



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Diseño para análisis y estimación de humedad de suelo mediante
técnica Kriging y WSN

TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

OSCAR FERNANDO LÓPEZ ALBINO

Director: Ing. Edgar Andrés Gutiérrez Caceres Esp. Msc. Phd. (st),

Co-director: Ing. William Fabian Chaparro Becerra Esp. Msc. Phd. (c)

Tunja, 2021



Universidad Santo Tomás



Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica

Diseño para análisis y estimación de humedad de suelo mediante técnica Kriging y WSN

TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

OSCAR FERNANDO LÓPEZ ALBINO

Advisor: Ing. Edgar Andrés Gutiérrez Caceres Esp. Msc. Phd. (st) ,

Co-advisor: Ing. William Fabian Chaparro Becerra Esp. Msc. Phd. (c)

Approved by

Date:.

(Signature)

(Signature)

.....
Ing. Edgar Andres Gutiérrez Caceres
Docente Tutor

.....
Ing. William Fabian Chaparro Becerra
Docente Cotutor

.....
Firma primer lector
Docente

.....
Firma segundo lector
Docente

Tunja, 2021

EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDADES

Los conceptos desarrollados, investigaciones realizadas, prácticas elaboradas, análisis y conclusiones del presente proyecto son de exclusiva responsabilidad del autor.

Dejo constancia que cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, según lo establecido por la ley No. 1915 del 12 de Julio de 2018, ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

AUTOR

FECHA

FIRMA

Resumen

Considerando la importancia del recurso hídrico, como un elemento esencial que a lo largo del desarrollo de la agricultura, ha condicionado su producción y ha exigido el desarrollo de nuevas técnicas para su control y uso [1]. Es este concepto el que sienta la base de esta investigación, donde se plantean una serie de parámetros para el diseño de una red WSN, la cual como enfoque principal tiene el análisis de humedad del suelo basado en interpolación geoestadística Kriging, a fin de generar una herramienta al agricultor para toma de decisiones en diseño e implementación de sistemas de riego. Buscando ese objetivo, se hace un detallado estudio de ubicación óptima de sensores mediante técnica de repeticiones y estimación de humedad, a fin de lograr un diseño estructurado, que se afiance en principios matemáticos para resolver un problema de optimización importante en las redes WSN (Wireless Sensor Network), como es la ubicación de los nodos sensores. A su vez, sobre la línea de la investigación de características de humedad del suelo, se sustenta por medio del método gravimétrico la calibración del sensor de humedad DFROBOT Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3), como medio preciso para la obtención de muestras experimentales, compatible con la plataforma Arduino. Por otra parte, dando soporte para la implementación real futura, se sugiere por medio de investigación y pruebas, el protocolo de comunicación Zigbee, para la puesta en marcha de la arquitectura de red de sensores, ajustando el uso de Arduino como sistema micro controlado para la conversión y transmisión de datos.

Palabras Clave

Análisis Kriging (OK), Calibración de Sensores, Comunicación inalámbrica, Humedad, Sensor, Sistema de Riego, Redes inalámbricas de sensores (WSN)

*Este trabajo lo dedico a mi familia por ser mi principal apoyo y a la memoria de mi abuelo como
el recuerdo grato de la alegría y el compromiso...*

Índice general

Resumen	1
1. Introducción	8
1.1. Formulación de preguntas	9
1.2. Definición del problema	9
1.3. Delimitación del problema	9
1.4. Justificación	10
1.5. Objetivos	10
1.5.1. Objetivo general	10
1.5.2. Objetivos específicos	10
2. Marco Referencial	11
2.1. Marco de Antecedentes	11
2.2. Marco Conceptual	12
2.2.1. Interpolación de Datos	12
2.2.2. Geoestadística	12
2.2.3. Humedad Del Suelo	12
2.2.4. Xbee Zigbee	13
2.3. Marco Teórico	14
2.4. Análisis de Kriging	14
2.5. Análisis Variográfico	15
2.5.1. Tipos de Variogramas	16
2.5.2. Wireless Sensor Networks(WSN)	17
2.6. Marco Legal	17
2.6.1. Normativa para redes WSN	17
3. Diseño Metodológico	19
3.1. Tipo de Investigación	19
3.2. Población	19
3.3. Muestra	19
3.4. Variables	19
3.5. Etapas Metodológicas	19
3.5.1. Calibración de Sensores	20
3.5.2. Toma de datos Experimentales	20
3.5.3. Desarrollo de Algoritmos para Análisis	20
3.5.4. Diseño de red WSN	20
3.6. Presupuesto	21
3.7. Recursos disponibles	21

4. Calibración de Sensores	22
4.1. Metodología de Calibración	22
4.1.1. Toma de Datos Para Un Suelo Homogéneo	24
4.1.2. Toma de Datos Para Un Suelo Heterogéneo	25
5. Análisis de distribución Óptima de Nodos	27
5.1. Datos Experimentales	27
5.2. Parámetros para Análisis de Kriging	28
5.2.1. Analisis variográfico Preliminar	28
5.3. Algoritmo de distribución de nodos	29
6. Comunicaciones Inalámbricas Zigbee para WSN	32
6.1. Topologías de Red posibles	32
6.1.1. Topología de red practica	33
6.2. Configuración de Módulos Xbee	33
6.2.1. Algoritmo para lectura de datos	34
6.2.2. Circuito de Un Nodo Sensor	35
7. Análisis de Resultados y Discusión	36
7.1. Calibración de Sensor de Humedad	36
7.2. análisis de distribución óptima de nodos	39
7.3. Comunicación Inalámbrica por Zigbee	41
8. Conclusiones	43
Bibliografía	46
9. Anexos	47
9.1. Participación en eventos	47
9.1.1. V Encuentro de Semilleros de Investigación ZBOY	47
9.1.2. VI Congreso Internacional de Instrumentación, Control y Telecomunicacio- nes	47

Índice de figuras

2.1.	Modo de operación AT	13
2.2.	Modo de operación API	14
2.3.	Partes de un Variograma	15
3.1.	Objetivo Metodológico total	19
4.1.	Metodología de Calibración Propuesta	22
4.2.	Rango de calibración	23
4.3.	Homogeneización de muestra del tierra (Prueba 1)	24
4.4.	Toma de registro de peso inicial para Calibrar	24
4.5.	Circuito para el Sensor	25
4.6.	Terreno Heterogéneo	26
5.1.	Grilla de datos experimentales	27
5.2.	Verificación Estadística de datos	28
5.3.	Variograma isotrópico de muestra de datos experimentales	29
5.4.	Metodología del algoritmo	30
5.5.	App diseñada en Matlab	31
6.1.	Topologías lógicas de redes Zigbee	32
6.2.	Propuesta de una topología practica	33
6.3.	Configuración de parámetros AT Xbee	34
6.4.	Algoritmo para lectura de datos	35
6.5.	Circuito de un nodo sensor	35
7.1.	Collage de saturación progresiva de muestra del terreno	37
7.2.	Curva de saturación del muestra de tierra	38
7.3.	Datos Obtenidos para Calibración	38
7.4.	Comportamiento de formula de Calibración	39
7.5.	Cultivo de Toma de Datos	40
7.6.	Mapas Kriging de los datos experimentales	40
7.7.	Datos Obtenidos para Calibración	41
7.8.	Funcionamiento Interfaz	41
7.9.	Comunicación Serial, Datos exportados a Excel	42
9.1.	Certificado de participación V encuentro de semilleros de investigación y VI Congreso Internacional de Instrumentación, Control y Telecomunicaciones	47

Índice de tablas

2.1.	Características de Xbee Zigbee	13
2.2.	Protocolos y estándares de comunicación mas comunes para WSN	17
2.3.	Recomendaciones Norma IEEE 802.15.4 [2]	18
2.4.	Velocidad y frecuencias de transmisión IEEE 802.11 [2]	18
3.1.	Recursos Disponibles	21

Capítulo 1

Introducción

En el marco del desarrollo tecnológico, han surgido muchas y diversas formas de aplicación de las nuevas tecnologías en ámbitos tan importantes como la agricultura, una disciplina centrada en la producción, sostenibilidad y la eficiencia energética [3]. Donde se encuentran campos de estudio como la agricultura de precisión; cuya meta es lograr llevar el aporte tecnológico al sector agrario productivo, con el único propósito de monitorear todo tipo de condiciones físicas, químicas y climáticas en diferentes tipos de cultivos, asegurando mediante estos procesos, optimización en el uso de los recursos, mejor distribución de los mismos, mayor calidad de los productos y más aporte hacia la infraestructura tecnificada enfocada en la eficiencia de producción.

Es por esto, que la agricultura de precisión constituye un área innovadora, que aporta de manera significativa al desarrollo agrícola en general, ya que, facilita de cierta manera, la toma de decisiones relacionadas directamente a las necesidades de un cultivo, dando mayor soporte al agricultor y permitiéndole así obtener mayores beneficios de su producción. Es por esta vía de aplicación, donde surgen herramientas como las conocidas redes inalámbricas de sensores o WSN (Wireless Sensor Networks), mecanismo propicio para cumplir con los objetivos planteados por la agricultura de precisión en lo referente al estudio y el monitoreo de las variables físicas químicas o climáticas de los cultivos.

Esto ha hecho que en la actualidad se haya fortalecido esta técnica y combinado con diferentes procesos tecnológicos, dando paso a una gran variedad de desarrollos que fomentan su uso y su investigación. Por esta razón, buscando relacionar todos los aspectos mencionados, se ha propuesto un proyecto basado en el diseño de una red WSN cuyo principio de valor, radica en el análisis de humedad del suelo en áreas cultivadas o potencialmente cultivables, centrado en el cultivo de papa.

Conociendo cómo se articula un sistema de sensores inalámbricos, su diseño y procesos, el proyecto busca analizar de forma particular, diferentes aspectos necesarios para su facilidad de despliegue adaptable y flexible, en base a la autonomía que tiene, al tratarse de sistemas controlados, que fortalecen el uso de esta técnica en sectores agrícolas y que permiten a su vez ser complementados con otros procesos, que la hacen más sofisticada y precisa.

Para este proyecto de investigación, se busca unificar la factibilidad de las redes WSN aplicada a cultivos, con el uso de sistemas de interpolación geoestadística, singularmente el análisis de Kriging, mediante el cual, se hace una integración de herramientas, que permita potenciar el diseño de la red, buscando estimar la humedad del suelo de un terreno, para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de riego o características de siembra, en diferentes tipos de cultivos.

1.1. Formulación de preguntas

Mediante el desarrollo del proyecto planteado se buscó dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el impacto de utilizar el método Kriging para el monitoreo de humedad?
- ¿Cómo se implementa un sistema de análisis de humedad en un cultivo, a partir de una red WSN?
- ¿Cuáles son los beneficios de la implementación de sistemas WSN para el monitoreo de humedad en un cultivo?
- ¿Cómo se pueden adaptar los estudios Geoestadísticos al comportamiento y control de humedad en Agricultura de precisión ?

1.2. Definición del problema

La poca capacidad de acondicionamiento de los entornos de producción, hacen que la eficiencia de los cultivos se vea opacada por factores que no se tienen en cuenta a la hora de cultivar, y que garantizan la calidad de un cultivo; uno de estos, es el recurso hídrico, que tiene grandes limitaciones, pues su gestión y distribución no está parcialmente controlada, además del continuo deterioro de la calidad del recurso por contaminación, debido a su uso insostenible y a la ocupación no planificada del territorio [4]. Lo cual lleva a un uso desmedido o incorrecto que termina afectando directamente a las plantas causando enfermedades en el cultivo, o ralentizando el crecimiento y la calidad del mismo. Pensando en esto, se propone el diseño para un sistema de integración WSN (Wireless Sensor Networks) con Kriging como método de interpolación geoestadística de datos, que permita estimar la humedad del suelo dentro de un cultivo. Se busca usar esta técnica y adaptarla, generando un sistema capaz de implementarse en cualquier tipo de cultivo y proporcionar así una herramienta a los agricultores para toma de decisión de riego en los cultivos.

1.3. Delimitación del problema

Partiendo de la toma de datos experimentales con sensores previamente calibrados, en diferentes tipos de cultivos, se busca estudiar la humedad del suelo en un área seleccionada, con el fin de establecer un modelo de análisis y estimación, por medio de dispositivos electrónicos, más concretamente una red WSN. Asociando herramientas de software, que permitan hacer cálculos matemáticos necesarios para determinar posición óptima de sensores en coordenadas (x,y) dentro del terreno para el diseño de la red WSN, generando distribuciones óptimas de la humedad del suelo, ahorrando dispositivos electrónicos y por medio de comunicación inalámbrica, hacer la recolección de datos para buscar aplicar métodos de verificación o control de la variable de interés, con análisis de Kriging aplicado a futuro en el diseño.

Este proceso asocia directamente al agricultor, siendo un medio de monitoreo y control de humedad para tomar decisiones con mayor certeza, en aspectos como sistemas de riego o fines particulares distintos como, distribución apropiada de tipo de siembra, planes de fertilización entre otros. Como proyección inicial, este proyecto se estudia en un cultivo de papa en la vereda de Pavas, municipio de Úmbita Boyacá, donde se obtuvieron datos experimentales de humedad en el terreno, de forma manual, con los cuales se obtiene los primeros resultados. Este estudio se hace a baja escala con el fin de verificar la eficiencia del proyecto, y se desarrolla durante los semestres del 2021 como proyecto de investigación vinculado al semillero SIRVAPS de la facultad.

1.4. Justificación

El recurso hídrico, como parte de todo lo que compete al cambio climático, es uno de los bienes mas preciados de la humanidad y el sector agrícola depende 100 % de este [5]. En la agricultura tradicional, se colocan sistemas de riego como aspersores que en muchos casos se distribuyen de forma arbitraria, según el parecer de la persona que esté realizando la instalación en ese momento. No se debe considerar como responsable al agricultor frente al desperdicio de agua, ya que no es común tener un sistema que le brinde información oportuna y real, frente a las necesidades y sectores específicos del cultivo. Es aquí donde el aporte de la ingeniería electrónica a la agricultura toma un gran valor y se propone un posible apoyo al agricultor, donde se busca a través de las tecnologías y diversas teorías del conocimiento dar una propuesta como solución a este problema. La tesis es pensada como un aporte a pequeña escala para el agricultor tradicional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de red inalámbrica de sensores (WSN), que estime la humedad del suelo a partir de la técnica Kriging.

