

Modelo de comunicación basado en IoT
para la transmisión de datos de estaciones
meteorológicas

Modelo de comunicación basado en IoT para la transmisión de datos de estaciones meteorológicas

Carlos René Suárez
Paulo Alonso Gaona García
Sebastián Soto Gaona
Carlos Enrique Montenegro Marín



© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© Carlos René Suárez, Paulo Alonso Gaona García, Sebastián Soto Gaona, Carlos Enrique Montenegro Marín

Primera edición, noviembre de 2020
ISBN: 978-958-787-256-9

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
Edwin Pardo Salazar

Corrección de estilo
John Fredy Guzmán

Diagramación y montaje de carátula
Sonia Lucía Güiza Ariza

Imagen de portada
Martin Péchy (from <https://www.pexels.com/>)

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Modelo de comunicación basado en IoT para la transmisión de datos de estaciones meteorológicas / Carlos René Suárez ...[et al.]. -- 1a ed. – Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020.
p. -- (Espacios)

Incluye datos de los autores. -- Contiene referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-787-256-9

1. Estaciones meteorológicas - Sistemas de comunicación
 2. Sistemas de transmisión de datos 3. Internet de las cosas I.
- Suárez, Carlos René II. Serie.

CDD: 551.6354 ed. 23

CO-BoBN- a1061617

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

1. Entornos de comunicación basados en IoT	11
1.1 Introducción	11
1.2 Necesidades de soluciones basadas en IoT de bajo costo	12
1.3 Motivación para construir una red de nodos de sensores inalámbricos	14
<i>1.3.1 Monitoreo de eventos para el uso del suelo y el cambio climático</i>	15
<i>1.3.2 Monitoreo hidrológico</i>	16
<i>1.3.3 Monitoreo ambiental urbano basado en teléfonos inteligentes</i>	16
<i>1.3.4 Uso de tecnologías móviles para medición orientada a eventos</i>	16
1.4 Desafíos y limitaciones	17
1.5 Definiciones y antecedentes	18
1.6 Planteamiento del problema y alcances	19
1.7 Estructura del libro	21
2. Marco conceptual	23
2.1 Factores que influyen en el diseño de las WSN	23
<i>2.1.1 Métricas de rendimiento</i>	23
<i>2.1.2 Localización</i>	24
<i>2.1.3 Técnicas de estimación de la localización por tiempo</i>	24
<i>2.1.4 Potencia de la señal recibida</i>	25
2.2 Técnicas de estimación de la localización de los nodos	25
<i>2.2.1 Triangulación</i>	26
<i>2.2.2 Trilateración</i>	26
<i>2.2.3 Multilateración</i>	27
<i>2.2.4 GPS</i>	27
2.3 Enrutamiento	28
<i>2.3.1 Inundación</i>	29
<i>2.3.2 Data-Centric</i>	29

<i>2.3.3 Proactivo</i>	29
<i>2.3.4 Reactivos</i>	30
<i>2.3.5 Jerárquico</i>	30
<i>2.3.6 Basado en ubicación</i>	30
2.4 Transmisión inalámbrica	31
<i>2.4.1 Modelo de canal</i>	31
<i>2.4.2 Modelos empíricos</i>	35
<i>2.4.3 Modelos semiempíricos</i>	38
<i>2.4.4 Modelos deterministas</i>	43
2.5 Errores en la transmisión (BER)	46
3. WSN construidas con aplicaciones medioambientales	49
3.1 Aplicaciones usuales	49
<i>3.1.1 Redes estáticas para la observación ambiental</i>	49
<i>3.1.2 Vigilancia hidrológica</i>	50
<i>3.1.3 Redes móviles para campañas de medición orientadas a eventos</i>	50
<i>3.1.4 Monitoreo ambiental urbano basado en teléfonos inteligentes</i>	51
3.2 Elementos de una WSN	51
<i>3.2.1 Sensores</i>	51
<i>3.2.2 Nodo sensor</i>	52
<i>3.2.3 Gateway</i>	53
<i>3.2.4 Estación base</i>	54
3.3 Aplicaciones ambientales de WSN en el ámbito mundial	54
3.4 Aplicaciones de WSN a nivel nacional	59
4. Enfoque metodológico propuesto	63
4.1 Método de investigación aplicado	63
4.2 Fases de trabajo	63
4.3 Caso de estudio aplicado	64
4.4 Tipo de datos empleados para la investigación	65
4.5 Manipulación de variables	65
4.6 Pruebas de medición	66
4.7 Construcción del prototipo	66
<i>4.7.1 Modelo SCAMPER</i>	67
5. Aspectos de diseño para el funcionamiento de WSN	69
5.1 Características de diseño	69
<i>5.1.1 Nodo WSN</i>	70
<i>5.1.2 Nodo de borde WSN</i>	70

<i>5.1.3 Software</i>	70
<i>5.1.4 Plataformas</i>	70
<i>5.1.5 Aspectos de administración del consumo de energía</i>	72
<i>5.1.6 Procesador</i>	72
<i>5.1.7 Comunicaciones</i>	73
<i>5.1.8 Velocidad de bus y tiempo de RAM</i>	74
<i>5.1.9 Subsistema de potencia</i>	74
<i>5.1.10 Operating Systems for Wireless Sensor Networks</i>	75
<i>5.1.11 Performance and Traffic Management</i>	76
6. Definición de un prototipo WSN enfocado en aplicaciones medioambientales	79
6.1 Elaboración	80
<i>6.1.1 Requisitos de la red</i>	80
<i>6.1.2 Implementación de estación meteorológica con Raspberry Pi</i>	81
<i>6.1.3 Implementación de estación meteorológica con Arduino</i>	82
6.2 Prototipo planteado	82
<i>6.2.1 Subsistema de sensores</i>	82
6.3 Subsistema procesador	88
6.4 Subsistema de comunicaciones	91
<i>6.4.1 LoRaWAN</i>	92
<i>6.4.2 XBee</i>	93
6.5 Subsistema de batería	94
<i>6.5.1 LoRaWAN</i>	95
<i>6.5.2 Arduino</i>	95
6.6 Subsistema informático y comunicación en la nube	98
<i>6.6.1 Relación de actividades por fase</i>	100
<i>6.6.2 Fase I</i>	101
<i>6.6.3 Fase II</i>	102
<i>6.6.4 Fase III</i>	106
<i>6.6.5 Fase IV</i>	106
<i>6.6.6 Fase V</i>	109
<i>6.6.7 Especificaciones de diseño y estándares de codificación</i>	109
<i>6.6.8 Instalación del ambiente de desarrollo Front-end (Angular)</i>	111
<i>6.6.9 Instalación</i>	111
<i>6.6.10 Requerimientos del servidor</i>	112
<i>6.6.11 Archivos Crontab</i>	113
6.7 Subsistema de programación de modelo de comunicación de equipos	118

6.8 Acondicionamiento de señales	118
6.9 Tramas de datos	120
6.10 Estación base	121
<i>6.10.1 Interfaz gráfica</i>	122
<i>6.10.2 Administrador de base de datos</i>	122
<i>6.10.3 Controlador del gateway</i>	123
6.11 Estaciones meteorológicas elaboradas	123
7. Resultados del estudio	125
7.1 Metodología de análisis	125
7.2 Resultados obtenidos	125
<i>7.2.1 Modelo matemático</i>	126
<i>7.2.2 Pruebas</i>	128
<i>7.2.3 Resultados estadísticos</i>	129
<i>7.2.4 Modelo experimental</i>	130
7.3 Proceso	130
7.4 Análisis de resultados	132
7.5 Prototipos de estaciones	134
Conclusiones	137
Recomendaciones	138
Dificultades	139
Trabajos futuros	139
Referencias bibliográficas	141
Autores	149

1. Entornos de comunicación basados en IoT

1.1 Introducción

Estamos inmersos en una sociedad en la que todos los dispositivos se conectan a internet. Mediante soluciones basadas en aplicaciones móviles se nos abre la posibilidad de tener acceso a múltiples beneficios y encontrar datos en tiempo real sobre cualquier acontecimiento. Este tipo de soluciones toma fuerza gracias a los escenarios que se han consolidado con tecnologías basadas en IoT (*Internet of Things*) y entornos de trabajo de sistemas de comunicación inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Networks*) (Hemant Ghayvat, 2015).

Anteriormente, los equipos de computación y los teléfonos móviles permitían realizar las labores elementales a los usuarios. Hoy en día, estos dispositivos cuentan con sistemas integrados miniaturizados, con conexión a internet, y están adquiriendo popularidad. Un ejemplo de ello son los sistemas WSN, que una vez implementados cumplen de manera autónoma la tarea de monitoreo específico sobre cualquier campo de aplicación (detección de fuentes climáticas en el entorno, temperatura, humedad, gases, etc.). Básicamente, son diseñados como redes aisladas, para proyectarse como una tecnología consolidada, parte integral de un futuro sobre internet.

Al extender los servicios de internet en redes de sensores y el mundo real en la creación de soluciones basadas en IoT, donde un sensor de estado relaciona objetos con personas y lugares disponibles en tiempo real, se logra integrar eventos que puedan surgir o ser influenciados a través de actuadores. Un ejemplo de ello se puede mostrar en el campo de las ciudades inteligentes, donde las soluciones basadas en IoT pueden aumentar la calidad de vida y disminuir el consumo de recursos en el campo de la “vida asistida ambiental” (Talavera, 2017). Así, tecnologías basadas en IoT posibilitan una vida autónoma en el hogar apropiada para la edad de sus usuarios.

En el campo industrial, el concepto de medir los parámetros de máquinas, bombas, tuberías, etc., no es nuevo. Entre las tendencias que se están presentando en las industrias 4.0 (Wollschlaeger, 2017), los sensores y las redes dedicadas ya son

ampliamente utilizadas, tanto en refinerías de petróleo como en líneas de producción. Históricamente, estos sistemas se han ejecutado en redes separadas, ofreciendo una alta confiabilidad y seguridad que no se pueden lograr con la tecnología de consumo.

La integración de sensores y actuadores inalámbricos en internet y el desarrollo de aplicaciones para entornos de trabajo IoT es compleja, ya que reúne dos mundos muy separados: internet, por un lado, y sistemas integrados, por el otro. Entonces, debe existir un puente entre los métodos de diseño, los dispositivos de desarrollo y las herramientas informáticas. Se deben crear los algoritmos y las infraestructuras de *software* y *hardware* —novedosos e integrales— requeridos para la composición de sistemas en internet y para el desarrollo de aplicaciones basadas en IoT.

En correspondencia con el proyecto que da origen a este libro¹, se pretende definir la forma en que se utilizan las redes de sensores inalámbricas integradas, mediante IoT y su arquitectura, con base en un modelo de comunicaciones para la recepción de datos de estaciones meteorológicas. En el marco de dicho proyecto se trabajó sobre dos frentes: a) soluciones tecnológicas para utilizar ondas de radio de banda de 0.9 a 2.4 GHz para la comunicación entre una limitada cantidad de sensores en un espacio de casi 100 km² y b) la arquitectura de un modelo informático para determinar el monitoreo y datos almacenados en la nube. Con esta solución se procura dar pautas para el desarrollo y la integración de tecnologías de bajo costo, a efectos de mejorar las aplicaciones relacionadas con medioambiente y energía, y los escenarios de estudio que permitan definir métodos de pronóstico meteorológicos y ser la base para áreas asociadas a la predicción de inundaciones.

1.2 Necesidades de soluciones basadas en IoT de bajo costo

Las redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks* [WSN]) son sistemas conformados por dispositivos electrónicos distribuidos y ubicados en espacios predeterminados que utilizan sensores para monitorear variables físicas del entorno. Los nodos sensores actúan como generadores de datos y retransmisores en la red; constan de un microprocesador y un transceptor que pueden programarse para realizar tareas complejas, sin limitarse únicamente a transmitir. El transceptor proporciona conectividad inalámbrica para comunicar los nodos sensores que generalmente son estacionarios; además se encuentran alimentados por baterías de baja capacidad (Akyildiz y Vuran, 2010). El objetivo de las WSN es monitorear, estudiar y controlar eventos y fenómenos

1 Este libro es resultado del desarrollo del proyecto interinstitucional de investigación *Modelo para gestión y consumo de datos de estaciones hidrometeorológicas y sensores remotos para la simulación de inundaciones mediante el consumo de Linked Open Data en la nube*, entre los grupos de investigación Innovación Verde de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia y los grupos GIIRA y Multimedia Interactiva y Animación Digital de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

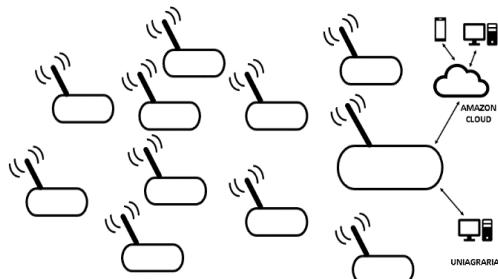
en un entorno determinado; recolectar la información para su posterior análisis con elementos electrónicos de bajo costo, que tienen la capacidad de obtener, procesar y comunicar información hasta un nodo central, a través de enlaces inalámbricos.

Las redes de sensores actuales captan información de todo tipo de sensores, la procesan y transmiten en forma de datos por medio de microcomputadores. Estas redes inalámbricas transmiten cantidades relativamente pequeñas de datos. Las WSN se caracterizan por su fácil instalación, configuración, mantenimiento, su inmunidad al ruido y el bajo consumo de energía. Este último es un requisito fundamental para que las redes de sensores puedan funcionar durante varios años con baterías o recolección de energía.

En la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías, la fabricación de nuevos circuitos integrados y el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas han permitido la implementación de todo tipo de WSN. Además, se han definido algunos estándares industriales para lograr la masificación de la tecnológica y el desarrollo de nuevos productos.

Existen diferentes enfoques y estándares para las redes de sensores inalámbricos, uno de los más conocidos es el del grupo de trabajo IEEE 802.15.4 (Molisch, 2004), llamado ZigBee. El concepto 802.15.4 tiene diversas variantes que difieren en el método de modulación y el consumo de energía. Otros enfoques incluyen Ultra Low Power Bluetooth (ULP), conocido como Wibree, WirelessHART e ISA-SP100 (Hasegawa, 2011) para redes inalámbricas de sensores en el entorno de control y automatización de campo. La figura 1 representa el arreglo típico de una WSN. Aunque se supone que todas las WSN tienen una funcionalidad similar en muchos entornos, en ciertos casos existe un entorno heterogéneo en relación con la funcionalidad del sensor.

Figura 1. Representación esquemática de una WSN



Fuente: elaboración propia

Proponer soluciones tecnológicas de bajo costo aporta al desarrollo de problemáticas comunes, asociadas a datos de sensores basados en estaciones meteorológicas. Los

dispositivos IoT pueden proporcionar un monitoreo constante y confiable, junto con informes en tiempo real, de los cambios del ambiente en estudio.

Desde este enfoque, el presente estudio pretende proporcionar una introducción a los conceptos y principios fundamentales de las redes de sensores inalámbricos (WSN), los métodos de comunicaciones, los algoritmos y las tecnologías en diferentes capas de un sistema de sensores. El propósito es plantear un modelo de comunicaciones que permita realizar la integración de sensores basados en estaciones meteorológicas de bajo costo, mediante la transmisión de datos a partir de tecnologías IoT, y el despliegue de datos a través de soluciones informáticas.

1.3 Motivación para construir una red de nodos de sensores inalámbricos

Una de las principales motivaciones para el desarrollo de la presente propuesta se enmarca en el planteamiento de lineamientos que posibiliten la construcción de soluciones de bajo costo para el monitoreo de datos meteorológicos. A partir del análisis, diseño y construcción de estaciones meteorológicas, se logra la integración de sensores y soluciones tecnológicas basadas en modelos de comunicaciones de bajo costo, que serán usados a través de entidades de control gubernamentales o por personas de zonas rurales, para monitorear datos meteorológicos. Así podrán tomar decisiones frente a las actividades que realizan de manera diaria en dichas zonas. Por tanto, se pretende plantear un modelo de comunicaciones basado en tecnologías WSN, para la integración y el monitoreo de datos de estaciones meteorológicas alojados en la nube, mediante entornos de desarrollo basados en *software* informático.

El ser humano enfrenta diversas preocupaciones ambientales como el cambio climático, la lluvia ácida, la contaminación del aire, la contaminación del agua y muchas otras que afectan la vida en este planeta (Scott y Becken, 2010). Puesto que la degradación del medioambiente ha aumentado, cada ser humano, ser viviente o comunidad puede beneficiarse con el uso de WSN, por su importante papel en la protección de este planeta. Actualmente, WSN es una tecnología utilizada en diferentes campos de aplicación (salud, movilidad, agricultura, cambio climático), que requieren sistemas automatizados que muestren dinámicamente información (Đurišić, 2012; Lazarescu, 2013).

El medioambiente se caracteriza por una gran heterogeneidad, complejidad y dinámica; por lo tanto, las mediciones individuales a menudo no son adecuadas para identificar ese ecosistema. El uso de WSN en sistemas ambientales terrestres y acuáticos ofrece ventajas significativas para una mejor comprobación de las condiciones de un ecosistema que requiere una implementación mediante la distribución de sensores. Otra ventaja de las WSN es su infraestructura autoorganizada, que reduce el costo y el tiempo de instalación y operación en este tipo de mediciones.

En este libro se presenta un modelo de comunicaciones sobre escenarios IoT para el monitoreo de datos de estaciones meteorológicas, basado en el diseño de una red con tecnología WSN, que puede ser utilizada sobre cualquier área del sector medioambiental. Este diseño se basa en aspectos como la robustez de nodos sensores, la capacidad en tiempo real y la tolerancia a fallas. Debido a que los recursos de energía son limitados, tanto los sensores como el protocolo se han desarrollado con el propósito de que se optimice su consumo.

En primera instancia se describen aspectos relacionados con la transmisión en tiempo real, el consumo de energía y la construcción de varios prototipos. Aunque estos ya han sido diseñados y construidos por diferentes investigadores, en este modelo se utilizan herramientas que se consideran tecnologías de estándar abierto. De modo que es posible replicar y utilizar el modelo en cualquier otra área de interés.

Como parte de los resultados de investigación, se realizaron pruebas con diferentes configuraciones en las que el procesamiento se llevó a cabo en el extremo del servidor. Adicionalmente, la capacidad de procesamiento dentro de la red se incorporó en el extremo del nodo; de esta manera, reprocesa los datos y envía de forma inalámbrica la información extraída.

La comunicación que hizo posible la transferencia de información del instrumento se realizó empleando diferentes estándares. Los nodos sensores operaron con base en microcontroladores con sistemas operativos apropiados para ellos, mientras que la estación base funcionó con un sistema operativo incorporado. Dependiendo de la aplicación, la implementación de la WSN logró adaptarse de manera óptima a las condiciones ambientales. De acuerdo con las consideraciones expuestas, la motivación de este trabajo consiste en el planteamiento de soluciones de bajo costo, que puedan ser implementadas sobre los contextos detallados en los acápite que siguen.

1.3.1 Monitoreo de eventos para el uso del suelo y el cambio climático

Los seres humanos se favorecen considerablemente de ecosistemas sanos y funcionales porque brindan una variedad de servicios insospechados. Si uno u otro servicio fallan, se producirán cambios drásticos en la vida de toda la población terrestre. Los avances en tecnología de sensores y la arquitectura de telemetría con capacidad de medir cambios en el clima y las condiciones atmosféricas permiten a los modeladores analizar el cambio climático y su variabilidad (Shanmuganthan, 2008). Ciertamente, en este contexto adquiere gran relevancia investigar acerca del cambio climático, el cambio de uso de la tierra, las invasiones biológicas, los contaminantes que afectan a las especies, los ecosistemas y sus funciones, y las consecuencias de estos fenómenos en los seres humanos.

Las WSN se postulan como instrumentos para un monitoreo a largo plazo en la investigación de ecosistemas. Para este caso en particular, el enfoque es específicamente

sobre parámetros meteorológicos y del suelo, por lo que se puede detectar la interacción de procesos bióticos y abióticos. Estos análisis permitirían estudiar los impactos del cambio climático en los procesos de los ecosistemas, bajo diferentes tipos de uso de la tierra.

1.3.2 Monitoreo hidrológico

Los datos recolectados por los sistemas de monitoreo hidrológico convencionales están limitados en resolución espacial y temporal, debido al costo y a la falta de autonomía de los sistemas (Asocaña, 2012). Las visitas al sitio y el mantenimiento de los equipos son necesarios para la recopilación de datos. Si los problemas de costos de viaje y la interrupción del sitio fuesen resueltos mediante el uso de sensores remotos con medición *in situ*, los datos podrían actualizarse con mayor frecuencia. Con la creación de sistemas de medición de bajo costo es posible mejorar la resolución espacial y, alternativamente, cubrir un área más grande. Así, los dispositivos de medición *in situ* también permitirían disminuir el retraso entre las mediciones que deben producirse simultáneamente en toda la zona que está siendo monitoreada (Freiberger, 2007).

1.3.3 Monitoreo ambiental urbano basado en teléfonos inteligentes

Este proceso se consolidó en colaboración con la cátedra de Gestión de la Información de la Universidad de Leipzig y el Departamento de Monitoreo de Tecnologías de Exploración del Centro Helmholtz de Investigación Medioambiental de Leipzig (Sandoval, 2015), con base en la plataforma multioperable para la integración de los diferentes componentes de un sensor desarrollado por un código abierto, acopiados con datos ambientales de alta resolución de tiempo y, por lo tanto, compleja.

Los procesos y las relaciones de los sistemas ambientales bajo condiciones de campo pueden ser detectados, además del desarrollo e integración de sensores en un sistema para aplicaciones de campo móviles y disposición específica de los datos ambientales. Estos procedimientos fueron construidos de la forma en que un sistema de información debe ser considerado.

1.3.4 Uso de tecnologías móviles para medición orientada a eventos

El uso de las WSN móviles para la exploración del suelo y la atmósfera ofrece una fácil ubicación de los sensores y su respectiva distribución espacial. Al mismo tiempo, el ajuste de los tipos de sensores y de las frecuencias de muestreo a las condiciones de medición proporciona importantes ventajas frente a los sistemas tradicionales (FutureWater, 2019). Esta cualidad puede ser importante en el monitoreo de sistemas y procesos ambientales heterogéneos y dinámicos, de modo que las WSN se convierten en una herramienta adecuada para la validación y calibración de datos de teledetección.

Una ventaja clave del uso de redes de sensores móviles *ad hoc* es su comportamiento de autoorganización. La red de sensores móviles puede tener un enfoque multiparamétrico. Un nodo sensor estándar puede incluir diferentes sensores de humedad y temperatura del suelo; de temperatura y humedad del aire; de radiación fotosintética, o de radiación de longitud de onda individual (Archila y Santamaría, 2013). Además, se pueden conectar sensores geoeléctricos o de velocidad y dirección del viento. Es así que este tipo de soluciones representa un enfoque con gran potencial para el monitoreo experto de eventos terrestres y atmosféricos.

1.4 Desafíos y limitaciones

En el contexto de los proyectos en curso y futuros, se planifican tanto la mejora de los sistemas y redes existentes como el desarrollo de nuevos sensores y métodos de medición innovadores. Según Fernández et al. (2009), los objetivos actuales del desarrollo de redes de sensores inalámbricos, y que representan el fundamento de este proyecto, son los siguientes:

- Desarrollar algoritmos personalizados para detectar procesos específicos.
- Implementar funciones de recolección y reactivación de energía para optimizar el tiempo de operación y la calidad de los datos.
- Reducir la complejidad de los sensores y el costo de los nodos.
- Mejorar la resistencia a la intemperie y del rango de transmisión de los sistemas y mayor miniaturización para una mejor operación de la WSN.
- Implementar modelos de recolección de datos para realizar análisis y obtener soluciones.
- Implementar sistemas de energía no convencionales, como celdas fotovoltaicas o microturbinas eólicas.
- Incorporar nuevos sensores.

Las limitaciones de esta propuesta se encuentran en las condiciones de infraestructura y tecnología:

- Las velocidades de transmisión.
- La transmisión de datos en tiempo real.
- Las distancias de cobertura son cortas.
- La duración de las baterías de los sistemas de energía.
- La disponibilidad de datos.
- La calibración de sensores.

1.5 Definiciones y antecedentes

La adquisición de datos es una de las falencias a nivel de la red de mediciones ambientales, pese a las iniciativas de compartirlos bajo el concepto de Open Data (Ubaldi, 2013). Este estudio pretende complementar el uso de estos repositorios de datos, con datos provenientes de sensores remotos; el propósito es contemplar un modelo basado en diferentes fuentes de información. Es una necesidad establecer modelos preliminares de adquisición, almacenamiento, tratamiento y presentación de datos, bajo modelos que permitan la simulación y predicción de eventos.

El sistema de apoyo a la decisión para la evaluación del impacto del cambio climático DESYCO (Torresan, 2016) es una propuesta basada en informática, desarrollada en el 2010 por el Gobierno italiano. Busca evaluar la gestión de los impactos del cambio climático en zonas costeras y conexas, e involucra los siguientes aspectos:

- Ecosistemas y conexos, como playas, deltas, estuarios, lagunas, humedales, bosques, áreas protegidas, zonas urbanas y agrícolas.
- Cuerpos de agua subterránea y cuencas hidrográficas.
- Análisis de riesgo de la zona de estudio, del Mar Adriático, el Golfo de Gabes y la República de Mauritania, para la reducción del riesgo y la administración de la tierra y el agua.

Otro modelo que apoya la presente propuesta ha sido desarrollado por Kureshi et al. (2015), que exponen un sistema holístico: el Dynamic Data Driven Application System (DDDAS), cuyos aspectos centrales pueden sintetizarse como sigue:

- Se basa en el informe de la Comisión Europea sobre Gestión de Riesgos y Vulnerabilidad, que analiza el antes y el después de los sucesos de un desastre.
- Presenta un aparte sobre la importancia del modelamiento y simulación en la planificación.
- Desarrolla una propuesta de *framework*, que incluye un enfoque holístico de la gestión de emergencias y permite el desarrollo de modelos y simulación para etapas previas y posteriores al desastre. Usa computadoras de alto rendimiento, distribuidas bajo un proceso semiautónomo.

Fohringer et al. (2015) presentan otro ejemplo que permite justificar la importancia y tendencia de este tipo de investigaciones. Se trata del uso de las herramientas de internet y de las redes sociales para el desarrollo rápido de mapas de desastres de inundación. Las fuentes de datos a las que se recurren son las siguientes:

- Modelo Digital de Elevación (DEM) de la Agencia Federal de Cartografía y Geodesia.

- Datos de estaciones de hidrología de Dresden, operado por la Administración de Vías Fluviales y de Navegación (WSV); y de www.perlis.org, que usa información del sistema Pléiades.
- Twitter y Flickr para el mapeo de la inundación.

El resultado es exitoso respecto a la metodología desarrollada con el uso de las redes sociales, logrando establecer de forma rápida el comportamiento de la inundación en parámetros de área, profundidad y rapidez. El proceso de recopilación de datos supone el desafío de reunirlos y almacenarlos para su tratamiento. De esta manera, se procede a modelar y simular, mediante los recursos de internet, las herramientas computacionales de la nube, el procesamiento en paralelo y otros recursos informáticos para el desarrollo de análisis de inundaciones.

La presente propuesta está orientada a formular un modelo de adquisición de datos a partir de estaciones meteorológicas, para su análisis y, consecuentemente, el estudio de desastres, dentro del campo de generación de datos abiertos. El desarrollo del modelo consiste en implementar varios sensores para obtener datos ambientales y transmitirlos por medios tecnológicos basados en tecnologías WSN y sensores remotos. Al respecto, existen ciertos aspectos por resolver, que se enuncian a continuación:

- Desarrollar a escala un sistema de adquisición de datos ambientales, que sea fácil de implementar con tecnologías de bajo costo, disponible para la medición y la transmisión de datos.
- Establecer varias estaciones equidistantes dentro de un espacio geográfico, que permitan recopilar datos ambientales.
- Desarrollar protocolos de transmisión y almacenamiento de datos, con acceso por medio de internet.
- Crear un prototipo informático para validar el modelo de comunicación y monitoreo de datos de estaciones meteorológicas, basado en tecnologías WSN sobre entornos IoT.

1.6 Planteamiento del problema y alcances

Desde hace varios años se ha gestado una tendencia de análisis de datos para el estudio de desastres, haciendo uso de datos provenientes de diversas fuentes, como estaciones de hidrometeorología, sensores remotos, modelos numéricos, geoestadística, entre otros. Uno de los aspectos de este análisis es que estos datos no tendrían un valor significativo si se toman de manera aislada, lo cual representa el gran reto de trabajar en línea, desde la adquisición de datos hasta la posibilidad de tenerlos a disposición en la nube (Alamdar, 2016; Azam, 2017).

Diferentes países han intentado desarrollar sistemas que faciliten el flujo de datos de desastres y, en particular, de inundación (Villa, 2016; Olyazadeh et al., 2016). En Colombia existen organizaciones dedicadas a la prevención del riesgo y manejo de desastres, como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y, a nivel local, el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER). Es así que se ha planteado un documento de políticas referidas a este tipo de situaciones (Campos, 2012).

En relación con lo anterior, se han adoptado algunas decisiones como la liberación de información de carácter público. Encontramos ejemplos de esto en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), en el Banco Nacional de Imágenes (BNI-IGAC) y en otras organizaciones del Estado, bajo condiciones de datos abiertos. Pero no se ha logrado la integración de datos debido a dificultades de estandarización, variedad de formatos, especificaciones de bases de datos y otras situaciones de carácter tecnológico, logístico y legal.

Ya en el contexto y con las dificultades que se exponen, es necesario generar un escenario de comunicaciones que permita el desarrollo de un modelo experimental de adquisición de datos meteorológicos, basado en sensores remotos con tecnologías WSN. A partir de estas consideraciones, este documento pretende responder a la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo plantear un modelo de comunicaciones basado en Internet de las Cosas para llevar a cabo el monitoreo de estaciones meteorológicas en aplicaciones medioambientales?*

Con el fin de acercarnos a la problemática configuradora de la investigación, nuestro objetivo principal consiste en proponer un modelo de comunicación de datos de estaciones meteorológicas y sensores remotos, para la detección de variables climáticas y el monitoreo de datos con soluciones informáticas basadas en la nube.

Para lo anterior, encontramos los siguientes objetivos:

- Identificar las variables meteorológicas que permitan la medición a través de estaciones meteorológicas y monitoreo temporal.
- Desarrollar un protocolo de transmisión de datos meteorológicos a la nube.
- Proponer un protocolo de almacenamiento de variables de sensores remotos en la nube.
- Proponer y desarrollar un modelo de integración de datos meteorológicos y de sensores remotos para el monitoreo de estaciones.
- Desarrollar un proceso experimental para la validación de la integración de datos meteorológicos y de sensores remotos, en un área de prueba.

1.7 Estructura del libro

Este libro se organiza en ocho capítulos. En el presente capítulo se desarrolló la introducción, que ofrece una descripción general de las aplicaciones de WSN, los desafíos, los antecedentes y los objetivos a alcanzar. El segundo capítulo continúa refiriéndose al dominio WSN, proporcionando una descripción general de los principales factores requeridos en este proyecto. El tercer capítulo presenta WSN construidas para aplicaciones medioambientales y varios ejemplos de implementaciones representativas de prototipos. En el cuarto capítulo se expone el marco metodológico correspondiente al modelo de comunicaciones planteado. El quinto capítulo plantea un panorama de las técnicas de diseño para redes de sensores inalámbricos y presenta el diseño e implementación de un prototipo WSN aplicado al medioambiente. El capítulo sexto analiza en detalle los subsistemas de detección y procesamiento, así como las interfaces de comunicación; además, describe los parámetros de funcionamiento de una WSN, y los aspectos funcionales y no funcionales de los sistemas aquí utilizados. El séptimo capítulo introduce los resultados del estudio y proporciona una visión general de la utilización del prototipo construido. Finalmente, en el octavo capítulo se formulan las conclusiones y se proponen los trabajos futuros que podrían integrarse, según el modelo de comunicaciones planteado.

2. Marco conceptual

En este capítulo se describen las ideas generales acerca de las WSN y los principios básicos de su funcionamiento. Su estudio requiere abordar varias áreas, como la detección, la comunicación y la computación. Un asunto relevante de este capítulo es el de las comunicaciones inalámbricas y los elementos requeridos para que sus sistemas sean construidos de manera simple y eficiente.

2.1 Factores que influyen en el diseño de las WSN

El desarrollo de WSN requiere un amplio conocimiento en diferentes áreas de investigación, que incluyen la tecnología inalámbrica de telecomunicaciones, las redes de telecomunicaciones, los sistemas integrados, el procesamiento de señales digitales y la ingeniería de *software*. Existen factores que influyen significativamente en un proyecto de WSN, estos son abordados por varios investigadores (Lazarescu, 2013), en una amplia gama de áreas relacionadas con su diseño y despliegue. Particularmente en este capítulo se describirá la tecnología inalámbrica de telecomunicaciones.

2.1.1 Métricas de rendimiento

Utilizando métricas de rendimiento se puede evaluar el estado de un sistema en su totalidad y el de sus elementos individuales. Por ello, se requieren diferentes medidas de rendimiento para evaluar las WSN, entre las que se encuentran las siguientes (Chiasserini y Garetto, 2004):

1. **Vida útil del sistema.** Puede definirse como: i) la duración de energía de batería hasta que un nodo la agota, ii) la duración de tiempo en funcionamiento hasta que las aplicaciones puedan garantizar la QoS, y iii) la duración del tiempo en actividad hasta que la red se desconecta.
2. **Eficiencia energética.** Se refiere a la cantidad de información que puede ser transmitida con éxito usando una unidad de energía.

3. **Confiabilidad.** Se puede definir como la proporción de éxito de paquetes recibidos sobre la cantidad total de paquetes transmitidos.
4. **Cobertura.** La cobertura completa de una red de sensores representa todo el espacio que puede ser monitoreado por los nodos.
5. **Conecividad.** La conectividad métrica se puede utilizar para evaluar qué tan bien conectada está la red o cuántos nodos se han aislado.
6. **Métricas de QoS.** Algunas aplicaciones tienen propiedades con requisitos de QoS, como retraso, índice de transmisiones erradas y ancho de banda.

2.1.2 Localización

Los sensores monitorean particularidades del mundo físico, cuyas variables son módulos fundamentales de la información de los sensores. Si no se conoce la posición de un nodo sensor, solo se describe una porción de la información. Por ejemplo, los sensores desplegados en un bosque, que activan alarmas cuando se producen incendios, obtienen un valor significativo si pueden informar la relación espacial entre ellos y el evento supervisado. Además, se necesita información precisa de la ubicación para diversas tareas, como el enrutamiento según la información geográfica, el seguimiento de objetos y la ubicación consciente (Dargie, 2010).

El proceso de localización consiste en determinar las coordenadas geofísicas de un sensor o un grupo de sensores. Comprende un conjunto de técnicas y procedimientos que permiten a un sensor estimar su propia ubicación en función de la información recopilada de su entorno (Ponticelli, 2011). El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), por su parte, es una técnica popular de detección de ubicación que no es viable en todos los entornos (por ejemplo, en interiores o bajo un follaje denso), y puede representar costos inaceptables para redes de sensores inalámbricos con recursos limitados (WSN). A continuación, se examinan diversas técnicas y servicios de localización en WSN.

