

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES PARA LA DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN EL PARQUE METROPOLITANO GUANGÜILTAGUA DE LA CIUDAD DE QUITO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

RONALD ABELARDO TORRES JAMA

ronald.torres01@epn.edu.ec

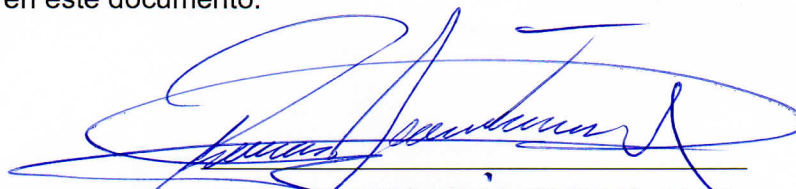
DIRECTOR: Dr. TARQUINO FABIÁN SÁNCHEZ ALMEIDA

tarquino.sanchez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, RONALD ABELARDO TORRES JAMA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



RONALD ABELARDO TORRES JAMA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por RONALD ABELARDO TORRES JAMA, bajo mi supervisión.



TARQUINO FABIÁN SÁNCHEZ ALMEIDA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RONALD ABELARDO TORRES JAMA

TARQUINO FABIÁN SÁNCHEZ ALMEIDA

DEDICATORIA

A mis padres, y mis hermanas. A todas las personas que siempre me apoyaron durante toda esta etapa y creyeron en mí.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

A mi padre Juan Bosco Torres Chica (+), por ser el pilar fundamental y ejemplo por seguir, de lucha y sacrificio para conseguir lo que uno desea con el corazón. A mi madre Maritza Leonor Jama Moreira por su inquebrantable amor, apoyo incondicional y ejemplo a seguir en mi vida. A mi hermana María José por sus palabras sabias y justas en los momentos difíciles.

Al Dr. Tarquino Sánchez por sus consejos, su ayuda, tiempo y paciencia durante el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente, a mis amigos y familia por los gratos momentos, experiencias y enseñanzas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Alcance.....	3
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 Incendios Forestales.....	6
1.4.1.2 Tipos de Incendios Forestales.....	6
1.4.1.3 Factores que influyen el comportamiento de un incendio forestal.....	6
1.4.1.4 Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito.....	8
1.4.1.5 Impacto ambiental en el parque Guangüiltagua de la ciudad de Quito.....	10
1.4.2 Redes Inalámbricas.....	11
1.4.2.1 Tecnologías Inalámbricas.....	11
1.4.2.2 Estándar IEEE 802.15.4 (Zigbee).....	12
1.4.2.3 Protocolos de Enrutamiento IEEE 802.15.4.....	13
1.4.3. Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).....	14
1.4.3.1 Origen.....	14
1.4.3.2 Características de una WSN.....	15
1.4.3.3 Elementos de una WSN.....	16
1.4.2.5 Topología de una WSN.....	17
2 METODOLOGÍA.....	18
2.1 Descripción de la región de análisis.....	18
2.2 Topología de la red.....	19
2.3 Elementos de la red.....	20
2.3.1 Motas / Nodos.....	20
2.3.2 Descripción del módulo XBee3 Pro.....	22
2.3.3 Sensores.....	24
2.3.4 Gateway.....	26

2.4	Arquitectura de la red	27
2.5	Análisis de Propagación	27
2.6	Diseño de la WSN	30
2.6.1	Cálculo del enlace entre nodos sensores.....	32
2.6.2	Enlace entre nodo Coordinador y Gateway.....	33
2.7	Localización geográfica de la red	34
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
3.1	Simulador Cooja.....	38
3.2.1	Pruebas de Comunicación entre nodos	38
3.2.2	Pruebas de Detección de los nodos.....	43
3.2	Conclusiones.....	45
3.3	Recomendaciones.....	46
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
5	ANEXOS.....	49
	ANEXO I.....	50

RESUMEN

Los incendios forestales dentro del ámbito ambiental se han transformado en un factor determinante a la hora de hablar de cambio climático y es que en los últimos años representa un problema no solo en Ecuador, sino a nivel mundial y más aun evidenciando un crecimiento exponencial en ambientes forestales durante época de verano. La protección oportuna de estos lugares es la solución más sostenible y eficaz. Los incendios forestales representan una amenaza a la conservación de la flora y fauna además del descuido e intención del ser humano dando como consecuencias devastadoras tanto en la economía, afectación de la biodiversidad e impacto en la sociedad dentro del país. Gracias al avance en tecnología es factible utilizar redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN), los cuales permiten dar nuevos mecanismos de predicción, detección al comportamiento de los incendios forestales.

Para el presente proyecto se presenta el diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN) para detectar un incendio forestal en el parque metropolitano Guanguiltagua de la ciudad de Quito. Para llevar a cabo el proyecto por un lado se determinará información del impacto ambiental generado, considerando este reducto de bosque andino en la capital del Ecuador.

Por otro lado, se diseñará la red de sensores inalámbricos configurada por un conjunto de nodos sensores y una estación base donde se comunican entre sí, los cuales se encargan de la adquisición de variables en el entorno, procesamiento y envío de información cada vez que se llegue a un umbral establecido. Así mismo poder procesar datos de temperatura, humedad relativa, factores ambientales como el monóxido y dióxido de carbón, de tal manera que se pueda inferir resultados de dicha detección en una zona boscosa mediante una simulación, analizando el comportamiento de cada sensor de la red, tanto en comprobar los cambios bruscos de temperatura ambiente como al hacer énfasis en los cambios que se pueda observar en el incremento de humedad de combustible del suelo cuando vaya a ocurrir un incendio forestal.

Por último, ya con el análisis de datos de la red de sensores tratada, se realizará pruebas experimentales para comprobar el correcto diseño de nuestra red de sensores inalámbricos.

PALABRAS CLAVE: red de sensores inalámbricos, incendios forestales, detectar.

ABSTRACT

Forest fires within the environmental field have become a determining factor when it comes to talking about climate change and it is that in recent years it represents a problem not only in Ecuador, but worldwide and even more so, evidencing exponential growth in environments forests during the summer season. The timely protection of these places is the most sustainable and effective solution. Forest fires represent a threat to the conservation of flora and fauna in addition to the discovery and intention of the human being, giving devastating consequences both in the economy, affectation of biodiversity and impact on society within the country. Thanks to advances in technology, it is feasible to use wireless sensor networks (Wireless Sensor Network, WSN), which allow new mechanisms for prediction and detection of the behavior of forest fires.

For this project, the design of a wireless sensor network (WSN) is presented to detect a forest fire in the Guanguiltagua metropolitan park in the city of Quito. To carry out the project, on the one hand, information on the environmental impact generated will be determined, considering this redoubt of Andean Forest in the capital of Ecuador.

On the other hand, the wireless sensor network will be designed, configured by a set of sensor nodes and a base station where they communicate with each other, which are responsible for the acquisition of variables in the environment, processing and sending information each time they are received. reach a set threshold. Likewise, to be able to process data on temperature, relative humidity, environmental factors such as carbon monoxide and dioxide, in such a way that the results of said detection in a wooded area can be inferred through a simulation, analyzing the behavior of each sensor in the network, both in checking the sudden changes in ambient temperature and in emphasizing the changes that can be observed in the increase in soil fuel moisture when a forest fire is going to occur.

Finally, with the data analysis of the treated sensor network, experimental tests will be carried out to verify the correct design of our wireless sensor network.

KEY WORDS: wireless sensor network, forest fires, detect.

1 INTRODUCCIÓN

Existe un considerable crecimiento exponencial de incendios forestales en el Ecuador y el mundo, durante los últimos años. Centrando en nuestro país, se tiene una estadística histórica de estos eventos de mayor recurrencia con 38.05%, mayor a otros eventos naturales considerados durante la última década, con registros en el **Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE)**. Si a este factor, conjugado con la degradación del cambio climático, más el descuido humano que cada vez afecta a grandes extensiones y espacios abiertos de flora y fauna que nos rodea, como resultado, tenemos una mayor preocupación por afectaciones en el sector agrícola, estimadas en 130.509 hectáreas perdidas hasta 2019 [1], y en el 2020 se ha perdido 27.904,21 hectáreas de cobertura vegetal en el territorio nacional ecuatoriano. Entre las provincias con mayor afectación por incendios forestales constan: Loja, Pichincha, Guayas, Azuay y Chimborazo. La investigación se centrará en la provincia de Pichincha, donde se presentaron 179 incendios forestales solo en el año 2020; los sectores más afectados por este problema fueron: Pintag (El Carmen, faldas del Antisana), Pomasqui (La Loma, faldas del cerro Casitagua) y San José de Minas (Sector Chespi, Reserva Ecológica Pululahua) [2], y en la ciudad de Quito, en zonas como las estribaciones del volcán Pichincha donde se tiene extensas zonas boscosas y de vegetación vulnerable a este problema.

Algunos métodos para la detección de incendios forestales se basan en el uso de imágenes satelitales (detección aérea) o la detección con sistemas de video vigilancia con torres instaladas sobre el terreno. Estos métodos son bastante usados sin embargo su coste de operación en infraestructura es bastante elevado del que se requiere un gran número de personal capacitado y que dificultan el monitoreo del fenómeno en tiempo real, a su vez cuando el incendio es detectado se ha producido daños difíciles de manejar por la velocidad de propagación rápida que se tiene en estos eventos. [3]

La gran cantidad de espacios verdes y vegetación forestal que existen en Ecuador, motiva el presente TIC (Trabajo de Integración Curricular), donde se propone un sistema de detección de un incendio forestal en el parque Guangüiltagua que se encuentra ubicado en el Distrito Metropolitano de Quito, mediante una red de sensores inalámbricos (WSN), esta red es un sistema distribuido por nodos con capacidad de

obtener información de las condiciones ambientales y trasmitirla de manera inalámbrica a una estación base (nodo coordinador) para su procesamiento. [3]

La principal contribución de este trabajo es diseñar la WSN que permita detectar un incendio forestal en el escenario antes mencionado de manera temprana, la misma que tiene como una de las tareas resolver problemas respecto al intercambio eficiente de paquetes (información) entre nodos de manera inalámbrica que es fundamental para hallar un incendio de manera oportuna. Además, se especificará la tecnología a utilizar con su respectivo estándar de comunicación, también la capacidad de detectar un incendio utilizando la información de los sensores incorporados.

El estudio se ha dividido en 3 capítulos en los cuales se presenta como:

- **Marco teórico:** En este apartado se analizará la situación presente de los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito considerados en los últimos años, específicamente del parque Guangüiltagua, se incluirá información respecto a los incendios forestales y de los parámetros que se miden para modelar su crecimiento. Esto va conectado a indagar en los fundamentos y aplicaciones de una red de sensores inalámbricos, los aspectos técnicos de cada uno de los componentes que intervienen en la comunicación.
- **Metodología:** En esta sección se describe el diseño y la arquitectura del sistema, el área específica del parque Guangüiltagua donde se colocará los nodos sensores y el nodo coordinador. Así mismo el detalle de los cálculos realizados para garantizar la comunicación y posición idónea de éstos con el diseño de la red.
- **Resultados, conclusiones y recomendaciones:** En este capítulo se presenta las pruebas experimentales realizadas mediante software con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de nuestro sistema, finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones.

1.1 Objetivo general

Diseñar una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network) para la detección de incendios forestales en el parque metropolitano Guangüiltagua del Distrito Metropolitano de Quito.

1.2 Objetivos específicos

1. Identificar los factores y mecanismos que influyen en la detección de incendios forestales, y las diferentes maneras de mitigar el impacto ambiental, para proteger áreas boscosas de mayores riesgos.
2. Seleccionar el uso de la tecnología inalámbrica correcta para las WSNs, conforme al estándar de comunicación IEEE 802.15.4.
3. Diseñar la red de sensores inalámbricos especificando características de hardware y software adecuados para el sistema.
4. Obtener una comunicación estable entre los sensores (nodos) inalámbricos, para asegurar una detección adecuada de parámetros ambientales en el terreno a diseñar.
5. Realizar pruebas de simulación, utilizando software para la comprobación del correcto funcionamiento de la red.

1.3 Alcance

El alcance del presente trabajo de titulación está enfocado en diseñar una red de sensores inalámbricos para detectar un evento fortuito o intencional, como un incendio forestal, en zonas de abundante vegetación en la ciudad de Quito, de esta manera se busca el mitigar áreas de mayor riesgo.

Se delimitará el estudio, a la realización del diseño de una red inalámbrica de sensores, utilizando el estándar de comunicaciones inalámbricas **IEEE 802.15.4 (Zigbee)**, basado en redes inalámbricas de área personal (WPANs), y donde se emplean diversos nodos sensores, y cada uno usando como estándar, protocolos de comunicación del modelo OSI y comparando las capas del modelo de protocolos WSN en el nodo coordinador y los nodos sensores, de acuerdo a la Figura 1, caracterizando su uso por la capacidad de operar redes de gran densidad y comunicarse entre sí.

