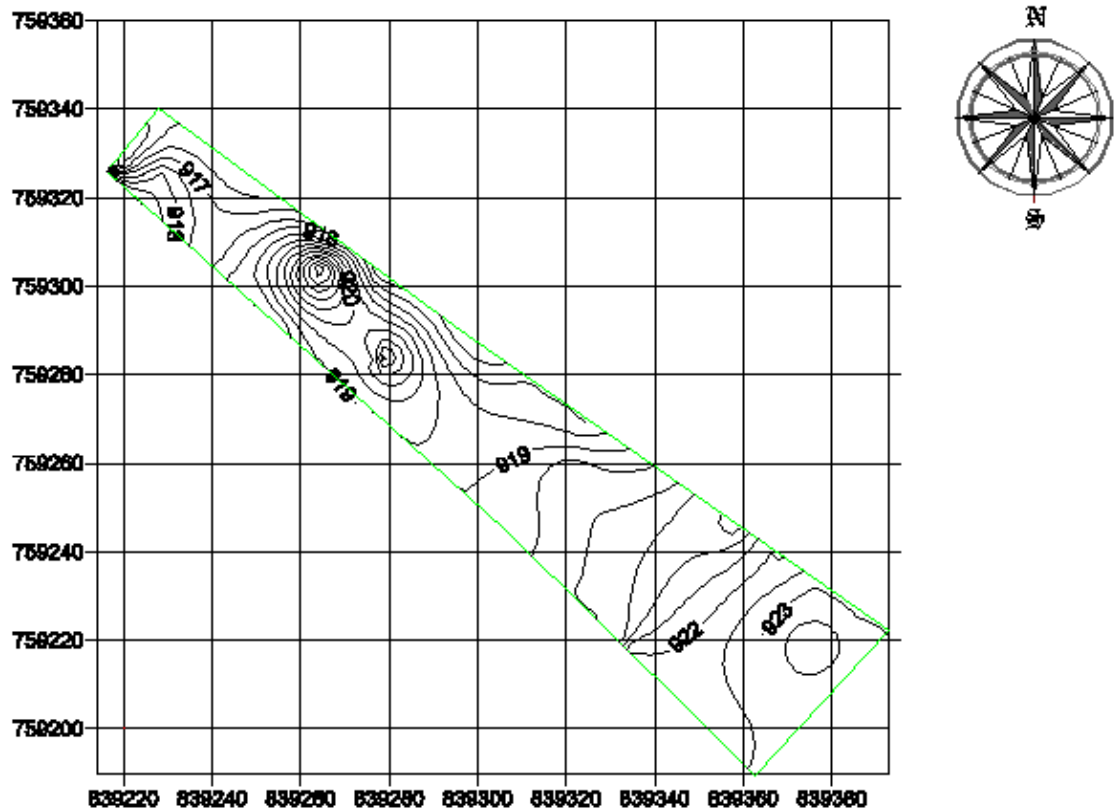
**Fuente:** Google hearth.

Dentro de las propiedades del suelo de este predio, están la profundidad de una capa orgánica que varía entre 15 y 20 cm de profundidad, y la presencia de limos y arcillas. El Cuadro 3 mostrado a continuación presenta algunas de las características de la zona.

Dato	Promedio Anual
Temperatura	24°C
Pluviosidad 2008	366 (mm/año)
Lluvia Critica	74.5 mm retorno de 10 años
Suelo	Franco – Arcillo - Limosa

**Cuadro 3:** Características de la zona

El predio tiende a tener una topografía ligeramente plana, donde su punto más alto es de 922 m.s.n.m. con una diferencia de 4 metros de su punto más bajo, en doscientos metros de recorrido. La Figura 45 ilustra las curvas de nivel que fueron levantadas gracias a los datos arrojados por el GPS.



**Figura 47.** Curvas de nivel Predio la Guandinosa

En cercanías al predio existe una casa que cuenta con energía eléctrica, factor indispensable para la comunicación efectiva dentro del sistema.

#### **5.4 INSTALACIÓN DEL SISTEMA.**

Se distribuyeron 5 componentes que incluyen; 1 sensor y 1 nodo terminal (Figura 46). Cada uno de estos 5 componentes fueron instalados en cada uno de los pozos que se habían instalado anteriormente con las siguientes características; los pozos son tubería de PVC de 1½ pulgada de diámetro, de alto 2 metros. La tubería esta perforada con círculos de 1 cm de diámetro cada 4 cm y 6 por línea aproximadamente.

Los sensores fueron puestos en la parte superior del tubo ensamblado de forma que no se obstruyera la lectura con las paredes del tubo, es por esto que la tubería debe estar de alguna manera nivelada tratando que el sensor esté dispuesto hacia abajo con la cara del sensor lo mas verticalmente posible. El sensor que se encuentra protegido por una estructura plástica negra, es ensamblado con ayuda de una cinta negra. El dispositivo que contiene en sensor tiene un diámetro aproximado de 2", lo cual encaja perfectamente para tuberías de este mismo diámetro.





**Figura 48.** Instalación de sensores y nodos en el pozo

Para una comunicación efectiva, y puesto que el terreno contaba con arbustos altos, los Nodos Terminales se establecieron con ayuda de un soporte que los elevaba a una altura aproximada de 1,80 m. cada nodo contaba con un par de correas que ayudaban amarrarse al soporte que lo sostenía.

La distribución de los pozos se encuentra ilustrada en la Figura 47, la ubicación de estos fueron establecidos por un grupo de estudiantes que fueron los encargados de la instalación de los pozos. Las características de los pozos se encuentran descritas en el cuadro 4 que se encuentran a continuación.

Pozo	Cota	Latitud	Longitud
1	924	839376	759218
2	921	839321	759258
3	923	839265	759304
4	922	839278	759284
5	918	839228	759326

**. Cuadro 4:** Características de los pozos

Dentro de las características mostradas anteriormente se resalta; la distancia promedio entre cada uno de los pozos es de 46 m, la mayor distancia está entre el pozo 1 y el pozo 5 es de 183m.