1.5.2. Objetivos específicos

- Hacer procesos de Calibración para sensores de humedad a utilizar.
- Adquirir datos experimentales de humedad de suelo en ambientes cultivables, en particular cultivos de papa para estudiar su comportamiento.
- Analizar el comportamiento de la humedad del suelo en un entorno real, por medio de la interpolación de datos.
- Diseñar un sistema de integración WSN, con el uso de técnica Monte Carló y Kriging para determinar puntos óptimos en coordenadas (x,y).
- Divulgar el proyecto de investigación en diferentes medios académicos y de investigación.

Marco Referencial

2.1. Marco de Antecedentes

Para esta investigación, se tienen en cuenta algunos referentes teóricos que relacionan la temática planteada para obtener información técnica y metodológica sobre temas como las redes WSN y métodos de interpolación geoestadísticos, las investigaciones más relevantes se describen a continuación:

La primera investigación fue hecha por [6], “Implementación de un prototipo WSN con Nodos Inteligentes para el sistema de riego aplicado a la agricultura de precisión para el CER-ESPOCH” en Riobamba-Ecuador, cuyo proyecto tenía por objetivo, la implementación de un prototipo que permitiera dar un monitoreo de forma continua del porcentaje de humedad presente en un cultivo de Mora, en uno de los predios de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en esta se determinó como alternativa sobresaliente el uso de redes WSN como medio de monitoreo en sistemas de riego, analizando las características del mismo según el tipo de cultivo, la forma del sistema de riego, la textura del suelo, además de las tecnologías propias para las redes de sensores inalámbricas. La autora concluye, que para la implementación de redes WSN con nodos inteligentes la topología de red más completa es el tipo malla y el protocolo de comunicación apropiado es Zigbee ya que tiene un buen alcance a línea directa, una alta velocidad sin pérdidas de información.

Una segunda investigación que se cita [7], tiene por título el “Diseño, Desarrollo e implementación de una red de sensores WSN para el control, monitoreo y toma de decisiones aplicado en la agricultura de precisión, Basado en el internet de las Cosas IoT. -Caso de estudio cultivo de Frijol” en Lima Perú, fundamentando su propuesta, en que la baja tecnificación de los cultivos en el Perú es un problema relevante, ya que la agricultura es la segunda actividad más importante dentro de la economía del país. De acuerdo a esto, los autores hacen el estudio completo de tecnificación de un sistema WSN para el cultivo de Frijol Canario. Bajo la problemática mencionada, se propone el objetivo de establecer este tipo de sistema para el control y herramienta en toma de decisiones de cultivos como ejemplo de agricultura de precisión. Los parámetros principales del estudio se fijan en dos variables importantes, la humedad y la temperatura. Dentro de la implementación este estudio el hardware usado es el ESP-12E como referente para dispositivos IoT, junto a una arquitectura de red tipo estrella debido a la necesidad de comunicación con varios dispositivos; por otra parte, los autores proponen el uso de circuitos de alimentación basados en energía Solar. De esta investigación, se destaca un análisis meticuloso de todos los componentes y circuitos que comprenden la implementación de una red WSN, lo que deja a este tipo de investigación como un referente teórico-práctico muy completo que se vincula al desarrollo del actual proyecto de investigación.

Una tercera investigación relacionada estrechamente con la temática tiene por título “ Escalamiento basado en regresión Kriging de las mediciones de humedad del suelo de una red de sensores inalámbricos y de teledetección de múltiples recurso en tierras heterogéneas”, [8] plantean en su

estudio diversos métodos complementarios para el modelamiento y la estimación de humedad en un terreno heterogéneo, para este estudio, los investigadores evalúan un área de cultivo de maíz y hortalizas ubicada en la cuenca del río Heihe al noreste de China, donde por medio de métodos geoestadísticos de interpolación de datos como el análisis de Kriging ordinario, proponen procedimientos diferentes, bajo dos métodos de estimación, para comparar la precisión del proceso. Por una parte, se implementa una red WSN sobre tierra que toma datos directos de la humedad del terreno y otras variables de interés cada cierto tiempo, que luego se interpolan y se relacionan con las variables auxiliares para generar la estimación en los puntos desconocidos bajo parámetros de correlación espacial; también se adquieren datos de humedad mediante teledetección directa sobre el terreno, donde se entregan valores de humedad que se analizan por regresión Kriging y genera otro modelo de estimación, con los resultados se comparan los datos generados por ambos análisis OK y RK. De esta investigación los autores concluyeron que para terrenos heterogéneos es factible el uso del método regresión Kriging (RK), pues se adapta más a las características del terreno, por lo que en zonas complejas es mejor que el método de Kriging ordinario (OK). De este artículo se rescatan datos fundamentales para el proyecto, pues, presenta varios métodos de estimación que se adaptan directamente con el objetivo planteado para la investigación. Presentando aplicaciones a escala más grande que permiten aprovechar esta característica para afianzar los algoritmos que se usan en el desarrollo.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Interpolación de Datos

La interpolación de datos es un método matemático de análisis numérico, que, en su conjunto, crea funciones continuas a partir de una serie de datos discretos. En la actualidad, los métodos de interpolación son ampliamente utilizados en campos de la ingeniería y la ciencia, como deep learning o regresión estadística, entre otras aplicaciones. Existen diferentes tipos de interpolación, dentro de los más comunes esta la interpolación constante por partes, la interpolación lineal, polinomial y de splines, también formas más sofisticadas como métodos trigonométricos, por series de Fourier o en dimensiones superiores que a su vez conforman sistemas de interpolación más complejos, dentro de los más destacados el método IDW y Kriging.

2.2.2. Geoestadística

El análisis Geoestadístico, es desarrollado en las ciencias medioambientales como medio para comprender y proporcionar información a la comprensión científica de fenómenos, para el apoyo de toma de decisiones etc. Es una subdisciplina de la estadística espacial, que se basa en el comportamiento espacio-temporal incluyendo la tendencia aleatoria de una o varias variables, su funcionamiento parte de la consideración de medidas estadísticas como la media, la varianza, la desviación estándar y la correlación espacio-temporal [9], para lograr obtener información de las muestras discretas, proceso conocido como inferencia de parámetros.

2.2.3. Humedad Del Suelo

Hace referencia a la cantidad de agua que se almacena en la tierra, determinada como una cantidad de agua por cierto volumen de tierra; es una variable importante en el comportamiento de un terreno, pues se ve afectada por factores diversos, como la temperatura, las precipitaciones y las propias características del suelo. Por lo que representa una de las principales variables a tener en cuenta dentro de un cultivo, ya que de la humedad del suelo afecta directamente la salud de las plantas y el rendimiento de producción de las mismas. Su medida se da en porcentaje (%) y se mide mediante diferentes dispositivos, cuyas técnicas de funcionamiento más comunes

son: gravimétricas, tensiométricas, disipación de calor y técnicas dieléctricas, todas por medición indirecta.

2.2.4. Xbee Zigbee

La tecnología que involucrada a Xbee, se conoce desde su desarrollo como la Zigbee aliance, cuyo objetivo se centra en resolver aspectos de fiabilidad, seguridad, bajo consumo y bajo coste, apropiada para sistemas en redes inalámbricas de control además de sensores de baja velocidad. Dentro de los estándares de la IEEE la tecnología Zigbee se cataloga en la IEEE.802.15.4, que gestiona la ejecución de esta tecnología en funciones de banda de frecuencia internacional libres, la tecnología Zigbee, bajo el estándar de la IEEE, dentro de sus capas de trabajo, define tres bandas de frecuencia de usos libre, gestionadas según la zona, dieciséis canales a 2,4 GHz, diez canales a 902-928 MHz y un canal a 868-870 MHz. Las velocidades máximas de datos para cada banda son de 250 kbps, 40 kbps y 20 kbps, respectivamente; Además de otras características generales que se relacionan en la siguiente tabla.

Especificación	Xbee Zigbee S2	Xbee -PRO
<i>Alcance Interior/Urbano</i>	Hasta 60 m o 200 ft	Hasta 90 m o 300 ft
<i>Línea de Visión de RF al aire Libre</i>	Hasta 1200 m o 4000 ft	Hasta 3200 m
<i>Transmisión de Potencia de Salida</i>	6.3 mW (+8 dBm), modo Boost 3.1 mW (+5 dBm), Nivel máximo en el canal 26, normal de (+3 dBm)	63 mW (+18 dBm)
<i>Tasa de datos velocidad en RF</i>	250 KbS	
<i>Tensión de Alimentación</i>	2.1 - 3.6 V	2.7 - 3.6 V
<i>Bandas o frecuencias de Operación</i>	ISM de 2.4 a 2.5 GHz (Es latinoamérica)	

Tabla 2.1: Características de Xbee Zigbee

Modos de Operación Xbee

Los Módulos de radio Xbee tienen dos modos de operación:

Modo Transparente (AT)

El módulo toma la información que recibe y la transmite sin ningún tipo de arreglo, tal como se envía por los puertos seriales. Es un modo apropiado para comunicar dos módulos configurando solamente las direcciones de destino [10], es un modo de operación versátil, no obstante, tiene algunas limitaciones respecto a sus aplicaciones, pues es específica para comunicación punto a punto; por tanto no permite la programación remota, ni envió de tramas de datos, por lo que no se reconoce el punto de origen del envío.



Figura 2.1: Modo de operación AT

Fuente: [10]

Modo aplicación de Programación (API)

Es un modo de trabajo más robusto, que encapsula dentro de un protocolo, la trama de datos enviados, por series de paquetes organizados [10]. Posee ciertas ventajas por encima del modo transparente, como configuración de dispositivos de forma remota mediante XCTU y comandos Hayes propios de Xbee, permite la creación de arquitecturas de red más amplias, pues puede identificar los orígenes de las comunicaciones, la velocidad y la estructura dentro de la que está funcionando; Este modo de operación de Xbee tiene una programación más compleja que AT debido a las condiciones de transmisión.

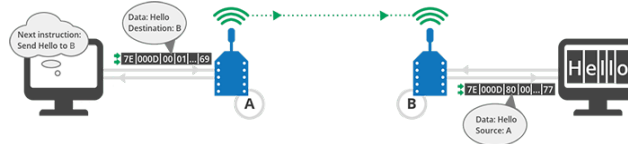


Figura 2.2: *Modo de operación API*

Fuente: [10]

2.3. Marco Teórico

2.4. Análisis de Kriging

Es una técnica de interpolación de datos de la familia de las geoestadísticas, basada en regresiones estadísticas bajo modelos tipo Gaussiano [11], el método pronostica valores de una variable dentro de un área determinada, por medio de análisis de covarianzas. Sus usos se extienden desde la Geología, ciencias ambientales y de suelos, hasta entornos climáticos y de minería. A lo largo del tiempo, esta técnica se ha desarrollado en diferentes tipos de análisis, ajustándose a diversos tipos de datos, dentro de los métodos Kriging más comunes se encuentran: el Kriging Ordinario, Kriging Universal y Cokriging para análisis de datos estacionarios y no estacionarios. En un principio básico, el método de estimación Kriging es un proceso que considera variación y distancia entre datos familiares medidos, para calcular valores en puntos desconocidos, de esta forma correlaciona los datos discretos generando una ponderación para estimar los valores en las ubicaciones no mediadas.

Es un análisis determinista, que comparte su principio de funcionamiento con el método IDW (Inverse Distance Weighting), los cuales se rigen la siguiente fórmula general:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (2.1)$$

Donde $Z(s_i)$ es el valor medido en la ubicación i , λ_i es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i , s_0 es la ubicación de la predicción y N es la cantidad de valores o puntos medidos [8]. De esta forma, el método evalúa distancias y direcciones entre las muestras de la variable, además tiene en cuenta para el análisis Variográfico la disposición espacial de los puntos medidos, con esos datos se da la ponderación o pesos a cada punto que debe cumplir con la relación de la ecuación (2.2).

$$\sum_i^N \lambda_i = 1 \quad (2.2)$$

por otra parte, para determinar dependencia espacial de las muestras se hace el cálculo del variograma experimental o semivariograma empírico, mediante el cual se estima el variograma general

que será la ecuación matemática que define los contornos del mapa de diferencias.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}(Z_x - Z_{x+h})^2 \quad (2.3)$$

$$\gamma_E(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_{ix} - Z_{xi+h})^2 \quad (2.4)$$

Donde $N(h)$ representa el número de pares de un mismo punto separado por una distancia h . Que asocia una la función matemática al variograma experimental que corresponde a un variograma definido [12]. Es importante mencionar, que para ejecutar la estimación de Kriging, la distribución de los puntos debe asemejarse a una campana gaussiana, para evitar errores de precisión y dar más exactitud al resultado

2.5. Análisis Variográfico

En la conformación de un proceso de un modelado geoestadístico, un análisis Variográfico es la referencia de interpretación, de la continuidad espacial de la variable de estudio. Un Variograma es utilizado como un medio para describir la correlación espacial entre los puntos conocidos dentro del área o plano analizado. El variograma que se genera a partir de la nube de puntos se le llama variograma experimental, a partir del cual, se estima el variograma general del modelo. Existen diferentes tipos de modelos de variogramas, los más comunes son: lineal, exponencial, gaussiano y esférico, los cuales relacionan funciones matemáticas al variograma experimental para crear el modelo geoestadístico e interpolar los datos. Generalmente un variograma se compone de las siguientes partes [13]:

- Rango: Distancia desde la base del eje donde el modelo comienza a aplanarse.
- Meseta: Valor que parte desde el punto donde se alcanza el rango, debe ajustarse a la varianza de los datos.
- Nugget o pepita : Es una la zona de discontinuidad donde la varianza no esta definida en el modelo, se relaciona con el ruido del variograma.
- Umbral: Es la zona comprendida desde la base hasta la meseta, es definida como la varianza estructural o dependencia espacial.