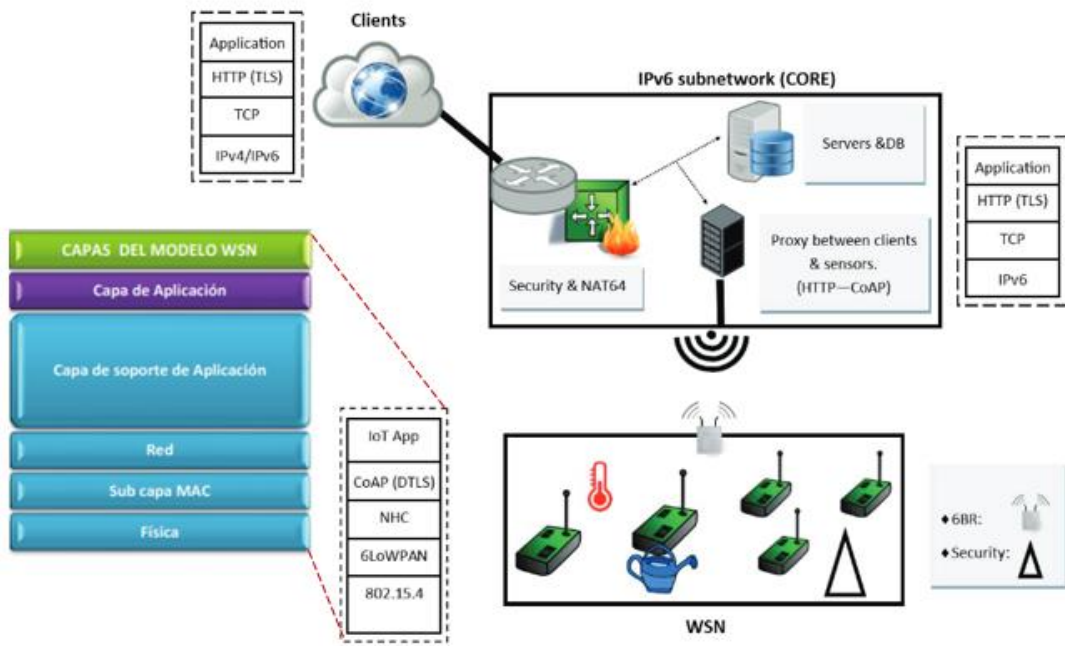


Figura 1. Estructura de protocolos y Diagrama OSI-WSN. Fuente: Fuentes, R. (2017)

El sistema se dimensionará para áreas boscosas en particular, donde sea necesaria su implementación, sin embargo, se focalizará el análisis, en diseñar la red para el Parque Metropolitano Guangüiltagua, Quito-Ecuador; por sus características de abundante vegetación con 557 hectáreas, en donde, al ser bastante transitado, al tener una comuna (Miraflores) en la parte interna, es propenso a incendios por la gran cantidad de material combustible forestal que posee. [4]



Figura 2. Mapa topográfico Parque Metropolitano Guangüiltagua

Se diseñará la red de sensores inalámbricos en base a las características técnicas y especificaciones de fábrica usando tecnología de sensores Zigbee 3.0 Pro (Xbee3), para detección en tiempo real en la conformación de los nodos sensores y estación base. Se evaluará y dimensionará el diseño de la WSN en un espacio de terreno de $0,5 \text{ km}^2$ de un área dentro del parque Guangüiltagua de Quito.

En la WSN diseñada, se determinará el alcance de cada nodo sensor y establecer el número máximo de nodos sensores necesarios para cubrir el área y garantizar la confiabilidad del sistema. Se validará el diseño idóneo mediante pruebas de simulación de capa física y de red, utilizando un software que será seleccionado durante el desarrollo del trabajo de titulación, y poder visualizar los puntos de comunicación débiles y fuertes de la red, ratificando distancia entre nodos sensores, pérdidas de paquetes y presupuesto de enlace.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Incendios Forestales

Incendio forestal se llama al fuego que se propaga sin control, especialmente en zonas sensibles, afectando la vegetación como árboles, matorrales, pastos y cultivos; bienes privados, semovientes, fauna silvestre, con ello los ecosistemas de gran importancia para la biodiversidad. [5]

1.4.1.2 Tipos de Incendios Forestales

- **Incendios de copas:** Fuego que rara vez toca el suelo y se extiende de copa en copa. El fuego consume a todo el bosque en su totalidad. La velocidad de propagación de este tipo de incendios oscila entre al menos 3 m/min y más de 100m/min, los más intensos. [6]
- **Incendios de suelo:** Es el incendio más común, las llamas se encuentran en la superficie del bosque, origina la destrucción de la fauna y flora existente, además de la quema de los arbustos y matas que se encuentran bajo los árboles. La profundidad de combustión de este incendio oscila entre los 25 cm y 50 cm. [6]
- **Incendios de superficie:** Quema las raíces y la materia orgánica, es el más difícil de detectar y apagar. El fuego se expande por toda la superficie del suelo, quemando musgos y líquenes, mientras que los árboles se mantienen intactos. La velocidad de propagación de incendios de superficie alcanza 1 m/h, hasta superar los 3 m/h. [6]

1.4.1.3 Factores que influyen el comportamiento de un incendio forestal

El factor principal que influye dentro de un incendio es el fuego, así mismo al ser una reacción química autoalimentada, se produce entre la mezcla de combustible sólido, líquido o gaseoso y el oxígeno. El fuego cuando inicia se mantiene a sí mismo hasta acabar con alguno de los substratos intervinientes, usualmente el combustible. Como resultado de esta reacción se obtiene luz, calor y humo, este último formado por restos de gases combustibles no quemados, tóxicos e irritantes que dependen del tipo de material que se combustiona, monóxido, dióxido de carbono y vapor de agua. [6]

Considerando lo expuesto anteriormente, se puede decir que el fuego es representado por un triángulo, siendo cada lado un componente indispensable para el proceso del calor.



Figura 3. Triángulo de Fuego [6]

- **Oxígeno:** Es un factor que forma parte de nuestra atmosfera, al entrar en contacto con vientos extremos ayudan a propagar el fuego.
- **Calor:** Es la temperatura a la cual estos gases arderán en llamas y provocarán que continúe la combustión, las principales fuentes de calor provienen de fenómenos naturales y por descuido del ser humano.
- **Combustible:** Es el factor donde su principal acción es la combustión, tiene características como el contenido de humedad, el volumen y la superficie ocupada, la vegetación seca y residuos muertos leñosos se presentan como combustible vegetal.

También existe una versión llamada Tetraedro del Comportamiento debido a los diferentes tipos de incendios. Este mecanismo de incendio viene dado por toda una serie de factores y consideraciones en donde se da algunas pautas del comportamiento: [6]

- **Viento:** Es el factor que mueve al fuego, mientras mayor sea la velocidad de viento mayor será su velocidad de propagación. Un incendio se propaga a favor del viento.

- **Tiempo Atmosférico:** Los indicios del tiempo, la hora del día influye y la estación del año en la que se encuentra, refleja y determina mucho cuando se tiene tiempo con lluvias o sequías prolongadas.
- **Topografía:** En este factor la pendiente y la velocidad de propagación son directamente proporcionales.
- **Humedad:**

Del combustible: Existe humedad de combustible que no propaga el fuego si dicha humedad supera el 25%. En este factor la velocidad de propagación y la humedad son inversamente proporcionales.

Humedad relativa del aire: Cuando disminuye 10° C la temperatura del aire, la humedad relativa pasa a ser el doble de la que tenía, cuando aumenta 10° C, la humedad es la mitad, así mismo si la humedad baja del 10% habrá focos secundarios con cualquier tipo de combustible.

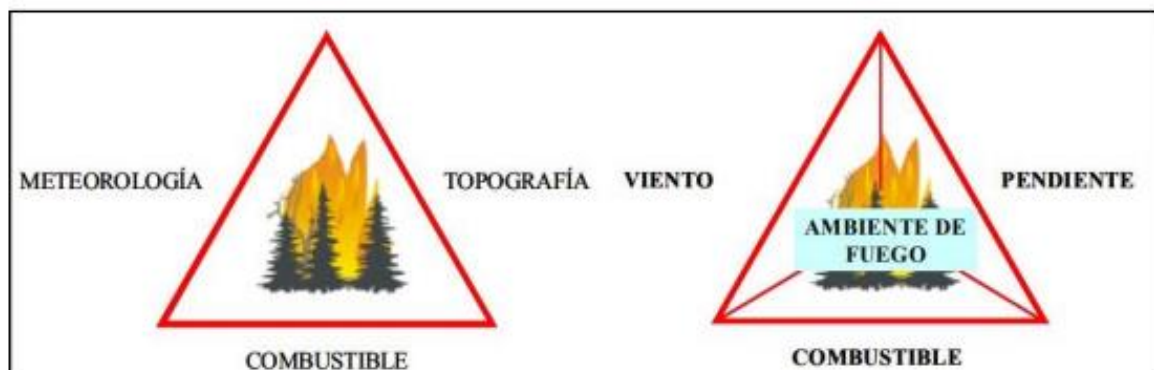


Figura 4. Tetraedro de la combustión [6]

1.4.1.4 Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito

En el Distrito Metropolitano de Quito la presencia de incendios forestales es regular por su abundante vegetación, sin embargo, éstos son poco conocidos dentro de su aspecto de recurrencia en cada evento. El Cuerpo de Bomberos de Quito reporta normalmente como incendios forestales aquellos relacionados con espacios periurbanos de la ciudad de Quito (laderas del Pichincha, zonas orientales de Quito y zonas de protección) y espacios públicos concernidos a vegetación arbustiva y arbórea del interior de la ciudad (bordes de quebrada, espacios vacantes o espacios de recreación). Esto significa que

existen muchos eventos que no tienen registros, que están localizados en zonas alejadas de la ciudad y que corresponden a sitios boscosos del Distrito Metropolitano a los cuales la respuesta llega de forma parcial o, en el peor de los casos, es inexistente. [7]

En un análisis de la Secretaría de Ambiente del DMQ, los incendios forestales generalmente son provocados por los seres humanos en un 95%, ningún incendio fue por causa natural, aunque no se ha establecido con precisión la causalidad; sin embargo, se puede deducir que muchos fueron provocados por la quema de pastos, basura y trabajos agrícolas generalmente en terrenos baldíos o abandonados; otra causa frenética es por acción de exploradores en los bosques o parques, pirómanos o simplemente travesuras de niños. En la resolución de los incendios forestales ocurridos se apunta que los incendios registrados corresponden a causas humanas, por negligencias el 87%, causas desconocidas 12% e incendios intencionales el 1%; no existen registros de incendios por causas naturales. [8] [9]

Existen datos proporcionados por el Cuerpo de Bomberos de Quito, COEM (Centro de Operaciones de Emergencia Metropolitano), SNGRE el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias) y el Ministerio del Ambiente, que en Pichincha los incendios normalmente están sujetos a épocas de verano (julio, agosto y septiembre) de manera recurrente todos los años, con esta premisa dentro del estudio se incluye al Distrito Metropolitano de Quito donde se evidencia de manera general los incidentes generados por el fuego y la superficie afectada por este. En la Tabla 1 se indica los incidentes por incendios forestales y la cantidad de superficie afectada en los últimos 4 años en el Distrito Metropolitano de Quito.

Tabla 1. Incidentes y áreas afectadas por Incendios Forestales en los últimos 4 años en el DMQ [9]

AÑO	Incidentes por incendio forestal	Área Afectada [Ha]
2019	154	1086.38
2020	88	1879.43
2021	121	306,27
2022	178	555,68

1.4.1.5 Impacto ambiental en el parque Guangüiltagua de la ciudad de Quito

Tomando en cuenta que el Parque Guangüiltagua está ubicado dentro de la ciudad de Quito, que por el desarrollo turístico y recreativo es propenso a impactos negativos al medio ambiente no solo por su fácil acceso y gratuito sino también por la afluencia masiva de personas para actividades turísticas y en muchos casos malas prácticas ambientales. El estudio en el ámbito ambiental ha brindado datos preocupantes sobre el proceso de degradación y contaminación de los recursos naturales, como el estado actual de la vegetación y la calidad del agua dentro del parque. Se ha determinado una importante cantidad de carbono y CO₂ (Dióxido de carbono) con lo que es necesario minimizar los efectos de estas emisiones que genera la ciudad. A pesar de que se tenga niveles elevados, estos no ocasionarían un incendio inminente, sino que la acumulación de la carga combustible y junto con la acción humana podrían ocasionar incendios forestales como los antecedentes de este tipo de evento en la ciudad [10]. En la Figura 5 se puede apreciar el nivel de riesgo y el índice de propagación de un incendio forestal en el parque Guangüiltagua de Quito.