2.1.3 Técnicas de estimación de la localización por tiempo

Se refiere a la apreciación de la distancia entre dos nodos sensores a través de la medición de las características de las señales intercambiadas entre ambos, como los tiempos de propagación de la señal, las intensidades de la señal o el ángulo de llegada (Aakvaag y Freyu, 2006). Para el tiempo de arriba, el concepto es que la distancia entre el emisor y el receptor puede determinarse usando el tiempo y la velocidad de propagación de señal. Una señal de estas viaja a una velocidad que se puede considerar la de la luz (alrededor de 300 km/s): requiere aproximadamente de 30 ns para recorrer 10 m. La secuela es que las mediciones de distancia basadas en esta técnica requieren relojes con alta resolución, lo que aumenta el costo y la complejidad de una red de sensores (Tomé, 2016).

2.1.3.1 Diferencia de tiempo de arribo

El concepto de diferencia de tiempo de arribo se calcula teóricamente (Zekavat, 2015) utilizando dos señales que viajan a diferentes velocidades; así el receptor puede determinar su ubicación de manera similar al concepto anterior. Por ejemplo, la primera señal podría ser una señal de radio (emitida en t_1 y recibida en t_2), seguida de una señal acústica, ya sea inmediatamente o después de un intervalo de tiempo fijo ($t_{wait} = t_3 - t_1$); así el receptor puede determinar la distancia. La desventaja del enfoque es la necesidad de *hardware* adicional —como un micrófono y un altavoz, para el ejemplo anterior—. Otra variante de este enfoque utiliza medidas de una sola señal para estimar la ubicación del emisor, recurriendo a múltiples receptores con ubicaciones conocidas.

2.1.3.2 Ángulo de arribo

Otra técnica de localización consiste en determinar la dirección de la propagación de la señal utilizando una serie de antenas o micrófonos. El ángulo de llegada es aquel que se establece entre la dirección de propagación y alguna dirección de referencia conocida como orientación (Peng, 2006). Por ejemplo, para mediciones acústicas, varios micrófonos espacialmente separados se usan para recibir una señal única. Las diferencias en el tiempo de llegada, amplitud o fase se usan para determinar una estimación del ángulo de llegada, que a su vez puede emplearse para determinar la posición de un nodo.

2.1.4 Potencia de la señal recibida

El concepto de potencia de señal recibida (RSSI) es la cantidad de energía electromagnética que se puede obtener en un receptor a determinada distancia de un transmisor. La potencia de una señal disminuye considerablemente con la distancia recorrida. La característica encontrada comúnmente en dispositivos inalámbricos es un indicador de energía de la señal recibida, que puede usarse para medir la potencia de la señal de radio recibida. Por lo general, los valores de RSSI están en el rango de 0 a RSSI_Max. Los valores comunes para RSSI_Max son 100, 128 y 256. En espacio libre, la RSSI se degrada con el cuadrado de la distancia que hay desde el transmisor hasta el receptor (Xu et al., 2010).

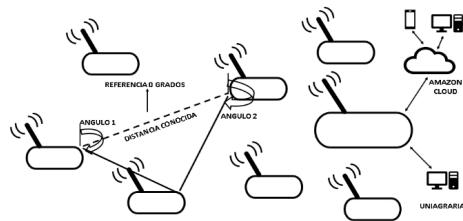
2.2 Técnicas de estimación de la localización de los nodos

Las WSN se han propuesto para una gran cantidad de aplicaciones dependientes de la ubicación. El costo y las limitaciones del *hardware* en la detección de los nodos impiden el uso de esquemas de localización basados en rangos y dependen de las estimaciones absolutas de distancia punto a punto. Debido a que la precisión es importante para la mayoría de las aplicaciones, las soluciones en localización sin rango son una alternativa rentable frente a los costosos enfoques basados en rangos (Tian He et al., 2003).

2.2.1 Triangulación

La triangulación usa las propiedades geométricas de los triángulos para estimar las ubicaciones de los sensores. Específicamente se basa en la recolección de mediciones de ángulos, como se describió en la sección anterior. Se necesitan mínimamente dos líneas de rumbo (Sharma y Malhotra, 2015) y las ubicaciones de los nodos de anclaje o la distancia entre ellas para determinar la ubicación de un nodo sensor en el espacio bidimensional, tal como se representa en la figura 2.

Figura 2. Método de localización por triangulación

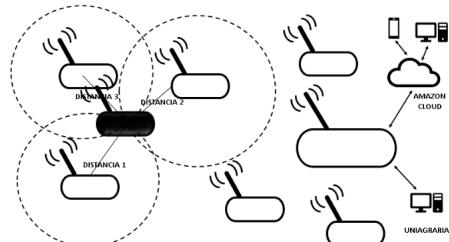


Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Trilateración

La trilateración se refiere al proceso de cálculo de la posición de un nodo en función de las distancias medidas entre este y una serie de nodos con ubicación conocida, que se toman como referencia. Dada la ubicación de una referencia y la distancia de un sensor con respecto a esta (estimada, por ejemplo, a través de medidas de potencia), el sensor debe colocarse en algún lugar en posición al nodo referencia. En espacio bidimensional, las mediciones de distancia desde al menos tres referencias son necesarias para obtener una ubicación única. En la figura 3 se ilustra el concepto de trilateración utilizando tres nodos de anclaje con ubicaciones conocidas. Algunos algoritmos estadísticos o métodos han sido desarrollados para obtener la localización (Stansfield, 1947).

Figura 3. Modelo de localización por trilateración

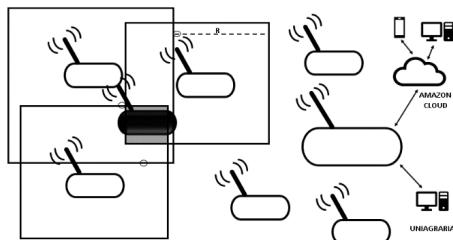


Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Multilateración

Esta técnica se puede extender para determinar ubicaciones de nodos sin tres nodos de referencia vecinos. Una vez un nodo ha identificado su posición usando el mensaje de baliza de los nodos de referencia, se convierte en una referencia y transmite mensajes de baliza que contienen su posición estimada respecto a otros nodos cercanos. Este proceso iterativo de multilateración (Savvides et al., 2006) se repite hasta que todos los nodos en una red han sido localizados. En la figura 4 se muestra un ejemplo simple de esta técnica con seis nodos, un nodo de anclaje (negro) y tres nodos con ubicaciones desconocidas (blanco en recuadro).

Figura 4. Modelo de localización por multilateración



Fuente: elaboración propia.

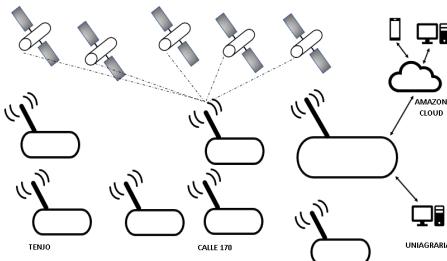
El objetivo de la multilateración colaborativa es construir un gráfico de nodos participantes, es decir, nodos que sean anclajes o tengan al menos tres vecinos participantes.

2.2.4 GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Hofmann-Wellenhof et al., 2008) es el sistema de detección de ubicación que proporciona un excelente marco para determinar las posiciones geográficas (Hightower y Borriello, 2001). Formalmente conocido como NAVSTAR (Navegación de satélite en tiempo y rango), es el único sistema global de navegación por satélite (GNSS) plenamente operativo; consta de, al menos, 24 satélites que orbitan la Tierra a altitudes de aproximadamente 11.000 millas. Comenzó como un programa de prueba en 1973 y entró en pleno funcionamiento en 1995. El GPS se ha establecido como una ayuda ampliamente utilizada para la navegación civil, la topografía, el seguimiento y la vigilancia, y las aplicaciones científicas.

Los receptores GPS desplegados en unos pocos nodos de una WSN pueden ser suficientes para proporcionar servicios de ubicación. El principio básico de posicionamiento GPS se muestra en la figura 5: los satélites y los receptores utilizan relojes precisos y sincronizados para generar el mismo código exactamente al mismo tiempo.

Figura 5. Representación de un sistema satelital



Fuente: elaboración propia.

Es posible construir redes de sensores inalámbricos en los que cada sensor tenga su propio receptor GPS. Sin embargo, las restricciones como el alto consumo de energía, el costo y la necesidad de una línea de vista directa hacen que una solución totalmente basada en GPS no sea práctica para la mayoría de las redes de sensores.

2.3 Enrutamiento

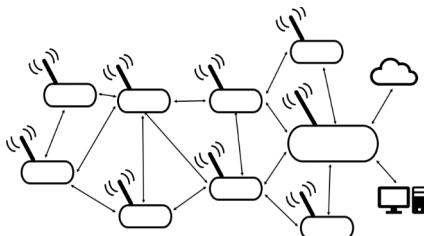
Las WSN y sus aplicaciones varían ampliamente en sus limitaciones y características, las cuales deben tenerse en cuenta en el diseño de un protocolo de enrutamiento. Las WSN se ven limitadas en términos de su energía disponible, potencia de procesamiento y capacidad de almacenamiento. Los protocolos específicamente diseñados para redes de sensores centran la mayor parte de la atención en los protocolos de enrutamiento, ya que pueden diferir según la aplicación y la arquitectura de la red (Akkaya y Younis, 2005). Las WSN pueden variar ampliamente en escala, las áreas geográficas que cubren y su posición. Los esquemas de direccionamiento (como las direcciones IP utilizadas en internet) pueden no estar disponibles e incluso no ser viables, especialmente en redes con nodos heterogéneos y movilidad de nodos.

En los esquemas basados en tiempo (por ejemplo, monitoreo ambiental), los nodos propagan los datos recogidos periódicamente por los sensores a un dispositivo receptor. En esquemas basados en eventos (por ejemplo, detección de incendios forestales), los nodos solo informan la información recopilada cuando ocurren eventos de interés. Finalmente, en los esquemas basados en consultas, es responsabilidad del receptor solicitar datos de los sensores cuando sea necesario. Un protocolo de enrutamiento se apoya en los recursos disponibles en la red y las necesidades de las aplicaciones. Con este fin, las métricas de enrutamiento se utilizan para expresar una variedad de objetivos del protocolo de enrutamiento con respecto al consumo de estos recursos o al rendimiento que percibe una aplicación. A continuación, se proporciona una descripción general de las técnicas de enrutamiento comúnmente utilizadas en WSN.

2.3.1 Inundación

Un nodo emisor difunde paquetes a sus vecinos inmediatos, que repetirán este proceso retransmitiéndolos a sus vecinos hasta que todos los nodos hayan recibido los paquetes o estos hayan viajado por un número máximo de saltos. Con las inundaciones, se garantiza que el destino reciba los datos. La principal ventaja de las inundaciones es su simplicidad, pero su principal desventaja es que genera tráfico en exceso. Por lo tanto, se deben tomar medidas para garantizar que los paquetes no viajen por la red indefinidamente. La figura 6 ilustra el procedimiento de enrutamiento por inundación. Si existiera un camino al destino, y suponiendo una comunicación sin pérdida, la recepción de datos en el destino estaría garantizada.

Figura 6. Representación gráfica de enrutamiento en una doble WSN



Fuente: elaboración propia.

2.3.2 Data-Centric

En las técnicas de enrutamiento centradas en datos, el punto central es la recuperación y diseminación de información de un tipo particular o que está descrita por ciertos atributos. Son opuestas a la recopilación de datos de sensores particulares, donde todos los nodos desempeñan el mismo rol con respecto al enrutamiento y colaboran para llevarlo a cabo. Las arquitecturas diseñadas con Data-Centric son compatibles con una disposición de Tipo de Servicio (TOS), que permite que las aplicaciones realicen las compensaciones deseadas entre la latencia y la energía (Krishnamachari et al., 2002).

2.3.3 Proactivo

El enfoque de enrutamiento puede ser proactivo, reactivo o híbrido. En los protocolos de enrutamiento proactivo, las rutas se establecen independientemente de la disposición de un nodo para transmitir datos y antes de que realmente se necesiten (Waharte et al., 2006). La principal ventaja de este enfoque es que las rutas están disponibles siempre que sean necesarias y no se incurre en retrasos buscándolas, como sucede en los protocolos de enrutamiento bajo demanda. Las principales desventajas son las cargas de procesamiento involucradas en la creación y el mantenimiento de

tablas de enrutamiento potencialmente muy grandes; además, la información obsoleta en estas tablas puede generar errores de enrutamiento.

2.3.4 Reactivos

Los protocolos reactivos descubren y mantienen rutas hasta que se soliciten y utilicen de manera explícita. Un nodo fuente, conociendo la identidad o dirección del nodo de destino, comienza un proceso de descubrimiento de ruta dentro de la red, que finaliza cuando se encuentra al menos una o cuando se han examinado todas las rutas posibles. Una ruta se mantiene hasta que se rompe o ya no es requerida por la fuente. El enrutamiento reactivo se utiliza para aumentar la resistencia a la dinámica de enlaces en las WSN, ya que está diseñado para mejorar los protocolos de enrutamiento existentes y realizar la entrega de paquetes de forma confiable y eficiente en cuanto a consumo de energía. Respecto a los enlaces inalámbricos que no son confiables, utiliza la diversidad de ruta local (Niu et al., 2014).

2.3.5 Jerárquico

Se basa en la agrupación de nodos en clústeres para contrarrestar algunos puntos débiles de los protocolos de enrutamiento plano, en particular la escalabilidad y la eficiencia. La idea principal detrás del enrutamiento jerárquico es que los nodos se comunican directamente con un nodo líder en su propio clúster, generalmente denominado cabeza del clúster. Estos nodos superiores, que pueden ser dispositivos más potentes y con menos energía que los nodos “regulares”, son los responsables de propagar los datos del sensor al sumidero. Este enfoque puede reducir significativamente la comunicación y la carga de energía en los nodos del sensor, mientras que los nodos superiores del clúster experimentan mucho más tráfico que los nodos normales. Heinzelman (2000) ha concluido que este protocolo es la alternativa más eficiente para una aplicación de monitoreo en la que los datos se transmiten continuamente a una estación base.

2.3.6 Basado en ubicación

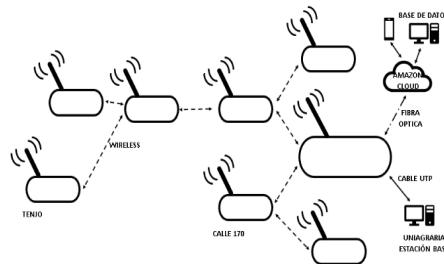
Este protocolo se puede usar en redes donde los nodos determinan su posición utilizando una variedad de sistemas de localización y algoritmos. En lugar de información de conectividad topológica, los sensores usan información geográfica para tomar decisiones de reenvío. En el enrutamiento basado en la ubicación de unidifusión, los paquetes se envían directamente a un único destino, que se identifica por su ubicación. Un remitente debe tener en cuenta no solo su propia ubicación, sino también la del destino. Esta ubicación se puede obtener mediante consulta (por ejemplo, inundar una consulta para solicitar una respuesta del destino que contiene su ubicación) o a través de un intermediario de ubicación, es decir, un servicio que asigna identidades de nodo a ubicaciones.

En los enfoques de enrutamiento basados en la ubicación de difusión o multidifusión, el mismo paquete debe difundirse a múltiples destinos. Los protocolos de multidifusión aprovechan las ubicaciones de destino conocidas para minimizar el consumo de recursos reduciendo los enlaces redundantes. El enrutamiento basado en ubicación resulta conveniente para WSN, pues tiene la ventaja de ser escalable y eficiente, en comparación con los enrutamientos reactivos y proactivos, especialmente en redes en las que los nodos son estacionarios o tienen poca movilidad (Djenouiri y Balasingham, 2011).

2.4 Transmisión inalámbrica

La operación exitosa de una WSN se basa en la comunicación confiable entre los nodos de la red; estos pueden comunicarse a través de un medio inalámbrico creando enlaces entre ellos; por ejemplo, enlaces de radio, infrarrojos, ópticos, acústicos o magneto-inductivos. Para permitir la interoperabilidad y la operación global de estas redes, la transmisión debe estar disponible en todo momento y en todo lugar (Akyildiz y Vuran, 2010). La figura 7 representa el modelo de transmisión en el que los mensajes se dirigen al centro de difusión; entonces, todos los nodos dentro del rango de transmisión del transmisor recibirán una copia del mensaje.

Figura 7. Modelo de transmisión en una doble WSN



Fuente: elaboración propia.

2.4.1 Modelo de canal

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para simular las características de un canal de radio, a través del cual se propagan señales inalámbricas en un ambiente dado. Existen diferentes modelos que permiten obtener una “comprensión” estimada de la mengua de la potencia de la señal electromagnética, que se propaga en un entorno y es recibida en otro lugar. Generalmente, los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos; teóricos o determinísticos; o la combinación de ambos (semiempíricos). La comparación entre los modelos empíricos y los deterministas ayuda a distinguir la

situación de la aplicación de cada modelo de canal; por lo tanto, su disertación origina el desarrollo de modelos de canales inalámbricos y optimiza las características del canal (Mao, 2010).

Modelos empíricos. Están basados en datos de medición simples (pocos parámetros); usan propiedades estadísticas no muy precisas:

- Hata
- Okumura

Modelos semideterministas. Se basan en modelos empíricos y aspectos determinísticos:

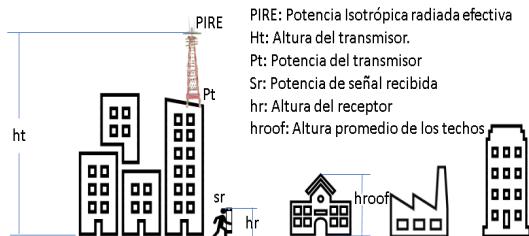
- Egli
- Walfisch
- Ikegami
- Longley Rice

Modelos deterministas. Son específicos del sitio. Requieren una enorme cantidad de información de geometría sobre la cita, y un esfuerzo computacional muy importante y preciso:

- Friis
- Difracción por objetos delgados
- Dos rayos

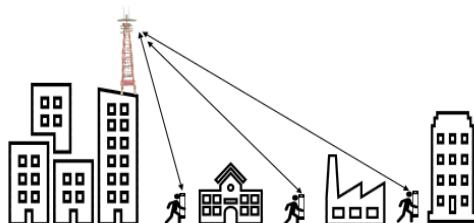
A continuación, se expondrán resumidamente algunos de los modelos de propagación que existen. Estos modelos prevén las pérdidas de potencia de la señal electromagnética en un determinado ambiente. Algunos se presentan de forma teórica, ya que no se utilizan en la realidad, pero ayudan a comprender los fundamentos de modelos más complejos, que son usados experimentalmente.

Los modelos se basan en elementos probabilísticos y pueden calcular la transmisión correcta de la señal a través de una probabilidad. Otros modelos utilizan mediciones realizadas en lugares específicos: se toman miles de mediciones que se promedian y, entonces, se logran establecer los modelos de propagación. Algunos sirven de base para otros modelos, y por tal razón no se pueden separar las teorías matemáticas de la información estadística adquirida en el medio de interés (Ghassemzadeh, 2002). La figura 8 representa un escenario en el que se experimentan los diferentes modelos y la predicción del alcance de una transmisión, que puede ser obtenida mediante cálculos.

Figura 8. Esquema básico de pérdidas por trayectoria**Fuente:** elaboración propia.

2.4.1.1 Free Space Loss

La FSPL (pérdida de ruta de espacio libre) se usa en muchos cálculos de sistemas de comunicaciones para predecir las intensidades de la señal de radio. Es útil como base para entender muchas situaciones de propagación de este tipo de señales en la vida real. Además, la FSPL es un parámetro básico, esencial para muchos cálculos de radiofrecuencia (RF); se usa como primera aproximación en cálculos de corto y mediano alcance (Abhayawardhana et al., 2005). Para entender en contexto la pérdida de la ruta de espacio libre, basta con imaginar una señal que se extiende desde un punto de partida, que funciona como transmisor, hasta un receptor que se alejará de la fuente. La forma de onda de radio se extiende a modo de esfera; a medida que lo hace, el área de superficie de la esfera aumenta, y mientras esto ocurre, la intensidad de la señal disminuye. La figura 9 evidencia un escenario Free Space Loss en el que se muestra que la trayectoria de señal a los receptores no presenta obstáculos.

Figura 9. Esquema básico Free Space Loss**Fuente:** elaboración propia.

$$\text{Señal} = \frac{1}{distance^2} \quad [2.1]$$

2.4.1.2 Fórmula de pérdida de ruta de espacio libre

La fórmula de pérdida de ruta de espacio libre es una derivación de las ecuaciones de Maxwell y es bastante simple de usar. La pérdida de trayecto no solo es proporcional al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, sino que el nivel de señal también es proporcional al cuadrado de la frecuencia en uso, por razones expuestas en la sección siguiente.

$$SPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad [2.2]$$

$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad [2.3]$$

Donde:

FSPL: Pérdida de ruta del espacio libre

d: Distancia del receptor del transmisor (m)

λ: Longitud de onda de la señal (m)

f: Frecuencia de la señal (Hz)

c: Velocidad de la luz en el vacío (m/s)

La pérdida de trayectoria en espacio libre, expresada en decibelios (dB), será la siguiente:

$$L_{dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad [2.4]$$

$$FSPL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} df\right)^2 \quad [2.5]$$

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} df\right) \quad [2.6]$$

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad [2.7]$$

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.4 \text{ dB} \quad [2.8]$$

La tabla 1 muestra los resultados de pérdidas por espacio libre y otras características, y calcula otros modelos de pérdida de trayectoria que caractericen con precisión el efecto de las variaciones del terreno en diferentes entornos.

Tabla 1. Cálculos realizados con el modelo de Espacio libre

Concepto	Predicción de enlace Abreviatura unidades		Valor
Frecuencia	f	Mhz	900
Distancia	d	Km	5,000
Datos de la estación base			
Potencia del transmisor	Pt	dBw	10
Altura de la antena	ht	m	40
Pérdidas en cable	Ica	dB/100m	3
Pérdidas en conectores	Ico	dB/un	0,5
Conectores		un	2
Pérdidas en la torre		dB	2,2
Ganancia de antena transmisora	Ai	dB	17
PIRE		dB	24,8
Datos del medio			
Pérdidas por espacio libre	LOS	dB	105,464
Fading	Fm	dB	-23,748
Disponibilidad	R		0,999
Datos del móvil			
Ganancia de antena receptora	Arx	dB	0
Sensibilidad min de fábrica	Srmin	dBm	-106
Sensibilidad recibida	Sr	dBm	-26,916
	Dif		79,084

Fuente: elaboración propia.

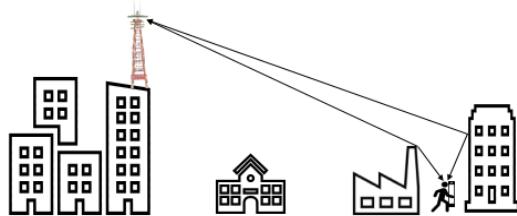
2.4.2 Modelos empíricos

Los modelos empíricos están basados en la observación y experimentación, y han sido construidos siguiendo principios particulares. Aunque no requieren el uso de computadores para la elaboración de cálculos, hemos recurrido a tal utilización, por ello mostramos los resultados en tablas.

2.4.2.1 Okumura-Hata

Este modelo se basa en la información de pérdidas por propagación de Okumuro y es práctico en frecuencias que van de 150 a 1500 Mhz. La altura de la antena en la torre de transmisión debe estar a un nivel de 30 a 200 m; y la altura de la antena del dispositivo receptor, de 1 a 10 m (Singh, 2012). La figura 10 representa un escenario en mención.

Figura 10. Representación básica del modelo Okumura-Hata



Fuente: elaboración propia.

La ecuación de pérdidas es la siguiente (Singh, 2012):

$$L_{50}(\text{urbano})(dB) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_r) * \log d \quad [2.9]$$

- $150 \text{ Mhz} < f_c < 1500 \text{ Mhz}$
- $30 \text{ m} < h_{te} < 200 \text{ m}$
- $1\text{m} < h_{re} < 10\text{m}$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora (MHz).

h_{te} : Altura de la antena transmisora para un rango de 30 a 300 m.

h_{re} : Altura de la antena receptora en el rango de 1 a 10 m.

$a(h_{re})$: Factor de corrección por la altura efectiva del móvil que es función del tipo de área de servicio.

d : Distancia entre el transmisor y el receptor (Km).

Donde $a(h_{re})$ es un factor de corrección que depende de la altura del móvil y se calcula como sigue:

1) Para áreas urbanas:

Para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad [2.10]$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{re}) = \begin{cases} 8.29(\log 1.54 h_m)^2 - 1.1 & f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log 1.75 h_m)^2 - 4.97 & f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad [2.11]$$

2) Para áreas suburbanas:

$$Abs = Ab - 2 \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 - 5.4 \quad [2.12]$$

3) Para áreas rurales:

$$Aba = Ab - 4.78 \log(f)^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad [2.13]$$

En la tabla 2 se exponen los cálculos obtenidos al aplicar las ecuaciones del modelo Okumura-Hata, y los resultados de pérdidas y otras características en ciertas condiciones.

Tabla 2. Cálculos realizados con el modelo Okumura-Hata

Cálculo de propagación en comunicaciones móviles			
Modelo Hata_238			
Datos del enlace			
Concepto	Abrev.	Unidades	Valor
Frecuencia DL	fDL	MHz	2400
Potencia Tx BS	Pbs	dBW	-13
Filtro combinador	Acomb	dB	0
Conectores	Acon	dB	0,1
Jumpers	Ljump	dB	0,1
Longitud cable	1	metros	2,0
Pérdidas cable	α	dB/100 m	2,0
Pérdidas totales en alimentador	Af	dB	0,2
Ganancia antena Tx BS	Gbs_tx	dBi	5,0
PIRE		dBW	-8,2
Distancia	d	Km	0,3
Altura de la antena BS	hbs	m	2
Altura antena MS	hms	m	1,50
Urbano denso	>400 MHz		-0,03
Urbano			0,05
Suburbano			12,93
Rural			28,71
Corrección altura móvil y tipo entorno	4	Rural	28,71
Pendiente de pérdidas	n		4,29
Pérdidas medias del camino	d	dB	105,58

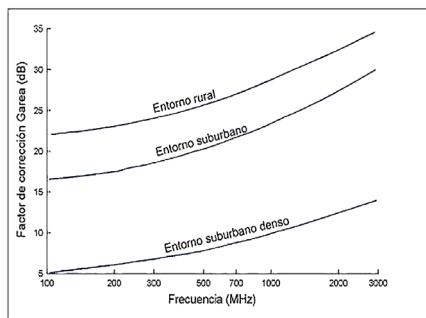
Desviación típica por ubicaciones	ou	dB	5,00
Desviación típica por tiempo	ot	dB	2,00
Porcentaje ubicaciones	% u		90,0
Porcentaje tiempo	% t		90,0
Margen desvanecimiento lento	SFM	dB	6,10
Margen desvanecimiento rápido	FFM	dB	10
Pérdidas totales		dB	121,67

Ganancia antena Rx MS	Gms_rx	dBi	0
Pérdidas recepción móvil	Ams-rx	dB	0
Potencia recibida en MS	Pr ms	dBm	-99,91
Sensibilidad MS	Ubs	dBm	-100
Margen enlace descendente DL			0,09

Fuente: elaboración propia.

En la figura 11 se muestran los cálculos obtenidos al aplicar las ecuaciones del modelo Okumura-Hata y los resultados de pérdidas, dependiendo del espacio geográfico medio en el que se realiza la predicción.

Figura 11. Curvas del modelo Okumura para la atenuación media



Fuente: elaboración propia.

2.4.3 Modelos semiempíricos

Son modelos en los que los cálculos se establecen combinando asociaciones observadas entre variables reales y análisis teóricos que relacionan variables a través de principios fundamentales como la conservación de la potencia recibida (Afric et al., 2007).

2.4.3.1 Walfisch-Ikegami

Este modelo es el resultado de la combinación de los modelos de Ikegami y Walfisch-Bertoni. El enunciado que representa el modelo Walfisch-Ikegami está compuesto por tres términos: a) las pérdidas por espacio libre, b) las pérdidas por difracción y c) la dispersión desde las azoteas hasta el nivel de la calle y las pérdidas por difracciones en múltiples pantallas. Aparentemente es el modelo más completo, pues considera elementos que no se utilizan en la mayoría de los modelos empíricos, como el ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle y los factores de corrección para las pérdidas por difracción (Har et al., 1999).

Los parámetros adicionales del ambiente urbano que este modelo incorpora son los siguientes:

- Altura de los edificios (Hroof).
- Ancho de las vías (W).
- Separación entre los edificios (b).
- Sentido de las vías respecto a la dirección de propagación de la señal (desde la estación base al teléfono celular).

Además, el modelo asume los siguientes aspectos (Har et al., 1999):

- Altura de la antena transmisora (Hbase), 4-50 m.
- Altura de la antena receptora, 1-3 m.
- Frecuencia de la portadora, 800-2000 MHz (como ya se había indicado).
- Distancia horizontal entre la antena transmisora y la antena receptora, 0.02-5 km.

Pérdidas cuando existe línea de vista:

El modelo establece una sencilla fórmula para las pérdidas por propagación cuando existe línea de vista (LOS, Line of Sight) entre transmisor y receptor (Har et al., 1999):

$$L_b(\text{dB}) = 42.6 + 26\log(d) + 20\log(f_c) \quad [2.11]$$

Donde:

d: Distancia horizontal entre transmisor y receptor; el modelo asume que esta distancia es mayor o igual a 20 m, y que está expresada en km.

f: Frecuencia de la portadora (MHz).

Pérdidas por espacio libre:

$$L_0(dB) = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f_c) \quad [2.15]$$

Pérdidas cuando no existe línea de vista:

$$lb = l_0 + l_{rts} + l_{msd} \quad [2.16]$$

Donde:

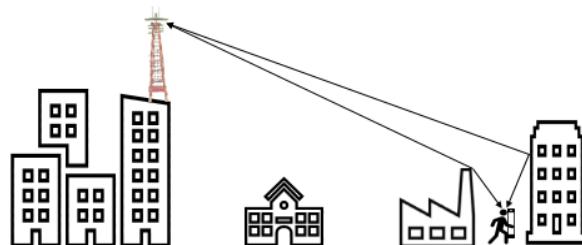
l_0 : Pérdidas por espacio libre.

l_{rts} : Pérdidas por difracción de múltiples esquinas de los techos de los edificios.

l_{msd} : Pérdidas debido a una única difracción final cuando la onda se propaga hacia la calle.

El valor de lb puede llegar a ser mínimo de l_0 cuando $l_{rts} + l_{msd} <= 0$. La determinación de l_{rts} se basa en el modelo de Ikegami, junto con el ancho de las calles y la orientación de estas con respecto a las antenas transmisoras. La figura 12 representa un escenario con los factores que afectan la señal del modelo Walfisch-Ikegami.

Figura 12. Síntesis primordial del modelo Walfisch-Ikegami



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se exponen los cálculos obtenidos al aplicar las ecuaciones del modelo Walfisch-Ikegami, y los resultados de pérdidas y otras características en ciertas condiciones.

Tabla 3. Cálculos realizados con el modelo Walfisch-Ikegami

Cálculo de propagación en comunicaciones móviles Modelo COST 231- Walfisch_Ikegami			
Datos del enlace de bajada (DL)			
Concepto	Abrev.	Unidades	Valor
Frecuencia DL	fDL	MHz	2400
Potencia Tx BS	Pbs	dBW	-13
Filtro combinador	Acomb	dB	0,0
Conectores	Acon	dB	0,1
Jumpers	Ljump	dB	0,1
Longitud cable	l	metros	2,0
Pérdidas cable	α	dB/100 m	2,0
Pérdidas totales en alimentador	Af	dB	0,2
Ganancia antena Tx BS	Gbs_tx	dBi	5,0
PIRE		dBW	-8,2
Distancia	d	Km	0,30
Altura de la antena BS	hbs	m	2
Altura antena MS	hms	m	1,50
Altura media de los tejados	hr	m	20,00
Ancho media de la calle	w	m	10,00
Distancia media entre edificios			20,00
Pérdidas del espacio libre	Lfs	dB	89,65
Pérdidas de difracción tejado-calle	L rts	dB	32,25
Pérdidas multipantalla	Lmsd	dB	34,78
Pendiente de pérdidas	n		5,15
Pérdidas medias del camino	d>20 km	dB	156,68
Desviación típica por ubicaciones	ou	dB	5,00
Desviación típica por tiempo	ot	dB	2,00
Porcentaje ubicaciones	% u		90,0
Porcentaje tiempo	% t		90,0
Margen desvanecimiento lento	SFM	dB	6,10
Margen desvanecimiento rápido	FFM	dB	10
Pérdidas totales		dB	172,77

Ganancia antena Rx M S	G ms_rx	dBi	5
Pérdidas recepción móvil	Am s-rx	dB	0
Potencia recibida en MS	Pr ms	dBm	-146,01
Sensibilidad MS	Ubs	dBm	-100
Margen enlace descendente DL			-46,01

Fuente: elaboración propia.

2.4.3.2 Longley-Rice

El modelo Longley-Rice, también llamado de Irregular Terrain Model (ITM), predice la aleatoria propagación de señal a largas y medias distancias sobre terrenos irregulares. Fue diseñado para frecuencias en el rango de 20 MHz a 20 GHz, con longitudes de distancia de 1 a 2000 km (Luebbers, 1982).

Es un modelo estadístico que tiene en cuenta parámetros adicionales para el cálculo de pérdidas:

- Altura media del terreno (ondulación).
- Refracción de la tropósfera.
- Perfiles del terreno.
- Conductividad y permisividad del suelo.
- Clima.

El modelo Longley-Rice tiene parámetros comunes al de otros modelos de propagación:

- Frecuencia: entre 20 MHz y 20 GHz.
- Polarización: horizontal o vertical.
- Refractividad: determina la cantidad de curvatura que sufrirán las ondas radio.

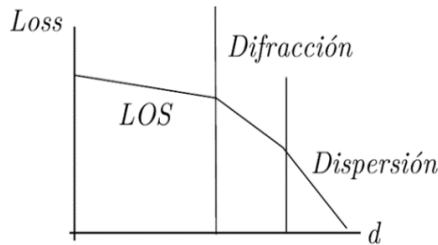
Asimismo, tiene en cuenta parámetros adicionales para el cálculo de pérdidas: frecuencia de transmisión, longitud del trayecto, polarización, alturas de las antenas, refractividad de la superficie, radio efectivo de la tierra, conductividad del suelo, constante dieléctrica del suelo y condiciones climáticas.

Para realizar el cálculo de la propagación, el modelo Longley-Rice considera parámetros habituales en otros modelos de propagación:

- Frecuencia: el rango de frecuencias para este modelo varía entre 20 MHz y 20 GHz.
- ERP: potencia efectiva radiada, que corresponde a la energía que emite la antena transmisora en las unidades que establezca el diseñador (mW, W, kW, dBm, dBW, dBk).

El modelo usa la hipótesis de la difracción, la refracción troposférica y la dispersión del terreno para el cálculo de pérdidas. Las pérdidas adicionales están basadas en medidas tomadas en varias situaciones. En la figura 13 se representan a escala las pérdidas de señal por cada efecto atmosférico con respecto a la distancia.

Figura 13. Pérdidas de señal por diferentes factores



Fuente: elaboración propia.

2.4.4 Modelos deterministas

Son modelos matemáticos en los que los resultados se determinan con precisión, a través de relaciones conocidas entre estados y eventos; esto significa que una entrada dada siempre producirá la misma salida.