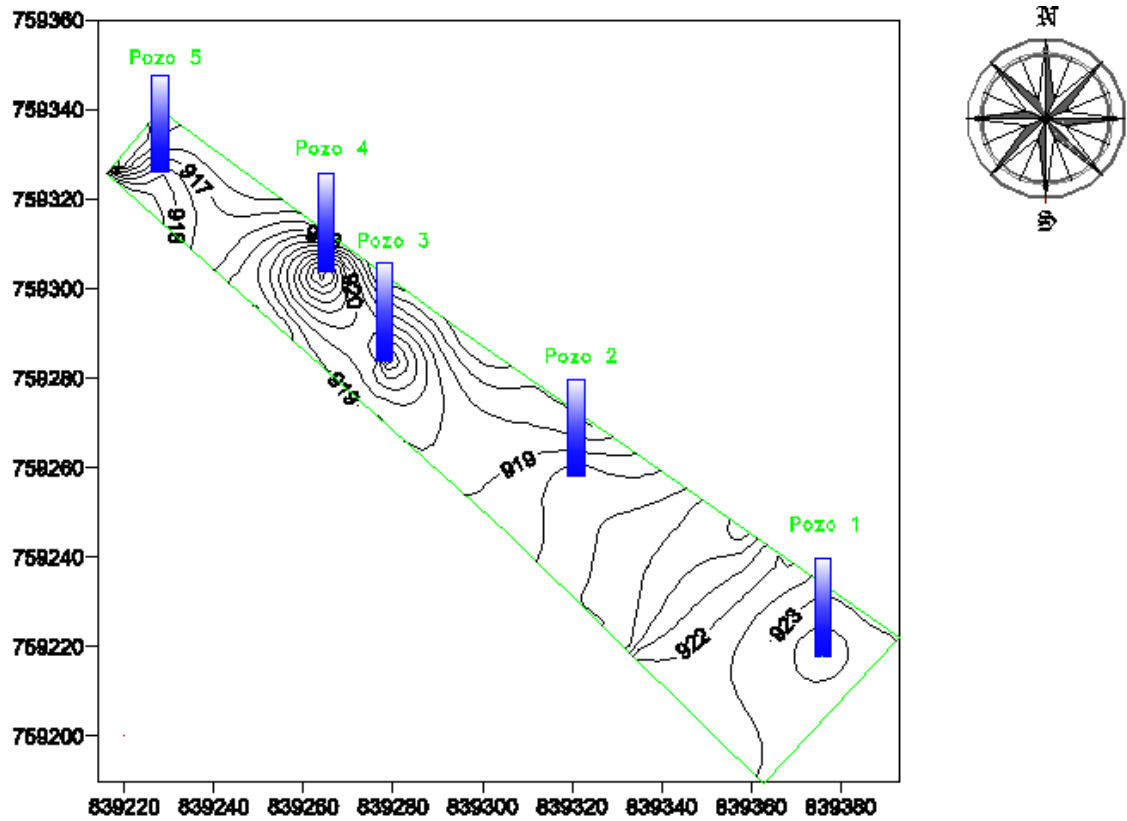


Figura 49. Distribución de los pozos de observación

La comunicación con el Nodo Central se situó en la casa en cercanías al predio, localizada a 300 metros de la entrada al lote, y a 401 metros del pozo 5, el más lejano del Nodo Central.

## 5.5 PUESTA A PRUEBA.

La comunicación se realizó satisfactoriamente anterior a una prueba de comunicación de los nodos en un mismo lugar, es decir, todos juntos. Siendo las 3:00 pm del 06 de Marzo, se logró la comunicación de los cinco Nodos Terminales con el Nodo Central que se encontraba en la casa del predio. Después de programado el Nodo Central, se registró la primera lectura de los cinco sensores donde se verificó la información entregada con el Nodo Central con mediciones

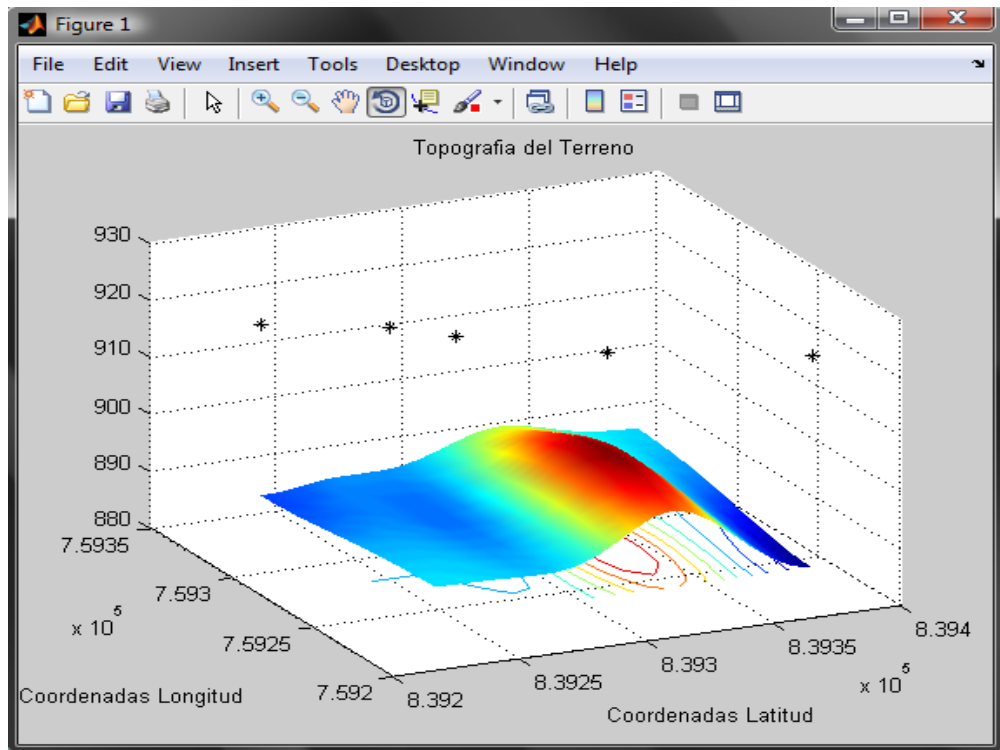
manuales realizadas en cada uno de los pozos, haciendo verificación de las medidas de los sensores.

El resultado de la primera comunicación se ilustra en la siguiente tabla que fue obtenida directamente del Nodo Central.

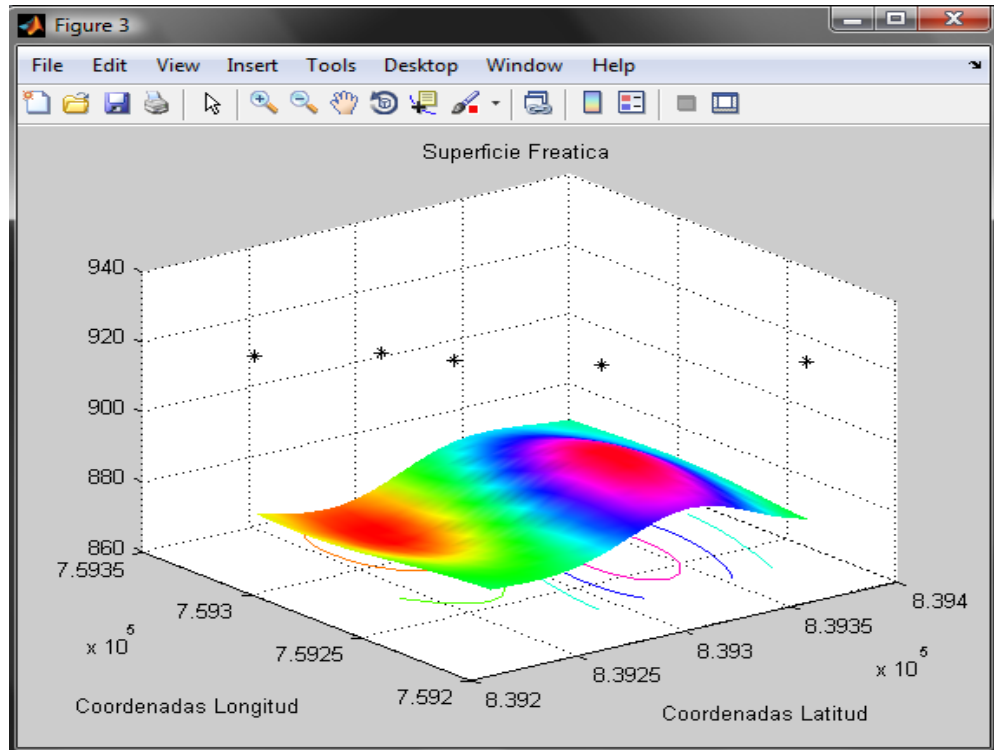
Altura_del_t	Cotas	Latitud	Longitud	
37	922	839376	759218	
17	921	839321	759258	
30	923	839265	759304	
31	922	839278	759284	
30	918	839228	759326	
FECHA/HORA	06/03/2010			
SENSOR	03:00:39 p.m.			
1	45			
2	30			
3	51			
4	48			
5	45			

**Figura 50.** Tabulación obtenida desde el Nodo Central

Como resultado de la primera prueba del sistema, se corrobora el segundo aspecto del software que consiste en convertir la anterior información numérica en información grafica. Los resultados de esta primera prueba se muestran a continuación en las siguientes graficas.