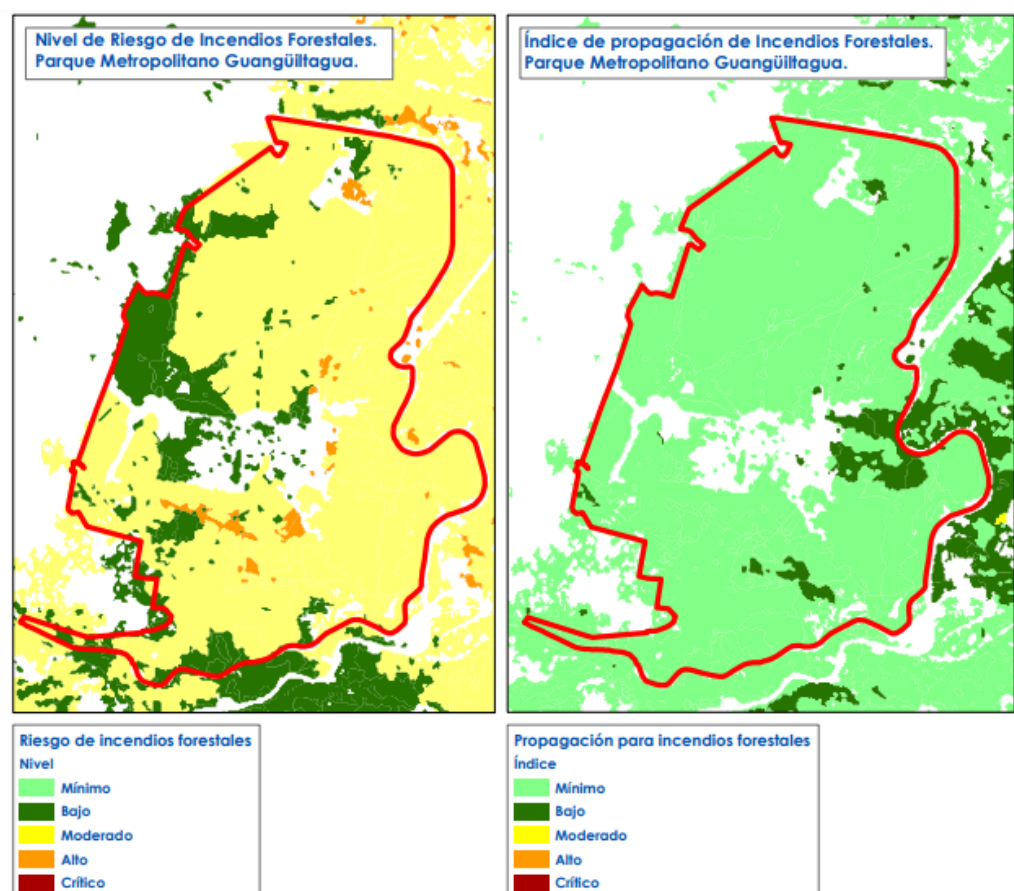


Figura 5. Estadísticas de riesgo y propagación de incendios forestales en el parque Guangüiltagua de Quito. [10]

1.4.2 Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas son redes que usan ondas de radio para conectar dispositivos entre sí, sin la necesidad de tener cables, este tipo de redes se caracterizan por consumir poca energía, al inicio su alcance fue limitado a unas decenas de metros, pero con la tecnología actual permiten conexiones a varios kilómetros de distancia. [11]

1.4.2.1 Tecnologías Inalámbricas

Las redes inalámbricas de sensores se clasifican dependiendo su distancia máxima de alcance y el área de aplicación, se dividen en:

- WBAN (Redes Inalámbricas de Área Corporal)
- WPAN (Redes Inalámbricas de Área Personal)
- WLAN (Redes Inalámbricas de Área Local)
- WMAN (Redes Inalámbricas de Área Metropolitana)
- WWAN (Redes Inalámbricas de Área Extensa)

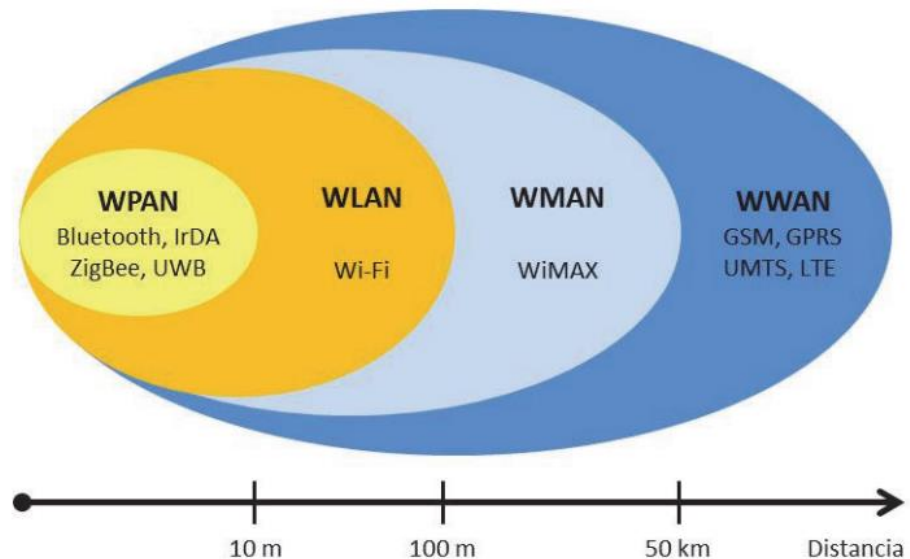


Figura 6. Clasificación de las redes inalámbricas. [12]

1.4.2.2 Estándar IEEE 802.15.4 (Zigbee)

Se basa en el estándar IEEE 8002.15.4, fue desarrollado como un estándar global para llegar a satisfacer las necesidades del uso continuo de las redes inalámbricas, su fácil aplicación, alta fiabilidad, bajo consumo, bajo costo, bajas velocidades de transmisión de datos y una amplia cobertura inalámbrica (10 a 70 metros). Zigbee está constituido de un conjunto protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica, los cuales están diseñados para operar en las bandas de frecuencia sin licenciamiento, en EE. UU. De 900 MHz, en Europa 868 MHz y 2,4 GHz, en todo el mundo con una velocidad de transmisión máxima de 250 Kbps, suficiente para la exigencia de un sensor. Realizando una comparativa entre los diferentes tipos de tecnologías que se tienen en el mercado, Zigbee permite un entorno perfecto para entorno con baja relación señal-ruido como se puede apreciar en la Figura 7.

El objetivo de esta tecnología no es obtener velocidades muy altas, sino más bien para la creación de redes grandes que no exijan una gran cantidad de transmisión de datos y que los dispositivos que la usan tengan un bajo consumo energético, en conclusión, estos dispositivos pasan la mayor parte del tiempo en un estado latente, es decir, durmiendo para consumir mucho menos. [13]

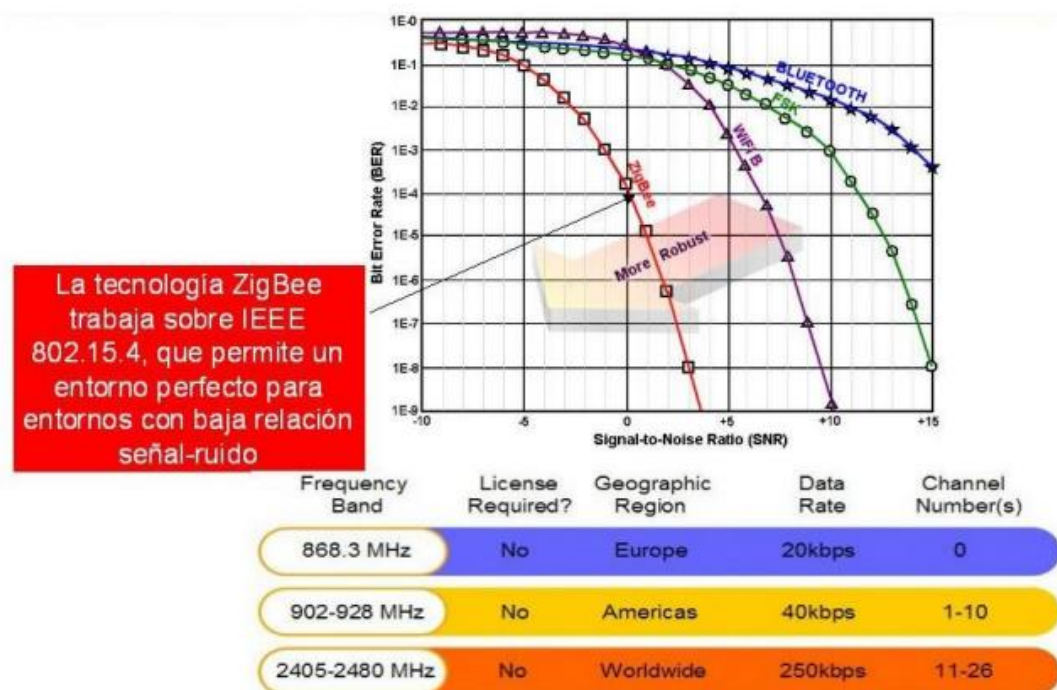


Figura 7. Características de bandas de funcionamiento de IEEE 802.15.4 [13]

En una red Zigbee se puede tener dos tipos diferentes de dispositivos: dispositivos de funcionalidad completa (FFD – Full Function Device) y dispositivos de funcionalidad reducida (RFD – Reduced Function Device). Los FFDs pueden operar como coordinador o dispositivo. El RFD se diseñó exclusivamente para aplicaciones simples. Zigbee tolera tres topologías de red diferentes: estrella, malla y árbol, se muestran en la Figura 8. La red en árbol es un caso particular de la red en malla porque los dispositivos son FFDs y un RFD puede conectarse como un nodo hoja en el extremo de una rama, mientras la red en malla, cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro siempre y cuando se encuentren dentro del mismo rango de cobertura del nodo. [12]

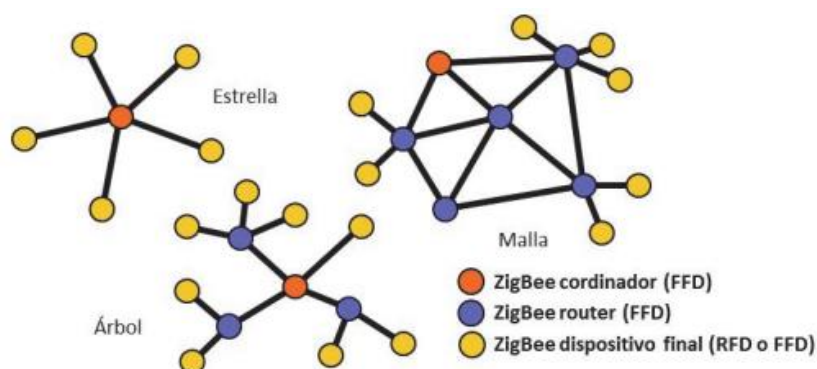


Figura 8. Dispositivos y topología de una red Zigbee. [12]

1.4.2.3 Protocolos de Enrutamiento IEEE 802.15.4

Para este apartado se revisará los protocolos de enrutamiento de Zigbee más utilizados en las redes de sensores inalámbricos, detalle a continuación:

- **Protocolo de Vector Distancia bajo demanda Ad-Hoc (AODV- Ad-hoc On-Demand Distance Vector)**

El protocolo AODV inicialmente se desarrolló con nodos móviles en una red ad-hoc en donde como principal característica es de permitir el funcionamiento automático de comunicación multisalto entre los nodos. El funcionamiento se basa en el uso de tablas en cada nodo, que contienen información sobre los nodos vecinos y el próximo salto para llegar al siguiente nodo.

El modelo de trabajo de este protocolo demuestra la transmisión de un nodo cuando no tiene una ruta definida, tiene que llevar a cabo un proceso para definir su ruta. El nodo emisor emitirá un comando de solicitud de ruta (RREQ), el RREQ contiene la dirección de red de origen, la dirección de red de destino y el costo (métrica) de la ruta. Ejemplo de aquello AODV utiliza el nivel de energía de un nodo como métrica principal. A medida que

se propaga este comando, en cada nodo se crea la tabla temporal de enrutamiento, cuando el nodo de destino recibe correctamente el RREQ este compara el costo de la ruta con todos los anteriores para que sea el costo mínimo. Luego de este proceso el nodo reenvía un paquete de respuesta de ruta (RREP) a través de la ruta de mínimo costo. Todo este proceso, aunque introduce un poco de carga adicional a la red, permitirá una mejor tolerancia a fallos. [14]

- **Protocolo RPL**

Este protocolo específicamente fue diseñado para redes de bajas pérdidas y potencia LLN (Low-Power and Lossy Networks), se caracterizan por sus limitadas capacidades de memoria y procesamiento. Los flujos por RPL son punto a punto, punto-multipunto con un nodo externo como punto central hacia un subconjunto de dispositivos y multipunto-punto, viceversa a lo anterior. RPL dispone de mecanismos que minimiza la complejidad del enrutamiento y el reenvío de datos es muy fácil, lo que favorece en sobrecarga de información a reducir la memoria. [14]

Para aplicaciones con topología RLP se organizan en DAGs (Directed Acyclic Graphs-Gráficos Acíclicos Dirigidos) debido a que proporciona redundancia en la ruta principal y que estos se dividen en uno o más DODAGS (Distance Oriented Directed Acyclic Graph-Gráficos Acíclicos Dirigidos Orientados a la Distancia), cada enlace de la red tiene un DODAG. [14]

1.4.3. Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

1.4.3.1 Origen

Una red de sensores inalámbricos o más conocida por sus siglas en inglés como WSN (Wireless Sensor Networks), dentro de este apartado se abordará las bases tecnológicas y los conocimientos necesarios para el despliegue de esta red de sensores. El concepto de una red de sensores inalámbrica se basa en dispositivos autónomos que monitorean y analizan el entorno que los rodean para recopilar, monitorear y analizar datos, fue impulsado inicialmente por organizaciones militares y de defensa que fueron los principales impulsores y partidarios de este concepto. [14]

Por lo general, las WSN se encuentran estructuras por muchos nodos, los cuales se dispersan en distintos lugares dentro del área a cubrir. Dichos nodos tienen como beneficio su bajo consumo de energía y costo de implementación, su principal tarea es adquirir datos del entorno donde se encuentran, datos que se definen por medio de las

variables a monitorear. Los datos son obtenidos de sensores como temperatura, presión, humedad, gases, vibración y distintos estados ambientales.

Para resumir su utilidad durante el tiempo se muestra la siguiente cronología:

1. Durante la guerra Fría (años 50)
2. Proyectos de defensa avanzada (anos 80)
3. Redes de sensores militares a finales del siglo XX
4. Inicios del siglo XXI a la actualidad

Con los avances en redes de procesamiento, técnicas de producción y gestión energética redujeron costos de implementación de los sistemas basados en WSN, el enfoque principal del uso de las redes de sensores inalámbricos cambió de aplicaciones militares a más dirigidas al consumidor. Un factor importante para la implementación de las redes de sensores inalámbricos es también el tamaño que es reducido hasta el punto de alcanzar nodos sensores basados en nanotecnología. [14]

Por lo antes expuesto se puede decir que estas nuevas tecnologías permitirán automatizar muchos procesos en el área de la agricultura, domótica, logística, seguridad, medicina, entre otras.