2.4.4.1 FRIIS

Este modelo se deduce de las ecuaciones de Maxwell y permite establecer la potencia recibida por un equipo receptor a cierta distancia del equipo transmisor en condiciones ideales, es decir, sin obstáculos de ninguna naturaleza:

$$L = 2.44 + 20 \log_{10} r + 20 \log_{10} f \quad [2.17]$$

Donde:

L : Pérdidas por trayectoria (dB)

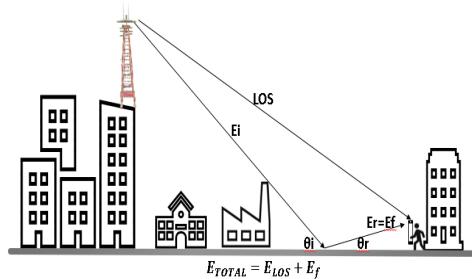
f: Frecuencia (Mhz)

d: Distancia (Km)

2.4.4.2 Dos rayos

Este modelo es conveniente si se requiere conocer la reflexión de las señales electromagnéticas sobre la tierra, ya que se basa en óptica geométrica. En la figura 14 se representa un escenario de dos rayos (Eyceoz y Duel-Halle, 1998).

Figura 14. Parámetros básicos para modelo de dos rayos



Fuente: elaboración propia.

Tiene en cuenta la altura de las antenas receptora y transmisora. Su ecuación matemática para calcular la potencia es la siguiente:

$$p_r = \frac{P_t G_r G_t h_r^2 h_t^2}{d^4} \quad [2.18]$$

Donde:

P_r : Potencia recibida (W).

P_t : Potencia trasmisita (W).

G_r : Ganancia de la antena receptora.

G_t : Ganancia de la antena transmisora.

h_r : Altura de la antena receptora (m).

h_t : Altura de la antena transmisora (m).

d : Distancia (Km).

La ecuación para las pérdidas por propagación es la que sigue:

$$L_p (dB) = 40 \log d + (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_r + 20 \log h_t) \quad [2.19]$$

Donde:

L_p : Pérdidas por trayectoria (dB).

d : Distancia (Km).

G_r : Ganancia de la antena receptora (dB).

G_t : Ganancia de la antena transmisora (dB).

h_r : Altura de la antena receptora (m).

h_t : Altura de la antena transmisora (m).

2.4.4.3 Modulación

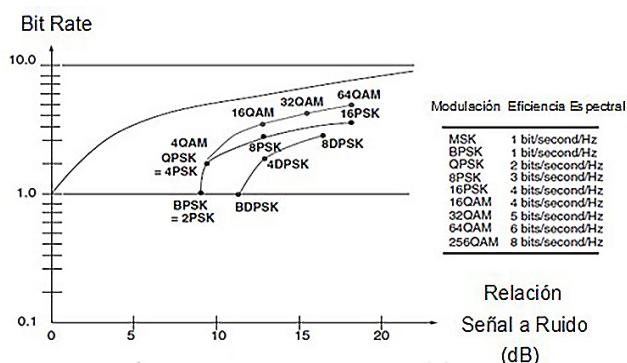
La modulación es la mezcla de una señal de información y una señal de alta frecuencia o portadora subyacente, que luego se transmite a través del medio (en este caso, un medio inalámbrico). En WSN existen tres tipos de modulación típicamente usados. Debido a que la señal de información entrante es digital, el proceso de modulación se denomina codificación por desplazamiento de frecuencia (FSK). En un entorno PM, la modulación se denomina cambio de fase de codificación (PSK), cuando la señal de inteligencia que recibe es digital. Si en un entorno digital la señal entrante se interpreta como una secuencia de n bits a la vez (por ejemplo, 00, 01, 10, 11; o 000, 001, 010, 011) y se utiliza una combinación de técnicas PSK y ASK, el proceso de modulación es llamado modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

El objetivo del diseño es maximizar el rendimiento del canal, haciendo que la señal digital entrante sea lo más densa posible (eje de tiempo lo más pequeño posible) o encontrando una forma de codificar grupos de bits entrantes en un solo cambio de señal (también conocido como baudios). La capacidad digital máxima C de un sistema de una sola portadora, con ancho de banda espectral W, se especifica mediante la ecuación de Shannon:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [2.20]$$

S es la potencia de señal recibida y N es la potencia de ruido (se supone que se trata de un canal de ruido gaussiano blanco aditivo). En un entorno típico, el término de registro varía de 1 a 10, dependiendo de la técnica de modulación (la relación señal-ruido suele estar entre 1 y 20). La figura 15 muestra algunos esquemas de modulación típicos.

Figura 15. Eficiencia típica de los esquemas de modulación



Fuente: elaboración propia.

2.5 Errores en la transmisión (BER)

El desempeño de los dispositivos inalámbricos se evalúa teniendo en cuenta las características de transmisión, el modelo de canal inalámbrico, y los parámetros y estructura de los dispositivos de comunicaciones. Uno de los desafíos que los sistemas de comunicaciones digitales han traído a la ingeniería de radio es la necesidad de mediciones de rendimiento de extremo a extremo. La medida de ese rendimiento es el BER (error de bit), que cuantifica la confiabilidad de todo el sistema de radio, incluyendo la electrónica, las antenas y la ruta de la señal en el medio. En la superficie, BER es un concepto simple (Breed, 2003):

$$BER = \frac{\text{Total de bits errados}}{\text{Total de bits transmitidos}} \quad [2.21]$$

El desempeño de la transmisión a través de canales inalámbricos se puede establecer observando el BER, que es una función de la relación señal a ruido (SNR) en el receptor. En este proyecto, se propuso calcular la SNR a través de algunos modelos que presentan la relación de una función de la distancia entre el emisor y el receptor, el factor de pérdida de trayectoria y la ganancia de canal. Describimos los tres más importantes y las distribuciones de uso frecuente: AWGN, Rayleigh y Rician. La señal se detecta y decodifica empleando varias réplicas de la señal recibida.

Diversos modos de transmisión se definen en estándares disímiles de WSN, puesto que deben considerar parámetros de capa física y características del canal inalámbrico. En este trabajo se evalúa el rendimiento de los modos de transmisión disponibles en IEEE. 802.11b. Este análisis se puede hacer directamente utilizando el rendimiento de los modos de transmisión, y se evalúa calculando la probabilidad de tasa de error de bits (BER) frente a la relación señal a ruido (SNR) en el canal inalámbrico de uso frecuente, en los tres modelos (AWGN, Rayleigh y Rician).

En las tablas 4 y 5 se consideran la modulación y velocidad de datos para analizar el rendimiento del BER frente a la SNR. Los resultados de la simulación muestran el rendimiento de la transmisión bajo diferentes modelos de canal. Es posible advertir que, en algunos de ellos, los modos de transmisión no son eficientes.

Tabla 4. Cálculos de BER en modulación PSK

Modulación	PSK	QPSK	8PSK	16PSK	32PSK	64PSK
Bits	1	2	3	4	5	6
Niveles	2	4	8	16	32	64
B/fb	1	0,5	0,333	0,25	0,2	0,167
Eb/No (log)	BER					
10,186	4,906E-6	2,453E-6	8,197E-4	1,866E-2	6,33E-2	9,715E-2
Sr	-125,833			Distancia (km)		BER
N	-129,998				1	5,449E-301
B/fb	-6,021				2,00E+00	3,600E-31
Eb/No	10,186				3	1,706E-9
					4	9,086E-5
					5	0,004
					6	0,018

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Cálculos de BER en modulación QAM

Modulación	Qam	16qam	32 Qam	64qam	128 Qam
Bits	3	4	5	6	7
M	8	16	32	64	128
L	2	3	4	5	6
b/FB	0,333	0,25	0,2	0,167	0,143
Eb/No (log)	BER				
13,779	2,422E-12	5,734E-6	0,000	0,003	0,008
Sr	-124				
N	-129,998				
B/fb	-7,782				
Eb/No	13,779				

Fuente: elaboración propia.

Para tener una mejor estimación del BER, en este trabajo se ha utilizado el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI); la energía promedio se introduce como una nueva métrica de decisión. De este modo, se deriva un límite de error de posición al cuadrado como un parámetro de precisión, y se propone un problema de optimización para maximizar el rendimiento del BER (Suárez et al., 2018). La estrategia de asignación de energía óptima se deriva primero, en el caso de que los nodos estimen sus propias potencias de transmisión sin error, pues hay errores inevitables debido a la interacción. El problema de optimización se modifica al incluir incertidumbre en el BER. Los resultados muestran que es posible lograr una reducción sustancial en el error mediante la asignación óptima de la potencia de transmisión.

3. WSN construidas con aplicaciones medioambientales

Los ecosistemas a menudo se caracterizan por su gran heterogeneidad, complejidad y dinámica; por lo tanto, las mediciones individuales o específicas no son apropiadas para mapear adecuadamente un sistema de este tipo. El uso de redes de sensores inalámbricos en sistemas ambientales terrestres ofrecería ventajas significativas en la adaptación de las condiciones de prueba locales, a través de la implementación simple de la distribución de sensores. El medioambiente constituye una de las áreas en la que se están implementando WSN. Esta tecnología favorece el análisis de variables ambientales vitales y permite obtener más fenómenos inesperados, lo que da lugar al desarrollo de nuevos paradigmas (Chen et al., 2013). Las WSN pueden generar alertas sobre la afluencia de heladas, inundaciones, incendios, etc. Además, tienen la capacidad de entregar información dirigida a la prevención de desastres y realizar predicciones climáticas. Se identifica, entonces, una necesidad generada por la incertidumbre que presenta variables climáticas, las cuales son incontrolables y propias de cualquier ambiente.

3.1 Aplicaciones usuales

3.1.1 Redes estáticas para la observación ambiental

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son adecuadas para la adquisición de datos ambientales a largo plazo. La implementación rápida, la larga vida útil, el bajo mantenimiento, la alta calidad de servicio, la reutilización de sus componentes y el bajo esfuerzo son algunas especificaciones en el diseño de una amplia gama de aplicaciones de monitoreo ambiental (Lazarescu, 2013). Con estas plataformas se investigan aspectos como el cambio climático, el cambio de uso de la tierra, las invasiones biológicas, y los efectos y consecuencias de los contaminantes en las comunidades de especies, los ecosistemas y sus funciones, y los seres humanos.

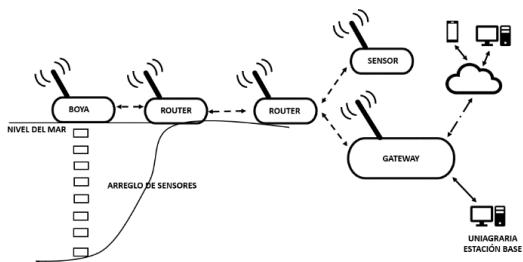
Esta clase de WSN permite el monitoreo a largo plazo, útil en la investigación de ecosistemas. El punto principal de la presente propuesta está orientado hacia los parámetros meteorológicos y del suelo, por lo que se puede detectar la interacción de los procesos bióticos y abióticos.

3.1.2 Vigilancia hidrológica

Un desafío pendiente en hidrología es explicar los patrones de comportamiento hidrológico, observados en múltiples escalas espaciotemporales, como resultado de factores ambientales interactivos. La variabilidad espacial y temporal del contenido de agua del suelo (SWC) está determinada por factores de cambios climáticos, topografía, propiedades del suelo y vegetación, que interactúan de una manera compleja, no lineal (Western et al., 2004).

Comprender y caracterizar esta variabilidad espacial es uno de los principales desafíos en la ciencia hidrológica (Vereecken, 2007). Utilizando WSN se puede tener una plataforma de observación centrada en la investigación de los sistemas hídricos, como el incremento o la disminución de acuíferos, o soluciones para el suministro eficiente y gestión de calidad del agua. En la figura 16 se muestra el esquema de un proyecto dirigido a la observación de sistemas hídricos.

Figura 16. Componentes de observación de un sistema hídrico



Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Redes móviles para campañas de medición orientadas a eventos

Actualmente, se usan WSN a gran escala para monitorear en tiempo real el estado ambiental. Sin embargo, funcionan bajo restricciones extremas de energía y están diseñadas manteniendo una aplicación en mente (kyildiz et al., 2002). Estas WSN han sido desarrolladas para el monitoreo de eventos terrestres y atmosféricos, ya que en un nodo sensor estándar es posible incluir sensores de humedad y temperatura del suelo, así como sensores de temperatura y humedad del aire. También puede contar con sensores de radiación fotosintética o de radiación de longitud de onda y conectar

sensores de velocidad y dirección del viento o geoeléctricos, para registrar procesos bióticos y abióticos y sus interacciones.

3.1.4 Monitoreo ambiental urbano basado en teléfonos inteligentes

Consiste en una plataforma para la integración de diferentes componentes de sensores, que generan datos ambientales, y con la que se pueden detectar relaciones de procesos y sistemas ambientales en condiciones de campo. A menudo, los dispositivos móviles se convierten en nodos en una red de sensores, que sirven para reunir, analizar y compartir el conocimiento local. Los patrones de movilidad individual y las historias de la vida cotidiana de los colaboradores se pueden agregar para documentar un entorno urbano (D'Hondt, 2013). La figura 17 presenta la combinación de las WSN con los sistemas móviles inteligentes.

Figura 17. Sistema de integración de diferentes dispositivos



Fuente: elaboración propia.

3.2 Elementos de una WSN

Según Pinto et al. (2004), una WSN físicamente está conformada por un conjunto de componentes principales, como elementos de telecomunicaciones inalámbricas, sensores conectados a módulos electrónicos y sustentados por dispositivos de generación y almacenamiento de energía. Además, se deben tener en cuenta unidades adicionales: las plataformas de almacenamiento y transmisión de los datos a la nube, las estaciones base y *gateways* o enrutadores, y un servicio para entregar datos al terminal, como un cliente del teléfono inteligente.

3.2.1 Sensores

Según SMC (2017), los sensores son elementos cuya función principal es cuantificar una variable física en una variable eléctrica. Sus aplicaciones son extensas y están presentes en todos los procesos que requieran conocer elementos del entorno: desde temperatura, presión o distancia hasta color, marcas o tipo de material. Cabe resaltar

que los sensores son el elemento fundamental de la red, sin ellos esta no tendría funcionalidad. Cuando la aplicación es una WSN, los sensores deben asumir limitantes inherentes a esta tecnología, como bajo requerimiento energético, capacidad de funcionamiento en ambientes agresivos (temperaturas extremas, vibraciones, vientos, lluvia, etc.), repetitividad, etc. Conociendo esto, la creación de nuevos elementos sensores orientados específicamente a esta tecnología surge como un área de investigación e innovación necesaria para dar lugar a la globalización de estas redes.

3.2.2 Nodo sensor

Conocido también como nodo genérico, puede estar provisto de varios elementos sensores, los cuales tendrán la capacidad de medir, al mismo tiempo, variables presentes en el ambiente. Debe requerir un bajo consumo de energía, puesto que su función se limita a obtener datos del entorno, y presentan baja capacidad de procesamiento y almacenamiento. Según el tipo de aplicación implementada, el nodo sensor debe ser capaz de controlarse y autogestionarse, para garantizar que la información suministrada sea transmitida, sin presentar pérdidas por factores externos a la red (Valdez, 2014).

Un problema del nodo sensor es la capacidad en su batería. La falta de energía en este elemento puede generar problemas funcionales: pérdida de datos, envío erróneo de datos, inconsistencia en el sistema, alteración de la red —que genera error en otros nodos sensores—, almacenamiento de datos no deseados, etc. (Maksimović, 2014). Por tal razón, la generación óptima de energía se considera un tema de investigación en la solución de este problema.

Por otra parte, existen tecnologías que han tomado relevancia en el mundo. La llamada energía limpia es potencialmente adecuada para cubrir la necesidad energética de una WSN; celdas solares (Chu at al., 2011), elementos piezoelectrónicos que aprovechan la vibración (Action Nechibvute et al., 2012) son las alternativas investigadas actualmente.

La obtención de la energía mediante paneles solares es la más usada en aplicaciones de redes de sensores inalámbricos; tiene a su favor que el sol es un elemento generador que está presente durante muchas horas al día sin ningún costo. Los paneles solares son módulos utilizados desde hace muchos años en la industria y existe gran cantidad de estudios sobre obtención de energía solar, lo cual los hace viables para estas aplicaciones. Sin embargo, esta solución no cubre totalmente la necesidad: lugares con poca radiación solar o ambientes con abundante nubosidad hacen que la energía obtenida por el sol proporcione solo una solución parcial.

Otra tecnología capaz de generar la energía requerida son los dispositivos que transforman vibraciones, funcionan bajo un principio piezoelectrónico. Este proceso consiste en transformar el movimiento generado sobre elementos —como cristales

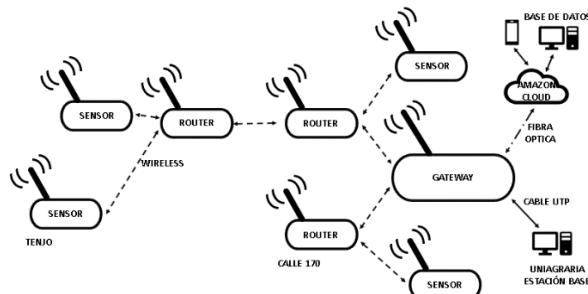
de cuarzo—, para obtener energía. Su principal desventaja es la falta de desarrollo tecnológico. No es una materia investigada a fondo, por ende, su costo de adquisición puede ser elevado. Existen aplicaciones como el Vibration to Electricity (Roundy, 2002), desarrollado en Estados Unidos, que representa un gran paso hacia la producción de energía mediante esta tecnología.

El ruido es otro factor generador y podría ser una gran alternativa energética. No es una tecnología muy reciente y existen factores importantes que hacen pensar que su implementación podría solucionar la problemática en algunos ambientes. Este sistema es ideal para ambientes citadinos, con elevado nivel de contaminación auditiva, pero no para granjas o espacios alejados de las grandes urbes. Actualmente, esta aplicación no está muy asociada a WSN: su tamaño es pequeño, su costo es elevado y su principal fuente, el ruido, puede no estar presente en algunos ambientes.

3.2.3 Gateway

El *gateway* es el elemento conector entre el nodo sensor y la red; cumple funciones organizadoras y logísticas en la transmisión de datos. En la figura 18 se muestra el lugar que este elemento ocupa en la red.

Figura 18. Establecimiento de un *gateway*



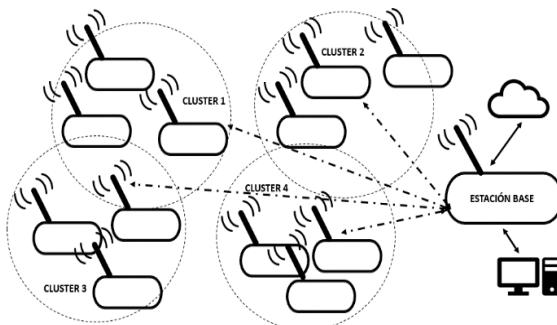
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 18, según la estructura de red, el *gateway* cumple su función mediante la interacción directa con todos los nodos sensores. Si la red presenta una complejidad mayor, tendrá conexión con nodos específicos, los cuales, además de sus funciones principales, cumplirán con la de almacenar datos y luego transmitirlos al *gateway*. La selección de este elemento se basa en los requerimientos de la red. Una red necesitará mayor capacidad de procesamiento según el área que desea cubrir. Como es lógico, conociendo esta necesidad, las variables a considerar serán la memoria RAM, los voltajes de operación, su valor ADC, la capacidad de bits, entre otras. Estas características son a priori valores de gran importancia en esta parte del proceso, pues una buena elección garantiza el buen desempeño de la red.

3.2.4 Estación base

La estación base gestiona la red de sensores inalámbricos. Posee un desarrollo de *hardware* y *software* que le da la capacidad de consultar los sensores, almacenar los datos detectados y presentarlos en forma gráfica. Actualmente, las aplicaciones pueden reenviar los datos recopilados a través de internet a un servidor. Así se muestra en la figura 19 (el desarrollo de una aplicación se expone en detalle en el capítulo 5; corresponde a la segunda parte de este proyecto). La aplicación proporciona acceso web y páginas con datos recolectados. El acceso a las páginas web de la aplicación es reforzado con autenticación de una contraseña para el inicio de sesión.

Figura 19. Arquitectura WSN con estación base asociada



Fuente: elaboración propia.

3.3 Aplicaciones ambientales de WSN en el ámbito mundial

En el mundo las aplicaciones que usan redes de sensores inalámbricos están en aumento, abarcan problemas industriales, prevención de desastres naturales, análisis de estructuras, control de ambientes, monitoreo de animales, análisis de comportamiento en animales, control de plagas, etc. En este apartado se mostrarán las aplicaciones actuales más novedosas y las proyecciones para el futuro de esta tecnología.

Othman (2012) presenta un estudio que analiza las características más importantes requeridas en un sistema para aplicaciones ambientales. Entre esas se cuentan la autonomía, pues es necesario implementar la batería más adecuada para los requerimientos del sistema; la confiabilidad, con el fin de evitar comportamientos no deseados; la robustez, porque el sistema debe tener la capacidad de trabajar en ambientes poco favorables y cambiantes sin modificar sus prestaciones; y la flexibilidad, a efectos de aumentar el alcance de la red. Este estudio también hace referencia a la necesidad de solucionar el problema generado por la fuente de energía en el nodo sensor, buscando como factor principal una fuente autónoma de corriente.

Para alcanzar estas características, la fuente de alimentación representa el problema a solucionar. En la actualidad, la obtención de energía mediante variables climáticas o fenómenos físicos es muy común, pero no se enfoca en sistemas de baja potencia como las WSN. Una de las soluciones propuestas es la energía solar mediante paneles solares, pero su principal desventaja es la falta de luz en el ambiente. La energía mecánica es otra alternativa de solución, utiliza la energía generada por el movimiento de elementos. La energía por cambios de temperatura es tal vez una de las más complejas de implementar en este tipo de redes, puesto que es difícil controlarla en ciertos ambientes trabajo.

Autores como Mohammed et al. (2016) aluden al proyecto Sodoma Dust (construido en Sodoma, California EUA), que basa su producción en la industria del vino, extrayendo su materia prima de árboles aledaños al condado. La red de sensores monitorea aspectos del hábitat de ese bosque. Los nodos de la red están programados para monitorear condiciones ambientales, temperatura, humedad o radiación solar. Los datos son recolectados y enviados cada cinco minutos, usando una de las ventajas de un WSN: mediante la conexión, estos datos son enviados desde los nodos lejanos a los más cercanos, hasta llegar a la estación base, y desde allí son remitidos a un computador a 70 km, para su análisis y estudio.

Existe otro proyecto innovador que plantea como objetivo primordial la captación de información climática y del suelo en el cultivo. Esta información se utiliza para encontrar una mejor forma de combatir la *Phytophthora* dentro de un cultivo, con base en valores tomados individualmente. La *Phytophthora* es una enfermedad fúngica en las papas, su propagación y ataque se asocia a condiciones climatológicas no controladas dentro del campo. La aplicación está compuesta por 150 nodos sensores, que poseen una tecnología similar a las motas de referencia Mica2; estas tienen un sistema preinstalado de monitoreo para cultivos. Los nodos son ubicados manualmente y su ubicación se apunta en un mapa; constan de sensores para registrar la temperatura y la humedad relativa (Ministerio de Ambiente de Perú, 2013).

Además de los nodos, se implementó una estación meteorológica, que tiene la capacidad de tomar datos de luminosidad, presión del aire, precipitación, fuerza del viento y dirección. Los datos obtenidos por los nodos sensores se envían, mediante un protocolo de enrutamiento de varios saltos, al nodo receptor (*gateway* de campo), para luego ser enviados a través de Wi-Fi al enlace de Lofar (la empresa creadora de los nodos sensores). Los datos se cargan en un servidor Lofar conectado a internet y, posteriormente, son distribuidos a otros servidores.

Villón Valdiviezo (2011) presenta el diseño de una red inalámbrica para agricultura de precisión. El objetivo es mostrar una solución apropiada a la problemática generada por la dificultad para recopilar información, confiable y en tiempo real, del estado de los terrenos asignados a agricultura en Perú. El esquema de la solución planteada

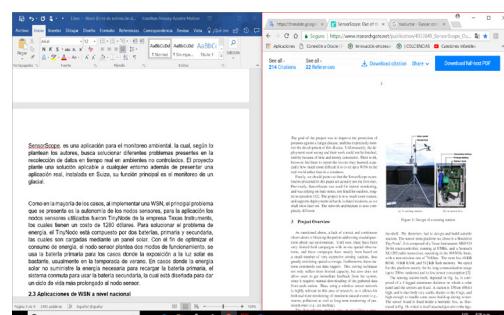
toma en cuenta la topología de la red y considera que el sistema de comunicación debe obtener y enviar datos íntegros mediante un protocolo y, al mismo tiempo, consumir la menor energía posible a través de un algoritmo. Por otra parte, una red de este tipo debe ser capaz de crecer sin afectar su calidad y presentar la información en un *software* amigable y de fácil análisis.

Barrenetxea et al. (2010) exponen SensorScope, una aplicación para el monitoreo ambiental, que busca solucionar diferentes problemas en el almacenamiento de datos en tiempo real en ambientes no controlados. El proyecto plantea una solución aplicable a cualquier entorno y presenta una aplicación real instalada en Suiza; su función principal es el monitoreo de un glacial.

Como en la mayoría de los casos, al implementar una WSN, la dificultad más significativa se presenta en la autonomía de funcionamiento de los nodos sensores. En esta aplicación los nodos sensores utilizados fueron TinyNode de la empresa Texas Instruments, los cuales tienen un costo de USD 1280. Para solucionar el problema de energía, el TinyNode está compuesto por dos baterías, una principal y otra suplementar, que son cargadas mediante un panel solar con el fin de optimizar el consumo de energía. El nodo sensor plantea dos modos de funcionamiento: se usa la batería principal para los casos en los que la exposición a la luz solar es suficiente, usualmente en la temporada de verano; si la energía solar suministrada no es suficiente para recargar la batería primaria, el sistema comuta para usar la batería secundaria, diseñada para dar un ciclo de vida más prolongado al nodo sensor.

En la figura 20 se muestra un nodo sensor implementado en una estación. Cada estación puede tener hasta siete sensores externos diferentes, algunos de ellos miden distintas variables. Según la elección de los tipos de sensores, las estaciones tienen la capacidad de medir nueve cantidades ambientales distintas: temperatura y humedad del aire; temperatura superficial; radiación solar entrante; velocidad y dirección del viento; precipitación; contenido de agua del suelo y succión del agua del suelo.

Figura 20. Nodo sensor TinyNode



Fuente: Barrenetxea et al. (2010).

Uno de los problemas que presentó este proyecto fue la complejidad para obtener datos en lugares remotos, pues se necesitaba un diseño más robusto para la reducción de posibles causas de error. Se realizaron pruebas en dos ambientes. La primera se basó en la implementación de 17 nodos sensores en el interior de un edificio, durante una semana; los datos se obtuvieron de forma constante y adecuada. Cabe mencionar que para esta prueba el edificio estaba vacío, lo cual mejoró las condiciones de trabajo. La segunda prueba fue en un ambiente abierto: se implementaron 10 estaciones en la montaña Genepi en Suiza; los autores apuntan la versatilidad del proyecto, pero señalan la complejidad de los ambientes adversos, pues dificultan el funcionamiento de sensores y nodos sensores.

El papel protagónico de las redes de sensores inalámbricos es destacado por Arampatzis (2005). En su trabajo, contextualiza la importancia de las redes de sensores para mecanismos de emergencia y plantea un evento como ejemplo: luego de un evento sísmico, las redes de sensores en un edificio pueden guiar, mediante alarmas lumínicas, la mejor y más rápida salida de personas. Si hablamos de edificaciones, la mejora del confort surge como una gran aplicación para las redes de sensores. Se subraya, además, la implementación de un sistema de sensores para analizar el consumo de energía, tanto de calefacción como de refrigeración, en el edificio Pacific Northwest National Laboratory (Richland, Washington). El objetivo es reducir los consumos no deseados y analizar posibles mejoras.

Una aplicación para la recolección de datos de un volcán activo muestra una red altamente compleja de sensores, analizando uno de los ambientes de trabajo más hostiles para cualquier tipo de tecnología. Werner-Allen et al. (2006) presenta el proyecto Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano, que expone la posible salida para el análisis de datos de volcanes. La característica estación de almacenamiento de datos volcánicos de hoy en día consiste en grandes equipos, pesados y limitados de energía, difíciles de mover y que requieren baterías de automóviles para obtener la energía. Estas implementaciones remotas a menudo demandan asistencia de vehículos o helicópteros para la instalación y mantenimiento del equipo.

El almacenamiento local también es un factor limitante: las estaciones normalmente registran datos en una tarjeta Compact Flash o disco duro que los investigadores deben recuperar periódicamente, por lo que deben regresar regularmente a cada estación. Aunque estas limitaciones dificultan la construcción de redes amplias con los equipos que existen actualmente, los experimentos a gran escala permiten obtener conocimientos significativos sobre el funcionamiento interno de los volcanes.

La tomografía volcánica plantea un enfoque para el estudio de la organización interior de los volcanes, puede producir mapas precisos del estado volcánico a través del almacenamiento y el análisis de señales de múltiples estaciones. En general, la precisión de dichos mapas se desarrolla a medida que las estaciones se agregan a la red de

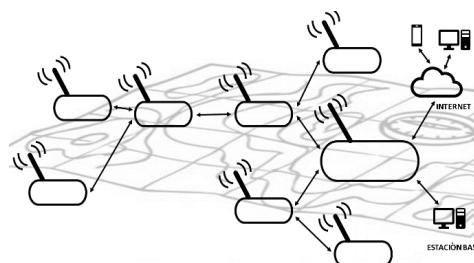
recolección de datos. Estudios como estos podrían ayudar a solucionar los problemas sobre los procesos físicos en el trabajo realizado al interior de un volcán.

El Colegio del Atlántico (COA) está realizando pruebas de campo con redes de sensores *in situ* para el monitoreo del hábitat. Actualmente, el COA cuenta con proyectos de investigación con una infraestructura y soporte logístico bien establecidos en diferentes islas remotas, por ejemplo, Great Duck Island (GDI) (44.09°N , 68.15°W), que tiene 237 acres y se encuentra ubicada a 15 km al sur de Mount Desert Island, Maine. Sus requisitos son los siguientes (Ha'c, 2003):

- **Acceso a internet.** Las redes de sensores en GDI deben ser accesibles a través de internet; es un aspecto esencial de las aplicaciones de monitoreo de hábitat que consiste en la capacidad de realizar interacciones remotas con redes *in situ*.
- **Red jerárquica.** La estación de campo en GDI necesita recursos suficientes para realizar interconexión a internet y a diferentes aplicaciones de bases de datos. Un segundo nivel de redes inalámbricas proporciona conectividad a múltiples parches de redes de sensores, desplegados en cada una de las áreas a estudiar; son tres a cuatro parches de 100 nodos estáticos (no móviles).
- **Vida útil de la red de sensores.** La vida útil corresponde a un tiempo de funcionamiento de nueve meses con baterías.
- **Gestión a distancia.** Corresponde a la distancia entre los sitios que se requieren monitorear y gestionar a través de internet. La meta es cero presencia en el sitio para mantenimiento y administración.
- **Operación cautelosa.** La infraestructura de monitoreo de hábitat debe ser discreta, pues no se debe interrumpir los procesos o conductas naturales.
- **Almacenamiento de datos.** Es esencial almacenar lecturas de sensores para minería y análisis de datos fuera de línea.

La estructura requerida en el proyecto se muestra en la figura 21.

Figura 21. Distribución WSN requerida en Great Duck Island

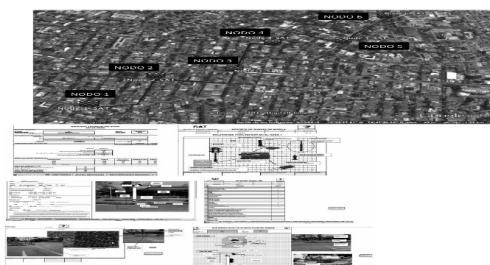


Fuente: elaboración propia.

3.4 Aplicaciones de WSN a nivel nacional

El trabajo de Cama-Pinto et al. (2016) consiste en una investigación que implementa un sistema de alerta temprana. Se usa una red de sensores inalámbricos encargados de reconocer variables ambientales, con el fin de detectar posibles inundaciones repentinas —comúnmente llamadas “arroyos”— en la ciudad de Barranquilla (Colombia). Se trata de un tipo de investigación aplicada, que se concentra en mayor medida en cubrir la ruta del arroyo denominado La Brigada, como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Mapa de recorrido del arroyo La Brigada con ubicación de nodos



Fuente: Cama-Pinto et al. (2016).

La construcción de la red de sensores inalámbricos se realizó usando seis nodos ubicados a orillas de la ruta trazada por el arroyo; estos se encargan de monitorear variables ambientales presentes en el recorrido. Se construyó una topología red de bus, utilizando el nodo 6 como *gateway*, que está a cargo de controlar la red y los eventos. En la transmisión de datos se implementaron módulos Xbee-Pro, seleccionados por su alcance en la distancia de transmisión. En la toma de datos se realizaron diferentes pruebas: en ambientes urbanos con obstáculos, en ambientes urbanos sin obstáculos, en ambiente libre de obstáculos y en áreas rurales. Se estableció el indicador de señal (RSSI) y el de éxito de transmisión, y como resultado del análisis se descubrió que el RSSI con mayor intensidad, a la misma distancia, se presenta en el ambiente rural y sin obstáculos.

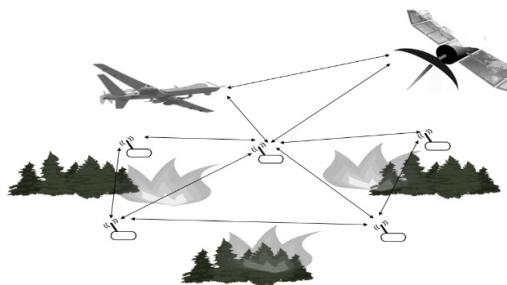
Analizando los resultados, los investigadores concluyeron que el sistema es capaz de obtener un dato meteorológico y alertar de un cambio brusco en dicha variable, pero es incapaz de analizar la peligrosidad del evento (Cama-Pinto et al., 2016).

Caicedo et al. (2015) presentaron un trabajo que estableció un diseño de campo a través de la modalidad de investigación aplicada en el municipio de Santa Lucía (Atlántico), el cual ha sido afectado por constantes inundaciones producidas por fuertes precipitaciones. Se propuso una WSN de 12 nodos, integrados por una placa de sensores capaces de medir diferentes variables climáticas, como temperatura, presión, humedad; y una estación meteorológica compuesta por un pluviómetro, y un

sensor de velocidad y dirección de viento. Se construyó una topología de red en malla, con la capacidad de cubrir toda el área del municipio. Se implementó el protocolo de comunicación ZigBee, como método de obtención de datos climáticos en lugares de difícil acceso y con condiciones inadecuadas.

Por su parte, Bermúdez et al. (2007) propone un método que aprovecha las WSN para el reconocimiento de áreas en riesgo de incendios forestales. En la figura 23 se presenta el diseño de este sistema, que está constituido por tres módulos: la red de sensores (WSN), la estación base, y uno o varios vehículos aéreos no tripulados (UAV). Los dispositivos son instalados en la zona afectada por el incendio mediante los UAV. Posteriormente, los sensores establecen una red inalámbrica interconectada, totalmente autónoma y autoconfigurable. Cada sensor se encarga de inspeccionar el terreno más cercano realizando mediciones periódicas de variables físicas: temperatura, presión, humedad y velocidad y dirección del viento.

Figura 23. Arquitectura para control de incendios



Fuente: elaboración propia.

Junto a los componentes mencionados se encuentra la estación base, compuesta por un computador administrado en la zona del incendio. Este equipo se acopla a la WSN por medio de un nodo sensor (o *gateway*), que se conecta a cualquiera de los puertos del computador que no realiza funciones de almacenamiento de datos, sino que direcciona la información que recibe de los demás nodos hacia la estación base. La estación base es el equipo encargado de procesar el algoritmo de pronóstico del fuego, que se irá organizando en tiempo real con la información entregada por la red de sensores. Toda esta información es procesada y administrada por el puesto de mando para resolver la mejor táctica de acción contra el fuego. Finalmente, los aviones teledirigidos que dispersan los sensores en el área de conflagración también tienen la función de proporcionar información de posicionamiento.