**Figura 51. Topografía del Terreno (prueba en Campo)**



**Figura 52. Superficie Freática (prueba en campo)**

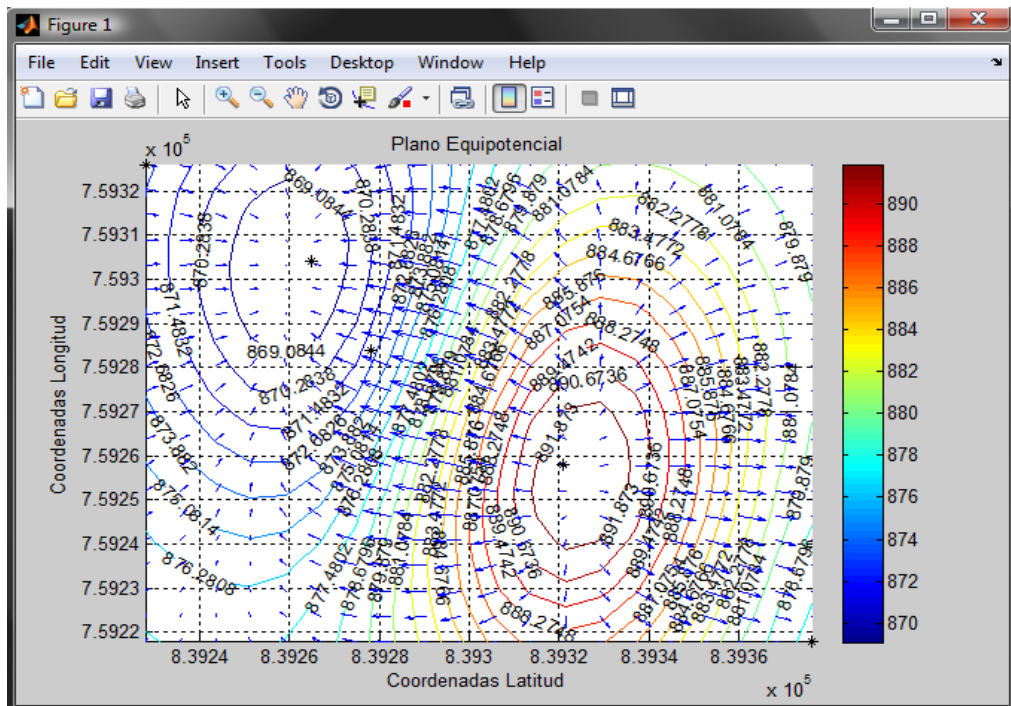


Figura 53. Plano Equipotencial 1 (prueba en campo)

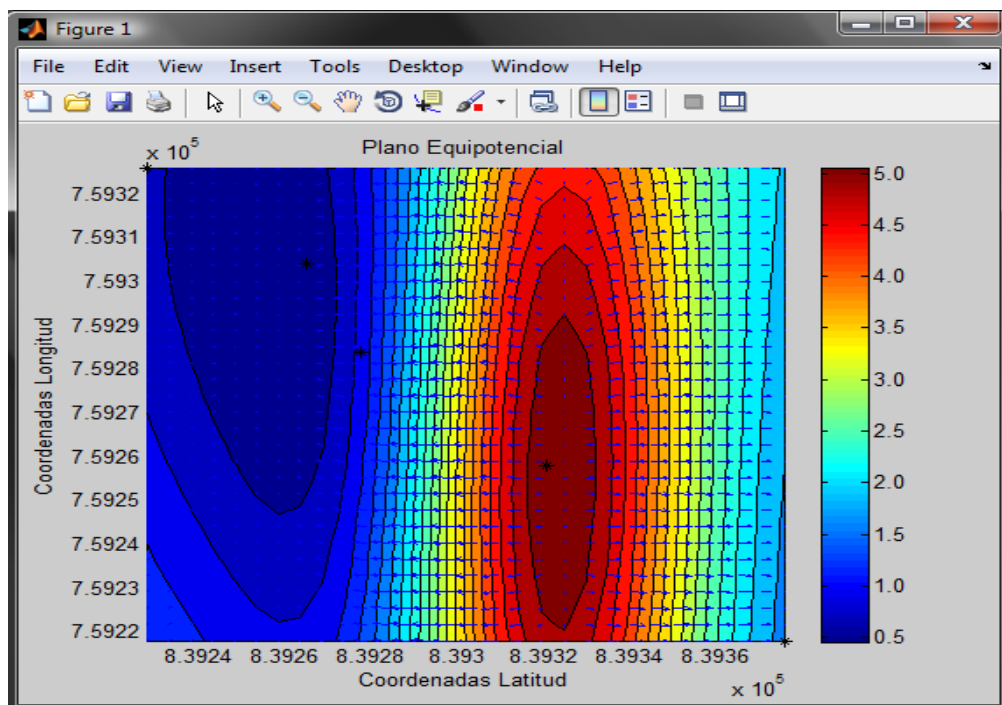


Figura 54. Plano Equipotencial 2 (prueba en campo)

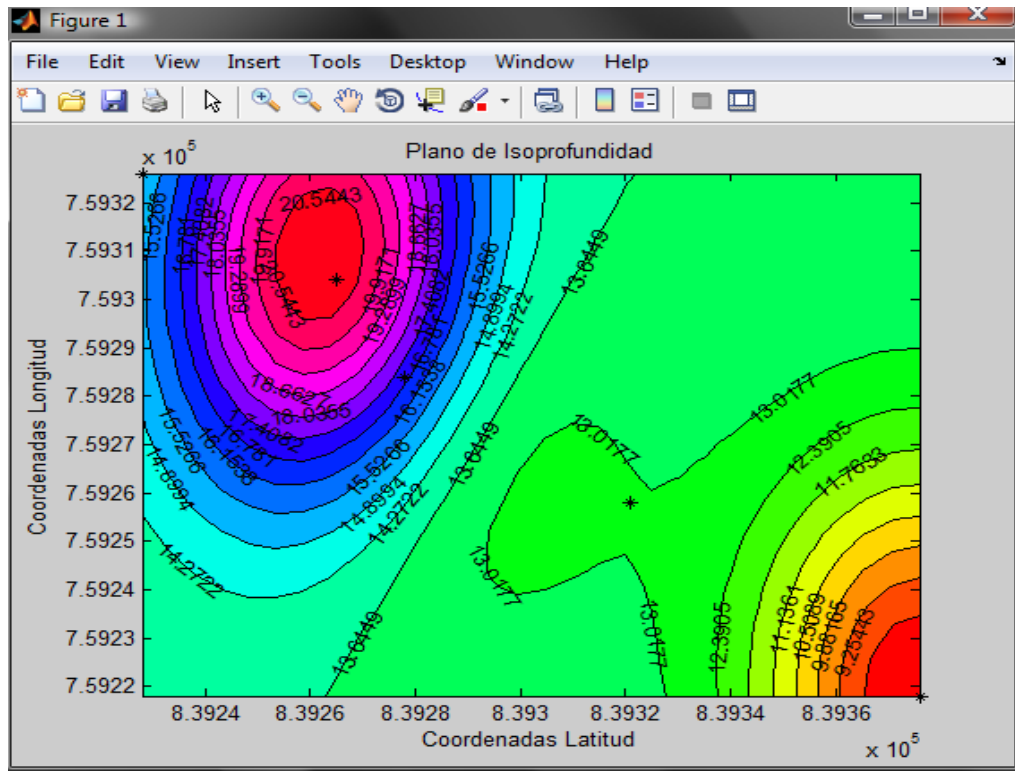


Figura 55. Plano Isopropfundidad 1 (prueba en campo)