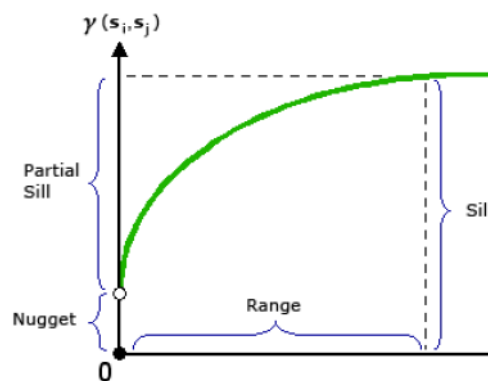


Figura 2.3: Partes de un Variograma

Fuente: Cómo funciona Kriging—Ayuda | ArcGIS for Desktop

2.5.1. Tipos de Variogramas

Para el ajuste de los modelos geoestadísticos, la interpretación de los datos iniciales se hace en dos pasos; por una parte, teniendo en cuenta la correlación espacial de los puntos, se crea un variograma experimental, que al estimarse de acuerdo al orden, distancia y valor de los puntos no puede ser usado directamente para describir un modelo de interpolación geoestadístico. De tal modo que se necesita, un modelo teórico que complemente esas deficiencias [14]. Ese segundo paso, consiste en asignar una función matemática que cumpla ciertas propiedades dentro del sistema, y que está definida bajo condiciones estrictas, pues, una función variograma debe cumplir: paridad, nulidad en el origen, positividad, comportamiento infinito y ser una función tipo negativa condicional. Lo que hace complejo una generación sistemática de funciones de este tipo, por tal motivo, se predefinen aquellas funciones que cumplen con la condición, clasificándose en cinco modelos elementales diferentes.

Efecto Pepita

Un variograma pepítico cuya meseta es C se define como

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.5)$$

Un variograma pepítico se caracteriza por la ausencia de una correlación espacial, por tanto en este variograma se alcanza de forma inmediata la meseta. Sus aplicaciones son pocas y están mas relacionadas a ruido, o en escenarios donde el error de medición sea alto.

Modelo Esférico

Un variograma tipo esférico, de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C\left\{\frac{3}{2}\frac{|h|}{a} - \frac{1}{2}\left(\frac{|h|}{a}\right)^3\right\} & \text{si } |h| \leq a \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.6)$$

Un variograma de este modelo, describe una variable que esta regionalizada de manera continua, cuyo alcance varia, según la forma de los datos [14]. Su comportamiento particular hace que el alcance llegue al 100 % con respecto a la meseta.

Modelo Exponencial

Un variograma tipo exponencial, de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = C\left\{1 - e^{-\left(\frac{|h|}{a}\right)}\right\} \quad (2.7)$$

El modelo exponencial solo tiene un comportamiento asintótico con respecto a la meseta. En general un variograma exponencial llega al 95 % de su meseta en un alcance practico de $3a$.

Modelo Gaussiano

Un variograma tipo Gaussiano, de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = C\left\{1 - e^{-\left(\frac{|h|^2}{a^2}\right)}\right\} \quad (2.8)$$

Al igual que el modelo exponencial, se consigue llegar a la meseta asintóticamente donde su alcance en forma practica se considera $a\sqrt{3}$.

En efecto, estos son los principales modelos de variograma teóricos más úsales dentro de los análisis geoestadísticos, sin embargo, existen otros modelos como el modelo de potencias y de

seno cardinal cuyas aplicaciones varían de acuerdo a su modelo ya sean parámetros indefinidos u oscilantes.

2.5.2. Wireless Sensor Networks(WSN)

Una red inalámbrica de sensores (WSN), consiste en la distribución de sensores unidos a nodos o bases de comunicación mediante una red, que se encargan de monitorear diferentes tipos de variables medibles en tiempo real. En conjunto, una red WSN toma una serie de datos transmitidos a nodos sensores que se comunican a un servidor o usuario final a través de diferentes protocolos de comunicación como: Bluetooth, Wifi, Zigbee y otros protocolos de comunicación inalámbrica [2]. Su diseño se adapta a los diferentes tipos de topologías de red y su eficiencia depende estrictamente al modo de implementación y al protocolo de comunicación utilizado. Por esta razón, en la actualidad se sigue investigando esta temática, con el fin de optimizar procesos como el consumo energético, la colocación de los sensores, protocolos de comunicación, además de otros aspectos de funcionamiento. Los protocolos y estándares de comunicación más comunes en estas redes son:

Protocolo/Estándar	Descripción
Bluetooth	-Requiere un nodo maestro que realice consulta a lo demás sensores -No es un protocolo totalmente fiable y tiene limitaciones
WIFI-IEEE 802.11x	-Trabaja bajo tecnología CSMA/CA por lo que hace una revisión continua antes de transmitir -Tiene altas capacidades de transmisión por lo que necesita fuentes de alto poder
IEEE 802.15.4	-Es un protocolo que trabaja en frecuencias de 2.4 GHz y 868/915 MHz - Tiene una tasa de transmisión baja, funciona en tiempo real y tiene bajo consumo energético
IEEE 802.15.6	-Fue creado para uso especial en un tipo de WSN conocido como WBAN en Biomedica - tiene un rango limitado de milímetros a centímetros
Zigbee	-Tecnología Basada en el estándar IEEE 802.15.4, tiene alcances hasta de 3000 metros -Tiene un bajo consumo energético, Transmisión de 250 Kbps o 40 Kbps dependiendo la frecuencia
WirelessHart	-Protocolo de red inalámbrica libre para uso en control de procesos -Se utiliza como medio para transmisión de otros protocolos de comunicación funciona en la banda de 2.4 GHz

Tabla 2.2: *Protocolos y estándares de comunicación mas comunes para WSN*

Por otro lado, en las redes WSN se utilizan arquitecturas de red descentralizadas conocidas como AD-HOC las cuales se componen por diferentes partes, la más importantes son los sensores, los nodos, el Gateway y la estación base. En su conjunto, para el funcionamiento de una WSN se requieren diferentes tipos de dispositivos electrónicos, dentro de los más comunes para proceso, están los dispositivos Telo, telosb, mica, imote2 y sistemas más comunes como Arduino; todos estos, métodos propios para implementación de recolección de datos y sistemas de comunicación con diferentes protocolos.

2.6. Marco Legal

2.6.1. Normativa para redes WSN

Para el proyecto planteado, se tienen en consideración aspectos legales sobre las redes de comunicación inalámbrica, en este caso para la red WSN, pues al ser una tecnología que usa señales de radio, tiene una asignación dentro del espectro electromagnético para las comunicaciones entre los dispositivos de red. En Colombia, Los estándares que condicionan ese tipo de enlaces son los protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11, que regulan las frecuencias, canales y velocidades de transmisión [15]. Estos estándares se tienen en cuenta para el diseño de la red planteada para el proyecto de investigación.

A modo de resumen se muestran las siguientes tablas, acerca de las normas:

Frecuencia	Velocidad (Kb/s)	Cobertura	N. Canales
868-868.6 MHz	20/100/250	Europa	1
902-928 MHz	40/250	USA	10
2.40-2.48 GHz	250	Mundial	16

Tabla 2.3: *Recomendaciones Norma IEEE 802.15.4 [2]*

Para la recomendación IEEE 802.11

Versión Norma	Frecuencia (GHz)	Velocidad(Mbps)
802.11.n	2.4	108
802.11.g	2.4	54
802.11.a	5	54
802.11.b	2.4	11

Tabla 2.4: *Velocidad y frecuencias de transmisión IEEE 802.11 [2]*

Para el caso de las herramientas de software, que se usan se basan herramientas de software libre como Arduino y XCTU para la recolección de datos y un software con licencia académica de la universidad como MATLAB, para los procesos de estimación e interpolación de datos. Sin embargo, al ser necesario adquirir o comprar membrecía para softwares de sistemas de comunicación para trabajos futuros, o servicios en la nube, se procede estrictamente como lo dicta la Normativa Colombiana o las políticas internas del Servicio.

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1. Tipo de Investigación

Se opta por un enfoque de investigación cuantitativo, ya que se representa de forma objetiva una de investigación experimental, donde se busca analizar una variable física como la humedad del suelo, con los datos obtenidos de un entorno de cultivo real, mediante procesos matemáticos y estadísticos, como la calibración de sensores, el análisis Variográfico, interpolación de datos y colocación de sensores. Los cuales son vitales para cumplir el objetivo planteado.

3.2. Población

Aplicado a todo tipo de terrenos cultivados, áreas potencialmente cultivables

3.3. Muestra

El desarrollo del proyecto se basa en la toma de datos experimentales de humedad de suelo en un área de 8x8 m dentro de un cultivo de papá en el municipio de Úmbita Boyacá.

3.4. Variables

Cómo variables de interés se tiene el análisis humedad del suelo y de manera opcional se pueden involucrar otras variables en trabajos futuros.

3.5. Etapas Metodológicas

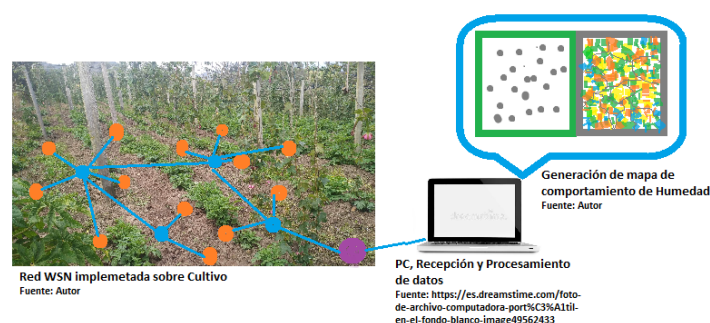


Figura 3.1: *Objetivo Metodológico total*
Fuente: Autor

Para el presente proyecto de investigación, se definen 4 etapas, la cuales tiene como finalidad dar los aportes esenciales, para generar un sistema como el que se representa en la figura 3.1. Consiste en generar el diseño de la red WSN, para un cultivo real, donde tomando datos en puntos previamente distribuidos, se pueda estimar la humedad de toda el área seleccionada de forma correcta con el menor error posible en las distribuciones de sensores, y que se vea reflejado en el mapa de humedad generado. Buscando ese objetivo, se describen las etapas metodológicas necesarias.

3.5.1. Calibración de Sensores

Como punto de partida, fue necesario caracterizar el sensor de humedad que se utilizó en el proceso, con el fin de obtener una ecuación para su lectura, que se asociara directamente al comportamiento que tiene el suelo, para hacer que los datos tomados fueran precisos.

3.5.2. Toma de datos Experimentales

De lo hecho con el sensor, ahora se adquirieron los datos de humedad del suelo en el cultivo, esos datos se obtuvieron de un cultivo de papa en un área seleccionada de 8x8 metros con medidas cada 40 cm, generando una grilla de datos de 441 puntos. Este proceso se repitió 3 veces con el fin de encontrar relaciones y hacer pruebas de los datos obtenidos y lograr la mejor caracterización posible en la siguiente fase.

3.5.3. Desarrollo de Algoritmos para Análisis

Para esta fase, con los datos obtenidos de la fase anterior, ahora se desarrollo en base a la revisión bibliográfica, un algoritmo que permitiera hacer la interpolación de la grilla de datos experimentales, para este fin, se usa el entorno de MATLAB y se analizan todas las muestras tomadas. Luego, en base a este, se construyó de otro programa para determinar las óptimas distribuciones y ubicaciones de sensores para la red WSN dentro del área estudiada.

3.5.4. Diseño de red WSN

Con el algoritmo de colocación óptima de sensores finalizado, en esta fase se desarrollaron los parámetros del diseño de la red, partiendo de la distribución de los sensores, los sistemas a utilizar, el método de comunicación, metodología de adquisición de datos y demás aspectos necesarios, con los cuales se hicieron pruebas para asegurar su funcionamiento.

3.6. Presupuesto

3.7. Recursos disponibles

Materiales	Computador personal Módulos Xbee, sensores de humedad DFROBOT, microcontroladores Arduino Uno y Mega.
Recursos	Licencias académicas de Software(Matlab, Labview)
Institucionales	Biblioteca CRAI Uta Tunja
Financiamiento	Recursos Propios Proyecto de la facultad FODEIN

Tabla 3.1: *Recursos Disponibles*

Fuente: Autor

El proyecto de investigación fue apoyado por el proyecto de facultad FODEIN “Sistema de visión artificial para monitoreo de rendimiento de cosecha en cultivos frutales” además de los rubros de la convocatoria I de proyectos CTel de la dirección de investigación de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

Capítulo 4

Calibración de Sensores

En el presente capítulo, se analiza todo lo referente a la calibración de los sensores de humedad (Higrómetros), utilizados para el diseño de la red WSN. Bajo características iniciales, el sensor analizado es el *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)* de DFROBOT, un sensor de humedad tipo capacitivo, de bajo costo compatible con Arduino. El cual posee una salida de datos análoga, por lo que para su lectura se necesita un conversor ADC, también es compatible con Raspberry PI y plataformas de la familia DFROBOT. En comparación con otros sensores de humedad de este tipo, se hace factible su uso debido a su precisión ya que no tiene un driver externo, pues viene incorporado dentro de la sonda, lo que facilita su transporte y uso en campo.