Por otra parte, la compañía Identidad IoT (2018) comenzó en el 2018 una prueba piloto de construcción de una solución de agricultura de precisión basada en IoT, en fincas cafetaleras de Chinchiná (Caldas, Colombia). El proyecto se desarrolla en

un cultivo de café tipo caturra. Mediante la instalación de 10 sensores, se calcula la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones en dos lotes de 3.5 ha, para intentar comprobar si alguna variación en estos factores climáticos incide en la proliferación de plagas o daños en las cosechas. Esta implementación de agricultura de precisión puede ser desarrollada en cualquier cultivo de granos y semillas, y otros productos agrícolas como flores, árboles de palmas y caña de azúcar. Sus creadores afirman que tiene la capacidad de reconocer con anticipación las zonas propensas a brotes de plagas como la roya y la broca.

Esta propuesta tecnológica ayuda a los agrónomos a excluir la mediación humana innecesaria en los cultivos, y así proyectar fumigaciones preventivamente, perfeccionar las propiedades de los productos cosechados, minimizar la cantidad de producción afectada por plagas, tener un control y un monitoreo más precisos de sus fincas, y reducir el costo de operación del cultivo. Además ofrece a los agricultores la posibilidad de conocer en tiempo real, a través de una página web y de una aplicación móvil, los factores que están perturbando sus cosechas (figura 24). También permite analizar los informes de comportamiento de la temperatura y humedad, y recibir alertas vía SMS y notificaciones en la página web cuando se registren variables ambientales que propician el desarrollo de enfermedades o un cambio de la temperatura riesgoso para los cultivos.

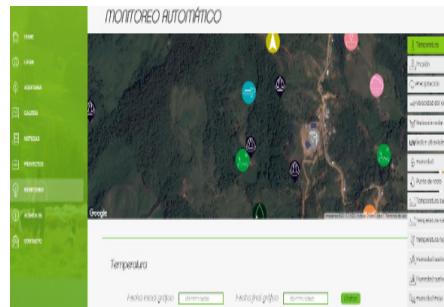
Figura 24. Prototipo de sensor y plataforma móvil



Fuente: Identidad Technologies (2018).

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas ha implementado una plataforma IoT denominada Bosques de Paz, propuesta para medir cualquier variable. Es un importante proyecto tecnológico con sentido social; fue diseñado por el grupo de investigaciones LIDER (Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Redes), reconocido en la categoría A por Colciencias, y con el apoyo de RITA (Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada) (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018). En la figura 25 se presenta una imagen de la aplicación.

Figura 25. Imagen de la plataforma Bosques de Paz



Fuente: Universidad Distrital Francisco José de Caldas (2018).

Actualmente, las WSN se pueden construir con sensores aptos para monitorear el suelo subterráneo y sus condiciones, como el contenido de agua y minerales, y suministrar datos para el riego y la fertilización. Un sistema subterráneo tiene la posibilidad de generar información significativa para un cuidado más focalizado y eficiente del suelo. Puesto que la instalación de WSN es más fácil que las soluciones cableadas existentes, los sensores pueden implementarse de manera más densa para proporcionar datos locales detallados. En lugar de irrigar un campo completo en respuesta a datos amplios del sensor, sería posible activar rociadores individuales con base en sensores locales. En un entorno de invernadero, los sensores podrían incluso ser desplegados dentro de la maceta de cada planta. El camuflaje de una WSN también la hace una solución atractiva y ampliamente viable entre las soluciones agrícolas terrestres.

Considerando este panorama, la siguiente sección presenta el marco metodológico definido para llevar a cabo el planteamiento del modelo de comunicaciones, que corresponde al caso de experimentación.

4. Enfoque metodológico propuesto

En esta sección se plantean los aspectos que propiciaron el desarrollo del proyecto inicial, según la identificación del problema y su posterior diseño dentro de las necesidades puntuales del sector de datos meteorológicos. La problemática se integra en el contexto social de acuerdo con los diversos acontecimientos en materia de desastres y las estrategias que en la actualidad existen para mitigarlos.

4.1 Método de investigación aplicado

Las variables abordadas dentro de esta investigación son de carácter cuantitativo y experimental, dado que existen procesos secuenciales que comprenden una serie de etapas cumplidas en orden riguroso. De cada etapa surge una idea que se delimita en objetivos específicos y preguntas de investigación, con base en una revisión literaria. A partir de esta se construye un marco teórico general, brindando así una perspectiva técnica del problema analizado.

Las variables se determinan de acuerdo con el entorno de análisis y desarrollo, por lo tanto, es necesario ejecutar el diseño del experimento para ponerlas a prueba y obtener resultados a partir de mediciones. Las mediciones obtenidas son analizadas con métodos matemáticos, y estos permiten sintetizar los resultados que derivan las conclusiones respecto a los objetivos.

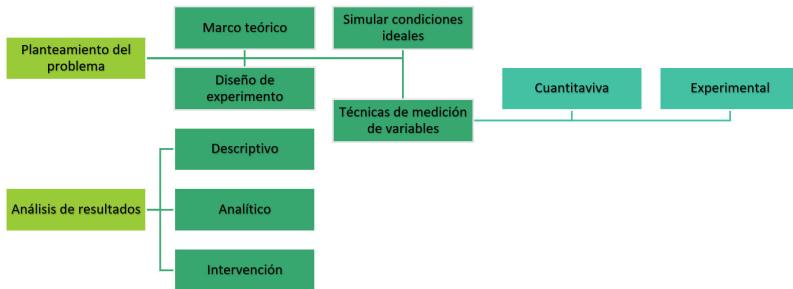
El enfoque de investigación planteado corresponde a un proceso de investigación cuantitativa y experimental, con aspectos de alcance descriptivo y correlacional. Considerando el análisis y el alcance de los resultados, el tipo de estudio puede ser descriptivo, analítico, experimental o de intervención.

4.2 Fases de trabajo

La investigación emplea métodos empíricos. Se desarrollaron prácticas basadas en observación, experimentación y medición, con el objetivo de lograr el correcto funcionamiento del sistema en determinadas situaciones, respecto de la medición de múltiples variables meteorológicas correspondientes a los estándares establecidos

para este tipo de monitoreo. En la figura 26 se exponen los métodos de análisis y síntesis para establecer la relación de las características de las partes estudiadas, obteniendo con esto la sistematización de los resultados.

Figura 26. Fases de trabajo en la investigación



Fuente: elaboración propia.

4.3 Caso de estudio aplicado

El cambio meteorológico observado y analizado a través del tiempo pone en evidencia los problemas del desarrollo global provocados por las ansias de crecimiento del ser humano, lo cual resulta inevitable dentro de un contexto evolutivo. Sin embargo, los fuertes cambios climáticos y el calentamiento global afectan a muchos sectores económicos.

Las condiciones meteorológicas en Colombia son muy inconstantes, las variaciones de las magnitudes físicas pueden abarcar una gran extensión de tierra o pequeñas zonas. Entonces, la información obtenida por una sola estación meteorológica en una dimensión muy grande de terreno no es tan eficaz, y la necesidad de estaciones meteorológicas personales —como herramientas fundamentales para el desarrollo de la agricultura de precisión— se hace evidente.

Por otro lado, una de las principales problemáticas que se enfrenta es la implementación de estaciones meteorológicas. Además de los altos costos que representan, no cuentan con sistemas de energía limpia para su funcionamiento autónomo, y los requerimientos de funcionamiento e interpretación de las magnitudes son muy complejos.

Es posible mitigar o reducir ese impacto implementando tecnologías de bajo costo, que puedan estar al alcance a cualquiera. Una estación meteorológica de bajo costo, de fácil adaptación y manejo, podría generar grandes ventajas, con magnitudes numéricas visibles que permitan predecir riesgos para los cultivos, ahorrar insumos y recursos naturales, mediante un sistema de adquisición de datos con sensores meteorológicos.

Desde esa perspectiva, se establece una técnica de obtención de datos haciendo uso de las técnicas de adquisición, transmisión y almacenamiento de datos de Open Data, internet, computación en la nube y otras técnicas posibles. Este proyecto presenta el sistema de un modelo de recopilación, almacenamiento y procesamiento de datos, que permita el pronóstico del clima. Se trata de un sistema de estaciones meteorológicas, compuesto por dispositivos electrónicos y sensores remotos para su almacenamiento en la nube, el cual integra adquisición, transmisión y acopio de datos para su posterior análisis.

4.4 Tipo de datos empleados para la investigación

Esta es una investigación cuantitativa, basada en el estudio y análisis —a través de procedimientos de medición— de las variables meteorológicas escogidas para desarrollar este trabajo. Los resultados son obtenidos por diferentes procedimientos, herramientas o técnicas, y están fundados en estadística. Los elementos de recolección de datos de una investigación cuantitativa son las encuestas y los experimentos. Los experimentos pueden contribuir con resultados específicos sobre la relación de causa y efecto de varios factores, que se reflejarán en los resultados obtenidos en la estación meteorológica de bajo costo, estableciendo además si realmente hace posible anticipar decisiones.

4.5 Manipulación de variables

Los datos que se manipulan son las magnitudes que presentan cada una de las variables meteorológicas definidas. Estas variables no se logran controlar ni manipular a deseo, pues proceden directamente de la naturaleza. Por ello, la investigación toma un rumbo no experimental: se basa fundamentalmente en la observación del cambio de las variables meteorológicas, con el fin de evitar daños en los cultivos mediante acciones preventivas. La observación se realiza siguiendo ciertos pasos que vienen dados por la adquisición de datos.

Con relación a los diferentes marcos tratados en la investigación, los objetivos mencionados y la aplicación para la que se quiere implementar, se ha decidido tomar a muestra las magnitudes que se logran medir, respecto de las cuales resaltamos las siguientes variables:

- Temperatura ambiente (°C)
- Presión atmosférica (hPa o mmHg)
- Precipitación hora, día (mm H₂O)
- Humedad relativa (%HR)
- Velocidad del viento (Km/h)
- Dirección del viento (grados)

- Luminosidad (lux/m^2)
- Radiación solar (watt/m^2)

Con base en la anterior lista, y dependiendo del proceso de transmisión y almacenamiento de datos, se da paso a la fase de detección de *outliers* y datos vacíos o no almacenados. Esto obedece a diferentes factores presentes en la captura de datos y a problemas en la transmisión de la trama o en el almacenamiento en la base de datos.

4.6 Pruebas de medición

Los datos obtenidos se sometieron a diferentes operaciones de registro, tabulación, clasificación y codificación, según el caso. Se emplearon técnicas lógicas de deducción, inducción y síntesis, con métodos estadísticos descriptivos, y una metodología para estimar la tasa de error de paquetes (PER) en una red inalámbrica por interferencia de otra red inalámbrica. La estimación de la tasa de error de paquetes se utiliza, a su vez, para obtener estimaciones de las métricas de rendimiento del canal, como el rendimiento y la latencia.

Este modelo se puede combinar con otros si algunas de sus partes no están disponibles analíticamente. Por ejemplo, si no hay una expresión analítica para la tasa de error de símbolo (SER), es posible recurrir a una simulación para encontrar dicha tasa. Los resultados de esa simulación se pueden usar, junto con las otras partes de este modelo, para estimar la tasa de error de paquetes (PER) y, en última instancia, las métricas de rendimiento.

El propósito del modelo es calcular la tasa de error de símbolo (SER) en la red inalámbrica afectada por la relación señal-interferencia. Si se utiliza la corrección de errores en avance binario (FEC), puede que no sea práctico determinar el SER, ya que la corrección de errores se realiza a nivel de bits. Entonces, el modelo de capa PHY calcula la tasa de error de bits después de FEC. Cabe señalar que en este modelo se asume que la interferencia es continua, pues el modelo temporal tiene, en efecto, la naturaleza dinámica del interferente.

4.7 Construcción del prototipo

Dentro de la metodología se incluye la construcción del prototipo. Para la elaboración de las estaciones meteorológicas se empleó una técnica creativa llamada SCAMPER, que permitió innovar y mejorar la idea del sistema. Se analizaron conceptos como Substitute (sustituir), Combine (combinar), Adapt (adaptar), Modify (modificar), Putt other uses (poner otros usos), Eliminate (eliminar) y Reverse (reordenar). Cada concepto fomenta el pensamiento divergente y la capacidad para encontrar de forma creativa posibles soluciones a una problemática. A partir de un modelo prediseñado

del sistema de monitoreo y alerta para sismos (SMAPS), se aplica la técnica SCAMPER (Serrat, 2009).

4.7.1 Modelo SCAMPER

Sustituir:

- Sustituir los componentes electrónicos para obtener mayores prestaciones.

Combinar:

- Combinar con redes existentes.
- Combinar con un dispositivo de respaldo energético para su óptimo funcionamiento.
- Combinar con aplicaciones Smart IoT.
- Combinar con múltiples dispositivos para subir datos a una *big data*.

Adaptar:

- Adaptarlo a aplicaciones Android.
- Adaptar diversos dispositivos para mejorar la calidad de la lectura.

Modificar:

- Rediseñar la estructura de la carcasa para que sea totalmente hermética y tenga protección.
- Rediseñar el sistema de adquisición de datos para tener uno más robusto al momento de la trasmisión de datos.
- Modificar el código base para lectura de las variables.

Poner en otros usos:

- Monitoreo de múltiples variables procedentes de diferentes fuentes.
- Eliminar:
- Eliminar en un 50% el uso de leds para minimizar el consumo de energía.
- Eliminar cableado innecesario.

Reordenar:

- Reordenar la distribución actual de componentes por una más compacta y que reduzca el tamaño.

5. Aspectos de diseño para el funcionamiento de WSN

Una de las características fundamentales de las WSN es que se encuentran compuestas por sistemas de comunicaciones inalámbricos, que se ven afectados por la interferencia interior y exterior. Esta surge de fuentes naturales o fenómenos como la pérdida o atenuación, la absorción, el desvanecimiento o el multirayecto, al igual que de usuarios próximos que utilizan la misma banda de frecuencia. Las transmisiones que se realizan en las bandas similares a las de WSN pueden afectar las transmisiones inalámbricas WSN, haciéndolas poco confiables. Incluso la colocación física de un transmisor puede causar una pérdida significativa de la señal (Sohraby et al., 2007).

Las tecnologías IEEE PAN, LAN y MAN son ampliamente implementadas y probablemente sean las que se utilizan en la mayoría de WSN. Los protocolos determinan la codificación física de la señal transmitida y la estructura de la capa de enlace de datos de la información; también especifican los procedimientos de intercambio de canales y manejo de datos y eventos. Las secciones que siguen proporcionan detalles sobre estas tecnologías inalámbricas estandarizadas.

5.1 Características de diseño

Cuando se requiere instalar un dispositivo IoT en algún lugar (por ejemplo, una fábrica), se debe considerar la distribución y organización de sensores para interconectarlos mediante una tecnología inalámbrica. Existen, además, varios tipos de nodos, como los nodos sencillos y los nodos de borde, algunos de los cuales ya han sido estandarizados. Se utilizan diferentes tecnologías de comunicación que incorporan el concepto de IoT y M2M (Machine to Machine), que poseen características particulares en cuanto a la frecuencia de radio, el consumo de energía, la complejidad del protocolo, etc. Por lo tanto, la selección de la tecnología de red es un aspecto importante para los desarrolladores de estos sistemas, y en muchos casos, no existe una sola opción.

5.1.1 Nodo WSN

Un nodo WSN es un dispositivo integrado que realiza una o algunas funciones, por ejemplo, leer variables ambientales (temperatura y presión), encender luces y motores, etc. Tiene un costo relativamente bajo, y se puede construir y desarrollar a gran escala. Requiere poca potencia para funcionar con baterías o con formas alternativas de energía (solar, térmica, eólica, mecánica, por radiación electromagnética).

5.1.2 Nodo de borde WSN

Un nodo de borde WSN es un nodo WSN con conectividad IP, que actúa como una puerta de enlace entre la WSN y la red IP. También es utilizado para realizar procesamiento y almacenamiento local, e incluso como una interfaz de usuario.

5.1.3 Software

Inicialmente existía una pila de protocolos para redes tipo malla, desarrollada por fabricantes como EmberZNet y TinyOS de Berkeley. Sin embargo, a medida que creció el mercado, para lograr compatibilidad en la operación de los múltiples fabricantes, se requirieron soluciones que dieron lugar a la aparición de nuevos estándares como Zigbee, Z-Wave y Ant.

5.1.4 Plataformas

La primera parte de la tecnología de red para dispositivos IoT es el Wi-Fi ubicuo, sin duda una solución efectiva para muchas aplicaciones. Todas las casas con instalaciones de conexión a internet usan un equipo Wi-Fi. Este es el punto de acceso y se puede usar con cualquier otro dispositivo en el hogar; también funciona mediante el protocolo IP. La última tecnología de red para redes inalámbricas de sensores está impulsando el desarrollo de soluciones de bajo costo y bajo consumo de energía. Estas tecnologías admiten una red muy grande de pequeños dispositivos inteligentes para detección y recopilación de datos. La principal investigación y el desarrollo actual se centra en los siguientes aspectos:

- Comunicación inalámbrica de alta potencia y eficiencia, que permita la duración de la batería durante varios años. El consumo de energía de los dispositivos comerciales de RF se ha reducido a la mitad en los últimos años y se espera una disminución adicional del 50% para los dispositivos de próxima generación.
- Generación de energía con fuentes de energía renovable para dispositivos de IoT, considerando futuras comunicaciones de radio de baja potencia.
- Red de tipo malla confiable (red M2M), que realice operaciones automatizadas a largo plazo sin intervención del ser humano.

- Nuevos estándares de protocolos de aplicaciones y formatos de datos que admitan la operación autónoma.

Una de las tecnologías clave que respalda la realización de IoT es el estándar inalámbrico IEEE 802.15.4 (en lo sucesivo: «15.4») emitido en el 2003, que es la base de los sistemas comerciales de baja potencia; se amplió y mejoró para incluir disposiciones de las enmiendas 15.4e y 15.4g del 2006 y del 2011.

Por ejemplo, EnOcean tiene patentes sobre tecnologías inalámbricas con energías renovables, para abordar problemas de consumo de energía. La tecnología de EnOcean opera a frecuencias de 868 MHz en Europa y de 315 MHz en Norteamérica, la distancia de transmisión llega a 30 m en interiores o dentro de edificios, y a 300 m en el exterior.

En dispositivos que utilizan tecnología de generación de energía renovable, los procesadores y el *software* que los operan deben realizar tareas en el menor tiempo, es decir, los mensajes transmitidos deben ser lo más cortos posibles, y esta circunstancia orienta el diseño del protocolo. Entonces, el encapsulado y la cabecera 6LoWPAN (acrónimo de IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks) llevan a cabo un proceso de adquisición del nodo, el cual se caracteriza por una transmisión en tiempo corto, gracias a la compresión de los mecanismos ARM y Cisco (ArchRock es una de las razones empleadas por la compañía).

Hay una gran variedad de redes inalámbricas dedicadas a diversas industrias. A continuación se presenta una lista simple:

- 6 LoWPAN
- ZigBee y ZigBee IP
- ANT
- Z-Wave
- Bluetooth
- Hart alembic
- M-Bus inalámbrico
- ISA 100
- DASH 7

Dado que los requisitos de conectividad para dispositivos IoT son muy amplios, se necesita una amplia gama de tecnologías, pues es improbable solucionar todos los requisitos relativos a distancia, potencia, tamaño, costo, etc., con una sola. Sin embargo, los protocolos que pueden transmitir paquetes IP son más robustos que

otros. Quizás estas tecnologías sean la mejor opción para WSN, ya que facilitan las aplicaciones desarrolladas en servicios *back-end* para internet.

5.1.5 Aspectos de administración del consumo de energía

El consumo de energía se puede abordar desde dos aspectos: desarrollando protocolos de comunicación con eficiencia energética (autoorganización, acceso a medios y enrutamiento), que tienen en cuenta las características de WSN; o identificando actividades en las redes WSN que desperdician energía para mitigar el impacto de ese desperdicio innecesario (Poellabauer, 2010). Entonces, se debe comprender cómo la energía es consumida por los diferentes subsistemas de un nodo sensor inalámbrico. Este conocimiento permite evitar actividades consumidoras y presupuestar la energía requerida, así como estimar la tasa de disipación de potencia general en un nodo y el modo en que esta tasa afecta la vida útil de toda la red. En las siguientes subsecciones se presenta información más detallada sobre el consumo en los diferentes subsistemas de una WSN.

5.1.6 Procesador

Los microprocesadores se pueden configurar para operar en diferentes modos de ahorro de energía: inactivo, reducción de ruido ADC, ahorro de energía, apagado, *standby* y modo de espera extendido. El modo inactivo suspende la CPU mientras permite que operen la SRAM, el temporizador/contador, el puerto SPI y el sistema de interrupciones. El modo de reducción de ruido ADC detiene la CPU y todos los módulos de E/S, excepto el temporizador asincrónico y el ADC; el objetivo es disminuir el ruido de conmutación durante las conversiones del ADC. En el modo de ahorro de energía, el temporizador asíncrono continúa ejecutándose, lo que permite mantener una base de temporizador mientras los componentes restantes del dispositivo entran en un modo de suspensión.

En el caso del modo apagado, el contenido de los registros se guarda, se detiene el oscilador y se inhabilitan las demás funciones del microcontrolador hasta que se dé inicio a la siguiente operación por interrupción o hasta que se genere un reinicio del *hardware*. En modo de espera, el oscilador interno sigue en funcionamiento y los demás componentes se activan en modo de suspensión. Es así que se facilita un inicio muy rápido, combinado con un bajo consumo de energía. En el modo de espera extendido, el temporizador asíncrono y el oscilador principal continúan funcionando. Además de estas configuraciones, el procesamiento del subsistema puede operar con diferentes voltajes de suministro y frecuencias de reloj (Del Brío, 1999).

5.1.7 Comunicaciones

El consumo de energía del subsistema de comunicaciones puede verse afectado por ciertos aspectos: el tipo e índice de modulación; el amplificador de potencia del transmisor; la eficiencia de la antena; el rango y la velocidad de transmisión, y la sensibilidad del receptor. Algunas de estas características se reconfiguran dinámicamente, y el subsistema de comunicación, por sí mismo, puede activar o desactivar el transmisor y el receptor, o ambos. Debido a la presencia de una gran cantidad de componentes activos en el subsistema de comunicación (amplificadores y osciladores), una cantidad significativa de corriente de reposo fluye incluso si el dispositivo está inactivo (Gallardo, 2015).

Determinar el modo operacional de estado activo más eficiente no es una decisión simple. Por ejemplo, la reducción del consumo de energía de un transmisor no necesariamente se logra reduciendo la velocidad o la potencia de transmisión. La razón es que hay una compensación entre la potencia útil requerida para la transmisión de datos y la potencia disipada en forma de calor en el amplificador de potencia (Huaita, 2017).

Por lo general, el poder de disipación (energía térmica) aumenta a medida que la potencia de transmisión disminuye. De hecho, la mayoría de los transmisores disponibles comercialmente funcionan de manera eficiente a uno o dos niveles de potencia de transmisión. Por debajo de cierto nivel, la eficiencia del amplificador de potencia cae drásticamente. En algunos transceptores baratos, incluso en el modo máximo de potencia de transmisión, más del 60% de la potencia de CC de suministro se disipa en la forma de calor inútil.

5.1.7.1 Modelos de ahorro de energía

La función de comunicación de los nodos sensores es una actividad de uso intensivo de energía en el nodo; la operación de detección real consume la menor cantidad de energía (Schurgers et al., 2002). Hay dos puntos de vista respecto a la reducción del consumo de energía de los sensores. El primer enfoque consiste en diseñar un esquema de comunicación que conserve energía inherentemente, lo cual supone apagar el transceptor durante un periodo específico. El segundo enfoque es reducir el volumen de comunicaciones a través del procesamiento en red. Esto conlleva funciones tales como la agregación y la compresión de datos, ya que las tareas de cálculo generalmente requieren menos energía que las tareas de comunicación.

La propuesta de este proyecto es lograr un ahorro de energía considerando la intensidad de la señal recibida (RSSI). La estrategia de asignación de energía óptima se deriva primero en caso de que los nodos estimen sus propias potencias de transmisión sin error. Puesto que hay errores inevitables debido a la interacción, el problema de optimización se modifica al incluir la incertidumbre. Los resultados muestran que

es posible una reducción sustancial en el error mediante la asignación óptima de la potencia de transmisión; el problema de optimización se modifica luego al incluir incertidumbre en el BER.

5.1.8 Velocidad de bus y tiempo de RAM

El subsistema del procesador consume energía cuando interactúa con los otros subsistemas a través de los buses internos de alta velocidad. La cantidad de energía consumida depende de la frecuencia y el ancho de banda de la comunicación. Estos dos parámetros se pueden configurar de manera óptima según el tipo de interacción.

5.1.8.1 Memoria

Para almacenar datos, la memoria debe recargarse periódicamente. La frecuencia o el intervalo de actualización es una medida del consumo de energía. Un intervalo de actualización bajo corresponde a una frecuencia de reloj baja, que debe transcurrir antes de que tenga lugar una operación refrescante. Por el contrario, un mayor intervalo de actualización supone una frecuencia de reloj alta, que debe transcurrir antes de una operación de actualización. Considere dos valores típicos: 2K y 4K. El intervalo de actualización más bajo completa el proceso más rápido, por lo que consume más energía que la frecuencia de actualización 4K, la cual refresca a un ritmo más lento, pero consume menos poder.

La memoria se puede configurar para que opere en uno de los siguientes modos de potencia: modo de actualización automática con compensación de temperatura y modo de actualización automática de matriz parcial o alimentación modo abajo. Es posible ajustar la frecuencia de actualización estándar de una unidad de memoria de acuerdo con su temperatura ambiente. Por esta razón, algunas RAM dinámicas disponibles comercialmente (DRAM) ya tienen integrados sensores de temperatura.

Por otro lado, la tasa de autoactualización aumenta si la matriz de memoria completa no es necesaria para almacenar datos. El tiempo de RAM es otro parámetro que afecta el consumo de energía de la memoria unidad. Se refiere a la latencia asociada con el acceso a la unidad de memoria.

5.1.9 Subsistema de potencia

El subsistema de potencia suministra energía a todos los demás subsistemas. Está compuesto por la batería y el convertidor DC-DC. En algunos casos, puede tener componentes adicionales, como un regulador de voltaje. El convertidor DC-DC es responsable de suministrar la cantidad correcta de voltaje a cada componente del *hardware*, mediante la transformación de la CC. Un proceso de transformación tiene su propio consumo de energía y puede ser ineficiente; algunas de las causas del consumo de energía se exponen a continuación.

5.1.9.1 Batería

Los nodos funcionan con baterías, cuya calidad es afectada por varios factores. El principal es el costo. En una implementación a gran escala, el costo de cientos de miles de baterías representa una gran restricción. Las baterías están especificadas por una capacidad de corriente nominal (C), expresada en amperios·hora (Ah). Esta cantidad describe la velocidad a la que una batería se descarga sin afectar significativamente el voltaje de suministro. La mayoría de las baterías portátiles tienen una clasificación de 1 C; esto significa que una batería de 1000 mAh proporciona 1000 mA durante 1 hora, si se descarga a una velocidad de 1 C. Idealmente, la misma batería puede descargarse a un ritmo de 0.5 C, proporcionando 500 mA durante 2 horas; a 2 C, 2000 mA durante 30 minutos, y así sucesivamente. Se conoce a 1 C como una descarga de 1 hora; del mismo modo, 0.5 C sería de 2 horas y 0.1 C, de 10 horas.

5.1.9.2 Convertidor DC-DC

El convertidor DC-DC transforma un nivel de voltaje en otro; es el equivalente de un transformador que realiza la transformación de tensión AC-AC. El principal problema con este dispositivo es su eficiencia de conversión. Un convertidor CC-CC típico está compuesto por una fuente de alimentación, un circuito de commutación, un circuito de filtro y una resistencia de carga.

5.1.10 Operating Systems for Wireless Sensor Networks

Una WSN generalmente se compone de una estación centralizada (estación base) y varios nodos sensores implementados para la detección de información, computación y comunicación inalámbrica entre estos dispositivos. Detecta el fenómeno físico, preprocesa la información y la comparte con sus nodos vecinos. Los nodos sensores pueden formar una WSN ya sea *ad hoc* o con una topología basada en clústeres. El nodo receptor puede examinar la información y, a veces, controlar el comportamiento de los nodos sensores.

Debido a que una WSN tiene una estación base centralizada y un flujo de información unidireccional, actúa como un sistema centralizado, aunque los nodos sensores estén distribuidos. Una WSN no es solo un sistema de base de datos sino también una red con recursos limitados; posee la mayoría de las funciones de red, razón por la que se utilizan para controlar eventos y recopilar datos. Por lo tanto, las WSN son un tipo especial de sistema de red distribuida, similar a los sistemas de base de datos en tiempo real e integrado. Su función básica es recopilar información y admitir ciertas aplicaciones específicas de la tarea de implementación de WSN.

Los nodos de sensores disponibles comercialmente se clasifican en cuatro grupos (Hill et al., 2004):

- Plataformas de detección especializadas, como el nodo Spec diseñado en la Universidad de California-Berkeley. Este nodo sensor tiene un solo chip con bajo consumo de energía y bajo costo de operación.
- Plataformas de detección genéricas, como las motas de Berkeley. Este nodo puede realizar tareas de detección genéricas.
- Plataformas de detección de gran ancho de banda. Este nodo puede manejar el flujo de datos detectado con un alto ancho de banda.
- Plataformas de pasarela, como Stargate. Este nodo puede ser usado como sumidero y conectar nodos sensores de bajo nivel directamente a internet.

Los componentes de *hardware* deben estar organizados de una manera que los haga funcionar correcta y efectivamente, sin un conflicto en el soporte de las aplicaciones específicas para las que están diseñados. Cada nodo sensor necesita un sistema operativo (OS) que controle el *hardware*, proporcione abstracción de *hardware* al *software* de la aplicación, y llene el vacío entre las aplicaciones y el *hardware* subyacente. El sistema operativo tradicional es una aplicación que funciona entre el *software* y el *hardware* diseñado para estaciones de trabajo y PC.

También hay sistemas operativos integrados, como VxWorks y WinCE, especialmente diseñados para las WSN centradas en datos con recursos limitados. Los sensores suelen tener un procesador lento y una memoria pequeña. En este libro se han considerado los parámetros que deben observarse en el proceso de diseño del sistema operativo para los nodos WSN.

5.1.11 Performance and Traffic Management

La mayor parte del tráfico en las WSN fluye desde los nodos sensores al sumidero. Los nodos sensores recopilan datos e informan al receptor según reglas preconfiguradas. Este flujo de tráfico de muchos a uno se llama convergecast (Zhang et al., 2007), lo que significa que este flujo va desde los nodos del sensor al sumidero. Los nodos sensores más cercanos al sumidero tienen la carga más pesada para la transmisión, y podrían volverse disfuncionales antes debido a un mayor consumo de energía. Una forma útil de solucionar este problema es desplegar más densamente alrededor del sumidero o realizar el procesamiento en la red (por ejemplo, la agregación de datos), reduciendo así el flujo de tráfico. Para optimizar los protocolos de red se puede utilizar el flujo de tráfico y los requisitos funcionales específicos de la implementación del sensor.

Los datos relacionados con los eventos suelen ser pequeños, generalmente de unos pocos bytes y, en muchos casos, de unos pocos bits. Por lo tanto, es posible transmitir más de un evento en una sola unidad de datos si la frecuencia de informe

de la aplicación lo permite. Otros factores que afectan el diseño de WSN y tienen un impacto directo en el rendimiento del sistema se enumeran en la tabla 6.

Tabla 6. Factores de diseño de una WSN

Factor	Opciones
Ubicación de nodos	Aleatorio, manual, iterativo
Movilidad	Fijas, móviles
Topología de red	Estrella, enlace sencillo, árbol, anillo
Cubrimiento	Esparcidas, denso, redundante
Conectividad	Esporádica, intermitente, conectadas 100%
Tamaño de red	Cientos, miles, unitaria
Comunicaciones	Narrowband, Spread Spectrum, UWB

Fuente: elaboración propia.

5.1.11.1 *Modelo de tráfico*

Actualmente se utilizan cuatro modelos de tráfico en WSN: transmisión basada en eventos, transmisión continua, transmisión basada en consultas y transmisión híbrida. El modelo de tráfico influye mucho en el diseño del protocolo y afecta el rendimiento. Los cuatro modelos y los aspectos de rendimiento relacionados se discuten a continuación.

5.1.11.2 *Transmisión basada en eventos*

Los nodos sensores monitorean la ocurrencia de eventos de forma pasiva y continua. Al ocurrir un evento, el nodo sensor comienza a informar sobre él; cuando se envían datos de eventos al receptor, el protocolo de enrutamiento se activa para encontrar una ruta al receptor. Este método de enrutamiento se denomina enrutamiento a solicitud. Si un evento aparece con frecuencia en uno o en varios nodos, la función de enrutamiento se ejecuta también con frecuencia, lo que resulta en un mayor consumo de energía. Un medio alterno es configurar anticipadamente una ruta de uso frecuente; por lo tanto, la eficiencia de enrutamiento para este tipo de prueba depende en gran medida de la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Es posible que se requiera un protocolo de enrutamiento adaptable, para configurar dinámicamente una ruta por anticipado si los eventos ocurren frecuentemente; de lo contrario, la ruta se configura por solicitud.

5.1.11.3 *Entrega continua*

Los datos recibidos por los sensores deben ser transmitidos de forma continua o periódica. Por ejemplo, en la investigación de Mainwaring et al. (2002), se utiliza una WSN para observar el comportamiento reproductivo de un ave pequeña en Great Duck Island. En esta situación, los nodos sensores desplegados dentro de las madrigueras y

en la superficie miden la humedad, la presión, la temperatura y el nivel de luz ambiental. Una vez por minuto los sensores transmiten valores de muestra a la estación base.

5.1.11.4 Transmisión basada en consultas

El receptor puede requerir una información específica, recopilada en los nodos sensores, así que emitirá mensajes de consulta a estos últimos para obtener el valor actualizado de la información. Los mensajes de consulta también pueden llevar, desde el receptor a los sensores, un comando sobre la información, la frecuencia de informes y otros parámetros de interés para el receptor. En este modelo de transmisión, el receptor difunde el mensaje de consulta. Cuando la consulta llega a los nodos sensores, una ruta se construye automáticamente, y los nodos sensores transmiten de acuerdo con la solicitud del mensaje de consulta.

5.1.11.5 Transmisión híbrida

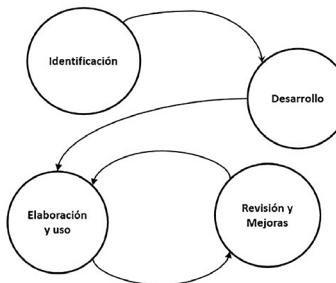
En algunas WSN, los tipos de sensores y los datos percibidos son muy diversos. Por ejemplo, los datos son reportados continuamente por algunos nodos, y el sumidero podría necesitar consultar información de otros nodos sensores.

6. Definición de un prototipo WSN enfocado en aplicaciones medioambientales

El diseño de WSN se caracteriza por una alta complejidad funcional combinada con una considerable variedad de implementaciones tecnológicas. Los procesos de diseño correspondientes se distinguen actualmente por una optimización aislada de los componentes individuales. La comparación de los enfoques de diseño existentes para sistemas electrónicos ha demostrado que ninguna metodología puede soportar adecuadamente todo el proceso de diseño de WSN. Los métodos solo son suficientes para ciertas prioridades de diseño.