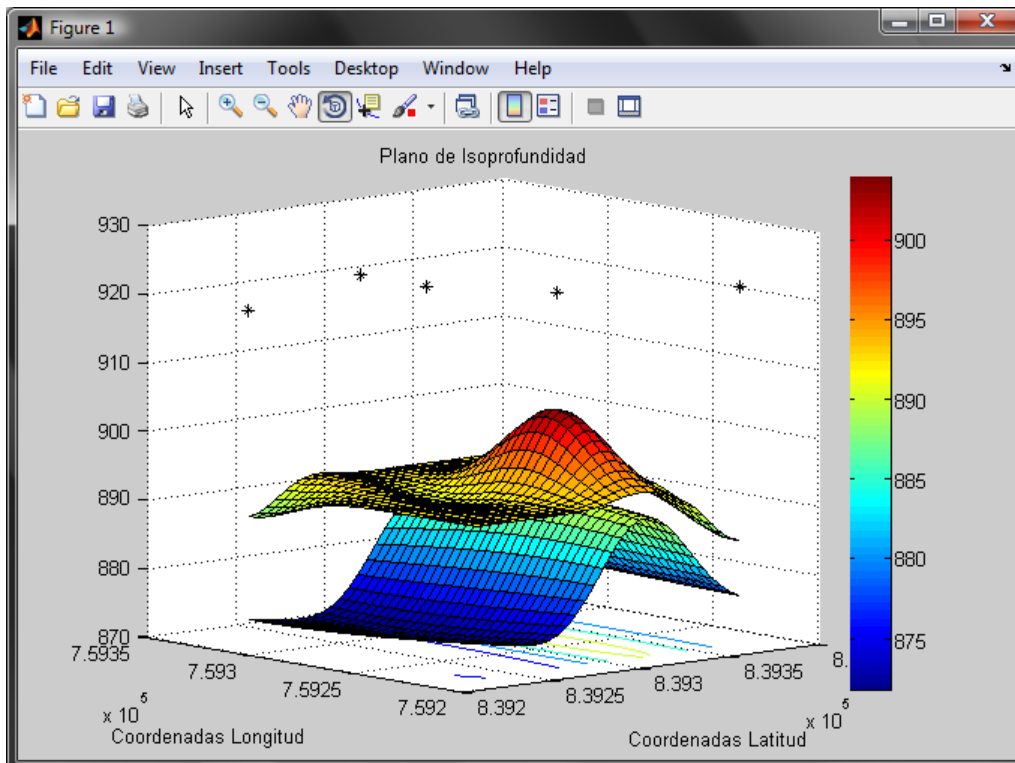
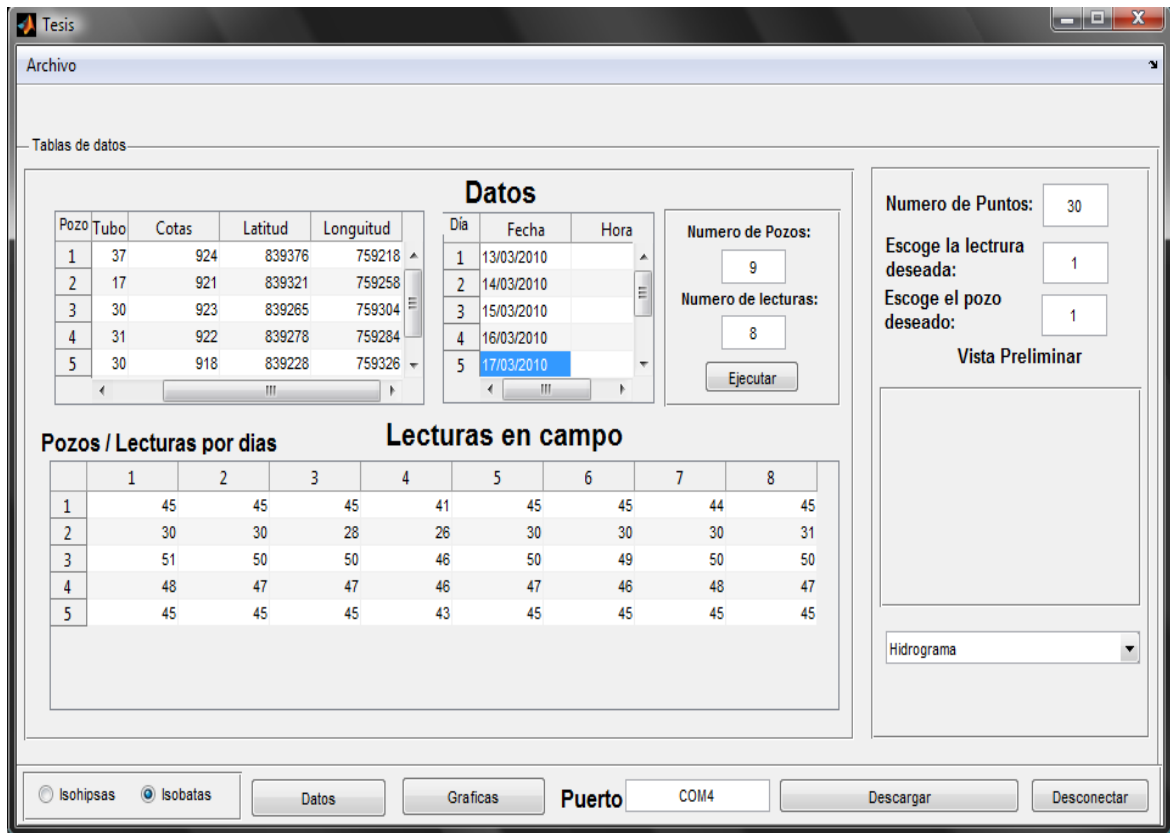


Figura 56. Plano Isopropfundidad 2 (prueba en campo)

El sistema estuvo funcionando una semana, es decir hasta el 13 de marzo después de lograrse la última comunicación de los nodos que fue a las 3:00 de la tarde de este día. Pasados estos siete días el Nodo central trabajo satisfactoriamente logrando recolectar las lecturas mostradas a continuación en la Figura 55.



**Figura 57.** Pantallazo del Software (prueba en campo)

El resultado de la información recolectada durante los 8 (ocho) días, donde una aplicabilidad del software se ilustra a continuación en la Figura 56, ilustran los mapas de las mediciones diarias recolectados en campo durante esta semana.