1.4.3.2 Características de una WSN

Al diseñar una red de sensores inalámbricos (WSN) completamente funcional para nuestro proyecto, existen factores importantes que deben ser considerados para el propósito del objetivo de estos dispositivos, las características que se deben considerar son las siguiente: [14]

Confiabilidad

Composición

Consumo de energía

Adquisición de datos

Seguridad

Densidad

1.4.3.3 Elementos de una WSN

Como cualquier tipo de red, una red de sensores inalámbricos (WSN) tiene un conjunto mínimo de componentes o elementos para el correcto modo de trabajo. Generalmente están formadas de la siguiente manera:

Nodo Sensor

Conocido como mota es el encargado de recolectar datos y transmitir datos monitoreadas en un área delimitada, este dispositivo electrónico recibe ese nombre por el tamaño compacto y peso que posee. Al instante de elegir una mota del mercado o diseñar una se debe de tener en cuenta su tamaño, costo, consumo de energía y compatibilidad respecto a su programación. [14]

Los principales elementos por cada nodo sensor son los siguientes:

- Sensor/ADC
- CPU
- Memoria/Almacenamiento
- Unidad de Potencia
- Transceiver inalámbrico

Nodo Coordinador

Este nodo es el responsable de receptar de manera inalámbrica todos los datos enviados por los nodos sensores que forman parte de la WSN. Reúne los datos recibidos y los envía a la estación base. [14]

Gateway

Es un nodo que sirve de canal de conexión entre la red de sensores con una red de datos TCP/IP, al mismo tiempo es el interfaz entre dos infraestructuras diferentes que permite que todos los datos sean enviados hacia el internet, por eso recibe el nombre de Gateway o puerta de enlace. [14]

Estación Base o Servidor

Es donde se recopilan los datos recibidos por la red inalámbrica de sensores para su procesamiento e interpretación por medio del usuario, por lo general, mediante simulación o por medio de una interfaz web. [14]

1.4.2.5 Topología de una WSN

En una red de sensores inalámbricos la topología depende de cómo estén programados los nodos sensores respecto al envío y enrutamiento de datos, esto está ligado de forma directa con la cobertura de esta. Entre las principales topologías se encuentran la estrella, árbol y malla. [15]

Topología en Estrella

Los dispositivos finales están conectados directamente hacia un único nodo Coordinador, es una topología sencilla de implementar, aunque tiene baja escalabilidad y pueden existir colisiones si se añade más coordinadores. [15]

Topología en Árbol

Es una variación de la topología en malla, donde las ramas del árbol son representadas por los nodos mientras que los dispositivos Finales son las hojas del árbol. Los *nodos* de la red se encargan de retransmitir mensajes hacia el Coordinador. [15]

Topología en Malla

Esta topología tiene un solo Coordinador y varios *nodos* que están buscando la ruta más confiable, en el caso de que un nodo de la red no esté disponible el Coordinador se encarga de buscar una nueva ruta permitiendo que el tráfico de datos alcance su lugar de destino, aun cuando se puede presentar mayor latencia en la red. [15]

2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se empezará definiendo el área de terreno donde se diseñará la red de sensores inalámbricos además de determinar las características topográficas del terreno, componentes electrónicos y tecnologías a usarse en el diseño de la red.

Se debe hacer énfasis en que el presente Trabajo de Integración Curricular está enfocado en realizar el diseño adecuado para detectar incendios forestales bajo parámetros como lo son la temperatura, humedad relativa, monóxido y dióxido de carbono que son variables que están directamente relacionadas cuando sucede un evento como este [16], en base a esto realizar las respectivas pruebas mediante simulación que se mostrará en el siguiente capítulo.

2.1 Descripción de la región de análisis

El escenario a diseñar la red de sensores inalámbricos se evaluará dentro del Parque Metropolitano Guanguiltagua de la ciudad de Quito por sus características de abundante vegetación, cuenta con 557 hectáreas de las cuales solo se delimitará y se realizará el diseño dentro de una superficie de 50 *hectáreas* o equivalente a 0,5 km^2 .

Tomando en cuenta que el Parque Metropolitano está ubicado dentro de la ciudad, además de que el acceso es fácil y gratuito, se ha generado una afluencia masiva de personas las cuales realizan diversas actividades turísticas sobre todo los fines de semana. Debido al gran volumen de visitas y acceso a la zona de uso intensivo del parque, es difícil realizar un control adecuado que asegure la conservación de recursos naturales. Además, la existencia de diversos niveles de conciencia ambiental y en muchos casos las malas prácticas ambientales generan impactos negativos al medio ambiente, se resolvió diseñar la red en un área la cual presenta mayor riesgo de incendio debido a su alto factor combustible donde se es propenso a tener un incendio forestal.

Para el escenario descrito en la Figura 9 se ha decidido utilizar un área de 0,5 km^2 .

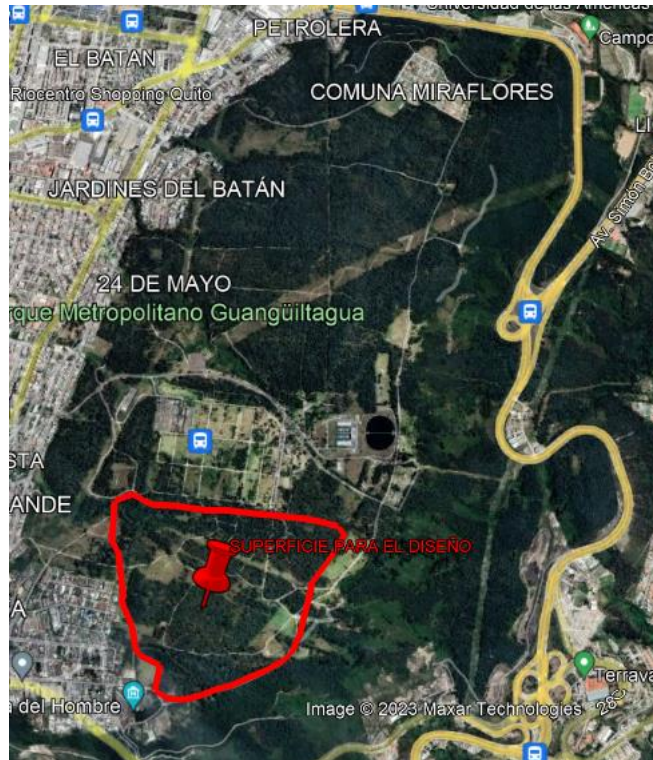


Figura 9. Área para el diseño dentro del Parque Metropolitano Guanguiltagua. Fuente: Google Earth

2.2 Topología de la red

En base a lo investigado en el capítulo anterior se usará una topología en malla para el diseño de la WSN, el número de sensores es de gran importancia ya que debe brindar cobertura a toda el área conociendo que cada nodo también agregará interferencia a la red y se lo analizará en capítulos posteriores. Al confirmar anteriormente el uso del estándar de comunicación 802.15.4 Zigbee por sus cualidades de bajo costo y consumo energético respecto a lo que ofrecen bluetooth o wifi, se evalúa dos tipos de topologías del estándar 802.15.4 como lo son punto-punto y punto-multipunto.

El área presenta mucha vegetación boscosa por lo que las pérdidas serán directamente proporcionales con la distancia entre cada nodo, se debe colocar los nodos sensores en cuadrícula organizada donde se distribuyen uniformemente que es la forma de lograr la mejor eficiencia y calidad de comunicación. A razón de esto se trabajará con la topología en malla con conexión punto-multipunto para tener escalabilidad y seguridad además de que permite que el mensaje tenga varios saltos para llegar a su destino.

Con todo lo expuesto y analizado la siguiente sección será un estudio de los elementos de la red por lo cual se brindará un mejor conocimiento de las soluciones existentes en el mercado con las respectivas características técnicas para nuestro diseño.

2.3 Elementos de la red

Durante las siguientes subsecciones, se mostrará módulos compatibles con IEEE 802.15.4 que comercialmente se encuentran disponibles, se comparará y describirá las características más importantes de cada uno para el diseño del TIC, colocando mayor atención a los parámetros de rendimiento, rango, consumo, velocidad de transmisión máxima, costo etc.

2.3.1 Motas / Nodos

Algunos de los dispositivos Wasmotes o motas usadas para proyectos o investigación son de la familia Teslob, Micaz, Zoolertia y muchas otras, sin embargo, se ha concluido que el Wasmote de la empresa Libelium se ajusta a los requerimientos necesarios para el presente trabajo [17]. Se presentará las características técnicas de esta mota para analizar en conjunto los componentes que son necesarios para la detección de factores ambientales que puedan conllevar a incendios dentro del parque Guanguiltagua y también para la comunicación inalámbrica entre estos dispositivos.

Wasmote Libelium - Esta mota tiene una ventaja importante ya que se ha utilizado en varias redes de sensores inalámbricos para incendios forestales logrando buenos resultados, una de las características más importantes es el bajo consumo energético por lo tanto va a tener muchos años de vida útil. Los interruptores digitales permiten encender y apagar cualquiera de las interfaces de los sensores, así como los módulos de radio. Tres modos de reposo diferentes hacen de Wasmote la plataforma de menor consumo del mercado (7 μ A). [17]

- **Características Generales**

Se hace referencia a las especificaciones técnicas de esta mota en las Tabla 2 y Tabla 3 mientras que en la Figura 10 se aprecia los elementos principales que conforman el dispositivo:

Tabla 2. Características técnicas del Waspote Libelium [17]

Microcontrolador	ATmega1281
Frecuencia	8 MHz
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
FLASH	128 kB
Tarjeta SD	16 GB
Peso	20 gramos
Dimensiones	73,5 x 51x 13 mm
Rango de Temperatura	[-30°C, +70°C] Soporta temperaturas extremas Recomendado: -20, +60°C
Reloj	RTC (32 kHz)

- **Características eléctricas:**

Tabla 3. Características eléctricas del Waspote Libelium [17]

Voltaje de la batería	3.3-4.2 V
Carga por USB	5 V – 100mA
Carga del panel solar	6-12 V – 300mA
Consumo de energía	
Encendido	17 mA
Dormido	30 uA
Sueño profundo	33 uA
Hibernación	7 uA

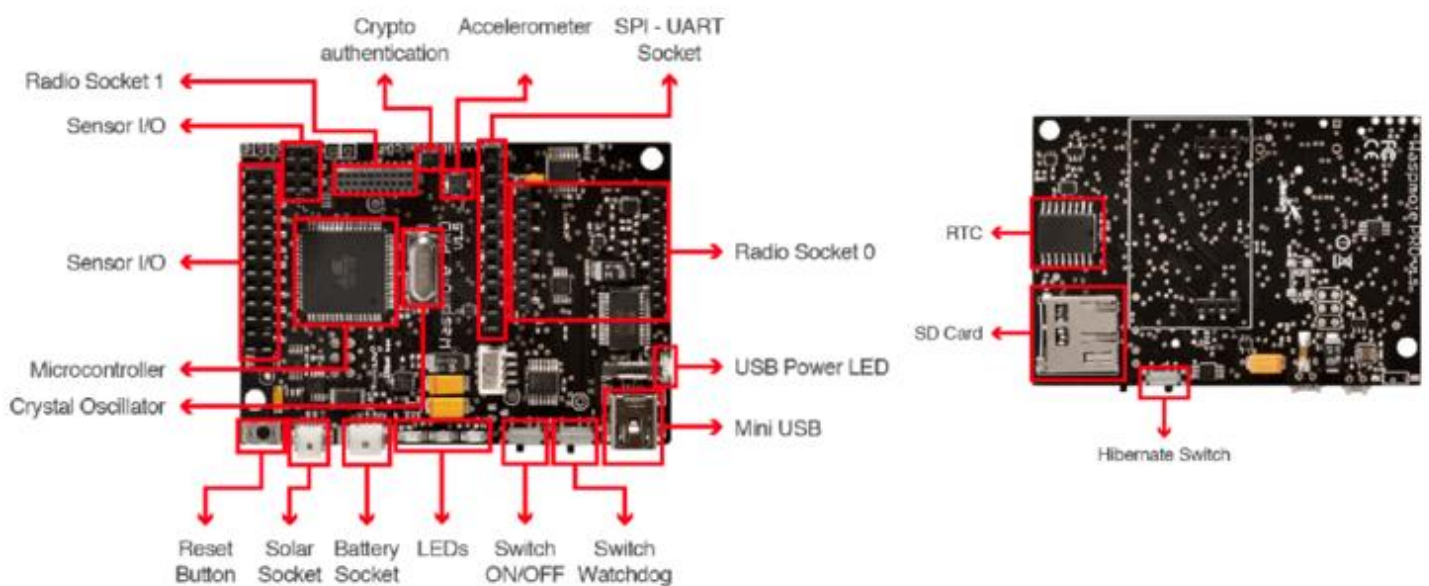


Figura 10. Elementos que conforman Waspote Libelium [17]

2.3.2 Descripción del módulo XBee3 Pro

Para el presente Trabajo de Integración Curricular se propone utilizar un módulo de Xbee fabricado por la empresa DIGI, es una pequeña radio que pueden comunicarse unas a otras de forma inalámbrica, fácil de usar, de bajo costo y alto rendimiento. Estas radios además cuentan con entradas y salidas análoga-digitales que se puede conectar sensores y leer sus mediciones en forma remota, este tipo de módulos tiene diferentes modelos según el tipo de antena que se necesite. Se detalla a continuación los tipos de antena que soporta Xbee: [18]

- **Antena Chip**
Chip pequeño que actúa como antena. Sencillo y barato.
- **Antena Whip**
Es un pequeño cable que sobresale.
- **Antena u.FL**
Conector pequeño para conectar otra antena.
- **Antena RPSMA**
Conector más grande agregar una antena propia.
- **Antena PCB**
Es las que está hecha con pistas en el mismo PCB.