4.1. Metodología de Calibración

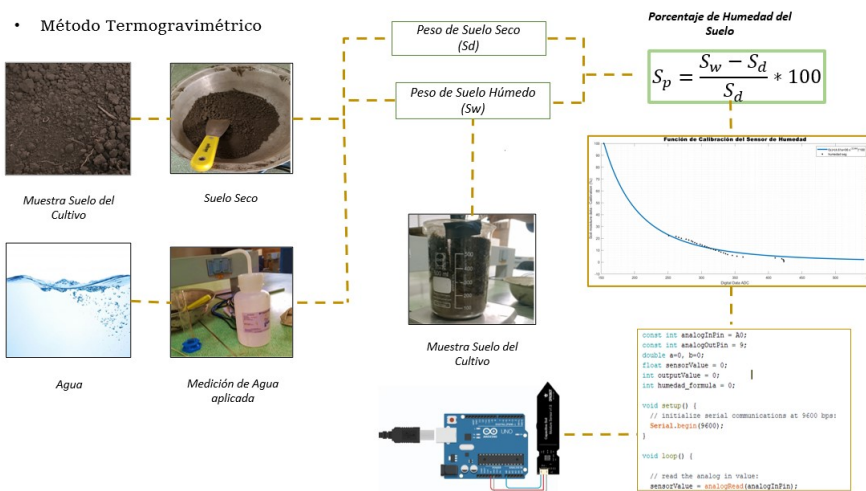


Figura 4.1: Metodología de Calibración Propuesta

Fuente: Calibration equation and field test of a capacitive soil moisture sensor 2020 IEEE MetroAgriFor

Para facilitar el proceso, se hizo una revisión bibliográfica de diversos investigadores acerca de técnicas más comunes para la calibración de higrómetros. Sobre estos, se especificaron algunas de las más usadas, métodos de fluido dividido, de dos presiones, soluciones sal agua [16]; también se revisaron métodos propios para calibración de sensores tipo capacitivo; con propuestas aplicadas a sensores de bajo costo con el mismo principio de medida dando especificaciones para calibración gravimétrica a sensores SKU: SEN0193 [17], técnica de la que se obtuvieron estimaciones de tiempo para realizar las pruebas. A partir de la revisión, para calibrar este sensor, se tiene en

cuenta la recomendación hecha por Souza [18], para los sensores de humedad Capacitivos, en la cual se propone una metodología de calibración basado en pruebas experimentales haciendo uso de técnicas gravimétricas y termogravimétricas, como se explica a lo largo de este desarrollo. En ese orden de ideas, como procedimiento inicial se enumeran los materiales utilizados para el experimento:

- Sensor de Humedad (Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3))
- Arduino (Con pin de Lectura análoga)
- Probeta Graduada de 25 mL
- Gotero de Agua destilada
- Balanza de precisión
- Vaso de precipitado
- Cronómetro

NOTA: Se describen en la lista anterior los principales elementos utilizados para la calibración de este sensor, no obstante, en las pruebas particulares se pueden usar otros elementos necesarios para mejorar la precisión del proceso.

Para la caracterización del sensor, se analizan las especificaciones técnicas del equipo dadas por el fabricante; donde como primer parte, se identifica el intervalo de profundidad recomendado, de tal forma, que no se afecte la funcionalidad ni la precisión de las medidas, como se relaciona en la figura 4.2.

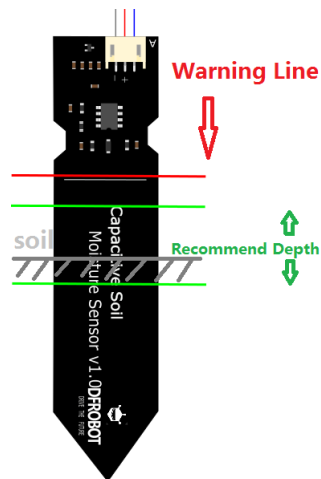


Figura 4.2: Rango de calibración

Fuente: wiki.dfrobot.com/CapacitiveSoilMoistureSensorsKUS-EN0193

Esto permite definir una zona de trabajo previa, que da el ajuste de altura a la que debe ser enterrada la sonda en la muestra. además, en este caso, se destaca que el sensor usado posee una cubierta plástica y cable encauchetado que permite más facilidad de manejo y trabajo en entornos externos, ya que es la versión 3 de esta familia de sensores.

Para las pruebas de la metodología de calibración, se hacen dos experimentos separados. Los cuales, se hacen a partir de la toma de una muestra de terreno del cultivo, donde se recolectaran los datos experimentales, este terreno pasa por un proceso de secado al aire libre, por un periodo de 7 días, o por un horno de secado, para extraer toda la humedad presente.

4.1.1. Toma de Datos Para Un Suelo Homogéneo

En esta primera experiencia, con el fin de analizar las características de absorción de la tierra, se toma la muestra y se muele de tal forma que se cree un suelo mas homogéneo, donde tomar los datos necesarios. La muestra de tierra se tritura, para eliminar gran parte de los terrones originales, y luego haciendo un proceso de tamizaje, se garantiza que todos los granos que tierra tengan un tamaño máximo de 2 mm como se muestra en la figura.



(a) *Muestra Original* (b) *Muestra Homogeneizada*

Figura 4.3: *Homogeneización de muestra del tierra (Prueba 1)*

Fuente: Autor

El siguiente paso, consiste en poner la muestra en el vaso de precipitado o en un recipiente que tenga suficiente altura, considerando el tamaño del sensor (10 cm) y la cantidad de tierra utilizada. Antes de esto, se debe tomar un registro con ayuda de la balanza, del peso del vaso y del peso de la tierra seca con el sensor, considerando este peso como partida para el procedimiento gravimétrico de calibración.



(a)

(b)

Figura 4.4: *Toma de registro de peso inicial para Calibrar*

(a) *Peso de Vaso Precipitado Vacío*, (b) *Peso de la muestra, mas el sensor*

Fuente: Autor

Para comenzar la toma de datos, de forma previa, se descuenta el peso del vaso de precipitado con una función de la balanza, dando esto como dato inicial 680.3 gr, que va corresponder, con el dato de la tierra seca, como se aprecia en figura 4.4 (b). Por otro lado, para la toma de datos del sensor, se utiliza el Arduino para la lectura del conversor análogo digital (ADC), mostrando este valor escalado de 0 a 1023 sin ningún tipo de ajuste, tan solo tomando la lectura. La conexión del sensor se hace según lo especificado en la hoja técnica, cuyo circuito se presenta a continuación.

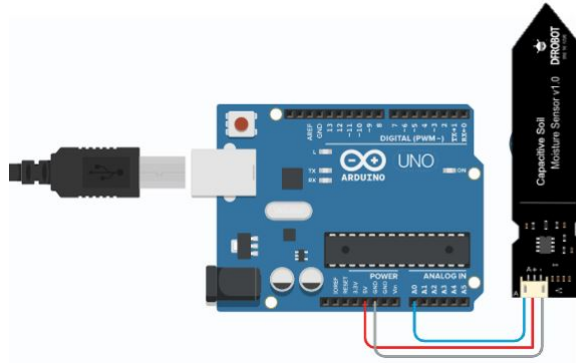


Figura 4.5: *Circuito para el Sensor*
Fuente: Diseño Tinkercat

Con todos los procesos preliminares hechos, la metodología consiste en tomar datos de peso de la muestra, a medida que se agrega una cantidad de agua cada cierto tiempo, y la vez ir registrando el valor obtenido del sensor. Las muestras registradas, deben separarse una de la otra por un estimado de tiempo suficiente, para que la tierra pueda absorber el líquido y el sensor vaya detectado estos cambios.

Para cumplir ese objetivo, el parámetro de profundidad se ajusta según lo recomienda el fabricante, y se ha cubierto la parte superior de la sonda, antes de poner la cantidad de tierra adecuada, para estar dentro del límite recomendado, figura 4.2. Enseguida, con ayuda de una probeta y un gotero, se miden 5 mL de agua, que se irán aplicado en intervalos de tiempo de 30 segundos, donde se tomarán los registros de variaciones de peso, los datos análogos del sensor y la cantidad de agua suministrada a la muestra.

Estos datos se registran manualmente y serán los que van a servir para hallar la relación de cambio de humedad de la muestra, con respecto a valor análogo entregado por el sensor. En este sentido, con la hipótesis planteada, para generar la gráfica se debe hallar inicialmente, una relación de proporcionalidad entre el peso del suelo seco y el cambio que sucede al añadir las cantidades de agua, para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_p = \frac{S_w - S_d}{S_d} * 100 \quad (4.1)$$

Donde S_p corresponde al porcentaje de humedad del suelo, S_w es el peso del suelo húmedo y S_d es el peso del suelo seco. Con la aplicación de la ecuación 4.1, a cada una de los datos, se halla el cambio o error porcentual que experimenta la muestra a lo largo de todo el proceso. Esos nuevos resultados, corresponden al eje Y de la gráfica, y representan la variación del porcentaje de humedad del suelo, en función de la información obtenida del conversor ADC del sensor.

4.1.2. Toma de Datos Para Un Suelo Heterogéneo

Continuando con la metodología propuesta en la figura 4.1 para la calibración gravimétrica, se hace una nueva prueba, para este nuevo experimento se toma una muestra húmeda de terreno y se pasa por un horno de secado, en el cual, se elimina todo rastro de humedad dejando la tierra preparada para el experimento. A comparación de tipo de suelo anterior, esta vez no se hace el proceso de tamizaje con el fin de trabajar con el terreno más heterogéneo de tal forma que solo se quitan las partes más grandes haciendo que el terreno sea menos compacto.

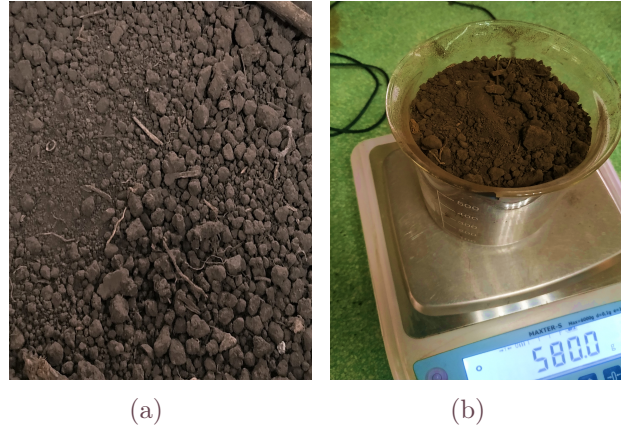


Figura 4.6: *Terreno Heterogéneo*
(a) características del suelo analizado (b) Muestra de Suelo Seco
Fuente: Autor

Bajo esas características, y continuado con el proceso descrito en la sección anterior, de nuevo se cubre la parte superior del sensor a fin de mantener el intervalo de medida recomendado por el fabricante, y se introduce en la muestra de tierra, donde se toman de nuevo los datos necesarios. En esta prueba, de nuevo se agregan cantidades de 5mL de agua cada 30 segundos, tomando un registro del cambio del peso de la muestra a medida que se satura y del valor analógico convertido, que entrega el sensor por pantalla.

Para esta ocasión, dado que la tierra no tuvo ningún otro acondicionamiento aparte del secado, se busca una saturación mas uniforme que no presente problemas de absorción sino hasta que la muestra se sature en su totalidad. En este caso, los datos iniciales fueron un peso del vaso de precipitado de 176.5 gr, un peso de la tierra sin el sensor de 580 g (figura 4.6 (b)), que completo es de 615.8 g, como peso de partida quitando el peso de recipiente. Posteriormente, se realiza la toma de los datos necesarios, y aplicando la ecuación 4.1, se obtiene la relación lineal del cambio de humedad en la muestra.

Capítulo 5

Análisis de distribución Óptima de Nodos

En este capítulo se analiza la capacidad y distribución óptima de nodos sensores dentro de un área real, partiendo de las características necesarias para la toma de datos experimentales, cantidad de datos y representación. Luego, se estudian las características de los datos, su distribución estadística y medidas de dispersión que dan forma para posteriormente desarrollar el algoritmo basado en análisis de Kriging, para determinar cantidad y posición óptima de nodos. Basado en la generación de múltiples mapas que se comparan con los datos originales, para encontrar el más óptimo de una forma más precisa.

5.1. Datos Experimentales

Como punto de partida para el calculo de estrategia de colocación, es necesario tomar una nube de datos experimentales dentro del terreno, con el fin de captar de forma experimental diferentes puntos y sus valores de humedad a lo largo de toda el área seleccionada. Los datos obtenidos relacionan dos parámetros, por una parte una aproximación de coordenada (x, y) dentro del área seleccionada y el valor porcentual (%) de la humedad del suelo en ese punto.

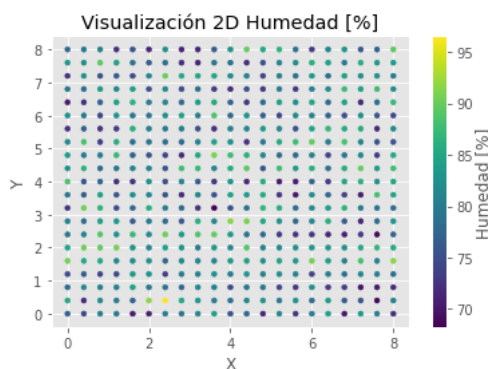


Figura 5.1: *Grilla de datos experimentales*
Fuente: Autor

A partir de todas la muestras tomadas en el terreno, la tabla se guarda en una archivo Excel, donde se relacionan todos los datos con su respectivo valor de humedad y coordenada. Este archivo se exporta al software de análisis MATLAB en el cual, se importan los valores de $(x, y, Humedad(\%))$. Para la ejecución de este proceso. La nube de puntos que se tomó en el área de $8m^2$ con una grilla de división de 0.4 metros por dato, se parametriza a los límites de 0 a 8 metros, condiciones bajo las cuales se obtuvieron los 441 muestras de humedad. Representada en tres dimensiones coordenada (x, y) y valor de humedad en Z, la distribución mencionada se presenta en la figura 5.1.

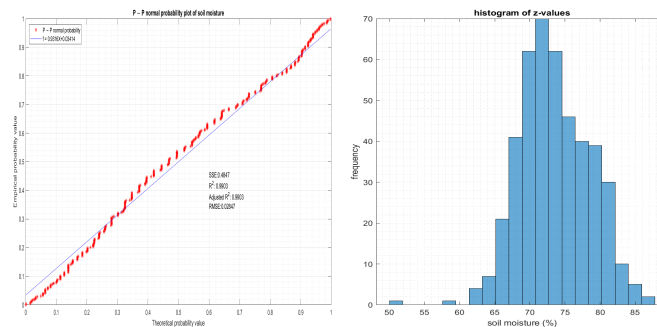
5.2. Parámetros para Análisis de Kriging

Obtenidos los datos experimentales, es necesario analizar sus condiciones estadísticas para conocer si la toma realizada se hizo de forma correcta y los datos están correlacionados o si de forma contraria se tiene demasiados datos atípicos que no permitan obtener un buen resultado. El fin, es obtener una distribución Gaussiana de tal forma que se presente una distribución estadística coherente de los datos. Así mismo, el análisis de medidas de tendencia central, tiene que responder con un análisis de varianza posterior, sobre los que se traza el mapa de interpolación.