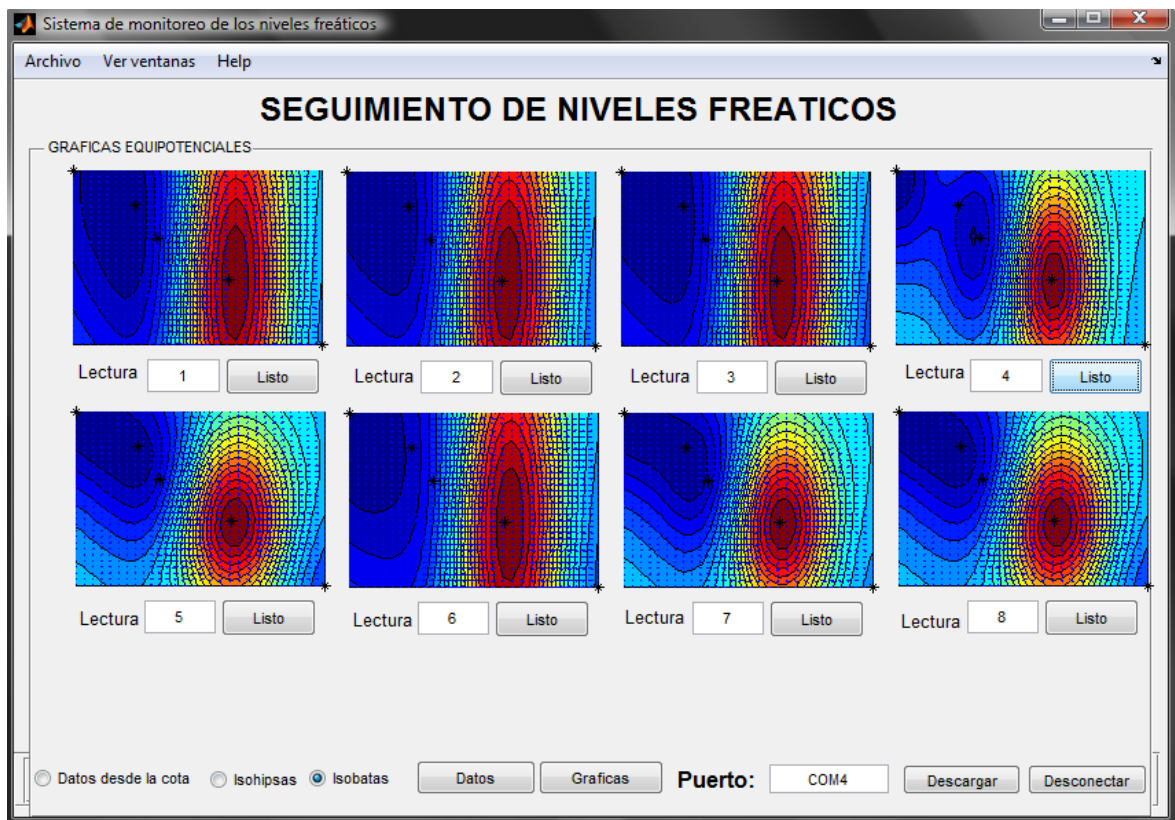


Figura 58. Graficas de Seguimiento del Nivel Freatico.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logro automatizar el proceso de medición de niveles freáticos mediante herramientas de comunicación y electrónicos, que incrementa la seguridad y confiabilidad de la información y del sistema, disminuyendo así la probabilidad de error y facilitando la medición en los pozos de observación.

La comunicación inalámbrica a través del protocolo ZigBee logro efectuar la interacción del sistema de manera satisfactoria para la creación de la Red de Sensores Inalámbricos WSN para medición de niveles freáticos.

Se logra poner a prueba un sistema en campo, con un bajo consumo de energía lo cual representa la viabilidad del proyecto en campos agrícolas.

El desarrollo del software aplicativo utilizando las herramientas de Matlab para el procesamiento, visualización y representaciones de la información para el análisis, estudio y seguimiento del comportamiento de la capa freática. A través de la visualización del software, profesionales y/o técnicos podrán establecer sus recomendaciones a partir de un conjunto de información que se ilustra en el programa, con el fin de observar las falencias o puntos críticos de un terreno. Resulta ser entonces un instrumento útil y de soporte para el diseño en ingeniería como drenajes, construcción y riego.

El sistema resulta ser viable económicamente, puesto si se tiene en cuenta que un estudio de drenajes oscila entre los 6 y 12 meses, para el mejor de los casos. La facilidad de implementación y la estructura inalámbrica hace que el rendimiento que ofrece el sistema sea económicamente aceptable. El trabajo de medición en conjunto con el trabajo del software establece no solo una eficiencia marcada comparado con el método tradicional, sino también una base de información verídica que se puede fundamentar, en el buen estado y calibración del equipo.

Es importante tener en cuenta que para la buena comunicación entre los nodos se debe asegurar en lo posible la visibilidad de los mismos. El sistema puesto en campo necesita que las cajillas que contienen los módulos ZigBee sean elevados a una altura prudente que evite la obstrucción de la comunicación dependiendo las características como la vegetación (árboles, arbustos, cultivos, etc.) de la zona.

Es muy probable que los pozos de observación puedan tener características diferentes, pero para el sistema es relevante la altura de tubo que sobresale sobre el nivel del suelo puesto que de esto dependerá la exactitud de las lecturas que registran los sensores.

## **Bibliografía**

RAMOS, Francisco. Redes de sensores inalámbricos. Universidad Politécnica de Valencia, España. <http://www.radioptica.com>

CRUZ, R. Drenajes. En. CENICAÑA, El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995.

COLINA, S DE LA. Diseño y manejo de sistemas de drenaje, Memoria del Simposio Internacional sobre Riego y Drenaje en Banano. Las Mercedes de Guácimo. 1997.

PAZOS, Víctor. Diseño de un sistema de drenaje mediante drenes abiertos empleando la ecuación de Ernst para el cultivo de banano. Babahoyo Ecuador. Maestría en Riego y Drenaje. 2005.

SOTO, M. El cultivo del Banano, Producción y Comercialización: Planteamiento de una empresa bananera, San José. 1994.

## **PRINCIPALES ENLACES**

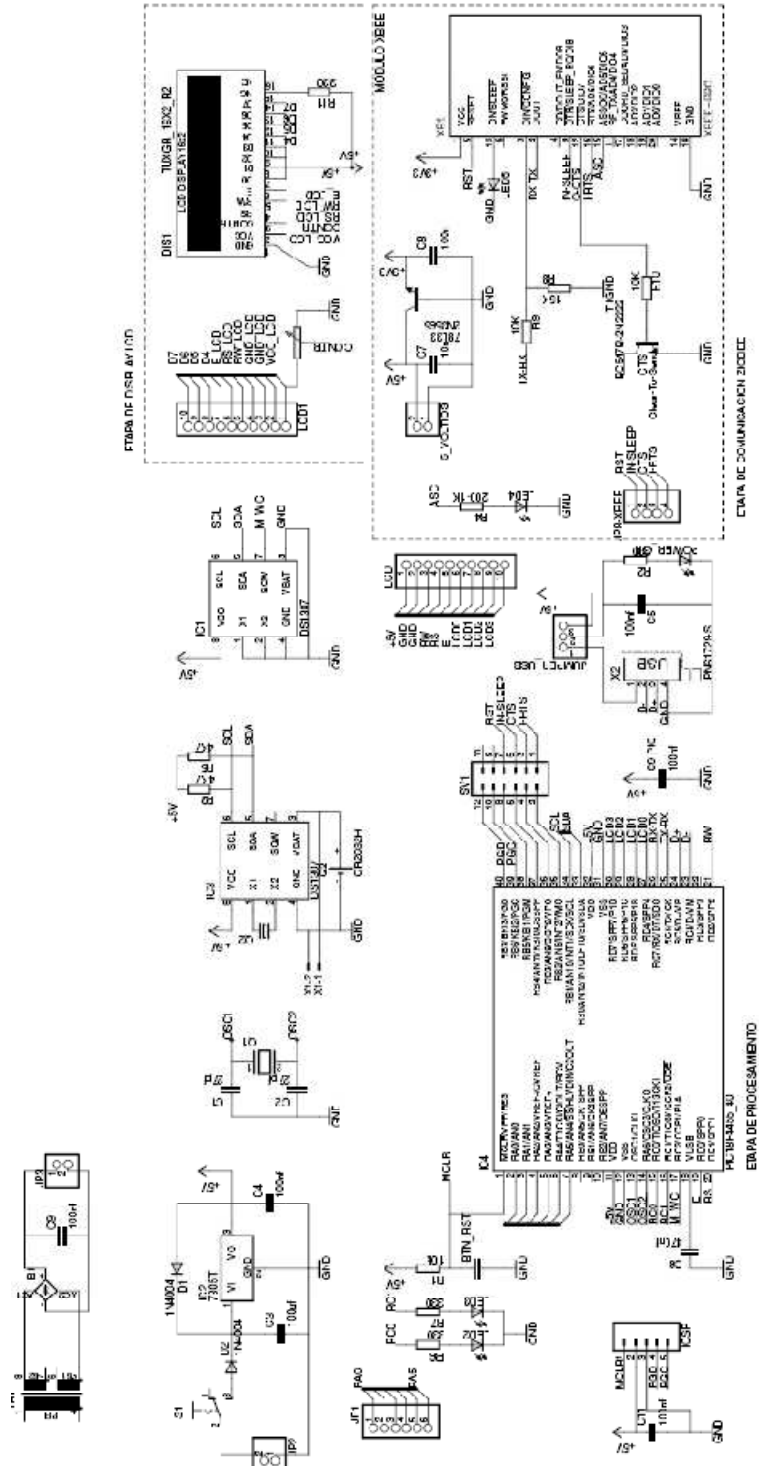
<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000.htm>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Topolog%C3%ADa\\_de\\_red](http://es.wikipedia.org/wiki/Topolog%C3%ADa_de_red)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_de\\_sensores](http://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_sensores)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Nodo>