Figura 11. Ejemplo de antenas para el módulo Xbee3 Pro [18]

Con la investigación de las diferentes series y modelos que se dispone de Xbee con respecto a la página del fabricante, se ha elegido al módulo **Xbee 3.0 Pro** por su mejor

sensibilidad de recepción y potencia de transmisión que sus anteriores versiones. En la Figura 12 se puede observar el dispositivo. [18]



Figura 12. Módulo Xbee 3.0 Pro [18]

En este módulo se puede configurar y programar dependiendo lo que se necesite, adaptando los varios tipos de antenas en sus varias versiones comerciales. A continuación, se muestra las características técnicas de este módulo.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del módulo Xbee3 Pro [18]

Tasa de transferencia	RF 250Kbps, Serial hasta 1Mbps
Alcance en interior	Urbano hasta 90m
Alcance exterior	RF línea vista hasta 3200m
Potencia de transmisión	+19 dBm
Sensibilidad de Receptor	-103dBm
Comunicación serial	UART, SPI, I2C
Configuración por comando	AT o API, local o via OTA
Frecuencia	ISM 2.4Ghz
Entradas Analógicas	4 ADC de 10-bits
Puertos Digitales	15 puerto de entrada/ salida digital
Memoria	1MB / 128Kb RAM (32Kb disponibles para MicroPython)
CPU	HCS08 hasta 50.33Mhz
Protocolo	Zigbee 3.0
Encriptado	128/250 bits AES
Voltaje de trabajo	2.1 – 3.6V
Corriente de transmisión	135mA @ 19 dBm
Corriente de recepción	17mA

2.3.3 Sensores

El estudio de los sensores son una parte muy importante para el apartado de este trabajo, encargados de receptar toda información del medio físico y convertirla en potencia, se analizará técnicamente el módulo de sensores del fabricante Libelium que está inmerso en el objetivo de este trabajo.

Este módulo de Libelium que se debe anexar a la mota principal, puede controlar parámetros ambientales mediante sus sensores comerciales los cuales pueden detectar parámetros tales como humedad, temperatura, presión atmosférica, y compuestos químicos como son gases por presencia de humo, el CO (monóxido de Carbono) y CO₂ (Dióxido de carbono) [17]. En el datasheet del fabricante se puede verificar los sockets específicos donde podemos incluir a estos sensores y su arquitectura en general.

Se abordará un breve resumen de cada sensor a continuación:

- **Sensor de Temperatura, Humedad y Presión**

Es necesario para el diseño de la red un sensor llamado BME280 desarrollado por Bosch Sensortec, este sensor es combinado, su consumo de energía es mínimo y sus tiempos de respuesta son muy rápidos. Una de las principales características de este sensor es que puede ser usado para la estimación de la temperatura ambiente. [17]



Figura 13. Sensor BME280 de Libelium. [17]

Tabla 4. Características generales Sensor BME280 [17]

Características	Sensor de Temperatura	Sensor de Humedad	Sensor de Presión
Rango de funcionamiento temperatura	-40 a +85 °C	-40 a +85 °C	-40 a +85 °C
Rango de temperatura de precisión	0 a +65 °C	0 a +65 °C	0 a +65 °C
Presión Absoluta	-	-	±0,1 kPa (0 ~ 65 °C)
Precisión	±1 °C (rango 0 °C ~ +65 °C)	< ±3% HR (a 25 °C, rango 20 ~ 80%)	-

Consumo típico	1 μ A de medición	2,8 μ A de medición	2,8 μ A de medición
Consumo máximo	1,8 μ A de medición	1,8 μ A de medición	4,2 μ A de medición
Tiempo de respuesta	1,65 segundos (respuesta del 63 % de +30 a +125 °C)	(63% del paso 90% a 0% o 0% a 90%): 1 segundo	-
Histéresis	-	\pm 1% HR	-

- **Sensor de Monóxido de Carbono**

Este sensor tiene funcionalidades importantes de desempeño en su modo de trabajo, el modelo es el 4-CO-500 indicado en la Figura 14. Este tiene un modelo de trabajo donde la corriente es linealmente proporcional al volumen fraccional de monóxido de carbono CO [19]. Adicional se muestra las características técnicas y de funcionamiento en la Tabla 5.



Figura 14. Sensor de Monóxido de Carbono (CO) [19]

Tabla 5. Características generales del sensor de Monóxido de Carbono (CO) [19]

Rango de Temperatura	-20 a +50 °C
Humedad	15 a 90% RH
Rango de Presión	90 a 110 kPa
Vida Útil	5 años
Rango Nominal	0 a 500 ppm
Carga Máxima	2000 ppm
Tiempo de respuesta	\leq 30 segundos
Sensibilidad	70 \pm 15 nA/ppm
Precisión (condiciones ideales)	\pm 1 ppm* (condiciones ideales)

- **Sensor de Dióxido de Carbono**

El sensor llamado INE20-CO2P-NCVSP, es un sensor que utiliza la técnica NDIR (Infrarrojo no Dispersivo) lo cual permite controlar la presencia de dióxido de carbono o hidrocarburos, muy bueno ya que mediante el uso del infrarrojo puede detectar el gas disperso en el ambiente. Se muestra a continuación el sensor en la Figura 15 y sus características importantes en la Tabla 6. [19]



Figura 15. Sensor de Dióxido de Carbono (CO2) [19]

Tabla 6. Características generales del sensor de Dióxido de Carbono (CO2) [19]

Rango de Temperatura	-20 a +60 °C
Humedad	0 a 95 % RH
Rango de Presión	90 a 110 kPa
Vida Útil	>= 5 años
Rango Nominal	0 a 500 ppm
Tiempo de respuesta	<= 60 segundos
Tiempo de calentamiento	60 segundos a 25 °C
Precisión (condiciones ideales)	± 50 ppm* (0-2500 rango de ppm)

2.3.4 Gateway

Este dispositivo es la puerta de enlace entre la red y e internet, para este análisis se consideró el uso del módulo **MCI Xbee Explorer** que es una unidad USB a serial, este dispositivo es compatible con todos los módulos Xbee versiones estándar y Pro. Tiene como objetivo la comunicación entre varios dispositivos Xbee y un PC, además de tener acceso directo a los pines seriales del Xbee. Su uso es bastante sencillo, se inserta un cable mini USB al módulo Xbee y directo al puerto USB del computador. [18]

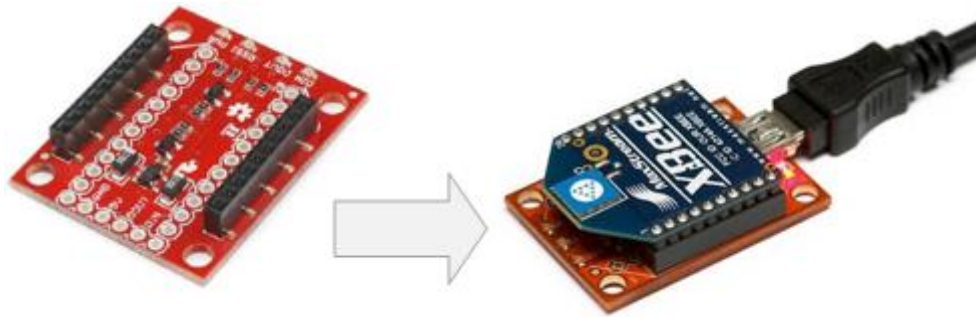


Figura 16. Modulo Xbee Explorer [18]

2.4 Arquitectura de la red

La arquitectura de la red de sensores inalámbricos se presenta en la Figura 17. Representa la interconexión entre los componentes mencionados en la sección 2.3, donde los tres sensores se deben conectar directamente a la mota de Libelium, y el módulo Xbee3 Pro trabajando en cada uno, tanto en los nodos sensores como en el nodo coordinador. Este nodo coordinador enlazado al Gateway.

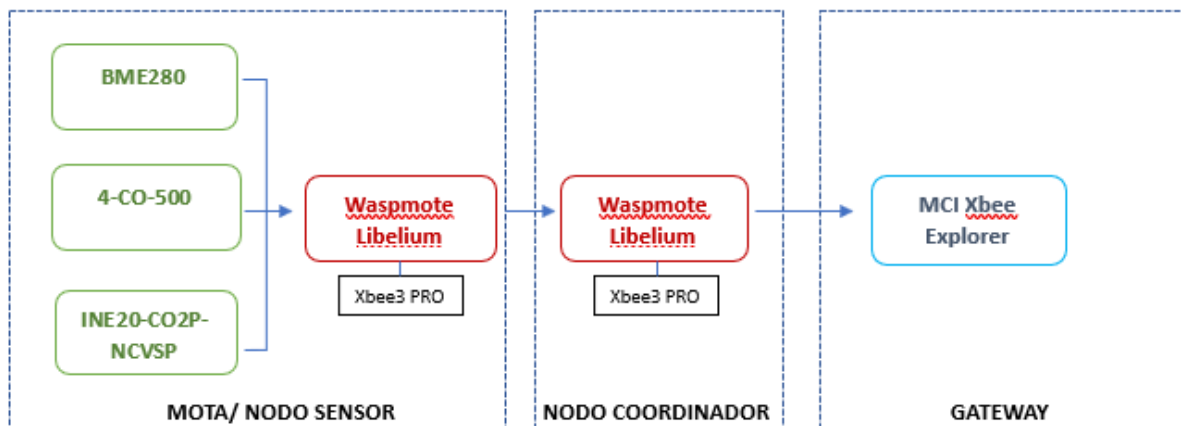


Figura 17. Arquitectura de hardware propuesta para la red de sensores inalámbricos

2.5 Análisis de Propagación

Los modelos de propagación de radiofrecuencia aparecen por la necesidad de modelar una zona geográfica de terreno irregular y así poder conocer las pérdidas a través del enlace "Path Loss" [20]. Este análisis se basará específicamente en tres modelos usados en zonas con alta densidad de vegetación, influyen factores como la topografía del

terreno, los obstáculos como árboles, la cantidad de hojas en cada uno etc., son causa para que la señal se pierda. Es por esto por lo que los modelos de propagación propuestos se enfocan en la atenuación sobre señales que pasen a través de follajes o campos de vegetación boscosos.

Partiendo de las características que se evaluarán en este estudio se decidió tomar en consideración los siguientes modelos de propagación:

- **Modelo de Obstrucción vegetal única (UIT)**

Este modelo fue considerado en la recomendación (UIT-R P.833-10). Se expresa cuando la separación del enlace entre el transmisor y receptor esté por debajo de los 400 metros [19] [21], de este modo, se garantiza que la señal inalámbrica se propague en medio de los árboles. De los 3 casos en donde se puede aplicar este modelo se va a analizar 2, los cuales se detalla a continuación:

- a) Frecuencias entre 30 MHz a 60 GHz**

Caso donde un extremo ya sea en transmisión o recepción se encuentra en el interior de la vegetación o zonas arboladas y el otro extremo está fuera de dicha zona. [21]. La ecuación 2.1 representa la atenuación debido a la vegetación.

$$L_{veg} = Lm(1 - e^{-\frac{d*\gamma}{Lm}}) \quad (2.1)$$

donde:

L_{veg} es la pérdida total por exceso de vegetación en (dB)

Lm es la atenuación máxima de la zona en (dB)

d es la parte de la trayectoria en (m)

γ es la atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m).

- b) Frecuencias hasta 3 GHz**

Cuando ni transmisor ni receptor están en zona arbolada, pero hay vegetación en alguna parte de la trayectoria. La ecuación 2.2 detalla la variante de la atenuación por follaje.

$$L_{veg} = Lm(1 - e^{-\frac{d*\gamma}{Lm}}) \quad (2.2)$$

Modelo Weissberger

Este modelo funciona en el rango de 230 MHz hasta 95 GHz, llamado también como modelo de decaimiento exponencial modificado, de acuerdo con los estudios empíricos ya establecidos se considera que el modelo es aplicable en trayectorias en donde existen árboles densos y las señales son obstruidas por estos y existe difracción dentro de esta zona. La atenuación estimada por Weissberger es adicional a las pérdidas por espacio libre y cualquier otra pérdida que no se deba a la vegetación. [19] [22]

La ecuación 2.3 dependiendo del escenario a analizar es la siguiente:

$$A_{veg} = \begin{cases} 1.33f^{0.284}d_f^{0.588} & 14 < d_f \leq 400m \\ 0.45f^{0.284}d_f & 0 < d_f \leq 14m \end{cases} \quad (2.3)$$

donde:

A_{veg} es la pérdida a causa de la vegetación del bosque en (dB)

f es la frecuencia en (GHz)

d_f es la profundidad en la vegetación a lo largo de la trayectoria en (m).

- **Multipath fading (Desvanecimiento por múltiples trayectos)**

Este modelo surge cuando las señales llegan a su receptor a través de múltiples caminos en este aspecto bajo los efectos de (pérdida por absorción, difracción, reflexión y dispersión), también es conocido como desvanecimiento lento (slow fading) [19]. Su estudio se enfoca analizando la frecuencia de operación del enlace y la fórmula de modelo está en la ecuación 2.4.

$$L_{Multitrayecto}(dB) = 10 * \gamma \log(d) + L_{FSL}(1metro) + L_{absorción} \quad (2.4)$$

dónde:

γ es el exponente de pérdida por dispersión

$L_{absorción}$ es la pérdida de la señal por el follaje

El exponente de pérdidas por dispersión y las pérdidas por absorción se indica en la Tabla 7.