La tecnología de fabricación y creación rápida de prototipos es una integración de muchas disciplinas. Se basa en un principio avanzado de formación acumulada dispersa y se originó en los años ochenta (YAN et al., 2009). Este capítulo muestra la construcción de un sistema piloto WSN completo, que empleó un procedimiento sintético de cuatro pasos, como se muestra en la figura 27 (Jenkins, 1982).

Figura 27. Proceso de construcción de prototipo en cuatro pasos



Fuente: elaboración propia.

A continuación se describe cada uno de los pasos del proceso aplicado:

- **Identificación.** Se determinan los requisitos para construir un modelo de *hardware* y *software*, con los datos más relevantes en el diseño de los sistemas que componen el prototipo. Comienza con la identificación de todos los elementos por utilizar.

- **Desarrollo y elaboración.** El prototipo inicial debe implementarse en muy poco tiempo, casi “de la noche a la mañana”. Es fundamental tener un sistema tangible para experimentar y corregir; así se obtienen respuestas basadas en la experiencia.
- **Elaboración y uso.** El uso “práctico” del sistema proporciona experiencia, comprensión y evaluación. En este punto, el prototipo construido cumple con una base y un objetivo fundamental en lo que se refiere al funcionamiento.
- **Revisión y mejoras.** Las características indeseables o faltantes identificadas deben ser modificadas. Es poco probable que el usuario identifique todos los problemas en el sistema durante una única evaluación; por lo tanto, se requieren varias iteraciones. Los pasos 3 y 4 deben ser repetidos hasta que se considere que el sistema está listo.

6.1 Elaboración

El concepto de medir las variables no es nuevo en el mundo industrial; los sensores y las redes se han usado histórica y ampliamente en la industria. Estos sistemas se ejecutan en redes separadas que ofrecen una alta fiabilidad y seguridad, que no se pueden alcanzar con la tecnología convencional. Los altos estándares limitan las tecnologías disponibles a aquellas que mejor se adaptan a las aplicaciones de IoT. La forma en que estos sensores están conectados a la red determina si pueden ser usados de manera segura, confiable y económica. A continuación, y siguiendo a Evans (2011), se destacan algunos de los requisitos clave en el diseño de WSN.

6.1.1 Requisitos de la red

- **Acceso a internet.** Debe ser accesible a través de internet, aspecto fundamental de las aplicaciones de monitoreo ambiental.
- **Red jerárquica.** La estación base exige recursos suficientes para proporcionar conectividad a internet y ocuparse localmente con sistemas de bases de datos, aunque los hábitats de interés se encuentren a varios kilómetros de distancia.
- **Vida útil de la red de sensores.** Debe funcionar continuamente durante nueve meses con baterías recargables de forma no convencional, para ello se utilizan fuentes de poder fotovoltaicas.
- **Gestión a distancia.** La distancia de los sitios demanda la capacidad de exploración y gestión de las redes de sensores a través de internet. La meta es generar presencia remota en el sitio para realizar mantenimiento y administración durante el estudio, excluyendo la instalación y el desmontaje de nodos.

- **Comportamiento del sistema.** Desde la perspectiva del sistema y del usuario, es importante que la red de sensores presente un comportamiento predecible, repetible y estable.
- **Interacciones en sitio.** Aunque se espera que la mayoría de las interacciones de la red sean a través de internet, se requieren interacciones locales durante el despliegue inicial, en las tareas de mantenimiento y las visitas a los sitios. Las PDA desempeñan un papel importante en la asistencia con estas tareas. Pueden consultar directamente un sensor, ajustar parámetros operativos o simplemente ayudar en la localización de dispositivos.
- **Sensores y muestreo.** Para esta aplicación se requiere la lectura de ocho variables ambientales: inicialmente, la capacidad de detectar luz, temperatura, infrarrojo, humedad relativa y presión barométrica. También es fundamental aportar un conjunto esencial de medidas útiles, y la capacidad de apreciar fenómenos adicionales, como aceleración, vibración, peso, química, vapores, concentraciones de gas, pH y niveles de ruido.
- **Almacenamiento de datos.** Es importante archivar lecturas de sensores para minería y análisis de datos en línea. La descarga confiable de registros de sensores a bases de datos es una capacidad principal. Se deben desglosar y explorar sensores individuales o en conjunto de forma interactiva; en este modo de operación es fundamental la entrega oportuna de datos de los sensores.

Este proyecto presenta el desarrollo de tres estaciones meteorológicas destinadas a medir las variables mencionadas. Una estación meteorológica se basa en Arduino a 2.4 Ghz; otra en Arduino a 900 Mhz, y la última utiliza tecnología Raspberry Pi a 900 Mhz. En este caso, la particularidad consiste en que los datos obtenidos por los sensores de las tres estaciones son transmitidos a una subestación de almacenamiento por medio de dispositivos Xbee y LoRaWAN. Estos dispositivos permiten realizar la comunicación entre las estaciones y la estación base, que servirá de punto de conexión a internet, la nube y otros servidores con IP pública, para almacenar la data recopilada.

6.1.2 Implementación de estación meteorológica con Raspberry Pi

A diferencia de Arduino, la Raspberry Pi es más potente, básicamente es un computador de placa reducida. Requiere de un sistema operativo para su funcionamiento, y todo su almacenamiento es proporcionado desde una tarjeta SD. Desde el modelo B, la Raspberry cuenta con algunos puertos integrados (dos puertos USB, HDMI o Ethernet) y con una serie de puertos GPIO, como el Arduino, que le permiten la interacción con otros dispositivos, entre ellos, sensores o actuadores. También es conocida como SBC (Single Board Computer), lo cual quiere decir que es un sistema embebido

en el que se integra la mayoría de las funciones de un computador convencional, incluso es posible conectarle periféricos (teclado, mouse, pantalla, altavoces e impresora). Es importante destacar que frente al Arduino sus más significativas ventajas son la velocidad de su procesador y la gran capacidad de memoria.

6.1.3 Implementación de estación meteorológica con Arduino

Se llevó a cabo la elaboración de dos estaciones meteorológicas basada en Arduino a 2.4 Ghz y a 900 Mhz, con la peculiaridad de que los datos obtenidos por los sensores son transmitidos hacia una aplicación Android por medio de un dispositivo *bluetooth*. Esto permite establecer la comunicación entre el Arduino y un dispositivo móvil. Para la comunicación *bluetooth*, se implementó un módulo HC-06, que funciona solo como esclavo dentro del sistema, y facilita su conexión con el Arduino. Además es posible conseguirlo a un costo relativamente bajo. Respecto al dispositivo móvil al que se envían los datos, también es necesario realizar una programación. Se desarrolló sobre App Inventor; la interfaz está compuesta en dos partes: una que lleva a cabo el diseño gráfico de la aplicación y otra en la que se realiza la programación basada en bloques (Escribano Vega, 2016).

6.2 Prototipo planteado

Los nodos son el dispositivo principal de una red de sensores inalámbricos (WSN), pues a través de ellos tienen lugar la detección, el procesamiento y la comunicación. También recolectan y establecen los protocolos de comunicación y los algoritmos de procesamiento de datos. La calidad, el tamaño y la frecuencia de los datos detectados que se pueden extraer de la red dependen de los recursos de *hardware* disponibles para el nodo. El diseño e implementación de un nodo de sensor inalámbrico es un proceso exhaustivo. El nodo está compuesto por un sistema de detección, otro de procesamiento, uno de comunicación, y por subsistemas de energía. Existe una gran cantidad de tecnología disponible para decidir cómo construir y armar estos subsistemas.

6.2.1 Subsistema de sensores

Los sensores utilizados en este proyecto fueron seleccionados teniendo en cuenta su facilidad para ser integrados a las placas Arduino y Raspberry Pi, pues se comunican mediante el protocolo I2C, que facilita la programación y disminuye la longitud y complejidad del código para la adquisición de datos. Los sensores y el dispositivo *bluetooth* funcionan como esclavos y el Arduino es el único maestro del sistema. En la figura 28 se muestra uno de los arreglos de sensores construido.

Las WSN consisten en sensores heterogéneos y su topología puede ser tan simple como una en estrella, que usa la infraestructura de comunicación con equipos como

Wi-Fi, Xbee y LORA. La estructura de la WSN requiere que los sensores se comuniquen directamente con una estación base, pues estos se comunican a través de ella. El área cubierta alcanza los 18 km². En esta red los nodos no pueden comunicarse directamente unos a otros ni actuar como enrutadores, reenviando mensajes a otros.

Figura 28. Arreglo de sensores para estación LoRaWAN



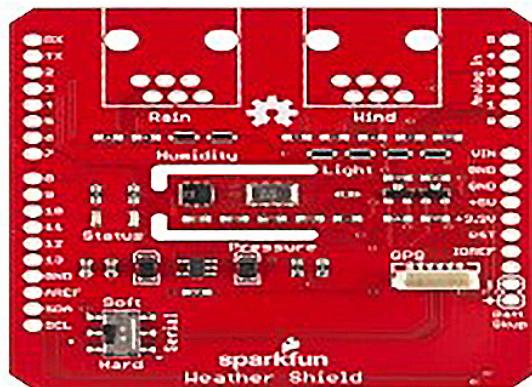
Fuente: autores.

La sensórica aplicada a los modelos propuestos en la implementación de las estaciones meteorológicas consiste en la compilación de sensores de tipo análogo y digital, que permiten la lectura de variables físicas: temperatura ambiente, presión atmosférica, radiación solar e incidencia, intensidad lumínica, humedad, pluviometría y detección anemométrica (dirección y velocidad del viento). A través de un proceso de amplificación y filtro de señal, se entregan a un componente de adquisición de datos, que posteriormente los remite al sistema embebido que se encargará de su modulación y transporte.

Con base en las investigaciones consultadas, el módulo Weather Shield de Sparkfun es el ideal para el muestreo de las magnitudes (figura 29), debido a ciertas ventajas como su tamaño compacto, la obtención de las medidas requeridas para la aplicación, el uso de librerías otorgadas por el fabricante, la precisión y la claridad en los resultados. Opera con un bajo voltaje de 3.3 V y una corriente mínima de aproximadamente 50 a 80 mA, que hace posible una alimentación poca robusta.

Este módulo cuenta con el acceso para medir la presión barométrica, la humedad relativa, la temperatura y la luminosidad. Tiene además la opción de expandirse a sensores de velocidad y dirección del viento, pluviómetro y un extra, que es el GPS. Estos últimos se adquieren por separado, pero proporcionan ubicación, sincronización y versatilidad.

Figura 29. Escudo meteorológico de Sparkfun (Weather Shield)



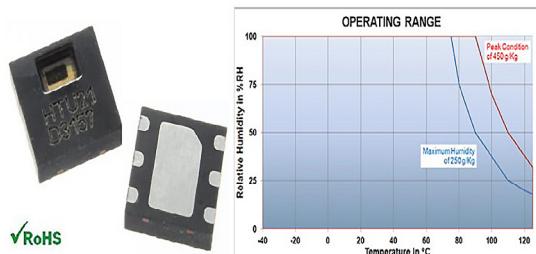
Fuente: autores.

Los componentes de este módulo son los siguientes:

- Sensor de humedad y temperatura (HTU21D)
 - Presión barométrica (MPL3115A2)
 - Sensor de luz (ALS- -315C / L177 / TR8)
 - Sensor de lluvia o pluviómetro
 - Velocidad del viento o anemómetro
 - Dirección del viento con veleta
 - Conector GPS (GPS635T opcional)

6.2.1.1 Sensor de humedad y temperatura HTU21D

En la figura 30 se muestran el sensor de humedad y, paralelamente, una salida de temperatura. En términos de tamaño, cuenta con un encapsulado bastante diminuto ($3 \times 3 \times 0.9$ mm) y una precisión aceptable mediante el protocolo de comunicación I2C. Cada sensor es calibrado individualmente y testeado a través de un microcontrolador o tarjeta de desarrollo; la resolución puede ser cambiada entre 8 y 14 bits por comandos. Cabe resaltar que el sensor cuenta con una protección de membrana contra agua y contaminación por partículas. Es adverso a los cambios meteorológicos.

Figura 30. Sensor físico de humedad y temperatura HTU21D; rango de operación

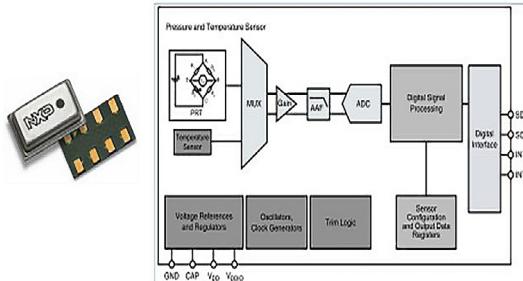
Fuente: ShareAlike (2019).

Es esencial mantener el encapsulado a la misma temperatura a la cual la humedad relativa debe medirse, pues la medida de humedad depende de la temperatura y de una ubicación en la que no haya transferencia significativa de calor. Su alimentación debe estar en el rango de 1.5 a 3.6 VDC. Posee dos pines más, uno es el de reloj para la sincronización del envío (SCK) y el otro es el encargado de enviar y recibir datos en dos bytes (DATA), el más significativo es transferido inicialmente llegando al menos significativo. A continuación están las fórmulas que el fabricante emplea a través de las librerías para hallar la humedad relativa y la temperatura. La “S” presente en cada una de las fórmulas es el dato que envía cada sensor de manera individual al realizar la conversión ADC.

6.2.1.2 Presión barométrica MPL3115A2

Es un sensor de presión compacto al igual que el anterior, cuenta con unas dimensiones diminutas ($3 \times 5 \times 1.1$ mm), como se muestra en la figura 31. Trabaja con el protocolo I₂C y opera en un rango de 20 a 110 kPa. Este chip también tiene un sensor de temperatura. Los datos se ingresan a un conversor ADC de alta resolución, del que se logra una precisión bastante considerable. Se le pueden dar múltiples configuraciones para obtener salidas de presión en kilopascales; de altitud en metros, que se obtiene de la misma medida de presión; y de temperatura en centígrados; para alimentación, interrupciones, entre otras características importantes. Cuenta con pines de alimentación, que van desde 1.95 a 3.6 V; un pin para capacidores externos, que ayudan a los ruidos eléctricos; dos pines de interrupciones por presión, y los pines de reloj (SCK) y de información (DATA). Entre las recomendaciones del fabricante está tener cuidado con la exposición a la luz. Este tipo de sensores se debe calibrar y ajustar con *software* para su funcionamiento, dado el cambio del nivel del mar en diferentes lugares de las regiones.

Figura 31. Sensor de presión MPL3115A2

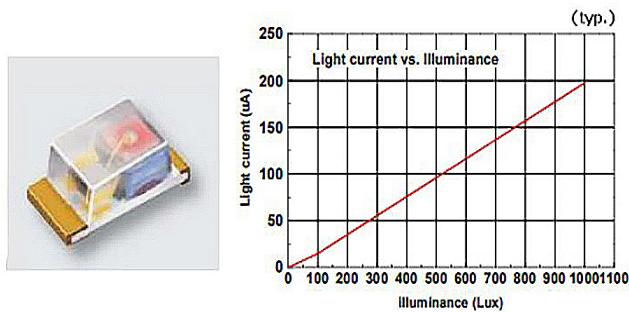


Fuente: ShareAlike (2019).

6.2.1.3 Sensor de luz ALS- -315C/L177/TR8

Es un sensor de luz como el de la figura 32, de bajo costo. Consiste en un fototransistor de montaje superficial. Se ve usualmente en celulares, cambia el brillo de la pantalla según la luz del ambiente; y en múltiples aplicaciones con computadores, televisores y otros, depende de que el espectro de luz cambie el rango de corriente. Se alimenta en un rango de 2.5 a 5.5 V, con dos pines únicamente: colector y emisor. La base del fototransistor es la entrada de luz ambiente.

Figura 32. Sensor de luz ambiente ALS- -315C/L177/TR8



Fuente: ShareAlike (2019).

Se usó el kit de sensores opcionales de la figura 33, desarrollado por Sparkfun para estaciones meteorológicas. Estos sensores vienen con sus respectivos soportes y se adaptan fácilmente a estructuras que requieran añadirse en la implementación final. Los sensores se comunican y se alimentan a través de conectores RJ-11.

Figura 33. Kit de sensores adicionales de Sparkfun



Fuente: ShareAlike (2019).

El pluviómetro desarrollado por Sparkfun (figura 34) funciona de tal manera que, por cada 0.2794 mm de lluvia, cierra un contacto temporal y vuelve a realizar el ciclo. Este pulso se va sumando con un contador digital, en este caso, a través del Arduino UNO, con una interrupción externa.

Figura 34. Pluviómetro



Fuente: autores.

El anemómetro de la figura 35, también desarrollado por Sparkfun, funciona del mismo modo que un tacómetro. Para este sensor, la calibración se encuentra en que una velocidad de viento de 2.4 km/h hace que el interruptor magnético se cierre (sensor de efecto Hall) una vez por segundo. Con la fórmula que se obtiene del sensor se obtiene la velocidad del viento en km/h.

Figura 35. Anemómetro



Fuente: autores.

En la figura 36 se muestra el dispositivo utilizado para conocer la dirección del viento. Sparkfun desarrolló este sensor tipo veleta, con un funcionamiento por resistencias netamente.

Figura 36. Sensor dirección del viento



Fuente: autores.

Se basa en ocho interruptores (figura 37), cada uno con una resistencia diferente. La posición en la que el imán se encuentre ubicado en la veleta puede cerrar dos interruptores al tiempo, creando 16 posiciones en el plano. La ciencia de este sensor es el divisor de voltaje: dependiendo de la posición de la veleta, generará un valor de voltaje distinto a los demás, tal como se muestra a continuación.

Figura 37. Divisor de voltaje para la dirección del viento

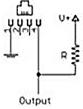


Tabla con una resistencia de 10K y un voltaje de alimentación de 5VDC

Direction (Degrees)	Resistance (Ohms)	Voltage (V=5v, R=10k)
0	33k	3.84v
22.5	6.57k	1.98v
45	8.2k	2.25v
67.5	891	0.41v
90	1k	0.45v
112.5	688	0.32v
135	2.2k	0.90v
157.5	1.41k	0.62v
180	3.9k	1.40v
202.5	3.14k	1.19v
225	16k	3.08v
247.5	14.12k	2.93v
270	120k	4.62v
292.5	42.12k	4.04v
315	64.9k	4.78v
337.5	21.88k	3.43v

Fuente: ShareAlike (2019).

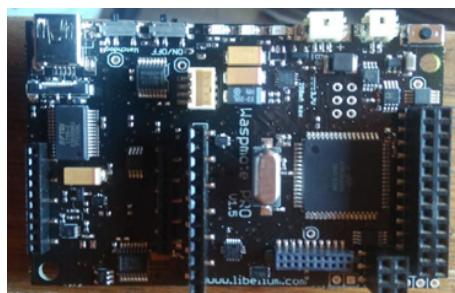
6.3 Subsistema procesador

Los sistemas embebidos modernos requieren soluciones de bajo consumo de energía mientras mantienen un nivel de rendimiento mínimo; esto es aún más complejo en el diseño de IoT (Johann, 2016). Este proyecto requirió del uso de procesadores configurables, asociados a un diseño que incluye *hardware* y *software* útiles para aplicaciones de IoT. Se permitieron múltiples configuraciones de *hardware* con varios grados de

complejidad, manteniendo la compatibilidad con la arquitectura del conjunto de instrucciones elegidas, que es configurable. Los resultados se basan en diseños de ejemplo dirigidos a una tecnología estándar. Como se observa en la figura 38, se ha buscado que la complejidad del *hardware* sea mínima, en tanto el prototipo muestra que los procesadores propuestos ofrecen el recurso necesario para desempeñar las aplicaciones de IoT que requerimos. Al mismo tiempo, la reducción de la complejidad del *hardware* produce una mejor compensación entre el rendimiento y la potencia.

Equipos de transmisión RF, como LoRaWAN, han recibido especial atención dentro de la comunidad de desarrollo e innovación tecnológica, lo que ha derivado en múltiples implementaciones en los sistemas embebidos y de integración. Uno de los sistemas embebidos con mayor aceptación dentro del mundo del IoT es WaspMote, base principal para el desarrollo del sistema propuesto. Su funcionamiento físico es muy similar al tan conocido Arduino, con la gran mejora de la integración de un *slot* o puerto para la conexión directa de los módulos RF LORA. Esto simplifica la estética y la configuración del sistema, generando estabilidad y fiabilidad en el proceso de transmisión. En cuanto al proceso de configuración y programación, toma la robustez y la solidez de lenguaje C, así como de un entorno compilador similar al IDE de Arduino, que facilita la interacción al momento de la programación y el desarrollo de la solución.

Figura 38. Tarjeta Arduino 1



Fuente: autores.

Se escogió otra tarjeta desarrolladora para leer y transmitir los datos obtenidos de la estación meteorológica. Esta elección se basó en los beneficios y la compatibilidad con varios módulos que la compañía ha ido desarrollando, los continuos avances de índole mundial, y el énfasis en la gran cantidad de información para la ampliación de conocimientos y proyectos de código libre.

Arduino es una herramienta eficaz que, a través de un microcontrolador, permite adquirir señales del entorno y operar el mundo físico por medio de su computador interno. Es una plataforma de desarrollo de computación física (*physical computing*)

de código abierto, fundamentalmente constituida por una placa con un microcontrolador simple y un sistema de desarrollo de *software* (programas) (ShareAlike, 2019).

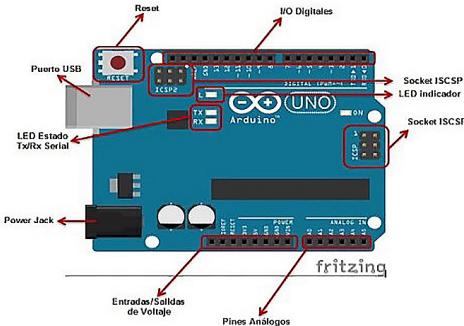
Mediante sus puertos de entrada, el sistema Arduino puede recopilar información del entorno de una amplia gama de sensores, e interactuar con dispositivos que se encuentren interconectados a estos puertos, ya sea controlando luces, motores u otros actuadores. Los proyectos de Arduino pueden ser aislados y funcionar autónomamente, o pueden comunicarse con un programa (*software*) que se compile en un computador. El *software* de desarrollo es abierto y puede ser descargado gratuitamente (ShareAlike, 2019).

El Arduino que se muestra en la figura 39 es una plataforma computacional física *open-source*. Se fundamenta en una tarjeta de entradas y salidas I/O, interconectada a elementos externos y a un ambiente de desarrollo que efectúa el procesamiento del lenguaje Processing/Wiring. Por ser una plataforma de *hardware* libre, es posible ensamblarla por nuestra propia cuenta.

Este Arduino UNO R3 utiliza el microcontrolador ATmega328, lo que le permite velocidades rápidas de transferencia y una mayor utilización de memoria. Cuenta con 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales cuatro pueden ser utilizados para salidas PWM); seis entradas analógicas; un resonador cerámico o cristal de cuarzo de 16 MHz; un conector para USB tipo hembra; un Jack para fuente de poder; un conector ICSP, y un botón reinicio.

Como se ha mencionado, el Arduino cuenta con todos los elementos de *hardware* necesarios para la interacción con el ambiente; he aquí sus principales partes y características:

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltaje operativo: 5 V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12 V
- Pines de entrada/salida digital: 14 (6 de salidas PWM)
- Pines de entradas analógicas: 6
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328), 0.5 KB usado por Bootloader
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Velocidad del reloj: 16 MHZ

Figura 39. Partes Arduino UNO R3

Fuente: Villafuerte (2013).

Una de las ventajas del Arduino son los *shields* o escudos: placas de circuitos modulares que pueden ser incorporados a una placa Arduino, con el fin de expandir sus funciones o añadir características especiales. Muchos de estos escudos son apilables; es decir, un Arduino puede contar con muchas más funciones, además de las que trae por defecto. Algunos escudos usan cada pin en el Arduino, y otros solo usan un par. Al apilar escudos, es importante asegurarse de que no usen pines superpuestos.

Algunos escudos se comunican con Arduino a través de SPI, I2C o serial, y otros utilizan las interrupciones o entradas analógicas de Arduino (ShareAlike, 2019). Es posible encontrar múltiples escudos; sin embargo, entre los más comunes están los escudos de música y sonido, cámaras y pantallas; los escudos para el control de motores y servomotores, o los escudos para añadir alguna característica de comunicación, que puede ser Wi-Fi, Ethernet o GPS.

6.4 Subsistema de comunicaciones

El sistema de comunicaciones es probablemente el componente más básico del modelo de IoT. Hasta ahora, los enfoques principales para proporcionar acceso a datos a las cosas se han basado en tecnologías de comunicación sin licencia, o en tecnologías celulares *legacy* de largo alcance, principalmente 2G/GSM, operando en las correspondientes bandas de frecuencia con licencia. Últimamente, estos modelos de referencia han sido actualizados, han aparecido otros nuevos que cuentan con conectividad inalámbrica, caracterizada por la baja tasa de transmisión de datos y su largo alcance. Son tecnologías de transmisión en la banda de frecuencia sub-GHz no licenciada, utilizadas para realizar redes de acceso con topología en estrella que se refieren a redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) (Centenaro, 2016).

En este proyecto presentamos este enfoque para facilitar conectividad en un escenario IoT, mostrando las ventajas de estos paradigmas en técnicas de eficiencia,

efectividad y diseño arquitectónico. Los sistemas inalámbricos utilizados en este proyecto (figura 40) cumplen los estándares en el campo de la transmisión inalámbrica de datos y el propósito de eficiencia, rango de transmisión, seguridad de transmisión y duración de la batería. Estas soluciones se basan en un método de transmisión así-métrica, que utiliza puntajes de nodos sensores simples y de un receptor complejo.

Figura 40. Transmisor LoRaWAN



Fuente: autores.

6.4.1 LoRaWAN

Un único receptor puede manejar una gran cantidad de transmisiones simultáneas, con un alcance de transmisión de hasta 18 km. La operación de ahorro de energía da como resultado una duración de la batería de aproximadamente dos años. Para el caso de las implementaciones sobre plataforma LoRaWan, el proceso de transmisión y propagación de la información recolectada de los sensores se realiza sobre enlaces de radiofrecuencia, con un rango de trabajo de 800 a 900 Mhz. Comúnmente conocidas como Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN), buscan optimizar, a través de redes de baja potencia y alto alcance, la vida útil de los sistemas de alimentación eléctrica, y generan conectividad entre nodos con distancias entre los 18 y 25 km de alcance en línea de vista. Se trata de un proceso básico de activación y transmisión por demanda, que permite que el equipo active procesos de hibernación en los tiempos muertos de trabajo u operación.

En cuanto al sistema receptor, la propuesta física consta de un computador implementado (figura 41) bajo un sistema embebido Raspberry, con una tarjeta puente de conexión al módulo RF LoRaWAN llamada *cooking hack*. Esta facilita la interacción entre la recepción y el procesamiento de datos. El componente de *software* y compilación está fundamentado en aplicativos *open source*, como Raspbian y Wasmote IDE Compilator, y un módulo RF LoRaWAN a modo de receptor.

Figura 41. Computador implementado

Fuente: autores.

6.4.2 Xbee

Para transmitir la información del Arduino UNO y del kit de sensores de Sparkfun, conectados al escudo meteorológico que contiene los demás sensores, se usó un XBee S2 bajo el estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.15.4. Este dispositivo fue escogido por su mejora en la potencia, el protocolo de comunicación y las múltiples configuraciones que ofrece para comunicarse con otros por puerto serial. Su alimentación también es realmente baja, con un rango de 2.8 a 3.4 VDC. Su consumo de corriente fue un dato importante para escoger a este módulo; la hoja de datos muestra que la corriente, tanto para transmitir como para recibir, es de 40 mA. Además, tiene un alcance de hasta 120 m y trabaja con 2.4 GHz. En el desarrollo de la estación se experimentó con este módulo, pero se utilizó un XBee de más alcance. La información se envía por el ambiente, de modo que existe un tiempo determinado para que se envíe y se reciba. El XBee para trabajar en larga distancia es el de 900 MHz, porque la señal posee mayor penetración a menos frecuencia, y con el uso de una antena robusta es posible lograr 24 km de alcance.

Para enlazar todos los componentes utilizados y la variedad de escudos de compatibilidad existentes en el mercado, se adquiere un escudo que permite darle al Arduino Uno (figura 42) conectividad inalámbrica a través del protocolo Zigbee. La ventaja de este escudo es, por un lado, la posibilidad de escoger entre el modo USB —para programar el Arduino sin la necesidad de quitar el módulo XBee— y, por otro, el modo XBee para realizar la transmisión de datos. El led del escudo permite saber si se asocia el emisor y el receptor, es decir, si hay transmisión de datos.

Figura 42. Escudo Xbee para Arduino



Fuente: autores.

6.5 Subsistema de batería

La investigación en redes de sensores inalámbricos (WSN) está centrada en el uso de energía portátil y limitada para alimentar los sistemas electrónicos y sensores. Un sensor sin batería o sin energía no funciona, y no puede apoyar el funcionamiento de la red. En consecuencia, los esfuerzos de investigación han trabajado en el diseño de protocolos de redes de eficiencia energética, para maximizar la vida útil de WSN (Seah, 2009). Sin embargo, están surgiendo aplicaciones WSN que requieren que el funcionamiento de los sensores, después de que han sido desplegados, se extienda por durante mucho tiempo (años e incluso décadas). Los ejemplos incluyen monitoreo ambiental y monitoreo estructural, donde las baterías son imposibles de reemplazar o recargar. Recientemente, se está experimentando una alternativa para alimentar las WSN. Consiste en transformar la energía ambiental en electricidad para sostener los nodos sensores funcionando. En la figura 42 se muestran los paneles solares utilizados en el proyecto.

Si bien la tecnología de energía renovable no es nueva (p. e., solar y eólica), los sistemas en uso no son apropiados para WSN por el tamaño. Aquellos lo suficientemente pequeños como para ser usados en sensores inalámbricos probablemente solo sirvan para proporcionar energía de manera esporádica, y no continua. Así que los nodos sensores se diseñan con el fin de optimizar la esporádica disponibilidad de energía, para detectar y transmitir rápidamente los datos.

Este proyecto se construyó pensando en las características mencionadas y estudió investigaciones relacionadas, analizando los desafíos de diseño de los prototipos WSN impulsados por energía no convencional. En la figura 43 se muestran los paneles utilizados en cada una de las tecnologías con las que se ha trabajado.

Figura 43. Módulos solares utilizados

Fuente: autores.

6.5.1 LoRaWan

En cuanto al sistema de potencia eléctrica, el modelo propuesto bajo la tecnología LoRaWAN cuenta con una implementación de energía solar, por medio de un pequeño panel solar que entrega 6.7 V. Esto es suficiente para la alimentación de un banco de baterías recargables de larga duración, que mediante rectificación, transformación y filtrado entregan la cantidad de electricidad solicitada por el equipo de adquisición y transmisión de datos, en un ciclo de vida y de uso de diez años. Cabe destacar que esto es posible a partir de procesos de programación: el sistema se activa a demanda y se pone en modo hibernación en tiempos inoperables. A diferencia de las implementaciones desarrolladas en sistemas como Arduino (alimentación entre 5 y 12 V), el consumo del sistema requiere voltajes inferiores a 4 V, lo que ayuda a optimizar y prolongar la vida útil del sistema de potencia.

Se estima que la ubicación del sistema receptor se hará en lugares donde el dispositivo pueda alimentarse eléctricamente a 110 V, como la red eléctrica común en nuestro país. Sin embargo, se prevé realizar un sistema de alimentación autónomo mediante el uso de energía no convencional, para lograr versatilidad y portabilidad en el dispositivo.

6.5.2 Arduino

Con el fin de optimizar el proceso, es necesaria una fuente de alimentación capaz de abastecer de energía a la estación meteorológica durante el transcurso del día. Esta instalación amortiza económicamente el consumo energético. Además, se han evaluado los beneficios medioambientales que produce: proporciona una red limpia y renovable a través de paneles solares. El máximo aprovechamiento de la energía contenida en la radiación solar ocurre cuando los paneles se encuentran posicionados perpendicularmente a los rayos solares. Es ideal el seguimiento a los rayos del sol, variando la posición de los paneles. En el caso de la estación meteorológica, el

gasto energético se encuentra entre 40 y 130 mA, y un seguimiento continuo de los rayos solares no sería beneficioso pues un servomotor elevaría el gasto energético y el montaje sería más robusto. Como solución se opta por orientar el panel en función del lugar, la latitud, el emplazamiento y la demanda de la energía prevista. La fuente de alimentación de la estación es una batería lipo de 3.7 V y 6600 mA recargable, como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Batería lipo 6600 mA



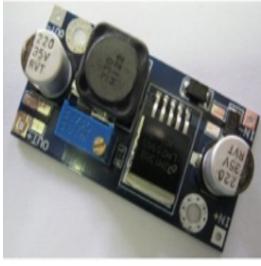
Fuente: autores.

La batería se escogió por el tamaño y la cantidad de corriente que demanda; además, los cargadores de una celda son muy comerciales en el mercado actual, y a través de una serie de etapas se logra una carga de eficiencia aceptable. Los paneles solares encargados son policristalinos, absorben el calor a una mayor velocidad, y el sobrecalefamiento, a diferencia del monocristalino, les afecta en menor medida. Alcanzan a proveer 22 V de corriente directa cuando reciben los rayos del sol; sin embargo, el cargador necesita de 5 V de corriente directa para su uso.

La propuesta plantea reducir y asegurar el voltaje entregado por el panel a 5 ± 0.5 V de corriente directa, con un módulo que está basado en el Regulador DC-DC Step Down LM2596, capaz de emitir una corriente de hasta 3A. Se trata de una fuente de alimentación conmutada, por lo que es mucho mejor que los reguladores lineales tradicionales, por ejemplo, el 7805: con una alimentación muy alta, se calienta excesivamente por disipar la energía hasta dañarse.

Tal como se observa en la figura 45, su tamaño y su fácil uso hacen que este módulo sea ideal para proyectos similares. Si la tensión del panel cae a 6 V, seguirá regulando los 5 V necesarios.

Figura 45. Módulo regulador 2569

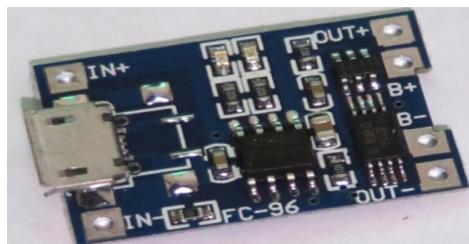
	<ul style="list-style-type: none"> Basada en el regulador LM2596: 1.5-35 Vdc. Voltaje de entrada: 4.5-40 V Voltaje de salida: 1.5-35 V (ajustable). Corriente de salida: Máxima 3 A Dimensiones: 43 × 20 × 14 mm Frecuencia de switching: 150 KHz
---	---

Fuente: elaboración propia.

La finalidad de regular el voltaje —que proviene del panel solar a 5 V— es alimentar un módulo capaz de cargar baterías lipo de una sola celda (3.7 V). Este minúsculo módulo, conocido como TP4056 (figura 46), ofrece una corriente de carga de hasta 1 A, y corta el suministro cuando termina de cargar completamente la batería. Las ventajas que ofrece son las siguientes:

- Protección de celda por debajo de 2.4 V.
- Protección contra la conexión de sobretensión.
- Polaridad inversa.
- Testigos led para carga y carga completa.
- Tamaño diminuto (26 × 17 × 10 mm).
- Conector mini USB para alimentación alternativa.

Además, mientras la batería de una sola celda está en proceso de carga, es posible obtener una salida de voltaje para alimentar un circuito, en este caso, la estación meteorológica.