Respondiendo a esas condiciones, es posible reconocer si los datos que se tomaron tienen un alto índice de error, o no se midieron de forma correcta, además de dar una certeza previa sobre la nube de puntos obtenida al relacionarse con el mapa de interpolación.

Por otro lado, es necesario hacer un análisis variográfico sobre los datos, ya que es sobre este análisis, que la interpolación por método de Kriging ordinario (OK) relaciona los puntos; además permite conocer las características del mapa que se generara, pues como se muestra en el *Marco Conceptual* el variograma designa mediante continuidad matemática la relación al comportamiento espacial de humedad del suelo en este caso, además de los datos involucrados en el proceso de interpolación.

Bajo esta premisa, de los datos que se tomaron, se exportan las tres columnas necesarias, de las cuales solo se usa la que contiene los datos del porcentaje de humedad, que es la variable analizada, en seguida se relaciona una línea de probabilidad para observar alguna anomalía en los datos.



(a) *P-P gráfica de probabili-* (b) *Histograma de datos, por-*
dad normal de la humedad del *centaje (%) de Humedad*
suelo

Figura 5.2: Verificación Estadística de datos

Fuente: Autor

De la gráfica se aprecia una aproximación coherente, que corrobora que la distribución frecuencial de los datos tiene relación y que se ha de asemejar a una distribución normal, considerando errores de frecuencias de valores atípicos. La distribución obtenida de los datos se relaciona en la figura 5.2. Con este parámetro obtenido, se resaltan que hay algunas frecuencias de datos poco comunes dentro de la distribución. Datos que dependiendo el tipo de variograma elegido para el análisis van a significar el efecto pepita o ruido en el variograma experimental.

5.2.1. Analisis variográfico Preliminar

Antes de trabajar con el algoritmo para el proceso de selección de puntos por el método geostatístico de interpolación de datos, se debe conocer el comportamiento de la variabilidad espacial de influencia de los diferentes puntos con respecto al cálculo de distancias. Para este fin, existen diversos tipos de variogramas, los cuáles relacionan una función matemática como base para interpretar todo el proceso, generan zonas de interpolación diferentes, por ende aunque el software de Matlab ya relaciona el cálculo del variograma de forma automática, sirve determinar sus características e identificar cambios en las distribuciones de frecuencias de los datos, pues en un

variograma, su meseta o punto de saturación, debe estabilizarse en un valor cercano a la varianza de la variable analizada.

Sin embargo, de acuerdo al variograma elegido pueden haber variaciones dentro del algoritmo. En el caso del ejemplo que se está trabajando el variograma experimental de los datos arroja el siguiente resultado:

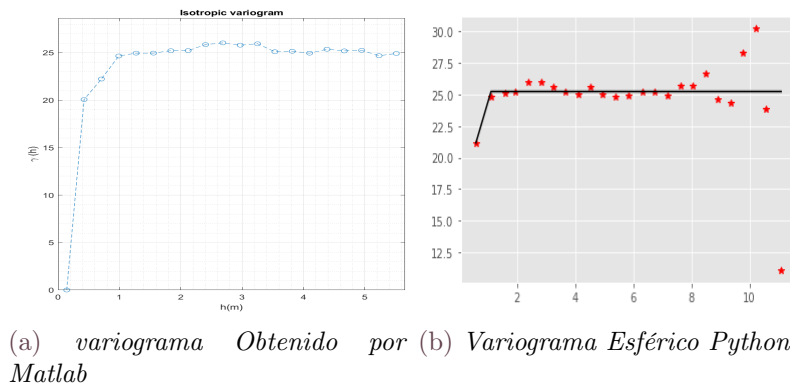


Figura 5.3: Variograma isotrópico de muestra de datos experimentales

Fuente: Autor

Con estos parámetros, es posible identificar en términos de análisis de la varianza, la semejanza de la meseta de los variogramas para conocer qué tan preciso puede ser el resultado, pues por medio de la verificación de estas herramientas estadísticas se determina la calidad de los datos de entrada al análisis de Kriging.

5.3. Algoritmo de distribución de nodos

La metodología para seleccionar distribuciones de puntos óptimos para la ubicación de los sensores, depende por un lado de los puntos donde se tomaron muestras experimentalmente y del cálculo de error posterior, que se determinara en función de un número M de repeticiones de diferentes distribuciones, que variara progresivamente la cantidad de nodos en determinada área, permitiendo obtener un porcentaje de error por cada repetición, que a su vez se relacionan con un número N de sensores que genere ese porcentaje y cuya distribución ya puede ser resuelta, en base a ese análisis o bajo otros parámetros estudiados en otras disciplinas para el análisis de suelos.

El algoritmo de distribución (fig 5.4) de nodos, es un factor importante al definir el análisis de comportamiento de una variable, en los sistemas que usan WSN (wireless sensor network) como medio de control o monitoreo, pues, de este depende que los datos que se recolecten del proceso, puedan ser lo más precisos posibles y den un alcance máximo, además de que contribuye a optimizar el diseño en lo que se refiere a la capacidad energética, materiales y en general, los costos de implementación.

Planteada esa idea inicial, ahora se describe paso a paso la metodología utilizada para el presente análisis en el proyecto. Se parte de conocer la organización y la estructura de los datos necesarios, como se muestra en la anterior sección; ahora con esos datos, se representa mediante un entorno de color variable considerando sus coordenadas y su valor, en este caso la humedad del suelo que es variable a estudiar con este método.

El sentido de esto, es reconocer las características de los puntos muestreados, a fin de que se obtenga de cada uno, los datos necesarios para generar un proceso de interpolación. Lo cual busca especificar un orden sobre el que se van tomar diferentes números y distribuciones de puntos, para observar su comportamiento. Enseguida el siguiente paso consiste en generar una selección de

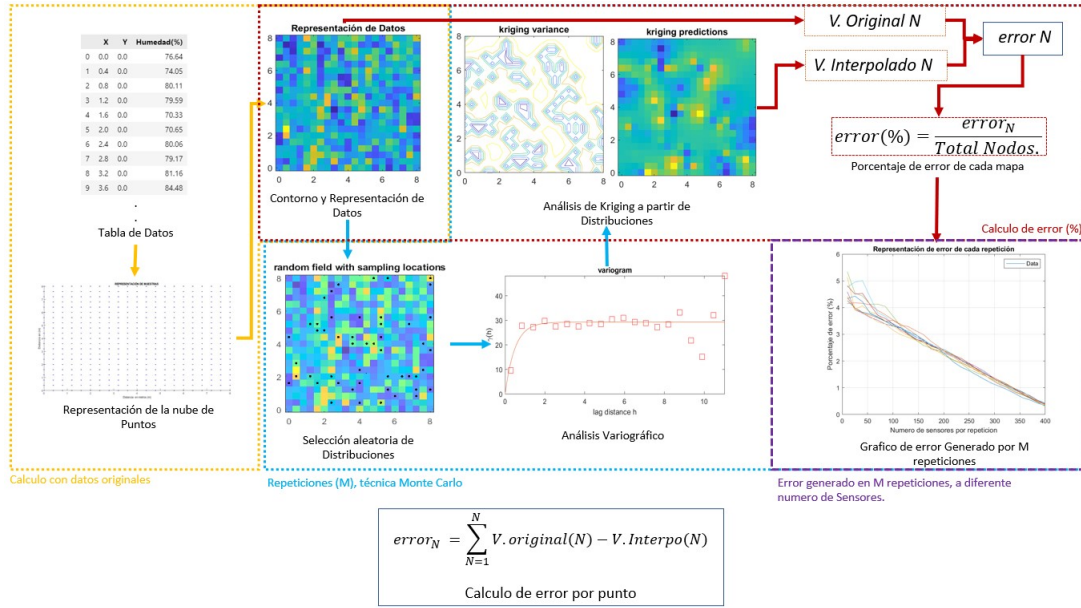


Figura 5.4: Metodología del algoritmo

Fuente: Autor

puntos aleatorios incrementalmente sin que se repitan, condicionados al número total de muestras tomadas.

Para el caso particular, en un terreno de $8\ m^2$ tomados a distancia de $0.4\ m$, se obtienen 441 puntos que en la prueba se incrementan ascendente de 10 en 10 o según las consideraciones del operario del algoritmo. Como se evidencia en la fig 5.4, cada selección aleatoria de puntos es la partida de la sección de M repeticiones de la técnica Monte Carló, que luego va pasar a generar un variograma experimental de análisis de comportamiento, donde se puede identificar su correlación espacial y varianza, para luego generar un análisis de Kriging, que interpole este número de datos hasta generar una nueva representación con una matriz de igual tamaño (21×21), tal como representa el siguiente paso de la metodología presente. Es importante mencionar, que el algoritmo se adecua al tamaño del mapa original, así que al hacer cambios en la cantidad de puntos la matriz de datos se reduce o aumenta, no obstante, el mapa obtenido luego de interpolar las ubicaciones de los puntos aleatorios, busca conservar el tamaño original.

Con ese nuevo mapa de diferencia generado con el análisis de Kriging, el proceso siguiente, es hallar el error general de los puntos interpolados con respecto a los puntos originales. De la figura 5.4 se observa el resultado “predicciones de Kriging” donde se ha generado un nuevo mapa a partir del variograma y la correlación de los punto entregados, cuyos valores resultantes deben predecir o asemejarse a los valores de humedad de todos los puntos originales, de esta manera saber que tantos puntos se necesitan para implementar la red WSN y que su predicción sea lo mas acertada posible.

La formula en general, como muestra el recuadro azul de la metodología, es el calculo del error por punto $error_N$, que se toma cíclicamente, de forma ordenada, corresponde a la resta del valor de humedad de una coordenada del dato original menos la misma coordenada del dato generado por interpolación; Así ese valor de error por cada punto, se va sumando hasta alcanzar el valor N total de puntos, generando un solo valor que sera la suma de todos los errores individuales de los puntos. De esa manera el método estima la predicción, con respecto al original.

$$error_N = \sum_{N=1}^N V.Original_N - V.Interpolado_N \quad (5.1)$$

Posteriormente, se evalúa el error total del mapa, que corresponde a la suma de los errores punto a punto, obtenidos de la ecuación anterior, sobre la cantidad total de puntos presentes en los mapas, que en relación a las muestras experimentales es de 441, numero que varia con respecto al área en que se aplique el algoritmo, la distancia que se tomen los puntos y como se distribuya la toma de muestras. Al presente caso de estudio, el N=441 representa la totalidad de sensores con los que se estimaría el comportamiento de la humedad, sin embargo, entre mas muestras se tomen mas preciso sera el sistema y por ende se obtendrán mejores resultados.

$$error(\%) = \frac{error_N}{TotaldeNodos} \quad (5.2)$$

Por otro lado, calculado el error porcentual de cada mapa generado, ahora se emplea la técnica Monte Carló para evaluar una cantidad M de veces diferentes distribuciones de puntos e ir obteniendo el porcentaje de error que generar cada variación, porcentaje que se va almacenando por cada repetición, para generar luego un gráfico resultante que resalte el comportamiento de error porcentual, así, evaluadas esas M repeticiones en diferentes ordenes de distribuciones, se puede obtener el error generado en cada repetición a diferente cantidad de sensores y observar su comportamiento. Luego se hace un promedio para identificar cual tiene una media de error mas pequeña y escoger la tendencia con la que se puede saber con precisión un numero óptimo de puntos necesarios. Un método también basado el principio de repeticiones, se puede encontrar en la bibliografía [19], donde por medio de un análisis por medidas de tendencia central y distribución estadística, se genera una grilla de datos de concentración de cobre, donde se busca encontrar la varianza minina.

Para validar la información antes obtenida, se genero una interfaz dentro de Matlab que permitiera observar las distribuciones que en base al calculo anterior tuvieran el porcentaje de error mas bajo con un diferente numero N de sensores, dando esta herramienta al operario del algoritmo, para lograr interactuar de una forma gráfica con las distribuciones óptimas por cantidad de sensores y por coordenada, que luego de ser analizada, desde los diferentes puntos de vista se puede exportar a un archivo Excel, donde se recoge el numero de puntos tomados, y la coordenada (x,y) listando ese punto en cuestión, dentro del área. figura 5.5

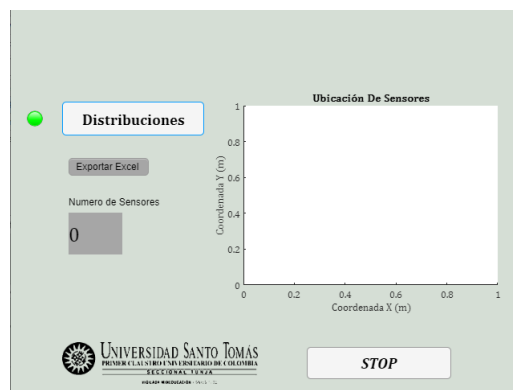


Figura 5.5: App diseñada en Matlab

Fuente: Autor

De esta forma se compone el algoritmo de selección y distribución de nodos para una red WSN, que puede ser aplicable a otros tipos de datos, cumpliendo con las características específicas explicadas a lo largo del capitulo.

Capítulo 6

Comunicaciones Inalámbricas Zigbee para WSN

En este capítulo, se reúne brevemente el uso de las características de la tecnología Zigbee para aplicaciones de comunicaciones inalámbricas por medio de los módulos Xbee, como forma de interactuar y recrear un modelo de red, respaldada en la revisión bibliográfica como la investigación de Gómez y Duran [20], donde se comprenden los parámetros, que pueden ser adaptados a la comunicación de varios nodos sensores utilizando banda de RF libre, dentro del diseño de la red WSN.