Tabla 7: Especificaciones de pérdidas en función de la aplicación [19]

Aplicación para Exteriores	Exponente de Dispersión	Pérdidas por Absorción (dB)
Espacio libre	2	0
Presencia de árboles	3 a 4	10 a 20
Edificios	4	0

2.6 Diseño de la WSN

Durante la investigación realizada en los anteriores capítulos se pudo analizar los componentes de la red de sensores y sus características técnicas, tomando en cuenta todos estos parámetros es necesario realizar un estudio de propagación con el fin de conocer nivel de señal y comunicación estable entre los nodos sensores para que la información que se va a enviar no se pierda y la red sea eficiente.

El nodo sensor elegido bajo el módulo Xbee3 Pro trabaja en 2.4Ghz, puede llegar a transmitir hasta 250kbps con una sensibilidad de -103 dBm y una potencia de transmisión de 79.43 mW (19 dBm) de acuerdo con lo revisado en la Tabla 3.

El diseño manifestado como se indicó debe garantizar la comunicación, en este caso, se expone el escenario a un entorno real del parque Guanguiltagua y se debe tener en cuenta la presencia de ruido en el ambiente por consiguiente se debe calcular la potencia mínima de recepción en los nodos. Usando las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 la relación señal a ruido (SNR) es de 3 dB y su factor de ruido (NF) es 11.5 dB se realizará el estudio necesario para comprobar cuantos dispositivos Xbee 3.0 Pro son necesarios en el área planteada.

En la ecuación 2.5 se expresa la potencia mínima y S define la sensibilidad del lado del receptor:

$$P_{Rxmin} = S + NF + SNR \quad (2.5)$$

$$P_{Rxmin} = -103 \text{ dBm} + 11.5 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$$

$$P_{Rxmin} = -88.5 \text{ dBm}$$

Se usará la ecuación 2.6 para demostrar el presupuesto de enlace del estudio:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{C_{Tx}} - L_{C_{Rx}} - L_p \quad (2.6)$$

$$P_{Rx} = 19dBm + 2dBi + 2dBi - 0.5dB - 0.5db - L_p$$

$$-88.5dBm = 22dBm - L_p \quad (2.7)$$

donde:

L_p corresponde a las pérdidas de propagación a calcular

L_{Rx} y L_{Tx} son las pérdidas en los conectores y cables.

G_{Tx} y G_{Rx} son la ganancia de las antenas en transmisión y recepción respectivamente.

Entre los modelos de propagación estudiados en la anterior sección se ha determinado usar el modelo de propagación "Multipath Fading" debido al comportamiento de todos los factores a considerar con respecto a pérdidas en zonas boscosas y alta densidad de follaje.

El modelo de propagación elegido es el más completo comparado con los otros modelos analizados para sectores con basta vegetación ya que permite calcular pérdidas con parámetros como la reflexión, refracción y dispersión en la señal. De acuerdo con lo estudiado en la sección 1.4.2.2 respecto al estándar de Zigbee, para este cálculo experimental se elegirá de referencia la frecuencia central. Comprobando la estructura de canales de IEEE 802.15.4 se trabajará con un valor de 2.442 GHz, en el cálculo real este valor puede variar dependiendo la disponibilidad de que canal inalámbrico que no se encuentre saturado.

$$L_{Multitrayecto}(dB) = 10 * \gamma \log(d) + L_{FSL}(1metro) + L_{absorción} \quad (2.8)$$

La Pérdida en el Espacio libre " L_{FSL} " es proporcional al cuadrado de la distancia y también proporcional al cuadrado de la frecuencia. Aplicado a decibeles, resulta la siguiente ecuación:

$$L_{FSL} = 20\log(d) + 20\log(f) + K \quad (2.9)$$

donde:

K es una constante que depende de las unidades de d y f .

Como es necesario analizar las pérdidas en el espacio libre para 1 metro la ecuación 2.9 se modifica de la siguiente manera para que f este en MHz y d en metros como en la ecuación 2.10:

$$L_{FSL} = 20 \log(f) - 27.55 \quad (2.10)$$

$$L_{FSL} = 20 \log(2450) - 27.55$$

$$L_{FSL} = 40.23 \text{ dB}$$

El exponente de perdidas por dispersión (γ) y las perdidas por absorción se muestran en la Tabla 7 revisada en la sección 2.9, estos elementos se utilizarán para el cálculo de la distancia mínima y máxima necesaria de cada sensor en presencia de árboles.

2.6.1 Cálculo del enlace entre nodos sensores

Se calcula los valores para el mejor escenario posible:

Se sustituye ($\gamma = 3$, $L_{\text{absorción}} = 10 \text{ dB}$) en la ecuación 2.8,

$$L_p(\text{dB}) = 10 * \gamma \log(d) + L_{FSL}(1\text{metro}) + L_{\text{absorción}}$$

$$L_p(\text{dB}) = 10 * 3 \log(d) + 40.23 + 10$$

$$L_p(\text{dB}) = 30 \log(d) + 50.23 \quad (2.11)$$

Se reemplaza la ecuación 2.11 en la ecuación 2.7,

$$-88.5 \text{ dBm} = 22 \text{ dBm} - (30 \log(d) + 50.23)$$

$$-88.5 = 22 - 30 \log(d) - 50.23$$

$$-88.5 = 22 - 30 \log(d) - 50.23$$

$$60.27 = 30 \log(d)$$

$$d \approx 102 \text{ m}$$

Ahora se calcula los valores para el peor escenario posible:

Se sustituye ($\gamma = 4$, $L_{\text{absorción}} = 20 \text{ dB}$) en la ecuación 2.8,

$$L_p(\text{dB}) = 10 * \gamma \log(d) + L_{\text{FSL}}(1\text{metro}) + L_{\text{absorción}}$$

$$L_p(\text{dB}) = 10 * 4 \log(d) + 40.23 + 20$$

$$L_p(\text{dB}) = 40 \log(d) + 60.23 \quad (2.12)$$

Se reemplaza la ecuación 2.12 en la ecuación 2.7,

$$-88.5 \text{ dBm} = 22 \text{ dBm} - (40 \log(d) + 60.23)$$

$$-88.5 = 22 - 40 \log(d) - 60.23$$

$$-88.5 = 22 - 40 \log(d) - 60.23$$

$$50.27 = 40 \log(d)$$

$$d \approx 18 \text{ m}$$

Como conclusión de los cálculos realizados se verifica que el alcance máximo para los nodos sensores en las peores condiciones, con un follaje denso de vegetación dentro del parque es de 18 metros de distancia, sin embargo, para el diseño indicado la superficie previa a este análisis no tiene mucha vegetación abundante y trabajará con una distancia de 102 metros entre cada nodo donde igual se asegura la comunicación sin pérdida de datos.

Con la premisa anterior se fundamenta este diseño y por ende se distribuirán las motas en el área definida del parque Guangüiltagua de Quito.

2.6.2 Enlace entre nodo Coordinador y Gateway

Para este análisis no olvidemos que el Gateway debe estar en un lugar que tenga energía eléctrica, que sea de fácil acceso y seguro. Como estudio de campo se determinó que el enlace Coordinador-Gateway no será a través del bosque. Se usará el exponente de dispersión y las pérdidas de absorción según la Tabla 7 para el espacio libre, con línea de vista directa sin obstáculos de por medio. Para ello se realiza los cálculos siguientes:

Se sustituye $\gamma = 2$, $L_{\text{absorción}} = 0\text{dB}$ en la ecuación 2.8,

$$L_p(\text{dB}) = 10 * \gamma \log(d) + L_{\text{FSL}}(1\text{metro}) + L_{\text{absorción}}$$

$$L_p(\text{dB}) = 10 * 2 \log(d) + 40.23$$

$$L_p(\text{dB}) = 20 \log(d) + 40.23 \quad (2.13)$$

Se reemplaza la ecuación 2.13 en la ecuación 2.7,

$$-88.5\text{dBm} = 22\text{dBm} - (20 \log(d) + 40.23)$$

$$-88.5 = 22 - 20 \log(d) - 40.23$$

$$70.27 = 20 \log(d)$$

$$d_{\text{máx}} \approx 3.3\text{km}$$

2.7 Localización geográfica de la red

Considerando el análisis anterior se realizará el respectivo despliegue y posicionamiento de la red en el área establecida, se utilizará el radio de cobertura de 102 metros para cada nodo en nuestra superficie de $0,5 \text{ km}^2$, se necesitará de 53 motas para cubrir toda el área. Como se había mencionado se usará una topología en malla para brindar redundancia a la WSN y se colocará los dispositivos en forma ordenada.

De las 53 motas Libelium con módulos Zigbee 3.0 pro elegidas, 52 tienen la funcionalidad de nodos sensores y 1 como nodo coordinador, partiendo de estas consideraciones con la ayuda de Google Earth se procede a ubicar cada nodo como en la Figura 17.



Figura 17. Ubicación geográfica de los nodos

Por lo expuesto anteriormente, se puede asegurar que los nodos colocados cumplen con el objetivo de cubrir los $0,5 \text{ km}^2$ de la superficie indicada dentro del parque Guangüiltagua de la ciudad de Quito.

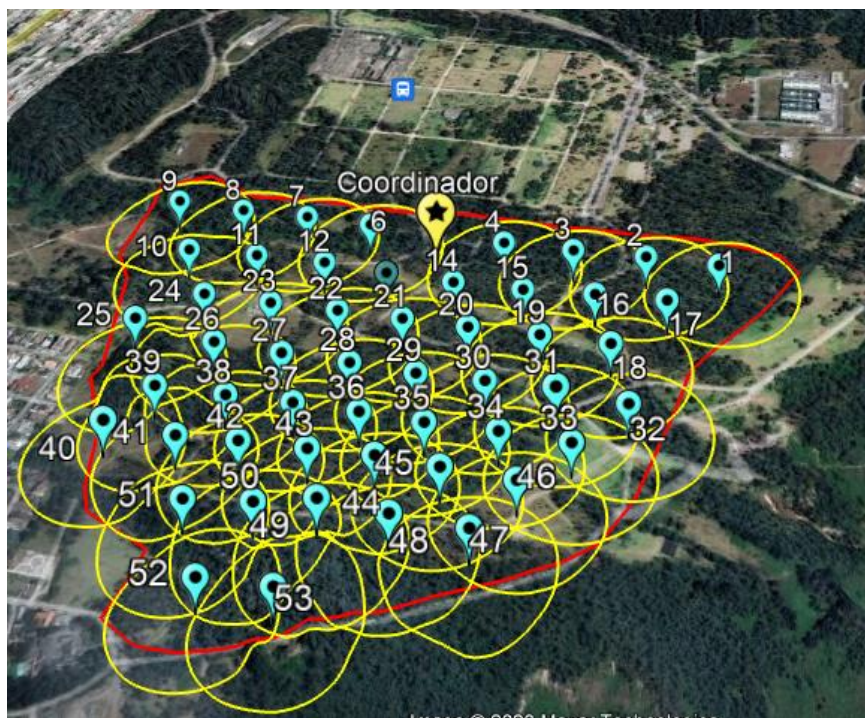


Figura 18. Área de cobertura de señal de la WSN

Adicional a la verificación geográfica de la red de sensores detallada, se debe asegurar la comunicación con el Gateway que es que encargado de procesar y mostrar mediante un PC toda la información recolectada por el nodo coordinador. Inicialmente se realizó el diseño colocando el Gateway en la oficina principal de administración del parque, sin embargo, al no tener línea de vista directa con el nodo coordinador más la topografía y el follaje en el trayecto no eran buenos, se determinó que la mejor ubicación sería en un sector a 615 metros donde poseen instalaciones adecuadas ya que se cuenta con cuarto de equipos y una torre celular instalada. Se debe usar esta torre para colocar el Gateway a una altura de 30 metros y asegurar al menos el 80% de la primera zona de Fresnel.

Con el análisis de propagación realizado se corrobora que es factible colocarlo en dicho lugar asegurando la comunicación Gateway-Coordinador. En la Figura 19 se puede observar el trayecto de este enlace y en la tabla de coordenadas se encuentra en la parte de anexos de este documento.

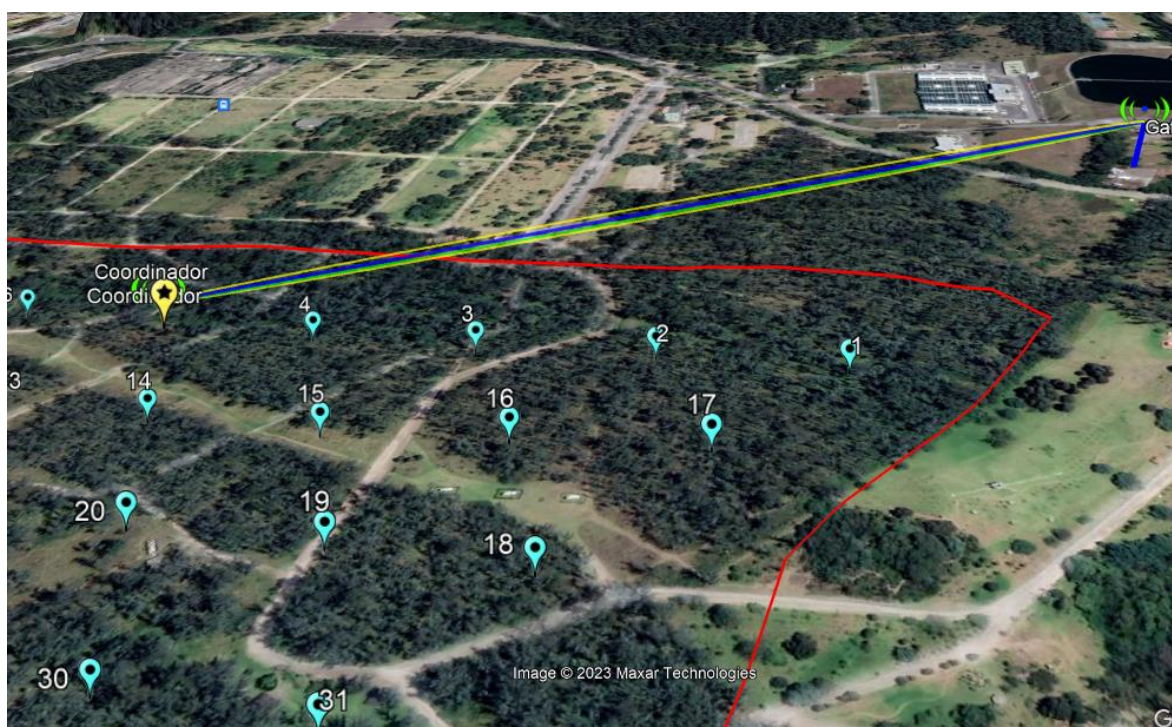


Figura 19. Enlace entre nodo Coordinador y Gateway

La distancia entre el nodo coordinador y el Gateway es de 615 metros, para comprobar de manera más detallada este último radioenlace se realizó pruebas mediante Radio Mobile con el fin de asegurar la factibilidad de comunicación dentro del perfil topográfico de este enlace punto a punto, configurando los parámetros previamente calculados y corroborando línea de vista directa sin problemas. En la Tabla 8 se puede apreciar los parámetros utilizados dentro del diseño.