Figura 46. Módulo cargador TP4056

Fuente: autores.

La alimentación necesaria para el *hardware* de la estación se encuentra entre 6 y 12 V de corriente directa; por esto, como etapa final, es necesario elevar el voltaje proveniente de la batería de lipo de 3.7 V. Se determina usar un convertidor DC-DC, elevador de tensión XL6009, como el de la figura 47, que aumenta la tensión. Los valores son ajustables y regulables gracias al potenciómetro con que cuenta el módulo. También es usado para aplicaciones en las que se requiera una constante salida —independientemente del cambio fluctuante en la entrada—, con una eficiencia de aproximadamente 90%. En muchos foros de internet, recomiendan colocar un condensador de alto valor para reducir el rizado.

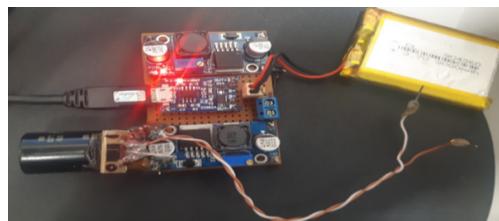
Figura 47. Módulo elevador de tensión XL6009



Fuente: autores.

Finalmente, la propuesta para la alimentación de la estación meteorológica se implementa como se observa en la figura 48. Se añadió un interruptor On/Off para el encendido de la estación y un condensador de 2200 uF para reducir el voltaje de rizado, según se ha indicado anteriormente.

Figura 48. Propuesta de alimentación de estación



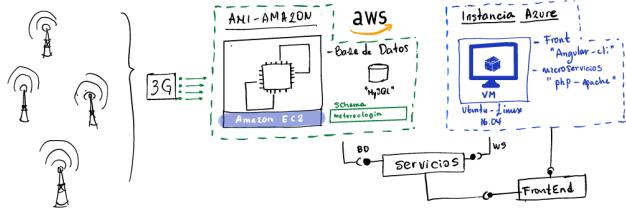
Fuente: autores.

6.6 Subsistema informático y comunicación en la nube

La plataforma implementada en la nube permitió crear y administrar una aplicación, desarrollada por el equipo de trabajo, con tecnologías de código creado por Microsoft.

A continuación, la figura 49 presenta la propuesta de comunicación informática del modelo de comunicación de datos, definida por tecnologías WSN.

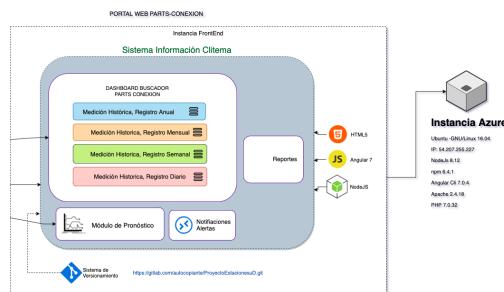
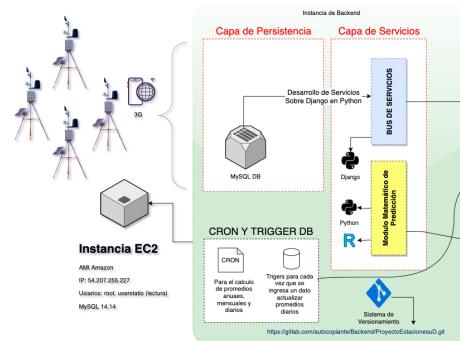
Figura 49. Propuesta gráfica de modelo informático



Fuente: elaboración propia.

En la figura 50 se presenta en detalle el modelo informático de monitoreo de datos que son almacenados en servidores físicos, y son mantenidos y controlados por un proveedor de computación en la nube Azure de Microsoft. A través de una conexión a internet, es posible acceder a la información almacenada en la nube como usuarios.

Figura 50. Modelo informático de monitoreo de datos

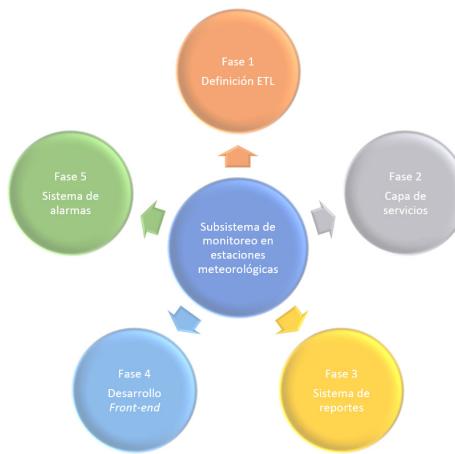


Fuente: elaboración propia.

6.6.1 Relación de actividades por fase

A continuación se presentan las actividades que permitieron el desarrollo y la implementación del subsistema de comunicaciones informático aplicado, junto con la herramienta de visualización y monitoreo de las estaciones. Para esto se ha definido una serie de fases articuladas, según se expone en la figura 51.

Figura 51. Fases articuladas para la implementación del *framework*



Fuente: elaboración propia.

- **Fase 1.** Definición de *scripts* para ETL de datos y tramas de las torres climáticas a un sistema de base de datos, a fin de unificar la información para su tratamiento en un sistema de información.
- **Fase 2.** Desarrollo de una capa de servicios que sirva de arquitectura al sistema de información, con el propósito de crear un sistema abierto para el consumo de los datos.
- **Fase 3.** Desarrollo de un sistema de reportes a efectos de visualizar la información de las torres meteorológicas en tiempo real y obtener un histórico de los datos por variables y rangos de tiempo.
- **Fase 4.** Desarrollo de una interfaz *Front-end* en Angular y NodeJs, con el objetivo de vincular los módulos de reportes, pronósticos e informativos.
- **Fase 5.** Desarrollo de un sistema de alarmas como medio de notificación. Cuando el *software* desencadena alguna notificación, las alertas se manejan vía correo electrónico o mensaje de texto.

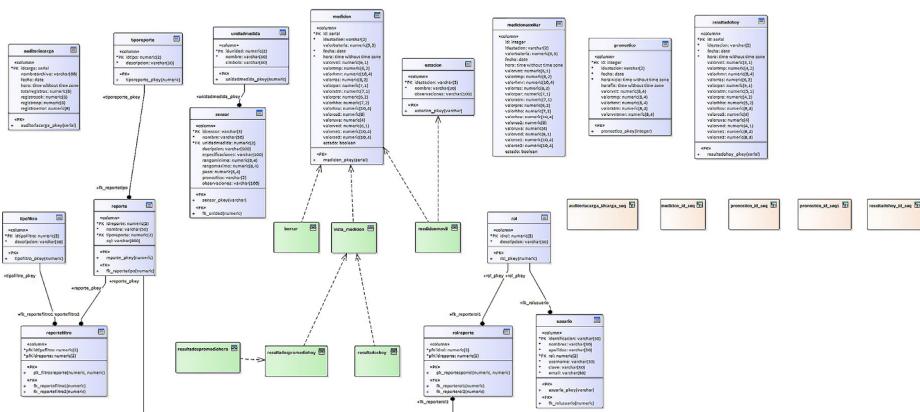
6.6.2 Fase I

Se analizan y definen los *scripts* para ETL de los diferentes tipos de datos y tramas de las torres climáticas a un sistema de base de datos, a fin de unificar la información para su tratamiento en un sistema de información. Actualmente, se cuenta con una base de datos a la cual llegan los datos del monitoreo de las estaciones climáticas. Es necesario definir consultas y vistas para realizar los servicios web que consumirá la plataforma.

6.6.2.1 Actividades desarrolladas

- a. Creación de vistas y consultas relacionadas en el mapeo de los datos a servicios.
 - b. Desarrollo de un sistema para regular los datos que entran a las bases de datos (datos vacíos, limpieza de datos, corrección e ingreso de media para datos que sean erráticos).
 - c. Planeación de técnicas de indexación para optimizar la base de datos; más aún considerando la cantidad de datos que ingresan al año y la razón de datos a consultar en la plataforma por petición de usuario.
 - d. Desarrollo de restricciones de columnas, rangos de datos y validaciones del modelo actual de la base de datos.

Figura 52. Modelo base que provee datos a la nueva base de datos



Fuente: autores.

A continuación, en la figura 53, se presenta la relación de datos capturados de la estación 02.

Figura 53. Registro de captura de datos que se almacenan en la base de datos, a partir de la sensórica reportada en las estaciones

Result Grid						
		Filter Rows:	Search	Export:	Fetch rows:	
id_station	create_time	th0temp	th0hum	thb0press	rain0rate	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 04:15:01	18	68	1017	0.3	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 04:10:01	17.7	77	1017	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 04:05:01	17.9	82	1017	0.3	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 04:00:01	17.1	85	1019	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:55:01	16.5	80	1016	0.4	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:50:01	19.9	63	1018	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:45:01	15.4	85	1018	0.2	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:40:01	17.1	100	1014	0	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:35:01	17.2	98	1018	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:30:01	17.6	64	1016	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:25:01	16.1	61	1017	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:20:01	16.2	74	1014	0.3	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:15:01	19.5	91	1017	0.4	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:10:01	18.3	73	1018	0.2	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:05:01	17.3	69	1019	0.1	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 03:00:01	16.1	67	1018	0.4	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 02:55:01	18.9	96	1016	0.4	
estacion02-modem17-une003261	2019-02-25 02:50:01	19.6	73	1017	0.4	

Fuente: autores.

6.6.3 Fase II

Se desarrolla una capa de servicios que sirve de arquitectura al sistema de información. El propósito es crear un sistema abierto para el consumo de los datos. Esta fase es una de las más importantes ya que alimenta la plataforma en la que se visualizan todos los datos del proyecto, los tableros de información (*dashboard*), los informes de consulta, el módulo histórico y de pronóstico, así como el módulo de alertas. Asimismo, se crea una API utilizando las herramientas Django y Python.

6.6.3.1 Actividades desarrolladas en esta fase

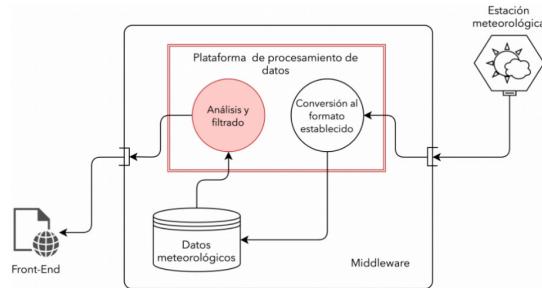
6.6.3.1.1 API REST

1. Método y estrategias para creación de las API.
2. Métodos para consumir los datos históricos en un rango de meses y año (para *dashboard*, pueden ser varios servicios).
3. Método para consumir datos según datos de pronóstico (módulo de pronóstico).
4. Método para consumir datos de alertas tempranas.
5. Método para la gráfica de los todos datos (variable vs. tiempo).
6. Método para la gráfica de los datos por estación (variable vs. tiempo).
7. Método para la gráfica de la probabilidad con respecto al tiempo.
8. Método para la gráfica que muestre la cantidad de datos por estación.

El proyecto de estaciones meteorológicas comprendió varias aplicaciones derivadas, desde la configuración de las estaciones meteorológicas hasta el *Front-end* de la aplica-

ción. En conjunto, esto permitió generar alertas y predicciones meteorológicas con base en históricos almacenados y registros en tiempo real. Una primera arquitectura planteada a grandes rasgos se presenta en la figura 54.

Figura 54. Especificaciones de arquitectura de infraestructura informática



Fuente: elaboración propia.

Se hace énfasis en el *middleware*, es decir, la capa intermedia de la aplicación entre la generación de datos y su visualización final. Esta capa se encarga del almacenamiento y la transformación de los datos. La API REST que aquí se documenta se encuentra en esta capa de la aplicación, de ahí que esté resaltada más específicamente en el proceso de análisis y filtro de datos.

6.6.3.1.2 Modelo de API

El modelo de datos está compuesto únicamente de los elementos expuestos en la tabla 7.

Tabla 7. Variables para asociación API

Nombre	Tipo	Ejemplo
consecutivo	integer	0
createTime	timestamp	1552100893
idStation	string	"palermo"
updateTime	timestamp	1552102394
th0Temp	string	"17.8"
th0Hum	string	"65.0"
th0Dew	string	"11.1"

Fuente: autores.

6.6.3.1.3 La API y el modelo de maduración de Richardson

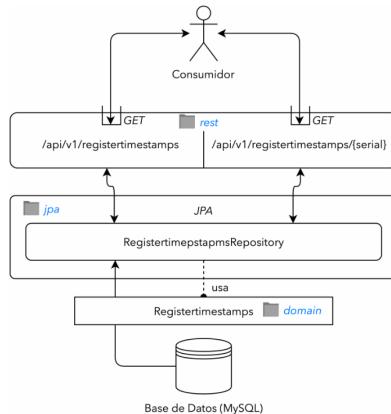
El modelo de madurez Richardson (REST, 2019) permite identificar la madurez de una API REST. A mayor nivel de madurez, más sólida, usable y semántica es la API. Este modelo tiene cuatro niveles, que se exponen a continuación:

- *Nivel 0. Swamp of POX.* Se refiere a usar HTTP para interacciones con un servidor en específico sin tener el concepto de recurso.
- *Nivel 1. Recursos.* Existe el concepto de recurso, y una URI permite acceder a él. Sin embargo, no se establece con claridad la acción a realizar sobre dicho recurso.
- *Nivel 2. Métodos HTTP.* Los métodos o verbos HTTP añaden semántica a la petición realizada al servidor, así se explica la operación ejecutada sobre el recurso identificado.
- *Nivel 3. HATEOAS.* De manera explícita nos dice qué acciones adicionales se pueden llevar a cabo sobre el recurso obtenido.

Al diseñar la API se proyectó alcanzar la madurez más alta. No obstante, se determinó únicamente llegar a la madurez 2 de Richardson, pues aún no se tenían definidas las características de la API; además, alcanzar un nivel mayor de madurez podría aumentar la dificultad para modificar la API hacia futuro. Todo el código se encuentra en la carpeta *src*, abreviatura para *sources*, que indica los archivos fuente. Allí está la carpeta *main*, que contiene las fuentes de Java y los recursos (*resources*). Estas carpetas cumplen una función específica:

- *Java:* contiene el código Java; es el corazón de la aplicación, allí se encuentra toda la implementación de la API.
- *Resources:* contiene los archivos secundarios que son usados en la implementación, no están en un lenguaje específico, y generalmente posee configuraciones necesarias para el despliegue de la aplicación.

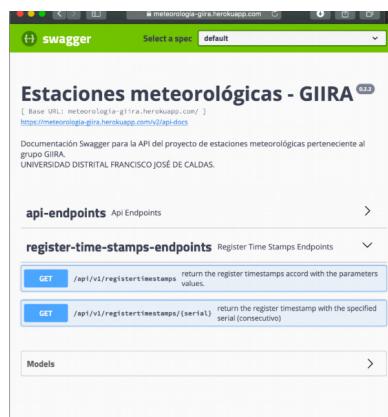
Este proyecto solo cuenta con un archivo de recursos llamado *application.properties*. Contiene varias propiedades necesarias para el funcionamiento de la aplicación, como la configuración de la base de datos, y varias deseadas, como el nivel de registro para los *logs*. La figura 55 presenta el diagrama general del API.

Figura 55. Diagrama de consumo API

Fuente: elaboración propia.

El diagrama muestra la estructura de la API REST (comprendida dentro del paquete `edu.udistrital.giira.meteorology`) junto con la carpeta que contiene cada uno de sus componentes. En la carpeta `rest` se encuentra el código que procesa las peticiones realizadas por el consumidor, allí se programa cada *endpoint* de manera directa.

La documentación de la API se genera con la librería *Swagger*, que produce archivos `*.json` con la información obtenida desde el código fuente Java. No obstante, era deseable una manera gráfica —e incluso interactiva— de ver los diferentes *endpoints*. Esto se logró haciendo uso de la librería *SpringFox*: se creó la documentación web interactiva de la API donde se listan los *endpoints* y se permiten hacer peticiones de prueba. La documentación luce como se muestra en la figura 56.

Figura 56. Repositorio del API

Fuente: autores.

6.6.4 Fase III

Se desarrolla un sistema de reportes para visualizar la información de las estaciones meteorológicas en tiempo real, y un histórico de sus datos por variable y rangos de tiempo.

- a. Este módulo forma parte de la plataforma de monitoreo.
- b. Los reportes se emiten de acuerdo con datos históricos presentes y en tiempo real, según las características de cada estación meteorológica.

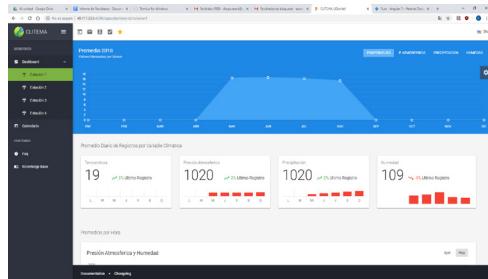
6.6.5 Fase IV

Se desarrolla una interfaz Front-end en Angular y NodeJs, e integración con servicios desarrollados en Django, con el objetivo de vincular todos los módulos de reportes, pronósticos e informativos.

- a. Instalación de infraestructura, versiones compatibles y dependencias de Angular, Python, NodeJS, NPM, Django, Git.
- b. Instalación, configuración de Angular CLI y ejecución del servicio en el servidor, con base en la plantilla destinada para la plataforma de monitoreo.
- c. Estudio de los servicios, conceptos básicos, rxjs, directivas, ruteos y conexiones remotas de la actual versión de angular (5), para el desarrollo de módulos personalizados en la plataforma, dando prioridad a los formularios y servicios a utilizar, según las necesidades específicas.
- d. Integración de los servicios (API) con la interfaz (Front-end) y cada uno de sus módulos. Esto incluye varias actividades y tareas (*dashboards*), listas por estación y variables, informes de pronósticos, históricos y módulo de alertas.
- e. Estudio de AGM para la utilización de Google Maps con la Angular, a fin de responder la parte de visualización y de reportes de la plataforma.

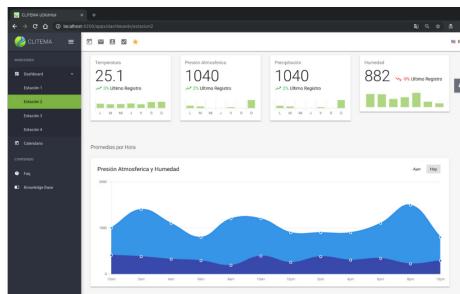
A continuación, en las figuras 57 a 63, se presentan algunas visualizaciones del Front-end creado.

Figura 57. Interfaz gráfica de consulta Estación 1



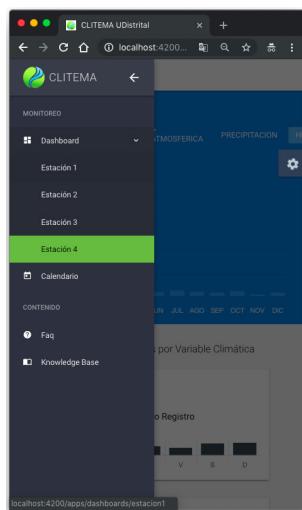
Fuente: CLITEMA.

Figura 58. Interfaz gráfica de consulta Estación 2



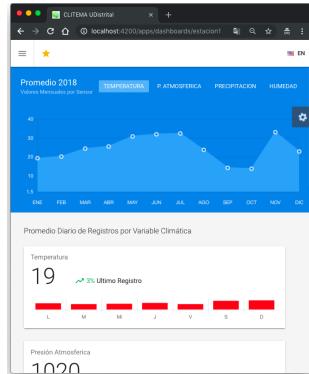
Fuente: CLITEMA.

Figura 59. Interfaz gráfica de consulta Estación 2



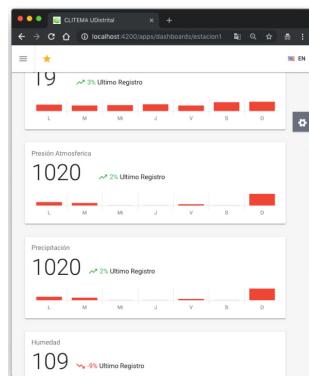
Fuente: CLITEMA.

Figura 60. Interfaz gráfica de consulta de la variable temperatura



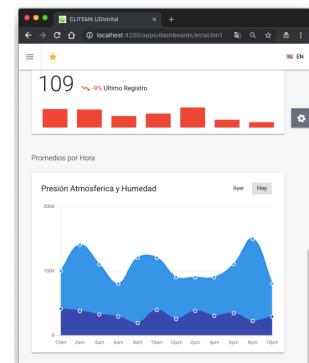
Fuente: CLITEMA.

Figura 61. Interfaz gráfica de consulta de registros

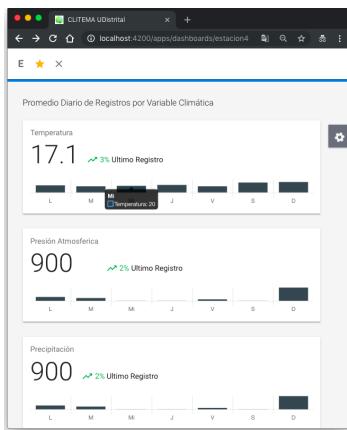


Fuente: CLITEMA.

Figura 62. Interfaz gráfica de consulta de presión atmosférica



Fuente: CLITEMA.

Figura 63. Interfaz gráfica de consulta de promedio de registros

Fuente: CLITEMA.

6.6.6 Fase V

Se desarrolla un sistema de alarmas como medio de notificación. Cuando el *software* desencadene alguna notificación, las alertas se manejan por medio de correo electrónico o por vía de mensaje de texto:

- Definición de un modelo basado en inteligencia computacional, métodos estadísticos y reglas de inferencia, que permita determinar una alerta en la aplicación.
- Desarrollo de alertas por correo electrónico e integración con Angular si es necesario.
- Estudio de API para manejar mensajes de texto.
- Manejo de alertas vía eventos para la plataforma y notificaciones para PWA, dado el caso y si el proyecto alcanza a cobijarlas.

6.6.7 Especificaciones de diseño y estándares de codificación

El código fuente de esta plataforma es una aplicación Angular, escrita completamente con Typescript y sin dependencia de jQuery. Entre las librerías especiales con las que se ha trabajado la plataforma se encuentran las que se enuncian a continuación.

6.6.7.1. Google's Material Design (Diseño de materiales de Google)

Todas las bibliotecas y los componentes personalizados están siguiendo las especificaciones de diseño de materiales de Google. Angular Material Design, según la descripción de sus desarrolladores Angular (2019), es un lenguaje visual que sintetiza los principios clásicos del buen diseño con la innovación de la tecnología y la ciencia.

Unifica la experiencia del usuario a través de plataformas, dispositivos y métodos de entrada; y personaliza por medio del amplio lenguaje visual de los materiales, proporcionando una base flexible para la innovación y la expresión única de la marca.

La utilización de esta librería para el proyecto se justifica por el diseño de materiales inspirado en el mundo físico y sus texturas, incluida la forma en que reflejan la luz y proyectan sombras. Las superficies de los materiales reimaginan los medios de papel y tinta. Lo atractivo de las combinaciones de color en cada componente y el fundamento teórico que existe detrás de cada material, tipografía o recurso hacen de los productos desarrollados un material creativo, atractivo y simple. En combinación con un diseño de componentes modernos y sensibles, ofrece una gran sensación de usabilidad (Angular, 2019).

6.6.7.2 Angular

Es un *framework* para aplicaciones web de código abierto, desarrollado en TypeScript y mantenido por Google, que se utiliza para crear y mantener aplicaciones web de una sola página. Su objetivo es aumentar las aplicaciones basadas en navegador con capacidad de Modelo Vista Controlador (MVC) para hacer que el desarrollo y las pruebas sean más fáciles.

La biblioteca lee el HTML que contiene atributos de las etiquetas personalizadas adicionales, entonces obedece las directrices de los atributos personalizados y une las piezas de entrada o salida de la página a un modelo representado por las variables estándar de JavaScript. Los valores de estas variables se pueden configurar manualmente o pueden ser recuperados de recursos JSON estáticos o dinámicos.

Se utilizó Angular debido a su estructura y forma de organizar el código, los componentes, los módulos y los recursos; esto hace posible un proyecto más ordenado. Además, es un lenguaje abierto a una amplia cantidad de librerías compatibles y del que existe una gran documentación actual y en constante evolución.

6.6.7.3 Angular Material

Los materiales de la biblioteca principal UI de Angular son un conjunto de componentes, directivas y servicios que implementan las especificaciones de diseño de materiales. Está en desarrollo activo por parte de Google.

6.6.7.4 CLI tool for Angular

Angular CLI es una herramienta para inicializar, desarrollar, escalar y mantener aplicaciones desarrolladas en Angular. Está construido sobre el DevKit Angular, que proporciona un gran conjunto de bibliotecas usadas para administrar, desarrollar, implementar y analizar su código.

6.6.8 Instalación del ambiente de desarrollo Front-end (Angular)

6.6.8.1 Definición de requisitos previos

- **Angular CLI.** Esta plataforma se trabaja sobre una plantilla llamada Fuse, y Angular CLI sirve para arrancar rápidamente la aplicación. Esta es una herramienta para inicializar, desarrollar, escalar y mantener aplicaciones desarrolladas en Angular.
- **Node.js.** Para instalar y usar esta plataforma es necesaria la instalación de Node.js en el servidor o computador donde se desee ejecutar en modo desarrollador. Node.js está diseñado para crear aplicaciones de red escalables. La versión requerida para este proyecto es 8.X; las versiones superiores —como 10.x— presentan problemas.
- **Git.** Este proyecto requiere Git para descargar la plantilla fuente del repositorio y para que npm funcione correctamente.
- **Npm, Package Manager.** Es el registro de *software* más grande del mundo. Los desarrolladores de código abierto de todos los continentes lo usan para compartir y pedir prestados paquetes. Muchas organizaciones también usan npm para administrar el desarrollo privado. En el presente proyecto, se usa este administrador de paquetes para instalar y administrar bibliotecas y componentes de terceros.

6.6.9 Instalación

Instalación de requisitos previos

1. Descargar e instalar Node.js de su sitio web, preferiblemente en la versión 8.x (<https://nodejs.org/dist/latest-v8.x/>); la versión 10.x presenta problemas para la versión de Angular de la plantilla.
2. Descargar e instalar el último paquete Git de su sitio web para su sistema operativo.
3. Descargar el repositorio donde se encuentra alojada la aplicación, para esto es necesario crear o clonar el repositorio sobre una carpeta existente:

```

a. mkdir EstacionesUD
b. chmod -R 777 EstacionesUD
c. git clone https://gitlab.com/autocopiate/ProyectoEstacionesuD.
   git
d. cd ProyectoEstaciones

```

Para instalar la CLI Angular se requiere abrir una aplicación de consola (terminal, símbolo del sistema, etc.) y ejecutar el siguiente comando, ejecutando el anterior para ubicarse dentro de la carpeta (es necesario esperar a que este finalice):

- ```
a. cd /raiz_del_proyecto_clonado
b. npm install -g @angular/cli
```

Para instalar el proyecto, es necesario estar en la raíz de este y esperar hasta que se finalice:

- ```
a. cd /raiz_del_proyecto_clonado  
b. npm install
```

Si se presenta algún inconveniente relacionado con node-sass, es necesario ejecutar el siguiente comando:

- ```
a. npm rebuild node-sass --force
```

Instalar librerías necesarias para los futuros reportes de las estaciones y alertas tempranas:

- ```
a. npm i ng2-pdf-viewer  
b. npm i ngx-countdown-timer
```

Finalmente, se levanta el servicio en modo desarrollo para comprobar que no existan errores:

- ```
a. ng serve --host 0.0.0.0
```

### 6.6.10 Requerimientos del servidor

Los siguientes requerimientos relacionan el montaje de las librerías y el *software* necesario para ejecutar las tareas automáticas y los servicios web: MySQL 5.0.11; PHP Version 5.6.36; Apache 2.0 Handler.

### 6.6.11 Archivos Crontab

**Tabla 8.** Descripción de requerimientos del servidor

| Script           | URL                            | Concurrencia           | Descripción                                                                                 |
|------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Set promedio mes | /index.php?rpc=set-promedioMes | Primer día de cada mes | Calcula el promedio de los diferentes sensores para cada una de las torres del mes anterior |
| Set promedio día | /index.php?rpc=set-promedioDia | Fin de cada día        | Calcula el promedio de los diferentes sensores para cada una de las torres del día anterior |

**Fuente:** elaboración propia.

#### *Get promedio mes:*

#### URL:

```
a. GET index.php?rpc=get-promedioMes&anno={año}&torre={nombreTorre}
```

#### Descripción:

Retorna en formato JSON los promedios mensuales de los diferentes sensores y torres.

#### Entradas:

**Tabla 9.** Variables de entrada de torres

| Nombre | Ubicación | Tipo de dato | Descripción                                    |
|--------|-----------|--------------|------------------------------------------------|
| Rpc    | query     | string       | Nombre del api a utilizar<br>(get-promedioMes) |
| anno   | query     | int          | Año del reporte                                |
| torre  | query     | string       | Nombre de la estación                          |

**Fuente:** elaboración propia.

```
a. index.php?rpc=get-promedioMes&anno=2018&torre=estacion01-modem16-une004909
```

**Salidas:**

**Tabla 10.** Variables de salida de torres

| Nombre  | Ubicación | Tipo de dato | Descripción                        |
|---------|-----------|--------------|------------------------------------|
| data    | body      | array        | Arreglo con los datos de respuesta |
| Id      | body      | Int          | Llave primaria                     |
| Year    | body      | Int          | Año del promedio                   |
| Month   | body      | Int          | Mes del promedio                   |
| average | Body      | Int          | Valor del promedio                 |
| Sensor  | Body      | String       | Nombre del sensor                  |
| Station | Body      | String       | Nombre de la estación              |
| Error   | Body      | Array        | Arreglo con errores                |

**Fuente:** elaboración propia.

**Salida (JSON):**

```
{
 "data": [
 {
 "id": "68",
 "year": "2018",
 "month": "9",
 "average": "0",
 "sensor": "HRelativa",
 "station": "estacion01-modem16-une004909"
 },
 {
 "id": "69",
 "year": "2018",
 "month": "10",
 "average": "0",
 "sensor": "Temperatura",
 "station": "estacion01-modem16-une004909"
 }
],
 "error": []
}
```

**Errores:**

Entrada:

```
index.php?rpc=apiDesconocido&anno=2018&torre=estacion01-modem16-
une004909
```

Respuesta:

```
{"data":[],"error":["Accion no implementada."]}
```

Entrada:

```
index.php?rpc=get-promedioMes&anno=&torre=estacion01-modem16-
une004909
```

Respuesta:

```
{"data":[],"error":["anno es un campo requerido!"]}
```

Entrada:

```
index.php?rpc=get-promedioMes&anno=2018&torre=
```

Respuesta:

```
{"data":[],"error":["torre es un campo requerido!"]}
```

**Get promedio diario:**

**URL:**

```
GET index.php?rpc=get-promedioDia&anno={año}&torre={nombreTorre}
```

**Descripción:**

Retorna en formato JSON los promedios de la última semana de los diferentes sensores y torres.

## Entradas:

**Tabla 11.** Variables de entrada de estaciones

| Nombre | Ubicación | Tipo de dato | Descripción                                 |
|--------|-----------|--------------|---------------------------------------------|
| Rpc    | Query     | string       | Nombre del api a utilizar (get-promedioDia) |
| anno   | Query     | Int          | Año del reporte                             |
| torre  | Query     | String       | Nombre de la estación                       |

**Fuente:** elaboración propia.

```
index.php?rpc=get-promedioDia&anno=2018&torre=Palermo
```

## Salidas:

**Tabla 12.** Variables de salida de estaciones

| Nombre  | Ubicación | Tipo de dato | Descripción                               |
|---------|-----------|--------------|-------------------------------------------|
| data    | Body      | array        | Arreglo con los datos de respuesta        |
| Id      | Body      | Int          | Llave primaria                            |
| year    | Body      | Int          | Año del promedio                          |
| month   | Body      | Int          | Mes del promedio                          |
| Day     | Body      | Int          | Día del promedio                          |
| average | Body      | Int          | Valor del promedio                        |
| sensor  | Body      | string       | Nombre del sensor                         |
| station | Body      | string       | Nombre de la estación                     |
| week    | Body      | int          | Número de la semana en el año             |
| numDay  | Body      | int          | Número de día dentro de la semana 0-lunes |
| error   | Body      | array        | Arreglo con errores                       |

**Fuente:** elaboración propia.

```
{
 "data": [
 {
 "id": "1053",
 "year": "2018",
 "month": "11",
 "day": "5",
 "average": "12",
```

```

 "sensor": "Temperatura",
 "station": "palermo",
 "week": "45",
 "numDay": 0
 },
 {
 "id": "1054",
 "year": "2018",
 "month": "11",
 "day": "5",
 "average": "0",
 "sensor": "PAtmosferica",
 "station": "palermo",
 "week": "45",
 "numDay": 0
 }
],
"error": []
}

```

**Errores:****Entrada:**

```
index.php?rpc=apiDesconocido&anno=2018&torre=palermo
```

**Respuesta:**

```
{"data":[],"error":["Accion no implementada."]}
```

**Entrada:**

```
index.php?rpc=get-promedioDia&anno=&torre=estacion01-modem16-une004909
```

**Respuesta:**

```
{"data":[],"error":["anno es un campo requerido!"]}
```

Entrada:

```
index.php?rpc=get-promedioDia&anno=2018&torre=
```

Respuesta:

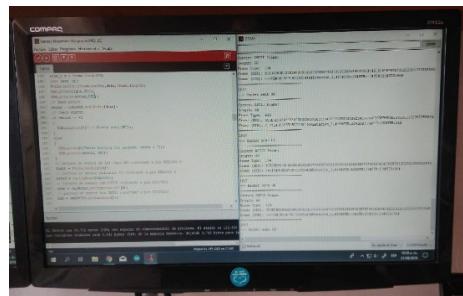
```
{"data": [], "error": ["torre es un campo requerido!"]}
```

## 6.7 Subsistema de programación de modelo de comunicación de equipos

En cuanto a programación y lenguaje de desarrollo de nuestras aplicaciones, se han utilizado aplicativos *open source*, como Wasmote IDE compiler. Estos poseen una interfaz gráfica similar a la IDE de Arduino, que en su trasfondo está implementada bajo lenguaje C, lo que facilita y brinda estabilidad al momento de la configuración y desarrollo. Cuentan, además, con cientos de repositorios y sitios de documentación para la optimización del proceso y la simplicidad en el desarrollo.

Para el componente receptor, el sistema operativo empleado es Raspbian, una versión ligera de Linux, orientada al trabajo en sistema embebido Raspberry. Tiene amplia funcionalidad, una interfaz gráfica amigable con el usuario final y —lo más importante— código abierto. En la figura 64 se muestra el subsistema de programación trabajando.

**Figura 64.** Sistema de programación en operación



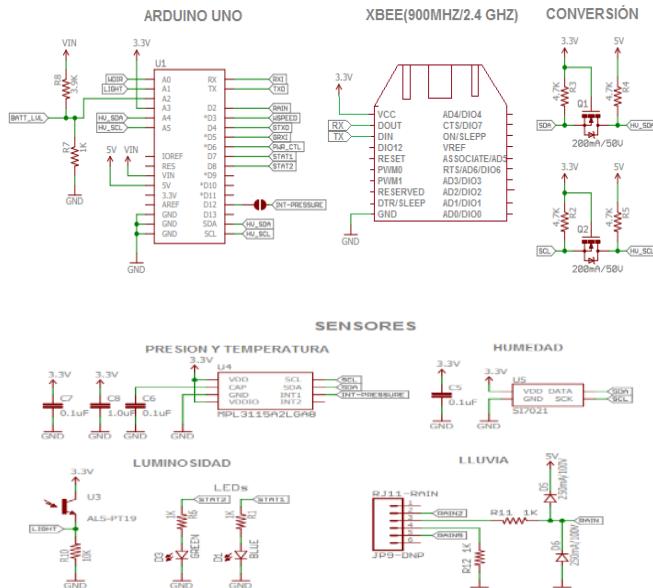
Fuente: autores.