6.1. Topologías de Red posibles

Un primer entorno a analizar, sobre el sistema de comunicación de una red inalámbrica, es identificar las características de la red que se requiera. Para este fin, se usan módulos Xbee pro serie 2 T, los cuales funcionan a una velocidad de transmisión de 9600 Baudios y una tasa de transmisión de datos de 250 Kbs, que corresponde al estándar IEEE 802.15.4, como se describe en la tabla 2.1. El estándar Zigbee, dentro de su funcionamiento permite diferentes topologías de red, por su facilidad de adaptación a la arquitectura planteada, haciéndolo un protocolo versátil y apropiado para redes de bajo tráfico. Las principales topologías de redes usadas son:

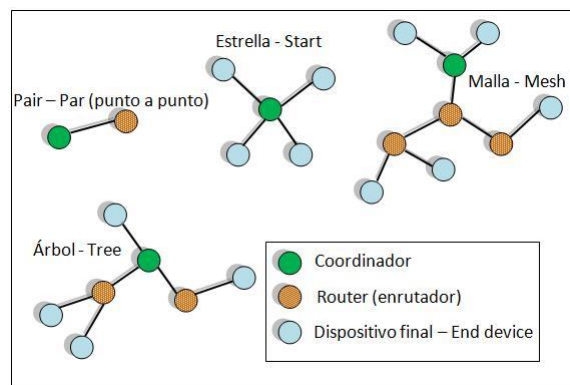


Figura 6.1: Topologías lógicas de redes Zigbee
Fuente: Zigbee ¹

Como se aprecia en la figura anterior, las topologías lógicas que ofrecen los módulos con Zigbee tienen diferentes formas que dependen directamente de la configuración que se dé a cada módulo, de forma independiente. Los módulos Xbee presentan tres configuraciones básicas: Coordinador, Router y dispositivo final [21]; Además de sus dos modos de operación; modo transparente por comandos (AT) y Application Programming Interface (API), los cuales limitan las características de la forma de comunicación y la magnitud de la red que se puede diseñar.

Como se mencionó en el objetivo metodológico (figura 3.1, el propósito de es generar una topología de red tipo estrella, que dependiendo de la forma y dimensiones del área que se está analizando, se puedan tener las tres formas de configuración de los Xbee, esta particularidad se

debe a que cada forma de configuración condiciona la eficiencia energética y de software, que se pueda obtener en la topología general, pues las diferentes configuraciones establecen si el módulo trabaja en una forma activa en envío y recepción de datos, o solo de forma pasiva de activación para envío, que son ventajas del modo dispositivo final.

6.1.1. Topología de red practica

Para poner en práctica el diseño parcial de comunicación inalámbrica, en una área pequeña, se desarrolla una topología por la cual se configuran 3 módulos Xbee para que se comuniquen entre ellos, la topología lógica se compone de un Xbee Coordinador, un Router y un dispositivo final que se comunican mediante el modo transparente (AT), para recibir información de dos nodos diferentes.

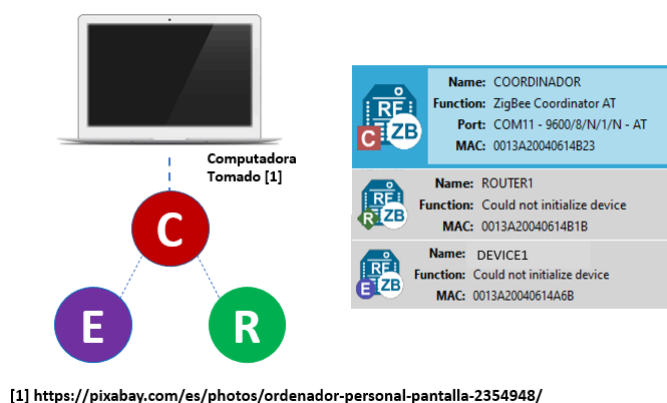


Figura 6.2: Propuesta de una topología practica
Fuente: Autor

La lógica consiste en generar trafico desde el *Router1* y el *Device1*, de tal forma que los datos que se generen se reciban en dispositivo coordinador AT, el cual trabaja en este modo como una comunicación serial, que reconoce la información de los dos dispositivos, pero no los diferencia. [10]

6.2. Configuración de Módulos Xbee

La topología de red propuesta en la figura 6.2 se configura en el modo transparente, conociendo inicialmente las características del modulo, como las direcciones identificadoras y funciones de protocolo Zigbee en Xbee. Para esto, como primer paso con el software XCTU se reconoce el modulo, con ayuda de una camilla programadora, por medio de este se lee y se actualiza su firmware al modo de operación necesario Router AT, Router API sucesivamente. Es importante resaltar, tal como se recomienda en algunos ejemplos de aplicaciones hechas y la documentación de Xbee, que independientemente del modo de trabajo, cada modulo posee dos direcciones particulares que permiten su comunicación; *Serial Number High* (SH) y *Serial Number Low* (SL) y serán la referencia de la comunicación punto a punto.

En la plataforma XCTU que brinda DIGI como fabricantes de Xbee, permite leer todos los parámetros del módulo, en la figura 6.3 se resume el proceso de configuración. Lo primero para todos los dispositivos que hacen parte de la red es tener un PAN ID igual, para el caso "1000", que será la referencia de la red, enseguida para los Xbee que se enlazan al coordinador, se debe asignar los campos *SH Destination* y *SL Destination* que corresponde a las direcciones MAC (SL) y reconocimiento (SH) de COORDINADOR, como lo referencia las flechas rojas en la figura, por último en la comunicación AT el coordinador se debe ajustar de tal modo que reciba la información de todos los dispositivos que le envíen datos; Para este fin, los campos en SH y SL de destino se

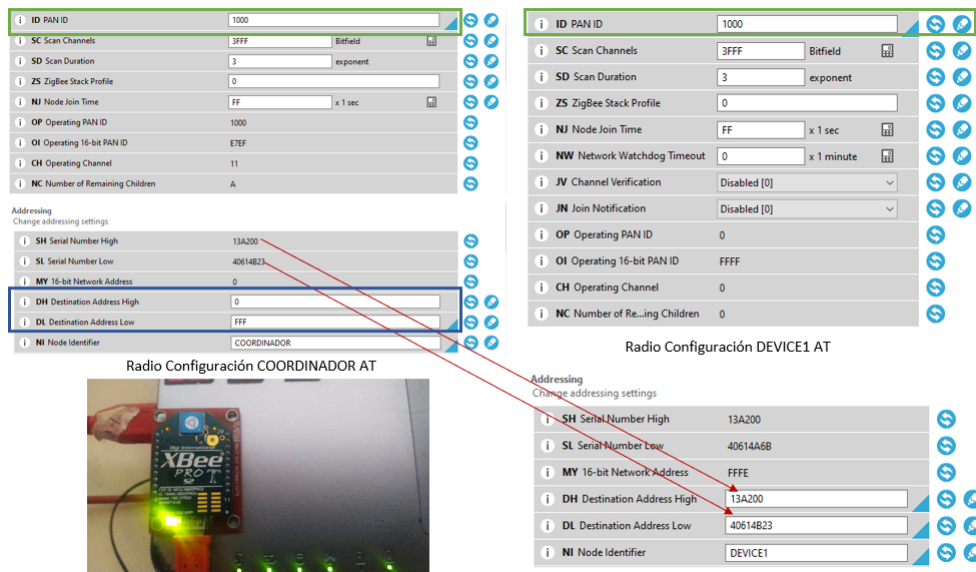


Figura 6.3: Configuración de parámetros AT Xbee

Fuente: Autor

completan con 0 y FFF, lo que significa mensaje tipo Broadcast para aceptar todo el tráfico de los demás módulos.

6.2.1. Algoritmo para lectura de datos

Configurados los tres módulos, en Arduino se programa la lectura ADC comunicada a través de puerto serial al cual se conecta el Xbee. Con la transmisión de datos ya funcional, el Coordinador recibe la información inalámbrica y la direcciona en un puerto COM, mediante conexión USB, luego, con ayuda de Matlab se hace la lectura del puerto serial, y se interpretan los datos como se muestra en la figura 6.4.

La lógica del algoritmo seguido, en relación con el modo de trabajo del módulo Xbee, está vinculada a que él envió de datos es punto a punto, por lo tanto, la diferencia de origen de los mismos no es perceptible por el módulo. En consecuencia, a esto, en código se genera una referencia para cada dato, coordinada por una letra del abecedario, así cada nodo tiene una letra que lo identifica y que por algoritmo se puede diferenciar, teniendo la cuenta que la lectura del sensor varía de 0-1023. Es importante mencionar, que el proceso seguido para obtención de los datos, se debe optimizar para aplicaciones a una escala mayor o para diferente número de sensores. Aunque el algoritmo desarrollado pueda ser compatible para implementar más sensores, tan solo repitiendo la función para otro identificador, su modo no es eficiente y puede ser mejorado usando el Modo API del Xbee donde ya se reconocen tramas completas de datos que tienen un datagrama específico evadiendo esta rutina, logrando que el proceso sea más eficiente a condiciones de mayor escala.

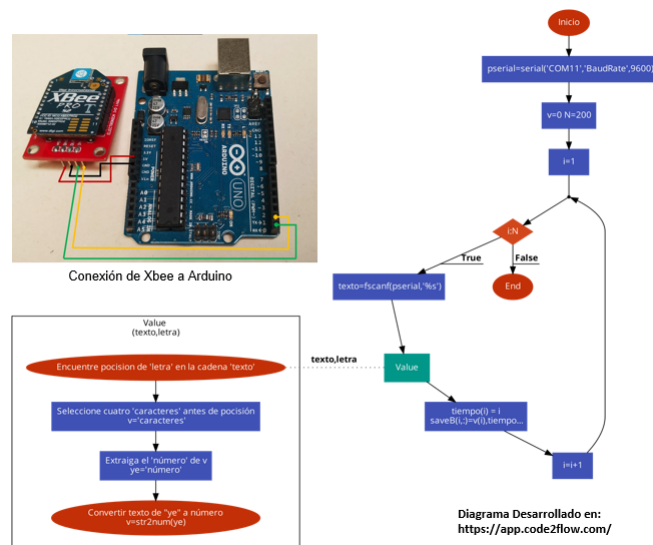


Figura 6.4: *Algoritmo para lectura de datos*
 Fuente: Autor

6.2.2. Circuito de Un Nodo Sensor

La tecnología Zigbee es fácilmente adaptable al uso de microcontroladores como Arduino [22], cuya distribución globalizada permite la vinculación de estos dispositivos mas fácil que con otros sistemas embebidos. De esta forma, considerando la independencia energética de cada nodo sensor en una red WSN, se debe incluir un circuito de alimentación que permita al nodo estar activo el mayor tiempo posible. Dependiendo de las características de la red, se puede hacer uso de energías alternativas como la fotovoltaica para este fin, analizando esta posibilidad y contemplando las especificaciones de implementación, se propone una estructura básica de un nodo sensor, con el uso de un panel fotovoltaico y Arduino.

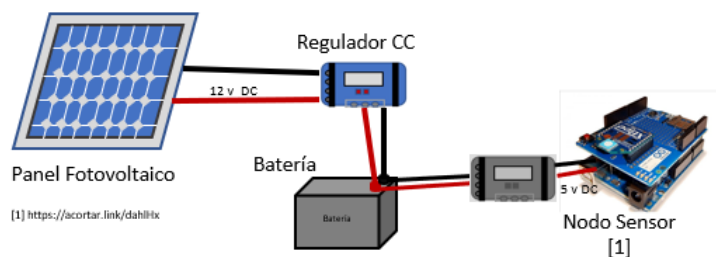


Figura 6.5: *Circuito de un nodo sensor*
 Fuente: Autor²

Capítulo 7

Análisis de Resultados y Discusión

A lo largo del diseño del sistema de estimación de humedad se abordaron tres temas en específico: Análisis de distribución y ubicación de sensores, Calibración de Sensores y comunicación inalámbrica Zigbee para WSN, los cuales se analizaron a detalle en los capítulos anteriores. En este capítulo se mencionan brevemente los resultados más relevantes obtenidos con las pruebas correspondientes hechas para llevar a cabo el proceso de diseño, además de las formas de optimización y aplicaciones.

7.1. Calibración de Sensor de Humedad

De los resultados logrados la caracterización del sensor a utilizar dentro del parámetro de medición de humedad, es importante para dar soporte a la función matemática que se asigne respaldada en pruebas, por esta razón desde la investigación en la bibliografía, se adoptó el método termogravimétrico para calibrar el sensor. En laboratorio se hicieron las pruebas registrando los datos, sobre los cuales, se mencionan algunos resultados.

Por un lado, en las pruebas experimentales es posible identificar una relación casi lineal entre el cambio de peso que se experimente con el suministro de agua y cantidad en mililitros agregados, dado que el agua tiene una densidad a condiciones de temperatura promedio, de aproximadamente 1; por tal razón, al agregar 5 mL el cambio de peso debe ser alrededor de 5 gr.

También, es claro que a mayor cantidad de datos tomados, se mejora la precisión de la ecuación que se obtenga de estos. Sin embargo, esto se ve limitado por la capacidad de absorción que tenga la tierra, pues aunque se agreguen cantidades de agua pequeñas a intervalos de tiempo considerables, las condiciones de la tierra pueden afectar negativamente con una absorción lenta que causa apozamiento en la parte superior del recipiente utilizado.

Como se observa en la figura 7.1, a medida que se agregaron los mililitros correspondientes a la muestra, el líquido debe ir filtrándose como se puede evidenciar, sin embargo, para esta prueba con un terreno homogéneo, se han observado algunos inconvenientes referentes al número de muestras que se han logrado obtener. Como ya se ha mencionado, esto depende de la capacidad de absorción, además, este caso se presenta porque buscando esta mayor homogeneización en el terreno, se ha conseguido una estructura compacta, lo que ha causado un apozamiento temprano, debido a que no hay espacios por donde pueda filtrar el agua, haciendo que el proceso sea sumamente lento, a comparación de los 30 segundos con los que se han agregado las cantidades. Algo semejante ocurre, al agregar cantidades de agua muy grandes en periodos de tiempo muy cortos, por lo cual, es importante que para mejorar la calidad del procedimiento se analice detalladamente las condiciones previas a tomar los datos.