Tabla 8. Presupuesto de potencia para un enlace de 615 metros (Gateway-Coordinador)

DATOS	ELEMENTOS	VALORES
Distancia del Enlace: 615 m Frecuencia: 2.442 GHz	Potencia de Transmisión	19 dBm
	Cable y Conector Tx	0.5 dB
	Ganancia antena Tx	2 dBi
	Ganancia Antena Rx	2 dBi
	Cable y Conector Rx	0.5 dB
	Sensibilidad del Rx	-103 dBm
	Pérdidas en el espacio libre (FSL)	40.23 dB
	Total (Margen)	84.77 dB

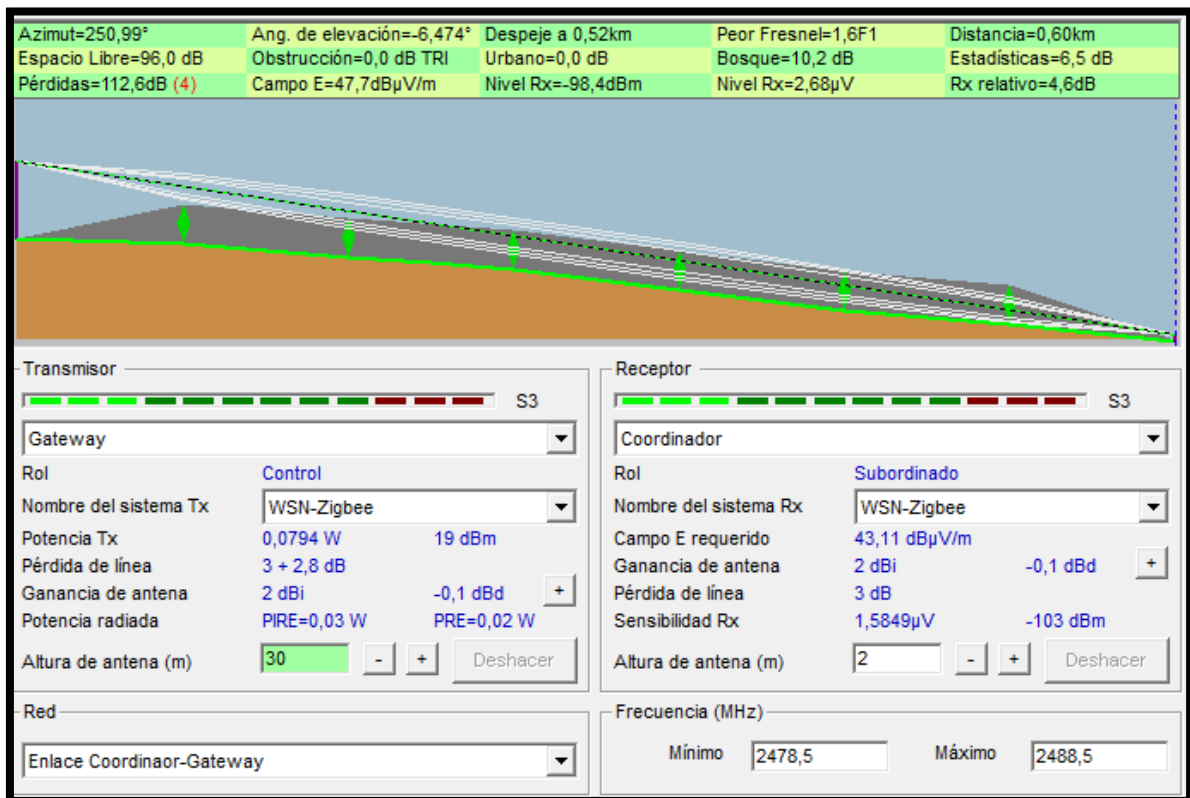


Figura 20. Comprobación del enlace Coordinador-Gateway en Radio Mobile.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se analizará los resultados de acuerdo con el diseño de la red de sensores inalámbricos, para esto se realizó un análisis para conocer la distribución de la red y comprobar en capa física su funcionamiento y además para el análisis de capas de red y transporte dentro de la comunicación inalámbrica en la red diseñada. El uso y funcionamiento del protocolo escogido RPL por sus características de adaptación a cualquier topología y crear rutas rápidamente.

Los factores de elección del software para estas pruebas son importantes, ya que se observó principalmente que sea de libre licenciamiento y en cuanto a interfaz gráfica que sea amigable y fácil de usar para lo que se tiene planteado.

3.1 Simulador Cooja

Cooja es un simulador especialmente diseñado para redes de sensores inalámbricos y trabaja en el sistema operativo de ContikiOS - NG, programado en Java. Para un mayor alcance del uso e instalación de este software, en [23] se explica cómo hacerlo.

En estas pruebas se verificó el envío de paquetes entre las motas y la correcta comunicación entre todas, así mismo validar la detección de parámetros ambientales en los sensores de cada nodo del sistema. Se presenta a continuación las pruebas realizadas:

3.2.1 Pruebas de Comunicación entre nodos

El objetivo es determinar el correcto comportamiento de la red de sensores inalámbricos dentro de su capa de red y capa transporte. Se realizó un modelado de dos ambientes, primero en un escenario normal con todos los nodos funcionando y segundo en un escenario donde 2 motas se encuentren dañadas, dando una idea de que estos nodos no podrán detectar parámetros ambientales en ese momento, con ello garantizar redundancia en el diseño y comparar resultados con el número total de paquetes recibidos en el lado del nodo coordinador.

En la Figura 21 se muestra la topología usada para esta prueba y en la Figura 22 el entorno de personalización del software.

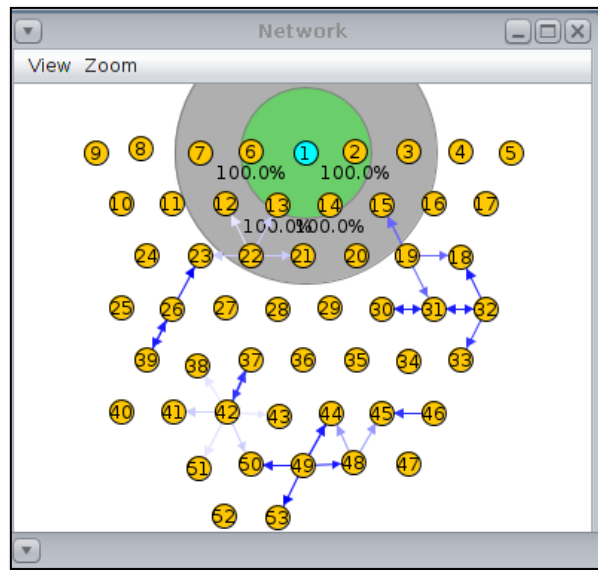


Figura 21. Despliegue de los nodos en el simulador Cooja. Fuente: El autor

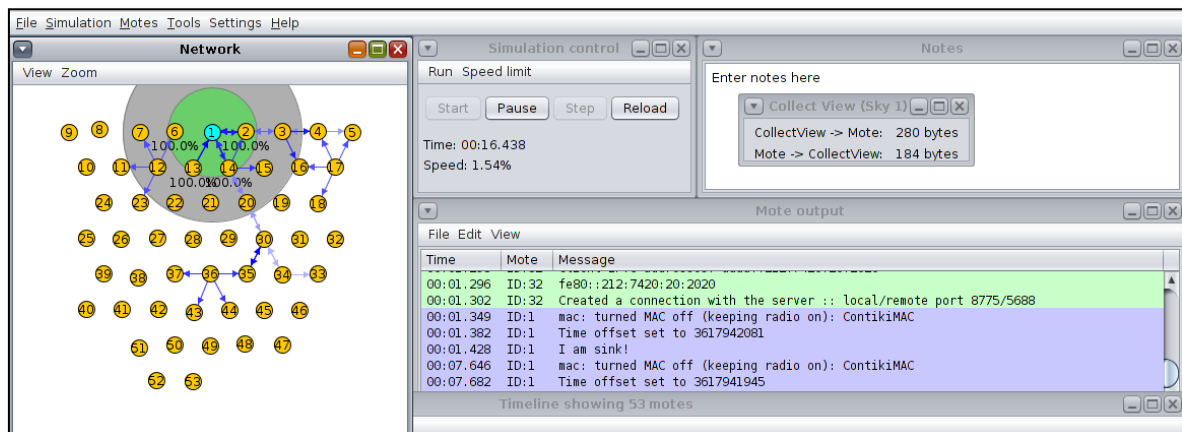


Figura 22. GUI Interfaz de trabajo del simulador Cooja.

Se utilizó las motas llamadas SKY que brindan características similares a las motas investigadas en este trabajo, se cargó el script con el protocolo de enrutamiento RPL, ideal para lo que se necesitamos. La configuración de la red de sensores es importante y el uso de este protocolo está previsto en este software.

Para los siguientes resultados se determinó un tiempo de 5 minutos dentro del entorno de la simulación que es diferente del computador que usaremos y tiene correspondencia con los siguientes datos y escenarios:

Resultados en condiciones normales

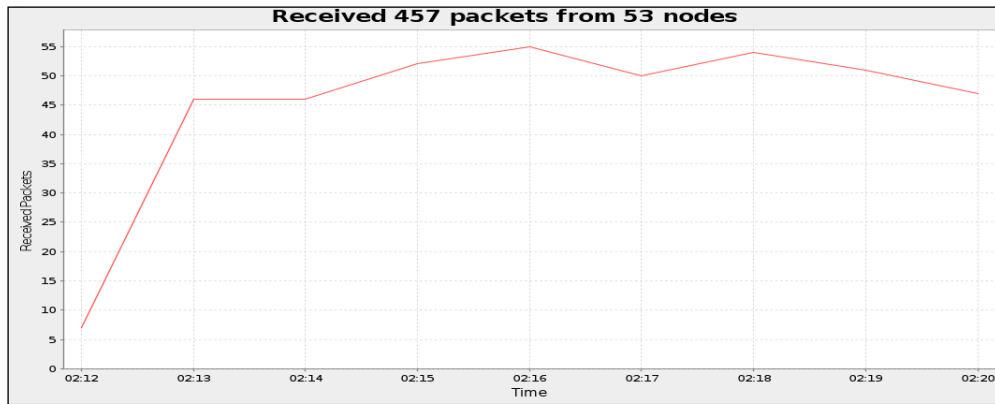


Figura 23. Total, de paquetes recibidos en la red. Fuente: El autor

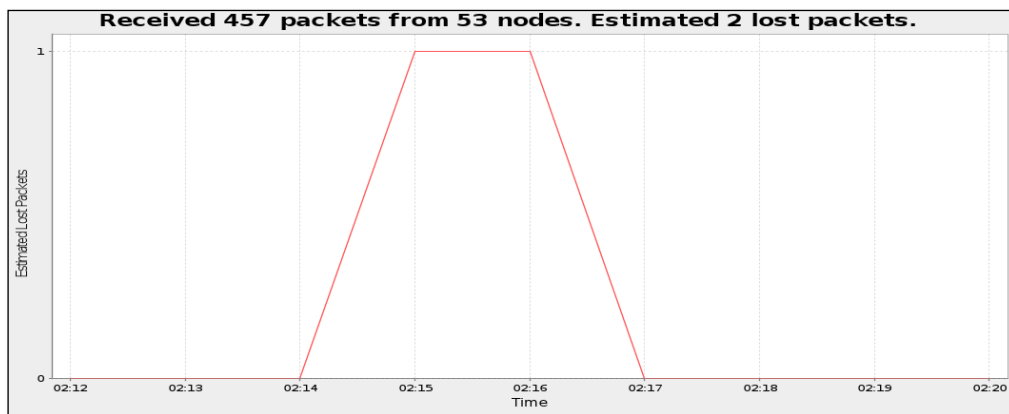


Figura 24. Estimación de paquetes perdidos durante la trayectoria. Fuente: El autor

Se comprueba que la eficiencia de la red es muy buena durante el tiempo de simulación, discriminamos los paquetes perdidos y se tiene un porcentaje de 99.57% de efectividad en la recepción de los paquetes, se cumple el diseño planteado y se puede indicar que la comunicación entre los 53 nodos es buena.