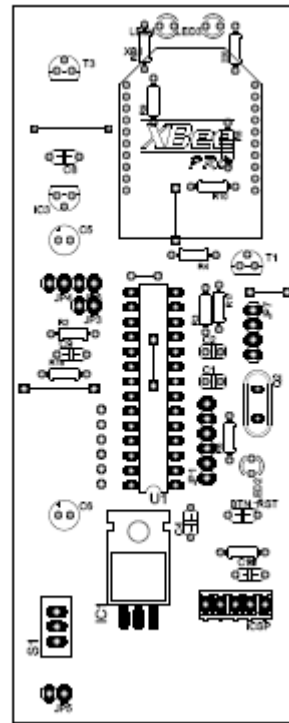
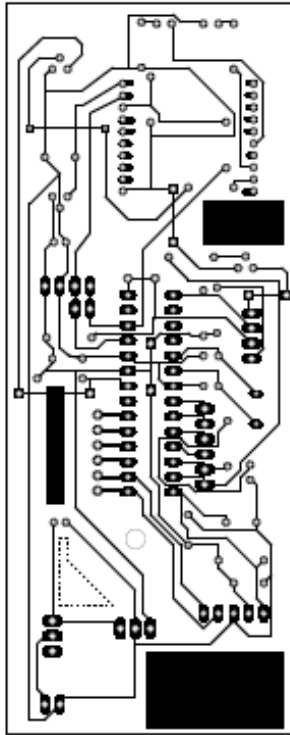
# ANEXOS



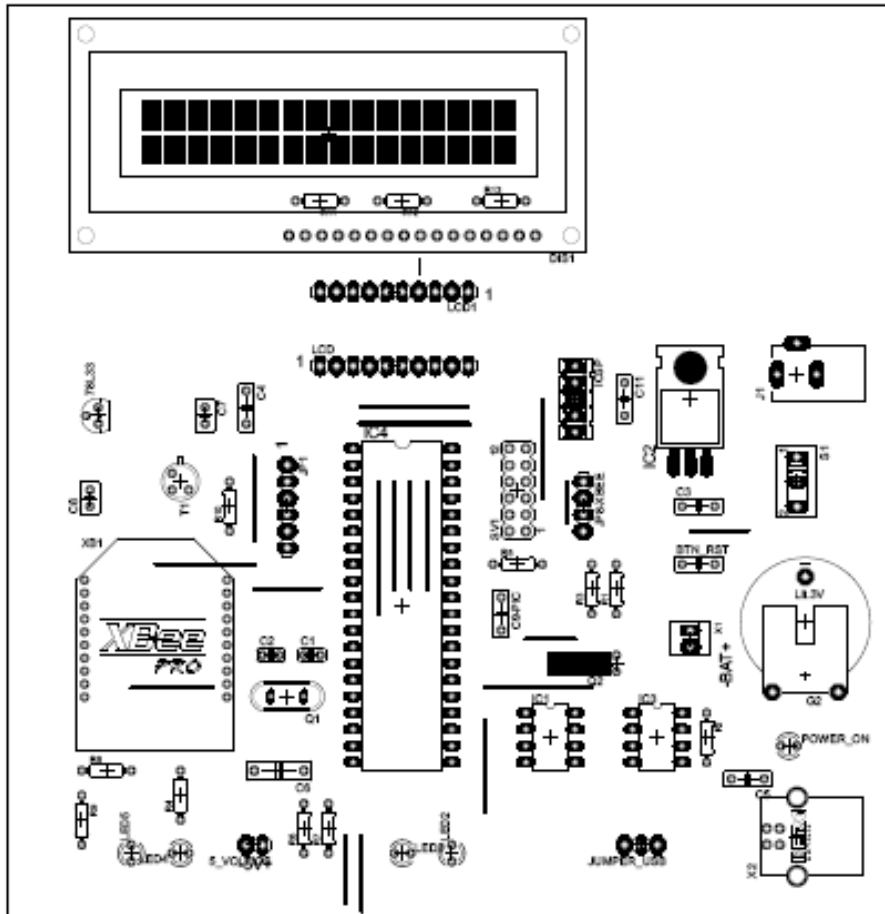
ANEXO A1. CIRCUITO ESQUEMATICO NODO COORDINADOR



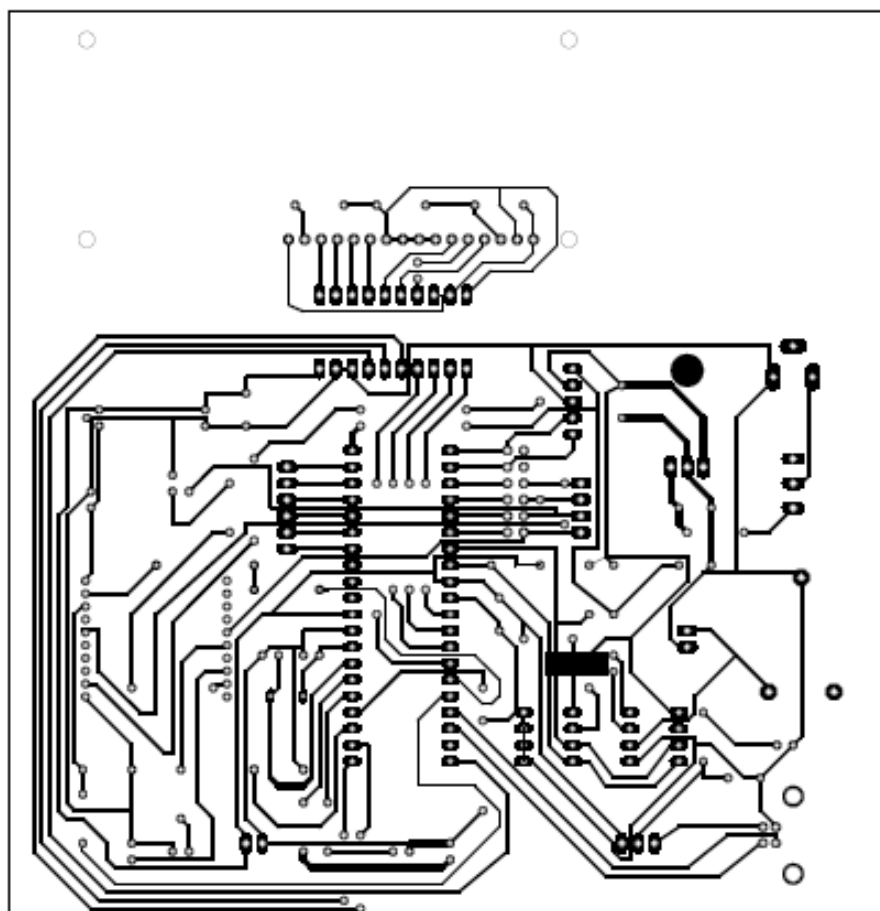
# ANEXO A3 CIRCUITO IMPRESO NODO TERMINAL



## ANEXO A4. CIRCUITO IMPRESO NODO COORDINADOR



## ANEXO A4. CIRCUITO IMPRESO NODO COORDINADOR





## ANEXO B1

### MICROCONTROLADORES PIC

Los 'PIC' son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Thecnology Inc. Y derivaos del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instruments.