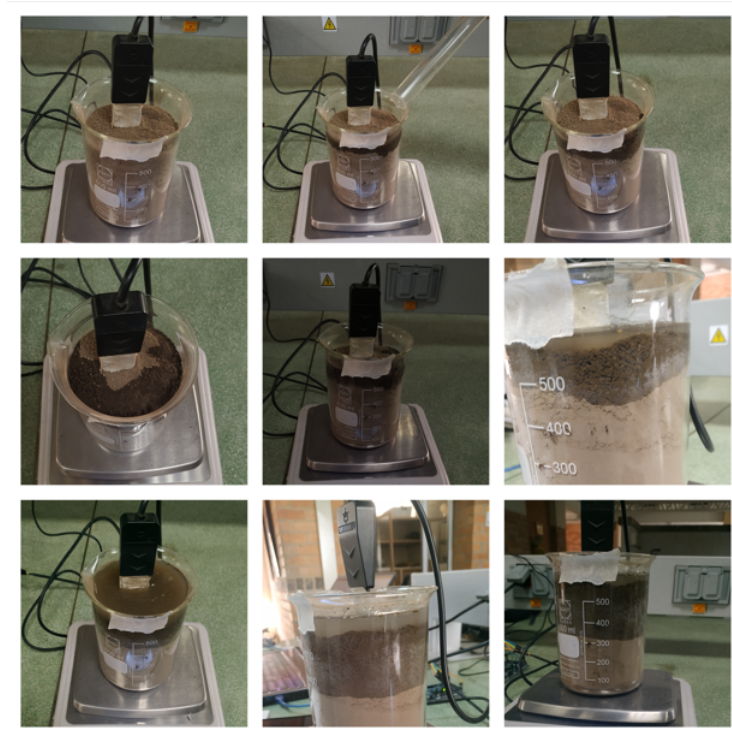


Figura 7.1: *Collage de saturación progresiva de muestra del terreno*
Fuente: Autor

En la segunda prueba realizada se han obtenido mayor cantidad de puntos que en la prueba con tierra homogénea. Esto debido a que la tierra está menos compacta y la absorción del agua es más rápida, en ese orden de ideas, teniendo en consideración las variaciones hechas a la muestra se han extraído los valores correspondientes de valor digital y datos de peso, no obstante aunque en esta ocasión las mediciones fueron más extensas, los resultados que se obtuvieron no tuvieron mayor variación dando ecuaciones de comportamiento menos eficiente y mas complejas que al llevarse al proceso de calculo dentro del controlador pueden ocasionar problemas de eficiencia.

Como características en particular, al lograrse una absorción del liquido adecuada la adición de agua a la muestra se hizo durante media hora, agregando un total de 300 mL sobre la muestra inicial. Además de eso, también a modo experimental se aprovecho el proceso, para observar la curva de saturación del suelo analizado, observando su cambio a través del tiempo hasta que se logro una saturación en toda el área. Este resultado también aporta un punto significativo dentro de la investigación pues demuestra de forma relativa, el comportamiento de la absorción de liquido, para un determinado tipo de terreno a condiciones de temperatura comunes entre 15-20 °C, así poder establecer un comportamiento estimado, de la variación de la humedad con el tiempo. Por otra parte, la gráfica de saturación de humedad de la muestra, se asemeja al comportamiento de una exponencial negativa, considerando la parametrización del sensor, cuyo principio es inversamente proporcional; cuando hay un nivel de humedad seco o nulo se muestran valores grandes, y en entornos muy húmedos los datos son pequeños, tal como se muestra en la gráfica obtenida. Estos datos, además de evidenciar el comportamiento de la muestra, sirven como referencia para comprender la velocidad y forma de saturación de la tierra.

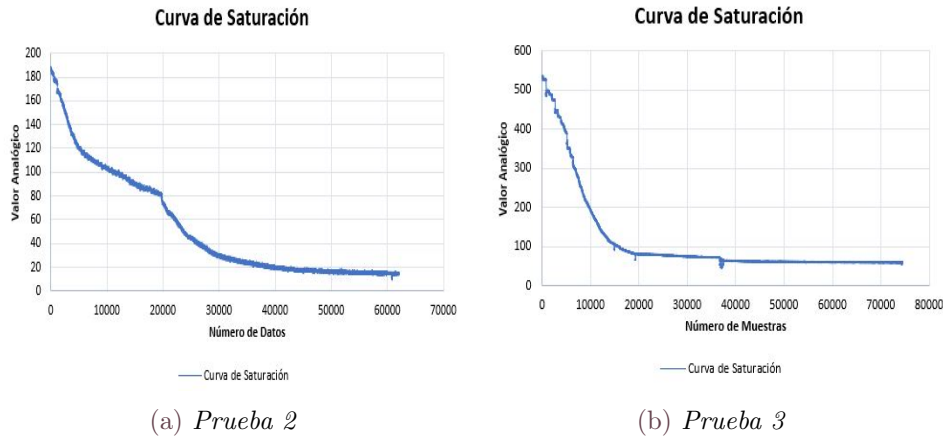


Figura 7.2: *Curva de saturación del muestra de tierra*
Fuente: Autor

Concluyendo la explicación detallada de la parte experimental de esta prueba, se pasan a analizar los resultados obtenidos con los datos recolectados. Continuando con el proceso metodológico planteado en la figura 4.1, y tomando como referencia los pesos de la muestra y valor digital del sensor, se obtiene la representación gráfica, del comportamiento del porcentaje de humedad en los dos tipos de pruebas.

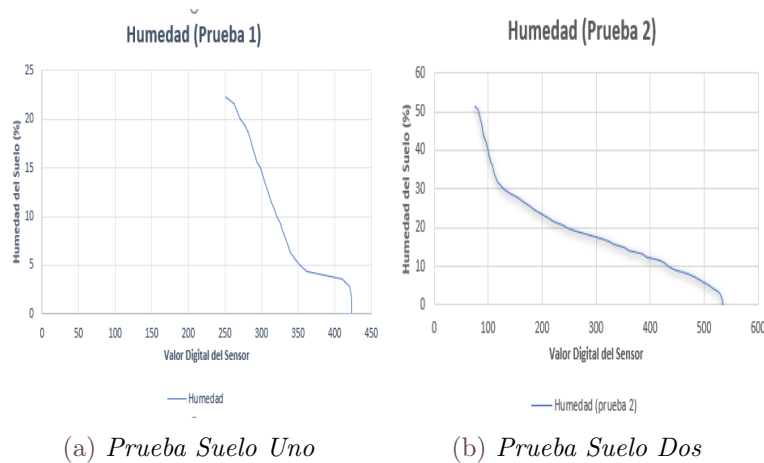
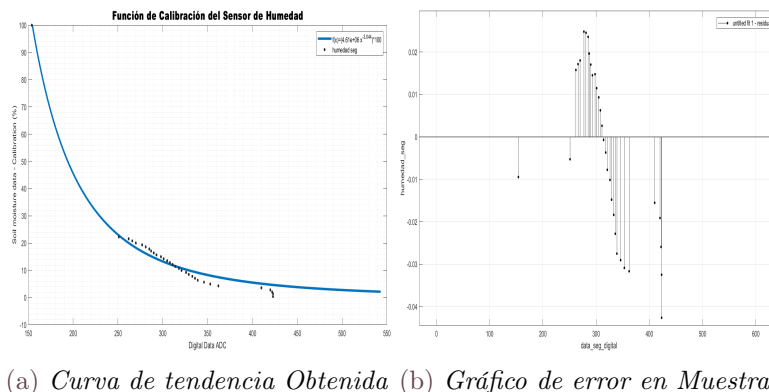


Figura 7.3: *Datos Obtenidos para Calibración*
Fuente: Autor

Con los datos de la figura 7.3, en Matlab se importan los valores calculados correspondientes y en el *Curve Fitting* se halla la mejor función de tendencia con su gráfico de error en comparación con la muestra. Como parámetros para la elección del tipo, forma y grado de la ecuación buscada, se priorizo la eficiencia de la misma, en relación a los datos del experimento y los puntos límites donde los datos del sensor estimaban los valores mínimos y máximos, además de eso, se busca una representación de tendencia con una ecuación simple, que fuera fácilmente adaptable a procesos individuales donde la capacidad de procesamiento sea baja y se necesite maximizar eficiencia.



(a) Curva de tendencia Obtenida (b) Gráfico de error en Muestra

Figura 7.4: Comportamiento de formula de Calibración

Fuente: Autor

De lo obtenido a partir de los datos, se optado por una linea de tendencia tipo potencial, ya que presenta una buena similitud al compararla con la distribución, además de que se adapta de forma mas precisa que los demás tipos de linea de tendencia. La ecuación resultante es la siguiente:

$$S_p = 4610000 * X^{-3,044} \quad (7.1)$$

la ecuación 7.1, representa el resultado final del proceso del calibración. pues con esta, ya es posible tener una aproximación mas concreta del comportamiento de medición del sensor, que fue la razón por la que se tomaron inicialmente los datos analógicos. Partiendo de una aproximación del 98 % a los datos recolectados en laboratorio, esta ecuación se ha acercado a resultados logrados por otros investigadores [23].

Cabe mencionar, que aunque se hicieron pruebas con la muestra de tierra del cultivo analizado para el diseño en general, la calibración es óptima, no obstante, pueden haber cambios en tipos de terrenos distintos; por lo que para mejorar en precisión, desde la bibliografía se pueden buscar nuevas referencias para la caracterización de sensores, si se busca incluir mas variables al análisis.

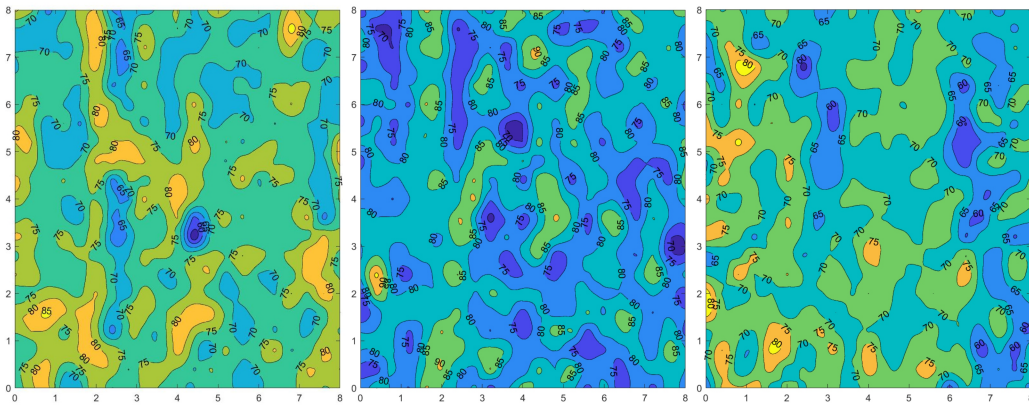
7.2. análisis de distribución óptima de nodos

Como principio básico de los datos obtenidos, el terreno donde se toman las muestras, es un área seleccionada dentro de un cultivo de papa, en un cuadrado de 8x8 metros, allí buscando hacer el procedimiento lo menos invasivo posible y considerando los constantes procesos que el agricultor requería hacer con el cultivo, el área se delimito solamente por los bordes exteriores, evitando que se presenten inconvenientes. Con estas referencias, y una cinta métrica se van uniando las delimitaciones exteriores correspondientes y tomando los datos respectivos, cada 0,4 metros en las 21 filas generadas. Al ser necesario que el circuito de toma de datos fuera lo más móvil posible, el conversor análogo digital (ADC), se alimentó a partir de una batería portátil, que energizaba el controlador, el sensor y en este caso un LCD de 16x2, donde se mostraban visualmente los datos del sensor. Con esto, se logra tener una medida rápida vista desde la LCD, donde esperando una estabilización del dato mostrado, se va registrando en una tabla. Por otro lado, para una toma de datos experimentales de este tipo, se recomienda tener una herramienta para ablandar la tierra o abrir el agujero donde se va tomar el dato, ya que al ser una cantidad considerable de puntos a tomar, el sensor se deteriora con el rozamiento continuo con la tierra o se puede romper, por lo que es importante dependiendo también el tipo de terreno.

Figura 7.5: *Cultivo de Toma de Datos*

Fuente: Autor

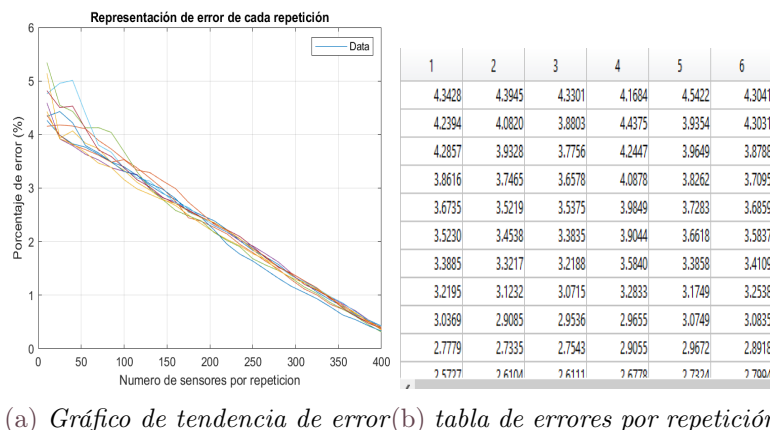
Esta toma de datos, etiquetadas cada 0.4 metros, se hicieron bajo pruebas parciales con el sensor de humedad *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)* cuyo proceso de calibración se muestra en capítulo 4 . Se realizaron toma de estos datos experimentales 3 veces, con las mismas condiciones, bajo las cuales se hacen las pruebas para obtener los primeros resultados.