## 6.8 Acondicionamiento de señales

Acondicionar una señal proveniente de un sensor implica una serie de etapas, como convertir la señal, modificar su nivel, linealizarla y filtrarla. Cada uno de los sensores caracterizados en la investigación tiene diferente acondicionamiento; esto se debe a que algunos no necesitan ser amplificados o linealizados, pues la respuesta es directa. Sin embargo, todas las respuestas deben emplear un conversor ADC, de modo que

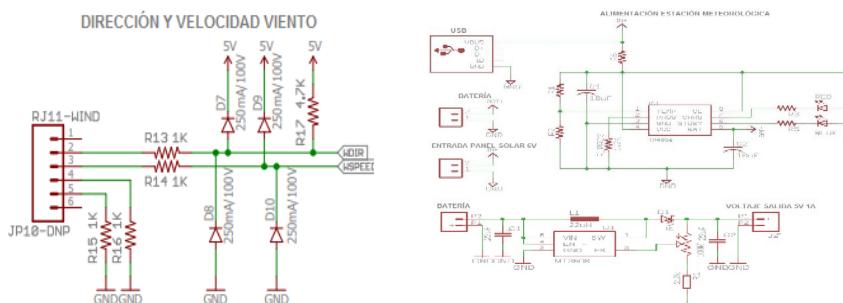
las plataformas manejen estos datos digitales para tomar decisiones. El escudo meteorológico cuenta con algunos sensores que internamente tienen conversión ADC, y evita así esta tarea a la tarjeta desarrolladora. Para otros, es necesario realizar la conversión por el ADC de las tarjetas procesadoras. La linealización de cada uno de los sensores viene dada por fórmulas ya establecidas por el fabricante, lo cual facilita el uso de estos módulos. Para ruidos eléctricos, se emplean capacitores de desacoplamiento, que no dejan pasar ciertas frecuencias de señales que alterarían la medición. En las figuras 65 y 66 se muestra el diseño de los prototipos utilizados en este proyecto.

**Figura 65.** Esquemático de conexiones características



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 66.** Esquemático de conexiones características (II)



**Fuente:** elaboración propia.

## 6.9 Tramas de datos

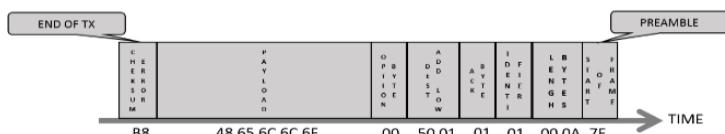
Los dispositivos de transmisión integrados en este proyecto fueron básicamente dos: Xbee y LoRaWan. La red establecida entre ambos corresponde a una red punto a punto; por tanto, la configuración de la transmisión se realizó en modo transparente, que no requiere ningún punto de control. Suele emplearse para reemplazar una conexión serie por cable, al ser una configuración bastante sencilla. Viene asignada por defecto a los módulos ZigBee; su funcionamiento consiste en que todos los datos que pasan por el puerto UART son enviados al módulo deseado, y lo que llega al módulo es enviado de vuelta por el puerto UART.

La longitud de la trama enviada es predefinida desde el código fuente del Arduino, de donde se envían los datos de todas las variables configuradas en la estación, a través del puerto serial. La trama de datos está conformada por las siete magnitudes ya descritas, junto con un separador —por ejemplo, una almohadilla (#)— para que la aplicación reconozca cada dato por separado. La cantidad de bytes que tiene va entre 40 y 48; el cambio numérico de las magnitudes puede aumentar o disminuir algunos bytes.

Esta trama se envía por secuencia de bits, en formato string; es decir, una cadena de caracteres formados por un código binario que el compilador de la máquina distingue. Este comando permite enviar vía serial el dato que se encuentra en estado numérico, formando por combinación de bits un dato tipo string o cadena de texto para facilitar la lectura de los sensores. La trama enviada tipo cadena de texto a través del pin tx del Arduino es recibida por el Xbee a través de su pin din o rx; posteriormente, este la envía al Xbee receptor mediante radiofrecuencia. Es posible ver el dato entrante en una consola o pc por sus puertos USB.

Cabe aclarar que la plataforma Arduino es de fácil uso en sus comandos, ya que muchas de sus funciones vienen preestablecidas. Esto contrasta con la compleja programación que antes se observaba en los microcontroladores. Las tramas de datos de la estación se muestran con ID 3, se envían cada 10 segundos, que es el número de la estación, realizada con sus respectivas mediciones. La mayoría de los paquetes inalámbricos tienen una estructura como la que se muestra en la figura 67, en la que hay un preámbulo seguido de datos.

**Figura 67.** Formato de paquete de capa de enlace



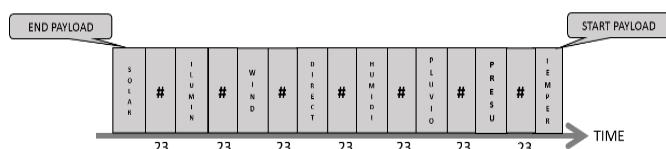
Fuente: elaboración propia.

En la mayoría de los diseños, el preámbulo es corto y se transmite a una modulación y una velocidad de codificación diferentes a las de los datos. Así, el rendimiento de la transmisión está generalmente limitado por el rendimiento de la parte de datos del paquete. En un SIR bajo, los errores suelen ocurrir en la parte de datos del paquete, por lo que es razonable ignorar los errores en el preámbulo. En un SIR más alto, también hay errores en el preámbulo, pero si la interferencia solo afecta al preámbulo, sería un error ignorarlo.

En este modelo simplificado trataremos el paquete como un objeto homogéneo para evitar complicaciones. El modelo podría extenderse para abordar los diferentes niveles de robustez del preámbulo y los datos; sin embargo, no hay claridad respecto a que la complejidad agregada lleve a resultados dramáticamente diferentes. El enfoque más moderado consiste en tratar al paquete como un único objeto homogéneo, cuya longitud es la longitud total del preámbulo y los datos, y su modulación y codificación son las mismas que la de los datos. Este enfoque es preciso en un SIR bajo, pues los datos reciben una modulación y una tasa de código comparables a las utilizadas en el preámbulo. Un enfoque menos conservador supone ignorar por completo la presencia del preámbulo y solo considerar los errores en la sección de datos. Este enfoque es preciso en un SIR alto, donde los datos se envían utilizando una modulación de orden superior y una mayor velocidad de código, por lo que el preámbulo es mucho más sólido que los datos.

La figura 68 ilustra la estructura del *payload* que se utiliza en este modelo. Consiste en una secuencia de símbolos de igual duración. Esto es típico de la sección de datos de un paquete. La longitud se puede ampliar para incluir aproximadamente el efecto del preámbulo.

**Figura 68.** *Payload* dentro del paquete



Fuente: elaboración propia.

El *payload* consta de N símbolos, cada uno de duración T. Se supone que estos símbolos se envían utilizando una modulación y una velocidad de código comunes.

## 6.10 Estación base

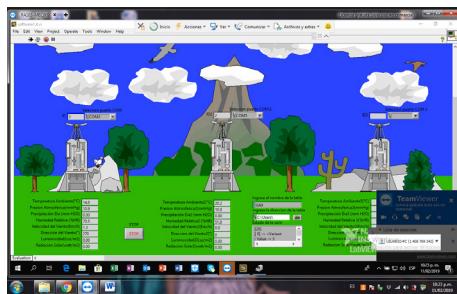
La aplicación en LabView, desarrollada por estudiantes de la Universidad Agraria de Colombia, consiste en la implementación de *software* de una estación base para una red de sensores inalámbricos (WSN). Posee nodos equipados con diferentes sensores que cuentan con la información recibida por tres estaciones meteorológicas; posteriormente, las mediciones de estas estaciones son captadas por la aplicación y son

enviadas a MySQL. Este sistema de gestión de base de datos ayudará a la generación de estadísticas y al análisis de las variables meteorológicas. Anteriormente, nos referimos a la aplicación de la estación base como un todo; en adelante, describimos la interfaz entre dos objetos principales: la ventana principal y el controlador del *gateway*.

### 6.10.1 Interfaz gráfica

El propósito es representar datos detectados e interactuar con el usuario. Por lo tanto, la mayoría de ellos, al menos, participa en el mantenimiento de GUI que se muestra en la figura 69.

Figura 69. Interfaz gráfica de la estación base



Fuente: elaboración propia.

La ventana principal tiene como finalidad interactuar con el usuario, habilitar la administración de nodos y conceder acceso a otras ventanas y cuadros de diálogo. La ventana principal es proporcionada por dos clases, cada una con un objetivo diferente. La clase MainWindow procura la conexión entre los objetos principales (el controlador de la puerta de enlace, el administrador de nodos, el administrador de la base de datos, el administrador de la consola) y administra el marco de la ventana principal (la barra de menú y la barra de estado). Por su parte, la clase CenterOfMain (una parte del administrador de nodos) administra el contenido de la ventana principal, crea y elimina solicitudes o nodos, de acuerdo con la acción del usuario. También proporciona una lista de nodos registrados. La barra de menús permite al usuario realizar diferentes acciones divididas en elementos de menú, separados y equipados con acciones relacionadas.

### 6.10.2 Administrador de base de datos

El objetivo de este administrador es almacenar los datos detectados en una base de datos local y reenviarlos a la aplicación en un servidor remoto. La base de datos local está representada por un directorio regular en el sistema operativo (denominado “directorio de la base de datos”). Este directorio contiene archivos cuyos nombres incluyen la fecha y componen el historial del día correspondiente (por ejemplo, un archivo del 13 de enero de 2012 estaría nombrado como 2012 1 13.dat). Según

la dirección proporcionada por el directorio de la base de datos y el día actual, el administrador de la base de datos selecciona el archivo correcto y agrega nuevos datos detectados, cada vez que llegan. Cabe además señalar que el administrador de gráficos utiliza los valores de la base de datos local.

Las líneas en el archivo describen valores detectados desde un nodo sensor. La línea contiene dos valores de marca de tiempo (uno para el inicio de la solicitud y el otro para el tiempo de llegada de respuesta; ambos son creados en el controlador de la puerta de enlace), ID de nodo, nombre de nodo, tipo de datos y valor de datos. Estos campos están separados por un delimitador.

### 6.10.3 Controlador del *gateway*

El controlador del *gateway* es un objeto que se ejecuta en el contexto del subprocesso de la puerta de enlace, que representa una interfaz entre la estación base y el resto de la aplicación. Gestiona las solicitudes, su orden, traducción y ejecución, como respuestas de la WSN. Cuando el objeto del subprocesso principal inserta una solicitud (utilizando la señal “insert-Query”), el controlador del *gateway* reacciona agregando la solicitud al grupo de solicitudes y configurando un temporizador de solicitud.

El temporizador de solicitud es un objeto derivado de la clase QTimer (Inzunza, 2019), asociado con una solicitud específica del grupo de solicitudes. Su función principal es hacer una cuenta regresiva del tiempo especificado y luego enviar una señal que indique que este ya ha transcurrido. Usamos el temporizador de solicitud para notificar al controlador del *gateway* que la solicitud debe enviarse nuevamente debido a un intento fallido, o para manejar una solicitud repetida.

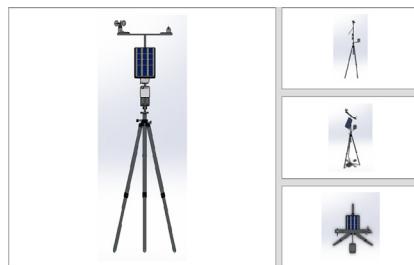
Cuando aparece la señal del temporizador, la aplicación intenta enviar la solicitud. Esto solo es posible si la solicitud se está ejecutando en ese momento; si no es el caso, el controlador del *gateway* agrega la solicitud a la cola de prioridad. Antes de enviar una solicitud, debe traducirla en un mensaje de acuerdo con el protocolo utilizado entre el nodo de la puerta de enlace y NetSend. El mensaje se almacena en una matriz de bytes y se envía a través del puerto serie al nodo de la puerta de enlace. La comunicación a través del puerto serie se implementa utilizando una biblioteca de terceros, Qextserialport (Archundia, 2019). Un puerto instanciado desde la biblioteca posee una gran característica: emite una señal cada vez que aparece un grueso de datos en el nodo de la puerta de enlace. Esta característica permite que el controlador de la puerta de enlace escuche al puerto.

## 6.11 Estaciones meteorológicas elaboradas

En términos generales, la solución propuesta para la implementación de bajo costo de una estación meteorológica comprende un equipo transmisor que recolecta y

transmite los datos obtenidos de un grupo de sensores. Los sensores permiten medir periódicamente el comportamiento de variables físicas a fin de transmitirlos a un equipo receptor ubicado a distancia considerable. Dicha transmisión se realiza a través de un medio inalámbrico por difusión de radiofrecuencia, que configurado e implementado de manera particular, permite la optimización de sistemas de alimentación eléctrica y transporte de datos. En la figura 70 se presenta el diseño elaborado en 3D.

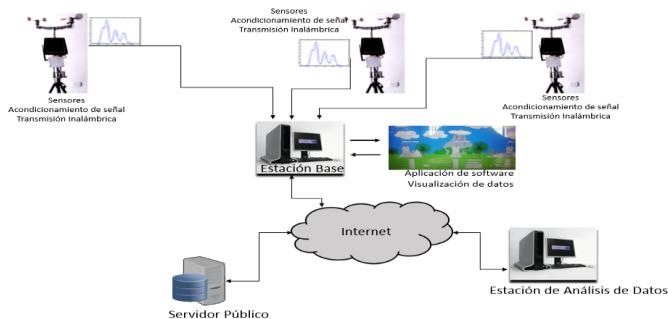
**Figura 70.** Diseño 3D de estación de metrología completa



**Fuente:** elaboración propia.

Luego de ser transmitidos, un equipo receptor —a manera de pasarela (*gateway*)— se encarga de la decodificación, consolidación y normalización de los datos, para su posterior alojamiento en la nube o IoT. A partir de ellos se genera la trazabilidad y el registro de la actividad meteorológica de la zona implementada. En la figura 71 se muestra en síntesis la implementación realizada.

**Figura 71.** Modelo del sistema final implementado



**Fuente:** elaboración propia.

Este es un modelo de sistema o una combinación de sistemas integrados y modulares con comunicación a redes de área local e internet. Existe comunicación local cuando varias estaciones se comunican con un solo punto central, y este se comunica a través de una conexión a internet.

# 7. Resultados del estudio

---

En este capítulo se presentan los hallazgos del estudio, de acuerdo con la metodología aplicada para recopilar información. Los resultados han sido organizados en una secuencia lógica sin sesgo ni interpretación, que incluye los datos generados a partir de la investigación.

## 7.1 Metodología de análisis

Los datos obtenidos fueron sometidos a diferentes operaciones como registro, tabulación, clasificación y codificación, según correspondiera. Asimismo, se definieron las técnicas lógicas (inducción, deducción, análisis, síntesis) o estadísticas (descriptivas o inferenciales) para descifrar lo que revelan los datos recogidos. Se identificaron las partes más críticas en el proceso, de modo que pudiera realizarse un análisis detallado de las variables involucradas, obteniendo conclusiones de cada una de ellas y su comportamiento. La observación de los hechos de forma individual permitió establecer parámetros y conjeturas generales del proceso.

A partir de un marco referencial previamente definido, se comprobaron los teoremas generales mediante prácticas experimentales. Estas permitieron aplicar las leyes y los principios de la sismología para el desarrollo del prototipo, validando la veracidad y pertinencia del arco conceptual en la investigación. Las partes de información extraídas y analizadas fueron reunidas conforme se desarrollaban los efectos experimentales y la observación de los fenómenos físicos involucrados. Se presentaron en forma de conclusión para explicar los hechos de la investigación.

## 7.2 Resultados obtenidos

La obtención de resultados se deriva de las pruebas de campo realizadas para la validación del funcionamiento de todos los sistemas y del modelo matemático elaborado. Las variables meteorológicas evaluadas, como se ha mencionado, fueron las siguientes:

- Temperatura
- Humedad
- Presión
- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Promedio hora lluvia
- Promedia día lluvia
- Luminosidad

### 7.2.1 Modelo matemático

Usando métodos de modelamiento matemático, se realizó un estudio para determinar la métrica de la cantidad de paquetes perdidos, el *throughput* y la latencia. Se procedió a medirlos y con esas mediciones se llevó a cabo el experimento base y el análisis de los datos obtenidos. Las métricas de rendimiento pueden verse afectadas por la interferencia. Además, la selección exacta de las métricas de rendimiento en las que hay que centrarse depende de las aplicaciones ejecutadas en la red inalámbrica. A continuación, describiremos un método para estimar el impacto en el rendimiento y la latencia, usando nuestra estimación de la tasa de error de paquetes.

El *throughput* es el número promedio de bits por segundo transportados a través del enlace en la red inalámbrica afectada. Dado que depende de los detalles de la red, el rendimiento con la interferencia presente es el rendimiento original multiplicado por la probabilidad de que cada paquete funcione correctamente. Por tanto, el rendimiento está dado según lo siguiente:

$$TP = (1 - PER) TP_0 \quad [7.1]$$

La latencia es el tiempo promedio que un mensaje tarda en transferirse desde una estación en la red inalámbrica afectada hacia otro nodo. Igual que ocurre en el caso del *throughput*, el valor exacto de la latencia depende de los detalles de la red. Así también, definamos la latencia sin ninguna interferencia como  $\tau_0$ . Entonces, la latencia con interferencia es la latencia sin interferencia dividida por la probabilidad de que un paquete se reciba correctamente. De ahí que la latencia con interferencia esté dada así:

$$\tau = \frac{\tau_0}{(1 - PER)} \quad [7.2]$$

Existe un modelo de pérdida por trayectoria de espacio libre, que se utiliza para estimar la relación promedio de señal a interferencia en la red inalámbrica afectada.

Dada la potencia de transmisión, tanto de la señal como del interferido, se puede usar ese modelo para calcular dicha relación. Es posible adoptar un enfoque similar con otros parámetros de rendimiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos que muestran el impacto de la interferencia en la tasa de error de paquetes, el rendimiento y la latencia suelen ser suficientes. De acuerdo con IEEE, esta SER (tasa de error de símbolo) se utilizará con frecuencia, y también es llamada P. Es una función del SIR, pero a menudo suprimimos el argumento de para simplificar la notación. Si se utiliza FEC (corrección de errores hacia adelante) binario, puede ser más práctico calcular BER (tasa de error de bits) después de FEC. Entonces, definimos BER después de FEC (Shellhammer, 2000):

$$b = Pb(Y) = BER = P(BE) \quad [7.3]$$

La relación entre BER y PER (relación de error de paquete) es válida para un sistema de comunicación ideal, que transmite datos mediante un canal simétrico binario con ruido no correlacionado. Esta relación no es válida para canales de ruido correlacionados y depende de la implementación específica del receptor. La longitud del paquete en bits es  $n$  y la probabilidad de error de bit para el canal es  $BP$ . Cualquier paquete que tenga un bit o más de error se descarta. La probabilidad  $Pn$  de obtener un paquete de error viene dada así (Nagamitsu et al., 2014):

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad [7.4]$$

PER es la tasa de errores de paquetes de  $n$  byte, en el caso de los paquetes, y BER es la tasa de errores de bits de un paquete. Un sistema de comunicaciones real se considera equivalente al sistema ideal si tienen el mismo PER. La equivalencia significa que el sistema real tiene el mismo rendimiento de paquetes que el sistema ideal de referencia, cuya BER conocida es  $1 \times 10^{-6}$ .

PER está determinada exclusivamente por BER y el número de bits en la carga útil de datos del paquete. No depende de la forma en que se codifican los datos ni de lo que sucede durante el proceso de transmisión-recepción. Por lo tanto, la relación entre PER y BER se establece de este modo:

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad [7.5]$$

## 7.2.2 Pruebas

Las pruebas que aquí se dan han sido elegidas para ilustrar el proceso. No son estándares específicos, sino ejemplos simples que pueden usarse para explicar cómo funciona la metodología. Se hizo la primera prueba en un sistema de codificación de cambio de fase binario (BPSK). La segunda prueba es una extensión del primer ejemplo, donde la modulación es la codificación de desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK), y el número de bits en el paquete sigue siendo el mismo. Esto demuestra el efecto de usar modulaciones de orden superior, con una relación de señal a interferencia externa en diferentes frecuencias. Ahora podemos expresar la importante relación ES/NO en términos de la potencia de la señal y la potencia de ruido, después del receptor (Shellhammer, 2005):

$$\frac{E_S}{N_0} = \frac{P_S T}{P_N T} = \frac{P_S}{P_N} \quad [7.6]$$

Este proyecto consta de una red inalámbrica con tres estaciones, con la variable de distancia entre estaciones. Las redes inalámbricas tienen un transmisor y un receptor, y la conexión inalámbrica es el medio ambiente. Cada trama de información emitida contiene 43 bytes o 344 bits. Esta sección condensa las fases de la estimación del PER:

1. Seleccionar un modelo geométrico. Consiste en seleccionar el número de estaciones, tanto en la red inalámbrica afectada como en la red inalámbrica interferente. También implica seleccionar las ubicaciones de todas las estaciones. En este proyecto se seleccionaron tres estaciones por red, interferencia aleatoria del entorno y distancia variable en abierto.
2. Seleccionar un modelo de pérdida de trayectoria de espacio libre. Hay un modelo de pérdida de trayectoria de espacio libre que ya se ha considerado en el desarrollo de la norma propuesta:

$$LOS = 32.4dB + 20 \log D + 20 \log F \quad [7.7]$$

*d*: Distancia (Km)

*F*: Frecuencia (Mhz)

3. Proponer la tasa de error de bits y la fórmula de error de paquete. En este caso, se asume que se tiene una interferencia de canal con el mismo ancho de banda (o menor) que el de la señal. Por lo tanto, podemos establecer que SIR sea igual a SNR en la fórmula para la tasa de error de símbolo de BPSK y GMSK. Las

fórmulas BER —obtenidas de cualquier libro de comunicación digital— para ambas modulaciones son las que siguen:

$$\text{QPSK } P(e) = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erf}(z) \quad [7.8]$$

$$\operatorname{erf} = \text{error function} \quad [7.9]$$

$$z = \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{M}\right)\left(\sqrt{\log_2 M}\right)\left(\sqrt{\frac{Eb}{N_o}}\right) \quad [7.10]$$

$$\text{GMSK } P(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\lambda Eb}{N_o}} \quad [7.11]$$

$$B_{3dB} Tb = 0,25 \text{ then } \lambda = 0,25 \quad [7.12]$$

4. Calcular y trazar PER y otras métricas de rendimiento. Utilizando el modelo geométrico, se varía el parámetro de distancia especificando la distancia que existe entre las estaciones en la red inalámbrica afectada y la red inalámbrica interferente. Esta distancia es llamada  $d$ .

Para cada valor de  $d$ , considérese lo siguiente:

- a. Calcular SIR en la estación ubicada en el origen.
- b. Usando SIR, calcular SER.
- c. Usando la fórmula PER, calcular PER.
- d. Usando el valor PER, calcular otras métricas, como el rendimiento y la latencia.

Repitiendo los pasos anteriores para el rango de valores y PER, puede verse el rendimiento y la latencia en función de la distancia  $d$ .

### 7.2.3 Resultados estadísticos

Se muestra una descripción y una comparación general del *throughput*, la latencia y la tasa de error de bit, según los datos medidos y los cálculos propuestos en este documento. Esta información proporciona una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, su interpretación y las conclusiones.

#### 7.2.4 Modelo experimental

Para la recopilación y el análisis de datos se realizó la puesta en marcha de las estaciones meteorológicas en las instalaciones de la Universidad Agraria de Colombia. Se ejecutaron pruebas de campo para la validación del funcionamiento de los sistemas, tanto mecánicos como electrónicos. En el ambiente real, se evidenció que, luego de haber estado almacenado, el sistema requiere un tiempo de estabilización, para que los sensores y sistemas de comunicación se adapten al ambiente y entreguen datos muy confiables. En 15 minutos, aproximadamente, el sistema empezó a transmitir los mismos valores de las variables que el termohigrómetro de referencia, con el que se compararon los datos.

Se llevaron a cabo las pruebas de transmisión para verificar el alcance del sistema. El fabricante expresa que estos módulos tienen gran alcance, siempre y cuando haya línea de vista entre receptor y emisor, y la ganancia en dBi de la antena.

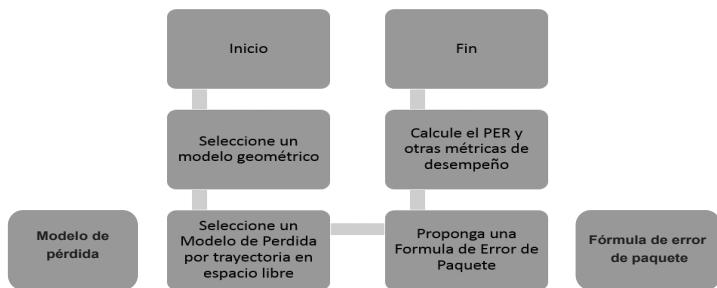
Para determinar la calidad de un sistema de transmisión digital, se debe medir su relación de error de bits (BER). Este se calcula comparando la secuencia de bits transmitida con los bits recibidos, y contando el número de errores. La relación de cuántos bits recibidos por error sobre el número total de bits recibidos es la BER, la cual se ve afectada por muchos factores que incluyen señal a ruido, distorsión y temblor.

El método para medir la BER consiste en transmitir bits a través del sistema y así estimar la BER. El número de bits para lograrlo solo dependerá del nivel de aseguramiento requerido y del umbral de BER. El nivel de garantía es la fracción de las pruebas de que la tasa de error de bit verdadera es menor que la BER especificada. Para determinar la longitud deseada de una prueba de muestreo binomial, es necesario hacer una estimación preliminar de la BER real. Por ejemplo, si se presume que BER es de aproximadamente  $10^{-6}$ , el número de muestras requeridas se estima como la relación de error de número por BER (Pawula, 1981).

### 7.3 Proceso

Esta sección se refiere a una metodología para estimar la tasa de error de paquetes (PER) en una red inalámbrica. Es necesario un modelo analítico para hacer alguna comparación con un modelo real más detallado. Es posible mezclar este modelo con otros; por ejemplo, si hay una expresión analítica para la relación de error de bits (BER), se puede usar un modelo para encontrar la tasa de error de símbolo (SER). A su vez, los resultados se usan, junto con otras partes de este modelo, para estimar la tasa de errores de bits (BER) y, en última instancia, para calcular el rendimiento y la latencia.

De acuerdo con la síntesis, en la figura 72 se resumen los pasos utilizados para estimar la tasa de error de bits (BER) y otras métricas de rendimiento, debido a la interferencia.

**Figura 72.** Proceso propuesto para estimar el BER**Fuente:** elaboración propia.

Según el procedimiento expuesto, el punto máximo obtenido fue a 654 m. Los resultados de Delay se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13.** Recopilación de datos

|                                            | 102 Metros | 415 Metros                                  | 550 Metros | 654 Metros |
|--------------------------------------------|------------|---------------------------------------------|------------|------------|
| 68.0;61.1;74662.75;0.7;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.0;68.4;74662.25;0.0;125;0.07;0.07;3.18   | 4 seg      |            |
| 68.1;61.2;74663.50;0.7;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.3;68.7;74664.00;0.7;125;0.07;0.07;3.11   | 4 seg      |            |
| 68.0;61.2;74663.75;0.0;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.2;68.7;74667.00;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 5 seg      |            |
| 68.0;61.2;74665.75;0.0;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.0;69.1;74678.75;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 6 seg      |            |
| 68.0;61.2;74664.75;0.0;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.3;69.1;74679.25;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 7 seg      |            |
| 68.0;61.4;74665.00;0.0;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.1;69.1;74679.50;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 5 seg      |            |
| 68.0;61.5;74665.50;0.0;98;0.07;0.07;3.12   | 2 seg      | 64.3;69.1;74679.50;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 4 seg      |            |
| 67.9;61.5;74661.00;0.0;7;113;0.            | 2 seg      | 64.5;69.1;74678.50;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 5 seg      |            |
| 64.5;68.3;74676.00;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 4 seg      | 64.0;68.4;74681.25;0.0;125;0.07;0.07;3.18   | 3 seg      |            |
| 64.5;68.3;74676.75;0.7;98;0.0              | 2 seg      | 64.3;68.7;74681.50;0.0;125;0.07;0.07;3.18   | 3 seg      |            |
| 64.5;68.3;74672.75;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 2 seg      | 64.2;68.7;74687.00;0.0;125;0.07;0.07;3.18   | 3 seg      |            |
| 64.6;68.7;74673.25;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 2 seg      | 64.0;69.1;74689.50;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 6 seg      |            |
| 64.7;68.7;74676.00;0.0;7;98;0.07;0.07;3.10 | 3 seg      | 64.3;69.1;74689.75;0.0;125;0.07;0.07;3.11   | 7 seg      |            |
| 64.9;68.4;74681.75;1.4;98;0.07;0.07;3.10   | 3 seg      | 64.2;69.1;74691.00;0.0;125;0.07;0.07;3.10   | 10 seg     |            |
| 64.6;68.2;74676.25;0.7;188;0.07;0.07;3.10  | 5 seg      | 64.8;69.1;74691.25;0.0;125;0.07;0.07;3.10   | 4 seg      |            |
| 64.4;68.2;74676.00;0.0;0;0.07;0.07;3.10    | 2 seg      | 64.9;70.3;74693.00;0.0;125;0.07;0.07;3.10   | 7 seg      |            |
| 64.5;68.3;74679.00;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 2 seg      | 64.3;69.1;74699.25;0.0;125;0.07;0.07;3.18   | 11 seg     |            |
| 64.5;68.3;74676.75;0.0;98;0.0              | 3 seg      | 64.2;68.7;74711.50;0.0;125;0.07;0.07;3.09   | 10 seg     |            |
| 64.5;68.3;74679.25;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 4 seg      | 64.0;69.1;74708.25;0.0;0;125;0.07;0.07;3.09 | 15 seg     |            |
| 64.6;68.4;74680.00;0.0;98;0.07;0.07;3.10   | 5 seg      | 64.0;69.1;74709.25;0.0;45;0.07;0.07;3.09    | 14 seg     |            |
| 64.7;68.4;74680.00;0.0;7;98;0.07;0.07;3.10 | 5 seg      | 64.0;69.1;74708.75;0.0;45;0.07;0.07;3.09    | 20 seg     |            |
| 64.9;68.4;74681.75;1.4;98;0.07;0.07;3.10   | 3 seg      | 64.1;69.1;74708.50;0.0;45;0.07;0.07;3.09    | 27 seg     |            |
| 64.6;68.2;74676.25;0.7;188;0.07;0.07;3.10  | 2 seg      | 64.1;69.1;74707.25;0.0;0;0.07;0.07;3.09     | -----      |            |
| 64.4;68.2;74676.00;0.0;0;0.07;0.07;3.10    | 2 seg      | 64.0;69.1;74707.25;0.0;7;338;0.07;0.07;3.09 | -----      |            |

**Fuente:** elaboración propia.

Como se observa en los datos, la eficiencia de los módulos en la ciudad no logra una distancia tan amplia. Aunque se recibe la señal en un tiempo moderado, el envío de cada trama se realiza cada dos segundos. Al alejarse cada vez más, se puede evidenciar el retraso de la señal al incrementarse los segundos; o la pérdida total de las tramas a 654 m de distancia. Cabe mencionar que, en el sector agrario, donde se experimenta bastante interferencia, el alcance puede ser mucho mayor, probablemente de más de 4 km. Otro aspecto importante es la ganancia de la antena y las posibles soluciones que se podrían añadir para mejorar las cifras. Es así que la investigación proporciona un punto de partida sobre las soluciones que se pueden dar para los diferentes sistemas que requieren una comunicación inalámbrica en un entorno urbano.

Continuando con el proceso, se determina el porcentaje de las tramas perdidas cada cierta cantidad de distancia. El objetivo es dar a conocer la posición adecuada

para el emisor y el receptor que, en este caso, se ubican en la Universidad Agraria de Colombia. Puesto que es una zona urbana —como dice la hoja de datos del Xbee 900 Mhz—, su máximo alcance es de 600 m, aproximadamente. Es importante señalar que, en la agricultura, este tipo de estaciones meteorológicas de bajo costo otorga un mayor provecho debido a la poca o nula interferencia, logrando así una comunicación más confiable a más distancia.

La trama de datos con un tamaño de 40 a 48 bytes se envía a una velocidad de transferencia de 10 a 200 Kb por segundo. Como se advierte en la hoja de datos, la variable de tiempo es de dos segundos, la cual es posible configurar, pues a mayor distancia los datos tardan más en llegar al receptor. Por razones obvias, algunas tramas se perderían o llegarían incompletas si se dejase un tiempo demasiado reducido. Por cada 100 m, se tomaron 100 muestras de alrededor de 3 minutos de comunicación. Las medidas se hicieron de tal forma que los obstáculos que pudiesen perturbar la radiofrecuencia fueran mínimos. En la tabla 14 se presenta una muestra estadística de los datos recolectados.

**Tabla 14.** Muestra estadística de las pruebas de transmisión realizadas

| Distancia (m) | Muestras enviadas | Muestras recibidas completas | Muestras perdidas o incompletas (%) |
|---------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 100           | 100               | 100                          | 0                                   |
| 200           | 100               | 97                           | 3                                   |
| 300           | 100               | 95                           | 5                                   |
| 400           | 100               | 92                           | 8                                   |
| 500           | 100               | 91                           | 9                                   |
| 600           | 100               | 74                           | 26                                  |

**Fuente:** elaboración propia.

## 7.4 Análisis de resultados

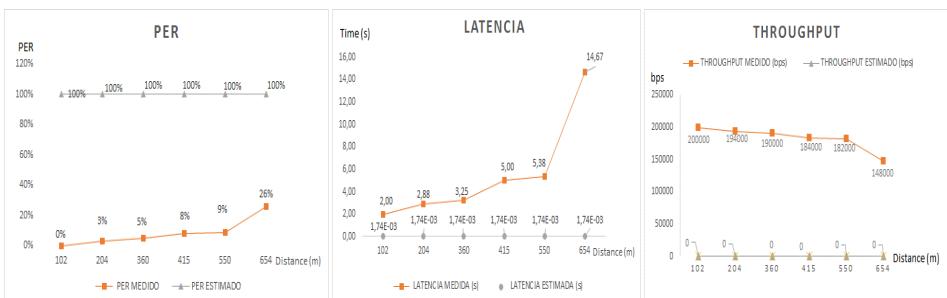
Para abordar los resultados de la investigación y la experimentación realizadas, se exponen y analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y de la puesta en marcha final del prototipo. Además de obtener las mediciones de las variables meteorológicas, las pruebas desarrolladas pretendían poner a prueba cada uno de los elementos integrados en la estación de meteorología, principalmente los dispositivos de transmisión inalámbrica y el sistema de alimentación. En primera instancia, se comprobó el rango de alcance de transmisión con el que cuentan los dispositivos Xbee serie 3B de 900 MHz. En la tabla 15 se sintetizan los resultados de los procesos de medición realizados experimentalmente y la comparación con los modelos matemáticos propuestos en la metodología de medición.