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como Peripheral Interface Controller (Controlador de Interfaz Periférico). En la figura 8 vemos microcontroladores PIC.



Figura 7. Microcontroladores

### Microcontrolador PIC18F4550

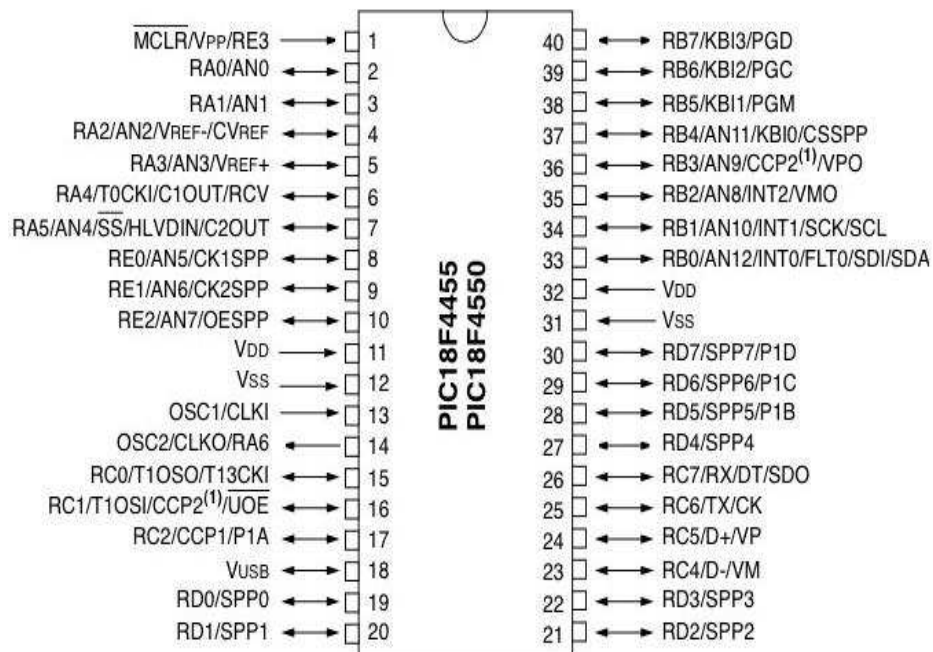
Partiendo que es un micro muy utilizado como un microcontrolador “estandar” por sus innumerables características, el cual incluye una memoria Flash USB y control de flujo de datos. Soporta USB low speed (1.5Mb/s) y full speed (12Mb/s) y USB V2.0, el cual es un atractivo complemento el poder incorporar por sí mismo una interfaz USB.

El PIC 18F4550 (**Figura 9**) se caracteriza por:

- Memoria Flash 32Kbytes
- Numero de instrucciones 16384
- Memoria RAM 2048 bytes
- Memoria EEPROM 256 bytes
- 35 entradas y salidas
- 13 entradas ADC

- Soporta master I2C
- 2 comparadores
- Universal Serial Bus (USB) module

Sus principales características destacan sobre todo su gran diversidad, con lo que podemos implementar muchas aplicaciones con tan sólo tener una buena distribución de sus entradas y salidas.



**Figura 8.** Diagrama de pines PIC18F4550

Microchip distribuye de forma general dos tipos de micros dependiendo del voltaje de alimentación:

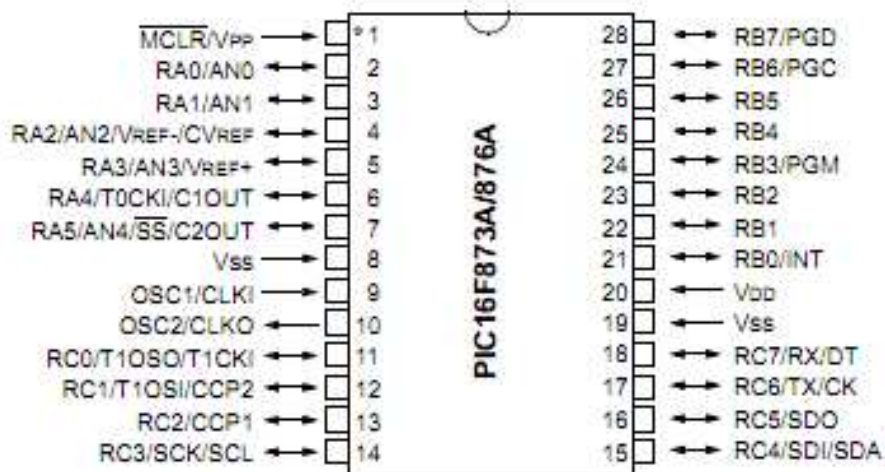
Clase F: Voltaje típico (4.2 V a 5.5V)

Clase LF: Bajo voltaje (2.0 V a 5.5V)

La diferencia entre estos dos es que los micros de clase LF pueden ser usados con la nueva alimentación de 3.3V que actualmente y poco a poco se está imponiendo a los típicos 5V.

### Microcontrolador PIC16F873A

El **PIC16F873A** (Figura 10) forma parte de una subfamilia de microcontroladores PIC (*Peripheral Interface Controller*) de gama media de 8 bits, incorpora una memoria EEPROM flash mejorado; Lo que permite una programación fácil, usando un dispositivo programador de PIC. Son fabricados por Microchip Technology Inc.



**Figura 9.** Diagrama de pines PIC16F873A

El carácter "A" al final del modelo PIC16F873A indica que cuenta con módulos de comparación analógicos. Maneja una longitud de datos de 8 bits en las instrucciones, que corresponde al tamaño del bus de datos y el registro de la CPU.

Las características principales de estos dispositivos son:

- CPU de arquitectura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*)
- Set de 35 instrucciones.
- Frecuencia de reloj de hasta 20MHz (ciclo de instrucción de 200ns).
- Todas las instrucciones se ejecutan en un único ciclo de instrucción, excepto las de salto.
- Hasta 8K x 14 palabras de Memoria de Programa FLASH (ver tabla a continuación).
- Hasta 368 x 8 bytes de Memoria de Datos tipo RAM (ver tabla a continuación).
- Hasta 256 x 8 bytes de Memoria de Datos tipo EEPROM (ver tabla a continuación).
- Hasta 15 fuentes de Interrupción posibles.
- 8 niveles de profundidad en la Pila hardware.
- Modo de bajo consumo (Sleep).

- Tipo de oscilador seleccionable (RC, HS, XT, LP y externo).
- Rango de voltaje de operación desde 2,0V a 5,5V.
- Conversor Analógico/Digital de 10 bits multicanal.
- 3 Temporizadores.
- Watchdog Timer o Perro Guardián.
- 2 módulos de captura/comparación/PWM.
- Comunicaciones por interfaz USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter).
- Puerto Paralelo Esclavo de 8 bits (PSP).
- Puerto Serie Síncrono (SSP) con SPI e I<sup>2</sup>C.

## **ANEXO B2 RELOJ DE TIEMPO REAL (RTC) DS1307**

El circuito integrado DS1307 (Figura 11) es un reloj de tiempo real exacto, tiene una compensación para los meses de 31 días y para cambios de años. El DS1307 es un dispositivo con 8 pines al que se le conecta un cristal de cuarzo de bajo costo con una frecuencia de 32.768kHz entre los pines 1 y 2, proveyendo el tiempo de base exacto. Además se conecta en el pin 3 una batería de respaldo de 3 voltios, asegurando la alimentación del circuito integrado en caso de que detecte que falta la alimentación principal.