Figura 7.6: *Mapas Kriging de los datos experimentales*

Fuente: Autor

Con los datos recolectados en el cultivo de papa seleccionado, se aplicó el algoritmo de análisis de Kriging con el uso de la técnica monte carló, para lograr el mejor resultado posible dentro de las distribuciones que se prueban durante el proceso. Para la corroboración de los datos se muestra una gráfica de porcentaje de error, en función a número de nodos sensores, de la cual se obtiene una tendencia decreciente a medida que aumenta la cantidad de puntos que se tienen en cuenta para calcular el Kriging.

Como ya se explicó anteriormente, el mapa que se genera a partir de la distribución de puntos aleatorios tiene el mismo tamaño que el mapa original del que se compara los puntos; Por ende, es posible calcular el resultado exacto del error porcentual a un número determinado de nodos, sin importar la representación que se realice para obtenerlo. Sin embargo, es importante saber que hay un número mínimo de puntos posibles que se puede asignar para generar el mapa de interpolación, pues, si se toman cantidades de puntos muy pequeñas el parámetro inicial sobre el que se estructura el mapa Kriging puede incurrir en errores en el cálculo.



(a) Gráfico de tendencia de error (b) tabla de errores por repetición

Figura 7.7: Datos Obtenidos para Calibración

Fuente: Autor

Adicionalmente se muestra la vista desde la interfaz gráfica, donde se representan las ubicaciones de los nodos que generaron la distribución mas óptima, en comparación del mapa Kriging de los datos experimentales utilizados.

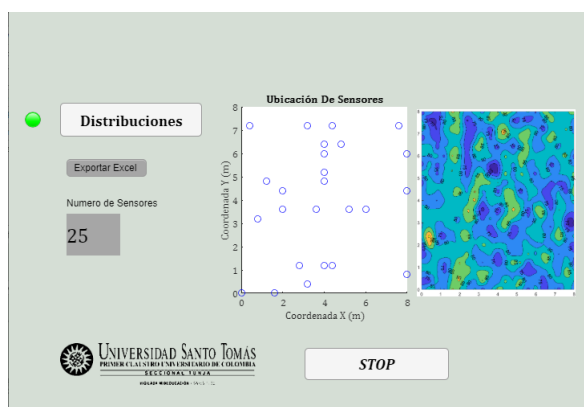


Figura 7.8: Funcionamiento Interfaz

Fuente: Autor

En concreto se puede afirmar, que el método mejora su eficacia a mayor numero de repeticiones, obteniendo el resultado mas óptimo. Se resalta que esta técnica no es nueva y es muy usada en varias disciplinas para procesos complejos ya que permite la evaluación de múltiples respuestas, a su vez puede ser mejorada implementando dentro del algoritmo métodos de selección mas robustos como gradientes que aunque exijan mas procesamiento puede llegar a ser mas efectivos.

7.3. Comunicación Inalámbrica por Zigbee

Como medio, para probar la comunicación en modo transparente (AT) de los módulos Xbee, se ha establecido la comunicación entre tres de ellos, cada uno en modo diferente como se especificó, de allí por medio de un enlace serial se tomaron datos ADC de dos dispositivos separados, simulando dos nodos distintos con retardos de envío de 400 mS, con esas características los datos tramitados inalámbrico se han exportado a un archivo Excel. dentro del proceso de prueba no se evidencio error ni perdidas de datos por los módulos de radio dejando al estándar IEEE 802.11.4 como un protocolo altamente factible para redes WSN en aplicaciones de bajo tráfico.

En el contexto de redes WSN como se describió en la tabla 2.2, existen diferentes protocolos, para implementaciones, siendo estos condicionados por las distancias de transmisión y el ancho de

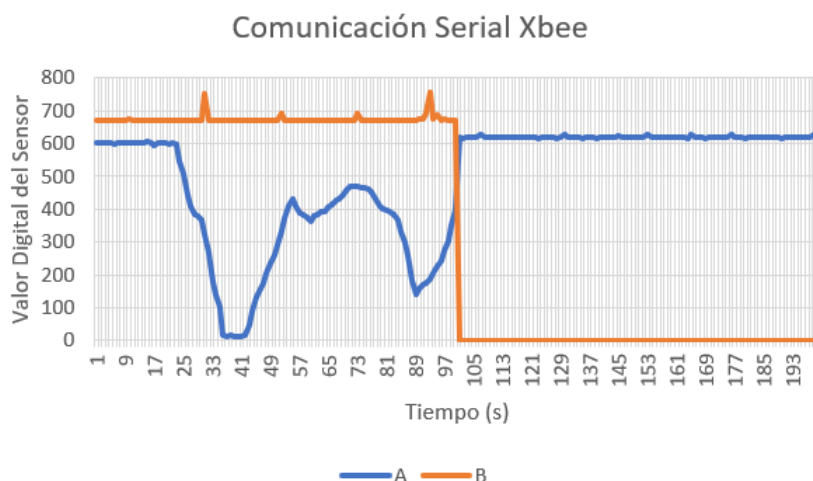


Figura 7.9: *Comunicación Serial, Datos exportados a Excel*

Fuente: Autor

banda permitido, por lo que es necesario hacer un estudio riguroso de especificaciones para cada aplicación. No obstante, en aplicaciones de WSN a una escala media es altamente recomendable el uso de Xbee para transmisión de datos, pues aunque no cuenta con ancho de banda muy amplio responde sin pérdidas a la prueba de transmisión hecha, y como se logró evidenciar en la bibliografía, en sistemas más complejos se debe programar en modo API para poder recibir información de varios módulos e identificarlos.

Conclusiones

Se propuso mediante la investigación, una metodología basada en el método termogravimétrico, para la calibración de sensores de humedad en especial el *Capacitive Soil Moisture Sensor (V0.3)*, la cual, funciona con buenos resultados, obteniendo una asertividad sobre los datos medidos de arriba de un 98 %, que al compararse con artículos de investigación, se asemeja de buena forma con las ecuaciones obtenidas de sensores similares que se basan en el mismo principio de funcionamiento, lo que deja a esta metodología como posible opción a tener en cuenta para la calibración de higrómetros para otros proyectos.

En la calibración de sensores es claro que, a mayor cantidad de datos tomados, se mejora la precisión de la ecuación que se obtenga de estos. Sin embargo, esto se ve limitado por la capacidad de absorción que tenga la tierra, pues, aunque se agreguen cantidades de agua pequeñas a intervalos de tiempo considerables, las condiciones de la tierra pueden afectar negativamente con una absorción lenta, que causa apozamiento en la parte superior. Por lo que de forma preliminar, es recomendable probar cuanto se tarda en absorber la cantidad de agua la muestra de tierra.

El análisis de Kriging que, al ser un método determinista, es apropiado para análisis de comparación en diversas aplicaciones, sin embargo, para que los datos obtenidos a partir de su cálculo sean concretos, se deben cumplir los parámetros preliminares, como un número mínimo de datos, máximas distancias y la distribución normal que se debe obtener antes de interpolar, pues al ignorar esas recomendaciones no es posible garantizar la calidad de la interpolación.

Analizando las características del algoritmo para distribución y ubicación óptima de sensores, la metodología es apropiada para este diseño, presentando resultados contundentes frente al comportamiento del porcentaje de error de las repeticiones y las posibles distribuciones dentro del área seleccionada. Se observó, que a medida que aumentan progresivamente el número de puntos sobre los que se calcula en mapa Kriging, el error baja y repitiendo este proceso una cantidad suficiente de veces se obtienen distribuciones óptimas que por otros métodos son más complejas de encontrar. Se debe tener en cuenta, que al ser un algoritmo de interpolación deben estar haciendo operaciones constantemente, por lo que al querer ejecutarse se debe tener una buena capacidad de procesamiento para poder generar múltiples repeticiones, haciendo que se mejoren los resultados que se obtengan.

Para los datos tomados como resultado, se obtuvieron distribuciones de los sensores, con errores en predicciones entre 6 y 0.5 % de acuerdo a las repeticiones hechas, lo que es un umbral bajo que puede causar inconvenientes de precisión a la hora de implementar la red, sin embargo, esta característica también se debe al rango de los datos, que no fue muy amplio dado que las condiciones del terreno y el clima fueron poco favorables para tener un terreno parcialmente seco.

Referente al protocolo de comunicación sugerido para la implementación de la WSN, se confirma mediante las pruebas experimentales hechas con los módulos, que se puede lograr diseñar topología de red y el algoritmo necesario para registrar los datos del área seleccionada bajo modo de operación AT, sin embargo, para lograrlo se deben utilizar Arduinos mega que tienen 16 pines analógicos, para lograr enlazar varios sensores. Como recomendación para implementar el modo API en la topología de red, es leer los datos obtenidos desde Labview ya que es un entorno más gráfico que permite hacer operaciones con cadenas de caracteres más fácilmente.

Bibliografía

- [1] A. Alínquer, *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. AGAC0108 (2a. ed.). Antequera (Malaga)*, 2018. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/ereader/usta/106552?page=190>
- [2] S. E. Campaña Bastidas, H. E. Cabrera Meza, A. J. Cervelion Bastidas, A. Aguirre Cabrera *et al.*, “Capítulo 1: Las redes de sensores inalámbricas, arquitectura y aplicaciones.”
- [3] A. H. Juan José Perfetti, Álvaro Balcázar and J. Leibovich, “Políticas para el desarrollo de la agricultura en colombia,” 2013.
- [4] W. L. Cerón, A. R. Trujillo, and Y. C. Escobar, “Aplicación del índice de sostenibilidad del recurso hídrico en la agricultura (isrha) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca centella,” *Ingeniería y desarrollo*, vol. 30, no. 2, pp. 160–181, 2012.
- [5] O. Ocampo, “El cambio climático y su impacto en el agro,” *Revista de ingeniería*, no. 33, pp. 115–123, 2011.
- [6] M. N. Paredes Vinuesa, “Implementación de un prototipo de wsn con nodos inteligentes para el sistema de riego aplicado a la agricultura de precisión para el cer-espocho.” B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017.
- [7] H. V. Mora Magallanes and J. L. Rosas Pari, “Diseño, desarrollo e implementación de una red de sensores inalámbricos (wsn) para el control, monitoreo y toma de decisiones aplicado en la agricultura de precisión basado en internet de las cosas (iot).—caso de estudio cultivo de frijol,” 2019.
- [8] J. Kang, R. Jin, and X. Li, “Regression kriging-based upscaling of soil moisture measurements from a wireless sensor network and multiresource remote sensing information over heterogeneous cropland,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 92–96, 2014.
- [9] R. C. Rebollo, “Análisis de señales en geofísica,” p. 22, 2015.
- [10] E. Crespo. (2016) Zigbee/xbee. [Online]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>
- [11] V. Sharma, M. Sharma, S. Pandita, J. Kour, and N. Sharma, “11 - application of geographic information system and remote sensing in heavy metal assessment,” in *Heavy Metals in the Environment*, V. Kumar, A. Sharma, and A. Cerdà, Eds. Elsevier, 2021, pp. 191–204. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128216569000110>
- [12] M. Umer, L. Kulik, and E. Tanin, “Spatial interpolation in wireless sensor networks: localized algorithms for variogram modeling and kriging,” *Geoinformatica*, vol. 14, no. 1, pp. 101–134, 2010.
- [13] ArcMap. Cómo funciona kriging. Cómo funciona Kriging—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [Online]. Available: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm#>

- [14] X. Emery, *Geoestadística*. Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, 2013, p. 149.
- [15] M. R. García Patiño, J. Mora Valero *et al.*, “Guía para la implementación de redes de sensores inalámbricos (wsn),” 2013.
- [16] J. A. D. Pacheco and E. M. López, “Validación del método de calibración de higrómetros capacitivos con soluciones sal-agua como generadoras de humedad,” *Cent. Nac. Metrol. Publicaciones Técnicas*, 2007.
- [17] E. A. A. D. Nagahage, I. S. P. Nagahage, and T. Fujino, “Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system,” *Agriculture*, vol. 9, no. 7, p. 141, 2019.
- [18] G. Souza, B. T. de Faria, R. Gomes Alves, F. Lima, P. T. Aquino, and J.-P. Soininen, “Calibration equation and field test of a capacitive soil moisture sensor,” in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 2020, pp. 180–184.
- [19] C. C. Castello, J. Fan, A. Davari, and R.-X. Chen, “Optimal sensor placement strategy for environmental monitoring using wireless sensor networks,” in *2010 42nd Southeastern Symposium on System Theory (SSST)*, 2010, pp. 275–279.
- [20] P. Andrés, P. Monsalve, C. Duran, and D. Acevedo, “Adquisición de datos de una matriz de sensores de gases (e-nose), mediante módulos de comunicación xbee data acquisition from an array of gas sensors (e-nose), through xbee communications modules,” 10 2014.
- [21] G. Sahitya, N. Balaji, C. Naidu, and S. Abinaya, “Designing a wireless sensor network for precision agriculture using zigbee,” in *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*, 2017, pp. 287–291.
- [22] V. H. Benítez, S. Hermosillo, M. J. Pacheco, and M. R. V. Armas-Flores, “Propuesta para la implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para un sistema de concentración solar con tecnología de torre central,” 2015.
- [23] Radi, Murtiningrum, Ngadisih, F. S. Muzdrikah, M. S. Nuha, and F. A. Rizqi, “Calibration of capacitive soil moisture sensor (sku:sen0193),” in *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1–6.

9.1. Participación en eventos

9.1.1. V Encuentro de Semilleros de Investigación ZBOY

El día 23 de Abril de 2021, se realiza ponencia con nombre “Análisis y estimación de humedad mediante técnica Kriging y WSN” donde se menciona la propuesta de proyecto, con los objetivos iniciales planteados para la investigación, recibiendo concepto positivo de parte de los jurados.



Figura 9.1: Certificado de participación V encuentro de semilleros de investigación y VI Congreso Internacional de Instrumentación, Control y Telecomunicaciones

Fuente: Autor

9.1.2. VI Congreso Internacional de Instrumentación, Control y Telecomunicaciones

El miércoles 20 de Octubre, en el marco del desarrollo del VI congreso internacional de Ingenierías CIICT-CIDIFAM 2021 donde se presenta la ponencia acerca del desarrollo del proyecto hasta la fecha.