**Tabla 15.** Descripción de los factores de desempeño medidos y calculados

| Distancia<br>(m) | Latencia<br>medida<br>(s) | PER<br>medido | Through-<br>put<br>medido<br>(bps) | PER<br>estimado | Factores de desempeño |                  |                  |            |              |                             | Through-<br>put<br>Estimado<br>(bps) |  |
|------------------|---------------------------|---------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------|------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
|                  |                           |               |                                    |                 | BER<br>estimado       | PER<br>calculado | BER<br>calculado | Eb/no (db) | RSSI (dB)    | Latencia<br>estimada<br>(s) |                                      |  |
|                  |                           |               |                                    |                 |                       |                  |                  |            |              |                             |                                      |  |
| 102              | 2,00                      | 0%            | 200000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 78,6192664 | -84,66715358 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |
| 204              | 2,88                      | 3%            | 194000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 72,5986665 | -90,68775349 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |
| 360              | 3,25                      | 5%            | 190000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 67,6652198 | -95,62120016 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |
| 415              | 5,00                      | 8%            | 184000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 66,4303079 | -96,85611208 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |
| 550              | 5,38                      | 9%            | 182000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 63,984016  | -99,30240394 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |
| 654              | 14,67                     | 26%           | 148000                             | 100%            | 1                     | 0                | 0                | 62,4797149 | -100,8067051 | 1,74E-03                    | 0                                    |  |

Fuente: elaboración propia.

La representación de los datos que se observa en la figura 73 muestra la relación matemática o correlación estadística que guardan entre sí los datos medidos y los datos calculados. De este modo se expone la descripción y la comparación general del rendimiento, la latencia y la BER según tales datos. Esta información, como ya se ha señalado, proporciona una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, su interpretación y las conclusiones experimentales.

**Figura 73.** Comparación entre datos medidos experimentalmente y datos estimados matemáticamente

Fuente: elaboración propia.

Otro de los elementos que pudo ser puesto a prueba fue el sistema de alimentación de los circuitos de la estación. Se logró constatar que el panel solar trabaja bastante bien. No obstante, para aumentar la velocidad de carga de la batería y garantizar la autonomía de la estación en proyectos de mayor alcance, se requiere la instalación de otro panel solar conectado en paralelo o la implementación de un sistema móvil para el panel solar —según se ha descrito anteriormente—, que le permita aumentar su eficiencia.

Verificando la hoja de datos de los módulos XBee, se observa que en la zona urbana alcanza los 2000 ft o 610 m, y al aire libre entre 4.5 y 14 km, lo cual representa una diferencia bastante alta.

Se realizó una serie de toma de datos del consumo de corriente de la estación. Así se determinó un consumo máximo de 140 mA durante la transmisión de datos cada dos segundos, según se establece en la programación. Este intervalo puede ser modificado para que la transmisión ocurra en un tiempo más prolongado, y de este modo disminuya el consumo. Cuando no se está transmitiendo, el consumo ronda los 70 a 80 mA. A partir de estas mediciones, se obtuvo un promedio: el consumo por hora debe estar alrededor de 80 a 105 mA, lo que da una duración máxima ideal, con la batería funcionando continuamente por un poco más de un día. Con la llegada de los rayos del sol al panel solar, la batería debe cargar para que siga funcionando con normalidad. Existe la ventaja de que, mientras se realiza la carga, es posible alimentar la estación meteorológica con 280 mA que produce el panel solar. El uso de más paneles solares en conexión paralela asegura la carga completa de la batería al proveer por lo menos 600 mA. En una situación ideal, la duración de la batería de 6600 mAh se calcula según la siguiente fórmula:

$$6600 \text{ mAh}(\text{capacidad batería}) / 80 \text{ mA} (\text{corriente demandada}) = 82.5 \text{ h}$$

Estas 82.5 horas equivalen a tres días y medio de funcionamiento sin ninguna recarga. La energía solar bastaría para mantener la carga durante el día y el uso de la batería cubriría el requerimiento de energía en la noche. Sin embargo, la tasa de descarga de algunas baterías suele ser mayor que otras, esto alude a la rapidez con la que una batería se descarga de manera segura. Por otro lado, hay que considerar que la temperatura ambiente también afecta y el rendimiento baja después de cierto voltaje. Esta batería fue elegida no solo por la capacidad de corriente, sino por el circuito de protección con el que cuenta. Este asegura que la tensión de la batería no suba demasiado y si el voltaje se encuentra demasiado bajo, desconecte completamente a 3 V.

## 7.5 Prototipos de estaciones

Se necesitaron prototipos durante el desarrollo del proyecto para probar y validar los resultados. Las estaciones meteorológicas propuestas lograron ser construidas con diferentes piezas impresas en 3D o moldeadas por inyección. Además de los prototipos, también se implementó el sistema de prueba necesario.

A partir de las especificaciones electrónicas, mecánicas y la aplicación de las estaciones, se realizó la elección de materiales, componentes, tolerancias y condiciones de calibración que incluyen normativa. Los conceptos resultantes fueron desarrollados

en 3D con CAD y se utilizaron para construir el producto. En las figuras 74 a 76 se muestran los productos obtenidos. Estos se sometieron a pruebas estándar y pruebas de dispositivos específicos.

**Figura 74.** Estación LoRaWAN



Fuente: autores.

**Figura 75.** Estación XBEE A 900 MHZ



Fuente: autores.

**Figura 76.** Estación XBEE A 2400 MHZ



Fuente: autores.

Este prototipo es un ejemplo que sirve de base y brinda la oportunidad de investigar nuevas alternativas de elaboración de estaciones meteorológicas. Así también permite probar el diseño existente, para confirmar la funcionalidad del sistema implementado.



# Conclusiones

---

La investigación se resolvió principalmente mediante estudios de literatura científica y resultó muy importante para proporcionar una explicación de los objetivos planteados. Durante el desarrollo del proyecto también se elaboró un prototipo de *hardware* y de *software* que permitió comprobar el trabajo gracias al planteamiento de un objetivo claro de principio a fin.

La investigación fue concreta en el tiempo, pues se resumió su enfoque y se propuso un proyecto en el que se elaboró un sistema con un procedimiento y parámetros conocidos. Adicionalmente, las pruebas realizadas con el sistema y el prototipo producido permitieron realizar ajustes para lograr un funcionamiento óptimo.

En este documento se muestra que el impacto de los factores de transmisión, como la tasa de error de paquetes, el rendimiento y la latencia han sido ajustados, y se otorgó una consideración especial a las condiciones de los entornos. Con estas pruebas, se sabe exactamente la distancia a la que deben ubicarse las estaciones para que el error de transmisión sea del 0%, y se conozca el rendimiento. Este representa una de las métricas más importantes, pues indica la cantidad de paquetes que podrían alcanzar el nivel de QoS especificado. En este caso, se obtuvo un 70% de esperanza a través del rendimiento. El retraso promedio en la entrega de datos (latencia) es mayor que en el modelo matemático, y el retraso de extremo a extremo experimentado por los paquetes recibidos con éxito fue alto.

Los objetivos establecidos se orientaron a presentar el concepto de WSN e IoT, identificar los desafíos que deben abordarse para garantizar el funcionamiento, y proponer y construir una solución. Al respecto, se desarrollan los siguientes puntos:

- El primer objetivo resultó en una conceptualización que incluye el análisis de la tecnología de nodos sensores y la discusión sobre algunas tendencias de tecnología actuales. Este estudio fue de gran ayuda durante el trabajo de identificación de los desafíos del proyecto.

- El segundo objetivo se enfocó en el procedimiento y el conjunto de reglas para la transmisión de las variables censadas. Se consideraron los problemas y la optimización de la transmisión, para lograr una implementación extensiva y rentable de la WSN. Estos aspectos se resolvieron utilizando dispositivos de comunicaciones e infraestructuras inalámbricas de diversos fabricantes, en lugar de desarrollar un módulo totalmente nuevo.
- El tercer objetivo abordó la metodología de almacenamiento de los datos transmitidos en la nube, como servicio y a través de internet. Se comprobó que el uso de Cloud Hosting permite cumplir con los requisitos establecidos para el procesamiento de la información de una WSN.
- El cuarto objetivo se dirigió a la propuesta de una solución IoT con sistemas integrados y abiertos. Una parte de la funcionalidad se implementó con *hardware*; otra de igual importancia con *software*. Se logró obtener un prototipo en el que la flexibilidad o la reconfiguración son características fundamentales. Asimismo, se proporciona una valiosa información sobre los diseños realizados.
- El objetivo de la última etapa se logró según lo planeado y los resultados fueron un material importante para el proceso de escritura de este libro. El análisis de los datos cuantitativos resultó una parte esencial del proyecto, se logró concebir los datos y establecer un formato claro y legible para llegar a una conclusión a partir de la experimentación.

## Recomendaciones

Existen investigaciones en diferentes áreas relacionadas con IoT. Los investigadores han propuesto varios tipos de adaptaciones a los protocolos y métodos de transmisión, lo que hace laboriosa la identificación de la mejor solución. Por lo tanto, existe una gran necesidad de reglas estructuradas, en forma de estandarización, para interconectar dispositivos, protocolos, aplicaciones, etc. El desarrollo de estándares o soluciones debe incluir protocolos y métodos de código abierto para lograr aceptación y uso amplios. Con la explicación respecto a cómo se debe desarrollar un estándar de este tipo y qué requisitos se necesitan, se espera haber contribuido al establecimiento de una base para los estudios del área.

El monitoreo del hábitat y del medioambiente supone una clase de aplicaciones de redes de sensores con enormes beneficios, que permite la recopilación de datos a largo plazo, en escalas y resoluciones difíciles de obtener por otra vía. La conexión directa con el entorno físico hace posible que cada sensor proporcione medidas e información detallada. Esta sería una tarea muy complicada si se emplea la instrumentación tradicional. La integración del procesamiento y almacenamiento local

permite a los nodos sensores realizar funciones de filtrado y activación, y aplicar algoritmos de compresión de datos específicos del sensor.

## Dificultades

A continuación se describen algunos consejos que hacen posible identificar las dificultades que deben considerarse en la implementación de un sistema.

- *Sensórica.* El *hardware* se debe mantener actualizado y, por tanto, es importante calibrar los sensores regularmente, tal como se hace con cualquier otro tipo de sensor eléctrico. Los sensores están integrados en dispositivos diferentes y es difícil sincronizar el flujo de datos en el *hardware*.
- *Conectividad.* En su forma actual, nuestro sistema es un modelo centralizado de cliente-servidor, para proporcionar conectividad a las diversas estaciones meteorológicas, a la estación de trabajo y a la nube. Actualmente, es eficiente, puesto que tiene pocas estaciones, pero ¿qué sucedería si cientos o miles de dispositivos utilizan la red simultáneamente? Probablemente, si se instalan demasiados dispositivos, se experimentarían cuellos de botella significativos en la conectividad, la eficiencia y el rendimiento general.
- *Contaminación electromagnética.* Se requiere dar cumplimiento a los estándares y las regulaciones de telecomunicaciones en cuanto a interferencia electromagnética. Debido a la considerable cantidad de dispositivos externos que emiten señales electromagnéticas, se presenta una importante cantidad de ruido de fuentes externas y, por tanto, el desempeño de los dispositivos disminuye.
- *Vulnerabilidades en la nube.* Es probable que los proveedores de la nube representen el objetivo de cibercriminales. Por eso, depender de los prestadores y desarrolladores de servicios en la nube puede convertirse en una debilidad, pues una gran cantidad de los datos que ejecutan —y, en este caso, los datos de nuestro proyecto— se almacenan en la nube.
- *Optimización del consumo de energía.* El uso continuo y la necesidad de una larga vida útil del prototipo demandan una forma eficiente del consumo de energía. Adicionalmente, la implementación con dispositivos de *hardware* de bajo costo exigió muchas horas de trabajo en la elaboración de algoritmos que permitieran el funcionamiento óptimo del sistema.

## Trabajos futuros

Como trabajo futuro, es posible orientar el análisis de datos con base en estudios realizados por Mohammad Saeid Mahdavinejad (2019), que propone un aprendizaje

automático a partir de soluciones basadas en IoT. Otro aspecto a desarrollar es el propuesto por Gabriel Martins Dias (2016), con respecto a la optimización de la transmisión de datos en redes inalámbricas. Con este prototipo podemos transmitir cualquiera de las señales antes de analizar y validar la confirmación de la capa de enlace; el modelo de disipación de energía; los resultados de nuestro análisis, a través de evaluaciones experimentales; y la extensión del formato de trama propuesta, que utiliza diferentes modelos de capa física.

Aunque hay mucho trabajo por hacer, esta propuesta puede ser utilizada en futuros desarrollos sobre IoT. En este libro aportamos una muestra de posibles aplicaciones WSN e IoT, y es factible pensar en docenas de aplicaciones potenciales, que parecen ser ilimitadas. Cuando se requiera medir, instrumentar, observar y responder a eventos y fenómenos en un entorno específico, es posible usar WSN. El medioambiente, un sistema hídrico o cualquier sistema imaginable puede ser estudiado mediante esta tecnología.

# Referencias bibliográficas

---

- Aakvaag, N. y Frey, J. E. (2006). Redes de sensores inalámbricos. Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. *Revista ABB*, 2(2006), 39-42.
- Abhayawardhana, V. S., Wassell, I. J., Crosby, D., Sellars, M. P. y Brown, M. G. (2005). Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. En *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference* (vol. 1, pp. 73-77).
- Afric, W., Zovko-Cihlar, B. y Grgic, S. (2007). Methodology of path loss calculation using measurement results. En *14<sup>th</sup> International Workshop on Systems, Signals and Image Processing and 6<sup>th</sup> EURASIP Conference focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services* (pp. 257-260). IEEE.
- Aguayo, F. R. (2018). Estado del arte de robótica en la agricultura. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 2018, 1-9.
- Akkaya, K. y Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for *wireless sensor networks*. *Ad Hoc Networks*, 3, 325-349.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. y Cayirci, E. (2002). *Wireless sensor networks: A survey*. *Computer Networks*, 38(4), 393-422.
- Akyildiz, I. y Can Vuran, M. (2010). *Wireless Sensor Network*. Singapur: John Wiley & Sons.
- Alamdar, F. K. (2016). Towards multi-agency sensor information integration for disaster management. *Computers, Environment and Urban Systems*, 56, 68-85.
- Angular (2019). Material design components for Angular. <https://material.angular.io/guides>
- Archila, D. y Santamaría, A. (2013). State of the art of *Wireless Sensor Networks*. *Revista Digital TIA*, 2(1).
- Archundia, P. (2019). El estándar IEEE 802.15.4. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_atales/documentos/1em/archundia\\_p\\_fm/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_atales/documentos/1em/archundia_p_fm/capitulo4.pdf)

- Asocaña (2012). *Protocolos elaborados para medir el impacto de las intervenciones del fondo agua por la vida y la sostenibilidad*. Cali: Autor.
- Azam, M. K. (2017). Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 11-26.
- Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G. y Vetterli, M. (2008). SensorScope: Out-of-the-box environmental monitoring. *ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*.
- Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G., Vetterli, M., Couach, O., y Parlange, M. (2008). Sensorscope: Out-of-the-box environmental monitoring. En *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (pp. 332-343). IEEE.
- Bermúdez, A., Casado, R., García, E. M., Gómez, A., Quiles, F. J. y Ruiz-Gallardo, J. R. (2007). Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales. En *4.ª Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales* (pp. 13-17). <http://www.eufirelab.org/toolbox2/library/upload/2244.pdf>
- Breed, G. (2003). Bit error rate: Fundamental concepts and measurement issues. *High Frequency Electronics*, 2003, 46-48.
- Caicedo Ortiz, J. G., Acosta Coll, M. A. y Cama-Pinto, A. (2015). WSN deployment model for measuring climate variables that cause strong precipitation. *Prospectiva*, 13(1), 106-115.
- Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., y Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 581-599.
- Campos, A., Holm-Nielsen, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F. y Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá: Banco Mundial.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A. y Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67.
- Chamberlin, K. A. y Luebbers, R. J. (1982). An evaluation of Longley-Rice and GTD propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(1), 1093-1098.

- Chia-Pang, C., Cheng-Long, C. y Joe-Air, J. (2013). Ecological monitoring using wireless sensor networks-Overview, challenges, and opportunities. *Advancement in Sensing Technology, 1*, 1-21.
- Chiasserini, C. F. y Gareto, M. G. (2004). Modeling the performance of wireless sensor. *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer*.
- Chu, H. C., Siao, W. T., Wu, W. T. y Huang, S. C. (2011). Design and implementation an energy-aware routing mechanism for solar wireless sensor networks. En *IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications* (pp. 881-886). IEEE.
- D'Hondt, M. S. (2013). Crowdsourcing of Pollution Data using Smartphones. *Geophysical, 48*(5), 1-4.
- Daniel Scott, S. B. (2010). Adapting to climate change and climate policy: Progress, problems and potentials. *Journal of Sustainable Tourism, 18*(3), 283-295.
- Del Brío, B. M. (1999). *Sistemas electrónicos basados en microprocesadores y microcontroladores*. Zaragoza: Universitarias de Zaragoza.
- Djenouri, D. y Balasingham, I. (2010). Traffic-differentiation-based modular QoS localized routing for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing, 10*(6), 797-809.
- Durisic, M. P., Tafa, Z., Dimic, G. y Milutinovic, V. (2012). A survey of military applications of wireless sensor networks. *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* (pp. 196-199). Bar: IEEE.
- Eisa, I., El-Bakry, H. M., Abd Elrazik, S. M., Hasan, I. Q., Hasan, A. Q. y Zaid, S. (2016). Challenges in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Research in Computer Science & Technology, 4*(4), 22-27.
- Eisa, I., El-Bakry, H. M., Abd Elrazik, S. M., Hasan, I. Q., Hasan, A. Q., y Zaid, S. (2016). Challenges in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Research in Computer Science & Technology, 4*(4), 22-27.
- Evans, D. (2011). *Internet of Things. La próxima evolución de Internet lo está cambiando todo*. Grupo de Soluciones Empresariales para Internet (IBSG) de Cisco.
- Eyceoz, T., Duel-Hallen, A., y Hallen, H. (1998). Deterministic channel modeling and long range prediction of fast fading mobile radio channels. *IEEE Communications Letters, 2*(9), 254-256.
- Fernández, C. (2012). RHEA: un proyecto europeo para el desarrollo de robots aplicados a la protección vegetal. *PHYTOMA, 244*, 30-35.

- Fernández, R., Ordieres, J. y Martínez, F. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. Longroño: Universidad de La Rioja.
- Fohringer, J., Dransch, D., Kreibich, H. y Schröter, K. (2015). Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 2725-2738.
- Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (FINAGRO) (2018, 9 de octubre). El momento del agro. <https://www.finagro.com.co/noticias/el-momento-del-agro>
- Freiberger, T., Sedigh, S. y Atekwana, E. (2007). Hydrological monitoring with hybrid sensor networks. *International Conference on Sensor Technologies and Applications* (pp. 484-489). Valencia: IEEE Explore.
- FutureWater (2019, 20 de abril). Teledetección satelital. <https://www.futurewater.es/metodos/teledeteccion/>
- Gage, D. W. (1995). A brief history of Unmanned Ground Vehicle (UGV) development efforts. *Unmanned Systems Magazine*, 13(3), 1-7.
- Gallardo, S. (2015). *Elementos de sistemas de telecomunicaciones*. Madrid: Paraninfo.
- Ghassemzadeh, S. S., Jana, R., Rice, C. W. y Turin, W. (2002). A statistical path loss model for in-home UWB channels. *2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies* (pp. 59-64). Baltimore: IEEE.
- Ghassemzadeh, S. S., Jana, R., Rice, C. W., Turin, W. y Tarokh, V. (2002). A statistical path loss model for in-home UWB channels. En *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies* (IEEE Cat. 02EX580; pp. 59-64). IEEE.
- Gildert, N. (2018). The need for combining implicit and explicit communication in cooperative robotic systems. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2018.00065/full>
- Granados, F. L. (2013). Uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la evaluación de producción agraria. *Ambienta*, 105, 40-52.
- Ha'c, A. (2003). *Wireless Sensor Network Designs*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Har, D., Watson, A. M., y Chadney, A. G. (1999). Comment on diffraction loss of rooftop-to-street in COST 231-Walfisch-Ikegami model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1451-1452.
- Harik, C. (2015). *UAV-UGV cooperation for objects transportation in an industrial area*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141993/document>

- He, T., Huang, C., Blum, B. M., Stankovic, J. A., y Abdelzaher, T. (2003). Range-free localization schemes for large scale sensor networks. En *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking* (pp. 81-95).
- Heinzelman, W. (2000). *Application specific protocol architectures*. Boston: MIT.
- Hemant Ghayvat, S. M. (2015). WSN- and IOT-Based Smart Homes and Their Extension to Smart Buildings. *Sensors*, 15(5), 10350-10379.
- Hightower, J., y Borriello, G. (2001). Location systems for ubiquitous computing. *Computer*, 34(8), 57-66.
- Hill, J., Horton, M., Kling, R. y Krishnamurthy, L. (2004). The platforms enabling wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 47(6), 41-46.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. y Wasle, E. (2008). *GPS. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Viena: Springer.
- Huaita, A. (2017). Análisis de la eficiencia de un sistema inalámbrico aplicado a la monitorización de una estación móvil mediante una estación base. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5050/ITMhubeaa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Inzunza, J. C. (2019). *Meteorología descriptiva*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Jenkins, J. D. (1982). Prototyping: The new paradigm for systems development. *Management Information Systems*, 6(3), 29-44.
- Jesús Martín Talavera, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142(Part A), 283-297.
- Johann, S., Moreira, M., HeckNey, L., Calazans N. y Hessel, F. (2016). A processor for IoT applications: An assessment of design space and trade-offs. *Microprocessors and Microsystems*, 42, 156-164.
- Jose Escribano Vega, M. A. (2016). *Implementación de una estación meteorológica con Arduino*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Kazem Sohraby, D. M. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, protocols, and applications*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Keane, J. F. y Carr, S. (2013). A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 32(3), 558-571.
- keiti Aki, P. R. (2002). *Quantitative Seismology*. Sausalito: University Science Books.

- Krishnamachari, B., Estrin, D. y Wicker, S. (2002). Modelling data-centric routing in *wireless sensor networks*. En *IEEE infocom* (vol. 2, pp. 39-44). Los Ángeles: University of Southern California.
- Krishnamachari, B., Estrin, D. y Wicker, S. (2002). Modelling data-centric routing in *wireless sensor networks*. En *IEEE infocom* (vol. 2, pp. 39-44). [https://www.researchgate.net/publication/215619101\\_Modeling\\_Data-Centric\\_Routing\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/215619101_Modeling_Data-Centric_Routing_in_Wireless_Sensor_Networks)
- Kureshi, I., Theodoropoulos, G., Mangina, E., O'Hare, G. y Roche, J. (2015). Towards an info-symbiotic decision support system for disaster risk management. En *IEEE/ACM 19th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7395918>
- Lazarescu, M. T. (2013). Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 3(1), 45-54.
- Mahdavinejad, M. S., Rezvan, M., Barekatain, M. y Adibi, P. (2017). Machine learning for *Internet of Things* data analysis: A survey. [https://www.researchgate.net/publication/320393191\\_Machine\\_learning\\_for\\_Internet\\_of\\_Things\\_data\\_analysis\\_A\\_survey](https://www.researchgate.net/publication/320393191_Machine_learning_for_Internet_of_Things_data_analysis_A_survey)
- Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., y Culler, D. (2002). WSNs for habitat monitoring [https://www.researchgate.net/publication/2545990\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_for\\_Habitat\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/2545990_Wireless_Sensor_Networks_for_Habitat_Monitoring)
- Maksimović, V. V. (2014). Raspberry Pi as a Wireless Sensor node: Performances and constraints. *37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (pp. 1013-1018)*. Opatija: IEEE.
- Martins Dias, G. (2016). Using data prediction techniques to reduce data transmissions in the IoT. *IEEE 3rd World Forum on Internet of Things* (pp. 331-335). Reston: IEEE Explore.
- Mejía, R. (marzo de 2016). ¿Se está promoviendo la inversión agrícola en Colombia? *Revista Nacional de Agricultura*, 969. <https://sac.org.co/se-esta-promoviendo-la-inversion-agricola-en-colombia/>
- MohdFauzi, O. y Khairunnisa, S. (2012). Wireless Sensor Network Applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, 41, 1204-1204. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302>
- Molisch, A., Balakrishnan, K., Cassioli, D., Chong, C. C., Emami, S., Fort, A., Karedal, J., Kunisch, J., Schantz, H., Schuster, U. y Siwiak, K. (2004). *IEEE 802.15.4a channel*

- model - Final report.* <http://www.ieee802.org/15/pub/04/15-04-0662-02-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>
- Morales, M. (2016, 23 de mayo). El 65.8% de la tierra apta para sembrar en Colombia no se aprovecha. <https://www.eleconomista.net/actualidad/El-65.8-de-la-tierra-aptas-para-sembrar-en-Colombia-no-se-aprovecha-20160524-0048.html>
- Nagamitsu, S., Aida, H., Okunishi, R., Motoya, Y. y Miki, M. (2014). Time synchronization protocol using lighting control for wireless sensor network. En *2014 International Conference on Wireless Networks (ICWN2014)* (pp. 10-16).
- Nechibvute, A., Chawanda, A., y Luhanga, P. (2012). Piezoelectric energy harvesting devices: An alternative energy source for wireless sensors. *Smart Materials Research, 2012*, 1-13.
- Nilsson, N. J. (1984). *shakey the robot*. Menlo Park: SRI International.
- Niu, J., Cheng, L., Gu, Y., Shu, L., y Das, S. K. (2013). R3E: Reliable reactive routing enhancement for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10*(1), 784-794.
- Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (2018). Agricultura de Precisión. [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU\\_18-015.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf)
- Olyazadeh, R., Aye, Z. C., Jaboyedoff, M. y Derron, M. H. (2016). Prototype of an open-source web-GIS platform for rapid disaster impact assessment. *Spatial Information Research, 24*(3), 203-210.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2017). *Concentración y extranjerización de tierras productivas en Colombia*. Bogota: FAO.
- Pawula, R. (1981). On the theory of error rates for narrow-band digital FM. *IEEE Transactions on Communications, 29*(11), 1634-1643.
- Peng, R. y Sichitiu, M.. (2006). Angle of arrival localization for wireless sensor networks. En *3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4068140>
- Pinto, A., Bonivento, A., Sangiovanni-Vincentelli, A. L., Passerone, R. y Sgroi, M. (2004). System level design paradigms: Platform-based design and communication synthesis. En *Proceedings of the 41st Annual Design Automation Conference* (pp. 537-563). <https://doi.org/10.1145/996566.1142982>
- Pinto, A., Bonivento, A., Sangiovanni-Vincentelli, A. L., Passerone, R. y Sgroi, M. (2004, June). System level design paradigms: Platform-based design and

- communication synthesis. En *Proceedings of the 41st annual Design Automation Conference* (pp. 537-563).
- Poellabauer, W. D. (2010). *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Ponticelli, R. (2011). *Sistema de exploración de terrenos con robots móviles: aplicación en tareas de detección y localización de minas antipersonas*. <https://eprints.ucm.es/12318/1/T32658.pdf>
- Portafolio (2017, 29 de julio). Colombia quiere convertirse en una potencia agroindustrial. <https://www.portafolio.co/economia/colombia-quiere-convertirse-en-una-potencia-agroindustrial-508227>
- PRAA Perú (2013). *Variabilidad climática: percepciones e impacto en los cultivos de papa y maíz amiláceo en la subcuenca del río Shullcas, Junin*. Lima: Ministerio de Ambiente.
- REST (2019). *Rest API Tutorial*. <https://restfulapi.net/>
- Saigua, S. F. y Villafuerte, M. V. (2014). *Evaluación de las topologías físicas de WSN mediante la implementación de un prototipo de medición de variables ambientales para el G.E.A.A. – ESPOCH* (tesis de pregrado). Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3241>
- Sandoval, D. (2015). *Estado del arte del IoT aplicado a la geotecnia* (tesis de pregrado). Bogotá: Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/4202/1/Estado-del-arte-del-IoT-aplicado-a-la-geotecnia.pdf>
- Savvides, A., Han, C. C. y Strivastava, M. B. (2001). Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. En *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (pp. 166-179).
- Schurges, C., Tsiatsis, V., Ganeriwa, S. y Srivastava, M. (2002). Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1(1), 70-80.
- Seah, W., Ang Eu, Z. y Pink Tan, H. (2009). *Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) – Survey and Challenges*. *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology* (pp. 1-5). Aalborg: IEEE Explore.
- Serrat, O. (2009). The SCAMPER Technique. *Knowledge Solutions*, 33, 311-314.
- Shad Roundy, P. K. (2002). Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. *2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition* (pp. 1-10). New Orleans: ASME.

- Shanmuganthan, S. (2008). Sensor data acquisition for climate change modelling. *WSEAS TRANSACTIONS on Circuits & Systems*, 942-952.
- Sharma, R. y Malhotra, S. (2015). Approximate point in triangulation (APIT) based localization algorithm in wireless sensor network. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2, 39-42.
- Shellhammer, S. (2000). Packet Error Rate of an IEEE 802.11 WLAN in the Presence of Bluetooth. *IEEE P802*, 15, 15-00.
- Singh, Y. (2012). Comparison of Okumura, Hata and COST-231 models on the basis fo path loss and signa strenght. *International Journal of Computer Applications*, 59(11), 37-41.
- SMC (2017). *FMS-200 Módulo de Formación 7: Sensores industriales*. SMC International Training.
- Stansfield, R. (1947). Statistical theory of DF fixing. *Journal of IEE*, 14, 762-770.
- Suárez, C., Gaona-García, P., Montenegro-Marín, C. y Parra, J. (2018). IOT quality of service based in link channel optimization in *Wireless Sensor Networks*. En *2018 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)* (pp. 172-177). IEEE.
- T. Hasegawa, H. H. (2011). Industrial wireless standardization - Scope and implementation of ISA SP100 standard. En *SICE Annual Conference 2011* (pp. 2059-2064). Tokyo: IEEE.
- Th. Arampatzis, J. L. (2005). A Survey of Applications of Wireless Sensors and *Wireless Sensor Networks*. En *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 719-724). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.192.6122&rep=rep1&type=pdf>
- Tomé, C. (2016). La velocidad de las ondas electromagnéticas y la naturaleza de la luz. <https://culturacientifica.com/2016/07/26/la-velocidad-las-ondas-electromagneticas-la-naturaleza-la-luz/>
- Torresan, S. C. (2016). DESYCO: A decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. *Ocean and Coastal Management*, 120, 49-63.
- Ubaldi, B. (2013). Open government data: Towards empirical analysis of open government data initiatives. *OECD*, 1-60.
- Universidad Distrital Franciso José de Caldas (2018, 31 de octubre). *Bosque de paz Aquitania - Antioquia - RITA*. <https://rita.udistrital.edu.co/bosqueaquitania/#/monitoreo>

- Universidad Nacional de Colombia (2015, 30 de diciembre). *Envejecimiento de habitantes rurales, otro freno al desarrollo del campo.* <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/envejecimiento-de-habitantes-rurales-otro-freno-al-desarrollo-del-campo.html>
- Valdez, L. (2014). A Study On The Wireless Sensor Networks. *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pp. 1-8).
- Vanegas, M. (2018, 25 de diciembre). Colombia tiene potencial para ser una despensa de alimentos en el mundo. *Semana.* <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/hay-campo-para-la-paz/articulo/colombia-como-despensa-de-alimentos-del-mundo/565788>
- Vereecken, H., Kamai, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J. y. Vanderborght, J. (2007). Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: A stochastic unsaturated flow perspective. *Geophysical Research Letters*, 34, 1-6.
- Villa, V., Paltinieri, N., Khan, F. y Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. *Safety Science*, 89, 77-93.
- Villón Valdiviezo, D. (2011). *Diseño de una red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión* (tesis de pregrado). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Waharte, S., Boutaba, R., Iraqui, Y. e Ishibashi, B. (2006). Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations. *Multimedia tools and Applications*, 29(3), 285-303.
- Waltenegus Dargie, C. P. (2010). Fundamentals Of wireless Sensor Networks. En C. P. Waltenegus Dargie, *Fundamentals Of wireless Sensor Networks* (p. 249). West Sussex: Willey.
- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Welsh, M., Marcillo, O., Johnson, J., Ruiz, M. y Lees, J. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, 2006, 18-25.
- Western, A. W., Zhou, S. L., Grayson, R. B., McMahon, T. A., Blöschl, G., y Wilson, D. J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 286(1-4), 113-134.
- Wollschlaeger, M. y Thilo, S. (2017). The future of industrial communication: Automation networks in the era of the *Internet of Things* and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17-27.

- X. Mao, J. J. (2010). Wireless channel modeling methods: Classification, comparison and application. *5th International Conference on Computer Science & Education* (pp. 1669-1673). Hefei: IEEE.
- Xu, J., Liu, W., Lang, F., Zhang, Y. y Wang, C. (2010). Distance measurement model based on RSSI in WSN. *Wireless Sensor Network*, 2(8), 606.
- Yan, Y., Li, S., Zhang, R., Lin, F., Wu, R., Lu, Q. y Wang, X. (2009). Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science and Technology*, 14(S1), 1-12.
- Zekavat, M. J. (2015). Time of Arrival Estimation in *Wireless Sensor Networks* via OFDMA. *015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference* (pp. 1-5). Boston: IEEE Explore.
- Zhang, H., Arora, A., Choi, Y. R., y Gouda, M. G. (2007). Reliable bursty convergecast in *wireless sensor networks*. *Computer Communications*, 30(13), 2560-2576.



## **Autores**

### **Carlos René Suárez**

Profesional en Ingeniería Electrónica con maestría en la misma disciplina. Actualmente funge como decano de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Uniagraria). Se ha desempeñado en cargos de ingeniería en diversas compañías del sector de telecomunicaciones. Profesor a nivel de pregrado y posgrado en el área de las telecomunicaciones. Gerencia proyectos de investigación con los que ha obtenido resultados y desarrollado productos de investigación que han sido reconocidos por la comunidad académica.

### **Paulo Alonso Gaona García**

Profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en Ingeniería de la Información y el Conocimiento de la Universidad de Alcalá, España. Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones con énfasis en Teleinformática e ingeniero de Sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del grupo de investigación Multimedia Interactiva y codirector del grupo de investigación GIIRA de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Miembro del grupo de investigación IERU (Information Engineering Research Unit) de la Universidad de Alcalá. Miembro fundador de la red de investigación SMART DATA SCIENCE++. Colaborador activo en procesos misionales asociados con proyectos de investigación y formación en áreas de interés como redes y comunicaciones, visualización de información, ciencia de los datos, *visual analytics* y seguridad informática.

### **Sebastián Soto Gaona**

Ingeniero Mecatrónico con enfoque en investigación. Ha desarrollado prototipos de alta calidad mediante el uso de herramientas matemáticas e implementando soluciones efectivas en problemas de ingeniería empleando Machine Learning e Inteligencia Artificial. Docente universitario y colaborador en revisión de artículos en revistas internacionales. Orador en ponencias con resultados de investigación en campos de sismología, telecomunicaciones, control y robótica.

**Carlos Enrique Montenegro Marín**

Profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en Sistemas y Servicios Informáticos para Internet de la Universidad de Oviedo, España. Tiene un diploma de estudios superiores otorgado por la Universidad Pontificia de Salamanca, España. Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Ingeniero de Sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del grupo de investigación GIIRA de la Universidad Distrital y miembro activo del grupo de investigación Multimedia Interactiva. Miembro fundador de la red de investigación SMART DATA SCIENCE++. Sus áreas de intereses están asociadas a proyectos de investigación, formación y desarrollo, que incluyen tecnología orientada a objetos, procesadores de lenguaje, analítica y procesamiento de datos, software de modelado con DSL y MDA.





Este libro se  
terminó de imprimir  
en noviembre de 2020  
en la Editorial UD  
Bogotá, Colombia