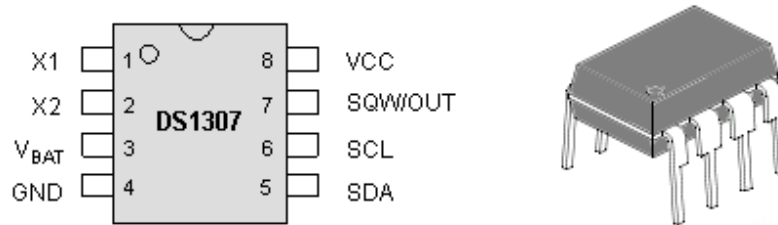
La batería de respaldo puede tener una vida útil hasta 10 años y se instala en la misma base del circuito coordinador. También posee dos características interesantes, la primera es que tiene una salida de colector abierto en el pin 7, permitiendo la instalación de un led indicador de segundos. La segunda en que tiene 56 bytes de memoria RAM para propósito general, el cual puede ser usado como memoria extra por el máster PICAXE si es requerido.

### **Características:**

El DS1307 es uno de los RTCs I2C más fáciles de usar debido en parte a sus limitaciones. Aun así, sus características son muy provechosas y son principalmente las que, con pocas variaciones, se repiten en los modelos de la serie DS1337, DS1338, DS1339, DS1340, DS1375. Veamos:

- Computa los segundos, minutos, horas, días de la semana, días del mes, meses y años (de 2000 hasta 2099).
- Aparte de los registros de hora y fecha del RTC, ofrece una SRAM de 56 bytes que se podrían usar como RAM extendida del microcontrolador.
- Provee por el pin SQW/OUT una señal cuadrada de frecuencia programable.
- Alimentación alterna usando una batería. En ausencia o deficiencia de la alimentación principal de Vcc, el DS1307 pasa automáticamente a alimentarse de la batería.
- Soporta el protocolo I2C en Standard Mode (máxima frecuencia de reloj de 100 kHz)

## Descripción Funcional de Pines



**Figura 10.** Diagrama de pines del RTC DS1307 en PDIP.

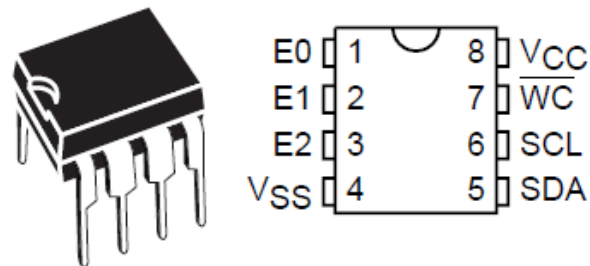
- SDA y SCL. Pines de interface I2C.
- Vcc y GND. Pines de alimentación. Vcc es típicamente de 5 V.
- X1 y X2. Pines para conectar un XTAL de cuarzo estándar externo de 32.768 KHz. Los capacitores para estabilizar el circuito oscilador se incluyen internamente.
- Vbat. Pin para conectar opcionalmente una batería de 2.0 a 3.5 V. Normalmente el DS1307 operará con su fuente del pin Vcc. En ausencia de dicha tensión o cuando su nivel caiga por debajo de Vbat, el DS1307 empezará a trabajar con la batería.
- SQW/OUT. Por aquí el DS1307 puede sacar una onda cuadrada de cuatro frecuencias: 1 Hz, 4.096 kHz, 8.192 kHz ó 32.768 kHz. Se configura con el registro de control. Es un pin de drenaje abierto y por tanto necesitará de una pull up si se usa.

## ANEXO B3 MEMORIA EXTERNA EEPROM M24512

### Almacenamiento de Datos

Para el almacenamiento de datos se incorporo una memoria EEPROM de referencia M24512 (Figura 12), el cual soporta una comunicación por el puerto I2C a una frecuencia de reloj 400 KHz con un voltaje de alimentación desde 1.8 Voltios a 5.5 Voltios. Por ser un tipo de memoria ROM se puede programar, borrar y reprogramar eléctricamente, a diferencia de la EPROM que ha de borrarse mediante un aparato que emite rayos ultravioletas.

Son memorias no volátiles, está constituida por un transistor MOS que tiene una compuerta flotante; su estado normal está en corte y la salida proporciona un 1 lógico. Aunque una EEPROM puede ser leída un número ilimitado de veces, sólo puede ser borrada y reprogramada entre 100.000 y un millón de veces.



**Figura 11.** Memoria EEPROM M24512.

Esta memoria cuenta con características adicionales como modos de lectura aleatorio y secuencial, escritura de bytes o de páginas de hasta 128Bytes y una entrada de control de escritura.

## ANEXO B4 SENSOR DE ULTRASONIDO SFR02

El SRF02 es un sensor de distancia ultrasónico que emplea un único transductor, tanto para transmitir ráfagas ultrasónicas como para recibir el eco de la misma; esta característica hace que su distancia mínima medida debe ser mayor a 15 cm.

Este sensor acepta la comunicación I2C y serie, con un total de 16 dispositivos diferentes en ambos modos. Dentro de sus características generales son:

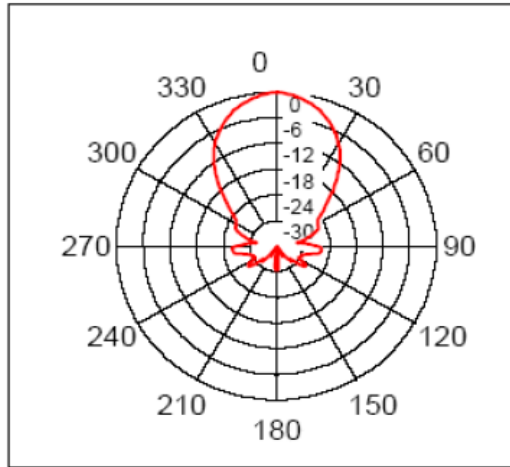
- Utiliza niveles de tensión estándar TTL, lo que permite la conexión directa con cualquier microcontrolador.
- Tensión de alimentación 5Vcc.
- Consumo típico de 4mA.
- Frecuencia ultrasónica de 40KHz.
- Control automático de ganancia.
- Rango de medidas de 15 cm hasta 6 m.



**Figura 12.** Sensor ultrasónico SFR02

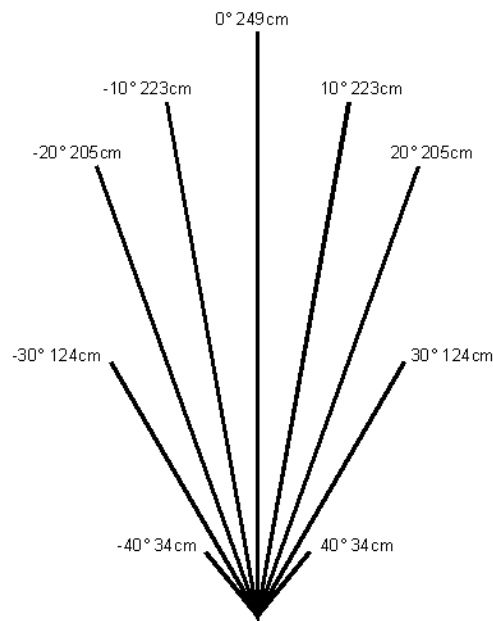
Para detectar la distancia, primero emite un pulso de ultrasonidos a 40 KHz con una duración de 8 ciclos de reloj y después cambia a receptor y escucha el primer eco, que procesa y devuelve esta medida en centímetros, pulgadas o microsegundos. Su diagrama de radiación, visible en la figura 14.





**Figura 13.** Diagrama de radiación de un SFR02

La siguiente grafica muestra la distribución del haz medido para el SRF02, que muestra el rango de detección máxima de un diámetro de 55mm.



**Figura 14.** Radiación del haz de un SFR02