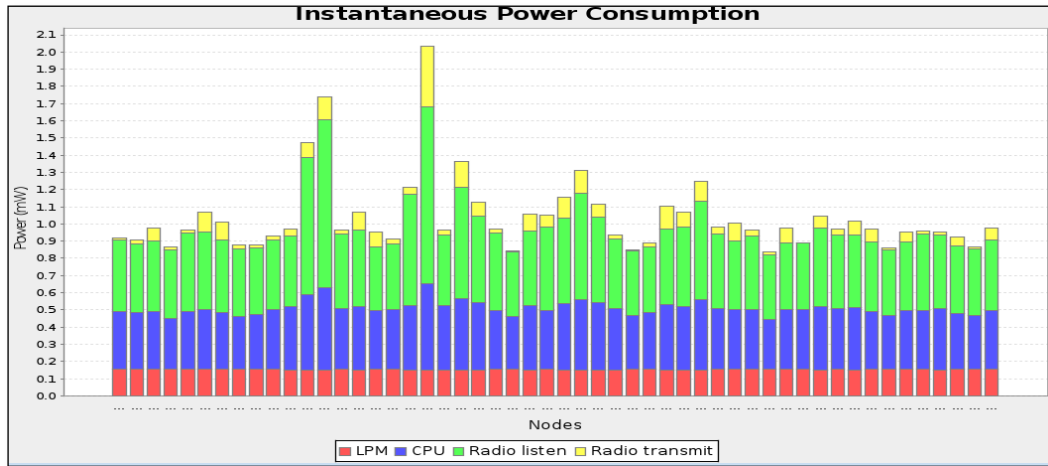


Figura 25. Energía consumida de cada nodo en (mW). Fuente: El autor

Igualmente se puede asegurar que el consumo de energía es bajo revisando las cualidades de cada mota en transmisión, recepción y hardware especificados. Este valor va a variar durante el tiempo dependiendo si el nodo está en modo escucha, dormido o en modo funcional y nos da una pauta para conocer el estado de nuestra red.

Resultados en condiciones adversas

Se simuló nuestra red de sensores asumiendo que 2 de ellos se encuentran dañados para comprobar su funcionamiento.

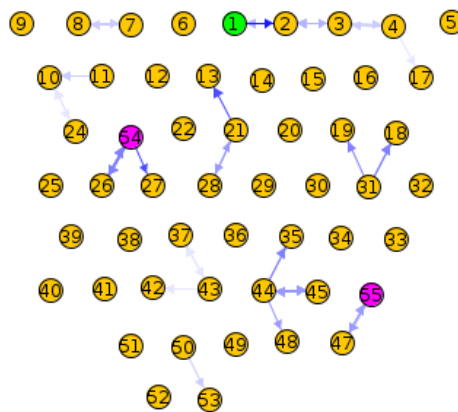


Figura 26. Topología de la WSN con 2 nodos sensores dañados. Fuente: El autor

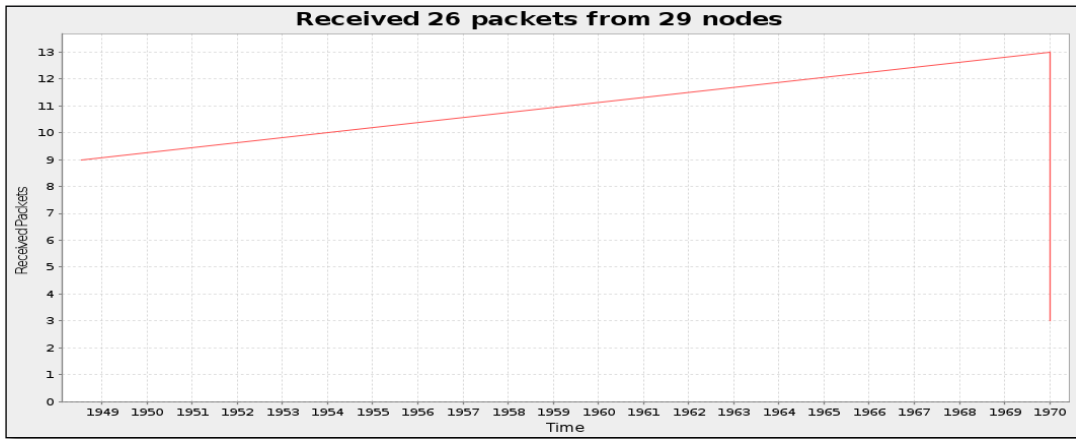


Figura 27. Paquetes recibidos en la red en condiciones adversas. Fuente: El autor

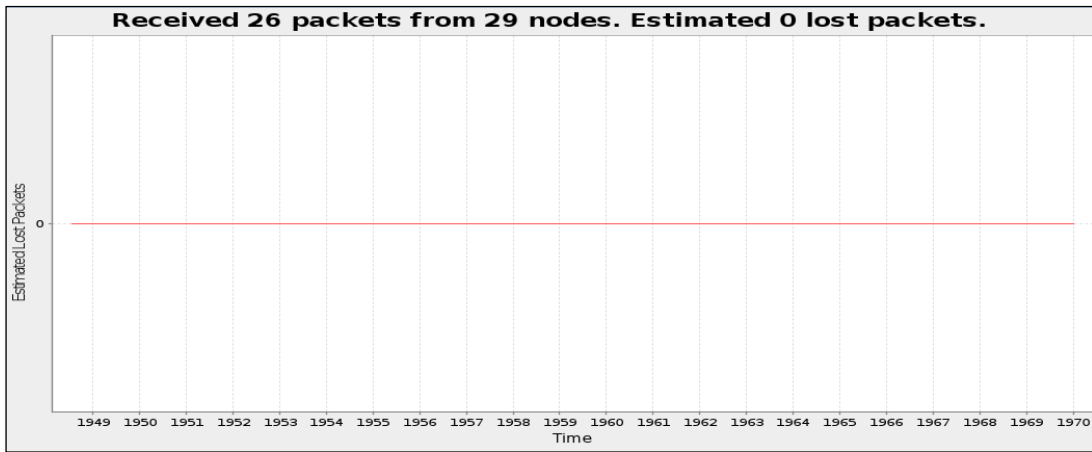


Figura 28. Escenario adverso de verificación de paquetes perdidos durante la trayectoria.

Fuente: El autor

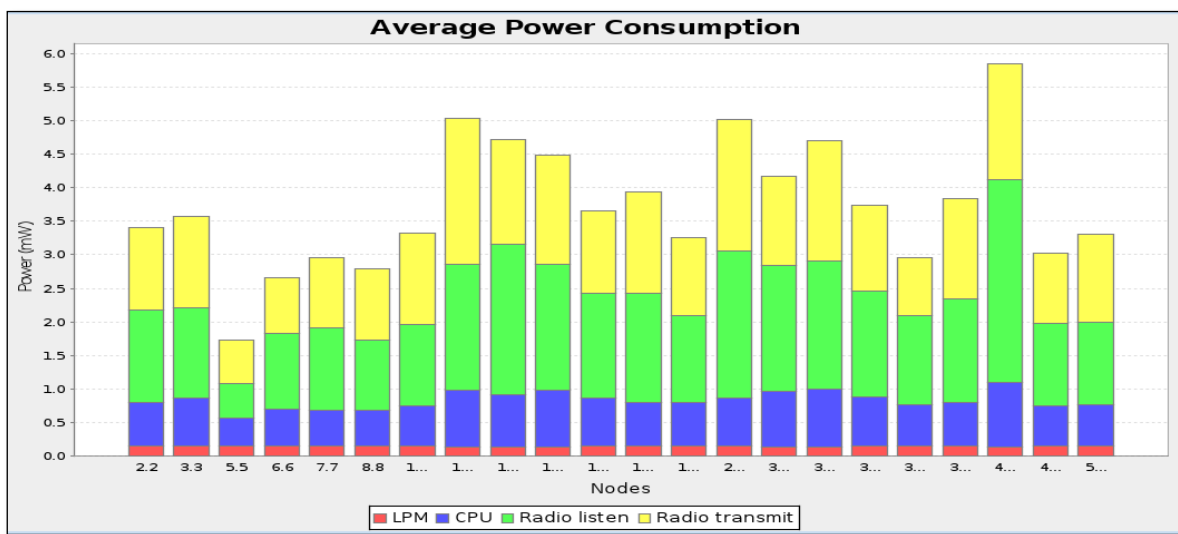


Figura 29. Consumo promedio de energía de los nodos sensores. Fuente: El autor

Se ratifica que para este escenario la transmisión y recepción de la señal inalámbrica es eficiente a pesar de que la comunicación demora más en realizarse durante el trayecto. Esto se debe a la mayor cantidad de saltos de cada nodo para poder buscar un nodo vecino disponible, con los 2 nodos dañados en la red existen alternativas para buscar el mejor camino y la ruta de más bajo costo, así que por las características que tiene cada sensor usando el protocolo RPL, se puede afirmar que existe redundancia en la red diseñada.

Además, no hay pérdida de paquetes en el tiempo establecido aun con menor cantidad de paquetes, se tiene disponibilidad. El consumo de energía es mucho mayor por el procesamiento adicional de debe realizar cada mota al enviar el tráfico y responder a las solicitudes de forma rápida.

3.2.2 Pruebas de Detección de los nodos

Uno de los principales factores del simulador es realizar pruebas con las mismas características de las motas, primero en el entorno simulado y luego poder aplicarlas en la realidad. En la Figura 30 se puede observar la salida que cada nodo el estar comunicándose entre sí, y en la Figura 31 el mensaje que trasmite cada mota en ese instante corroborando que los sensores funcionen para el efecto propuesto.

Cada mota está programada dependiendo la necesidad, y se puede visualizar la información transmitida y recibida entre cada uno de ellos correlacionando la detección con la transmisión.

Time	Mote	Message
00:00.868	ID:12	Rime started with address 0.18.116.12.0.12.12.12
00:00.877	ID:12	MAC 00:12:74:0c:00:0c:0c:0c Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 12.
00:00.886	ID:12	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 26, CCA threshold -45
00:00.896	ID:12	Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:0212:740c:000c:0c0c
00:00.898	ID:12	Starting 'SHT11 test'
00:00.899	ID:49	Rime started with address 0.18.116.49.0.49.49.49
00:00.908	ID:49	MAC 00:12:74:31:00:31:31:31 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 49.
00:00.911	ID:29	Rime started with address 0.18.116.29.0.29.29.29
00:00.917	ID:49	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 26, CCA threshold -45
00:00.920	ID:29	MAC 00:12:74:1d:00:1d:1d:1d Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 29.
00:00.928	ID:49	Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:0212:7431:0031:3131
00:00.929	ID:29	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 26, CCA threshold -45
00:00.930	ID:49	Starting 'SHT11 test'
00:00.937	ID:22	Rime started with address 0.18.116.22.0.22.22.22
00:00.940	ID:29	Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0000:0212:741d:001d:1d1d
00:00.941	ID:29	Starting 'SHT11 test'

Figura 30. Información de estado de activación y comunicación de cada mota.

Fuente: El autor

Mote output		
Time	Mote	Message
00:02.451	ID:50	Humedad relativa: 32%
00:02.467	ID:28	Temperatura: 26 Grados Celsius !TEMPERATURA NORMAL!
00:02.468	ID:28	Humedad relativa: 92%
00:02.515	ID:11	Temperatura: 17 Grados Celsius !TEMPERATURA NORMAL!
00:02.517	ID:11	Humedad relativa: 74%
00:02.528	ID:31	Temperatura: 71 Grados Celsius !ALERTA AMARILLA!
00:02.530	ID:31	Humedad relativa: 25%
00:02.538	ID:35	Temperatura: 81 Grados Celsius !ALERTA AMARILLA!
00:02.540	ID:35	Humedad relativa: 30%
00:02.543	ID:44	Temperatura: 93 Grados Celsius !ALETA ROJA! **FUEGO**
00:02.543	ID:45	Temperatura: 93 Grados Celsius !ALETA ROJA! **FUEGO**
00:02.544	ID:44	Humedad relativa: 36%
00:02.545	ID:45	Humedad relativa: 36%
00:02.561	ID:2	Temperatura: 20 Grados Celsius !TEMPERATURA NORMAL!
00:02.563	ID:2	Humedad relativa: 80%
00:02.569	ID:30	Temperatura: 91 Grados Celsius !ALETA ROJA! **FUEGO**
00:02.571	ID:30	Humedad relativa: 35%
00:02.575	ID:6	Temperatura: 88 Grados Celsius !ALERTA AMARILLA!
00:02.577	ID:6	Humedad relativa: 34%
00:02.652	ID:18	Temperatura: 28 Grados Celsius !TEMPERATURA NORMAL!
00:02.653	ID:18	Humedad relativa: 96%

Figura 31. Información de los parámetros de Temperatura y Humedad relativa de cada mota. Fuente: El autor

En la Figura 32 se muestra parte del proceso principal del código de detección y de temperatura y humedad relativa en la simulación:

```

PROCESS(test_sht11_process, "SHT11 test");
AUTOSTART_PROCESSES(&test_sht11_process);

PROCESS_THREAD(test_sht11_process, ev, data)
{
    static struct etimer et;
    /*unsigned rh;*/
    unsigned rn;

    PROCESS_BEGIN();
    /*t2c_disable();*/
    sht11_init();

    for (etimer_set(&et, CLOCK_SECOND); etimer_reset(&et) ) {
        PROCESS_YIELD();

        printf("Temperatura: %u Grados Celsius ",
            rn= rand((unsigned)(sht11_temp())) % 51 + 50);

        if (rn >= 90){
            printf(" !ALETA ROJA!          **FUEGO**\n");
        }else if (rn > 40 && rn < 90){
            printf(" !ALERTA AMARILLA! \n");
        }else{
            printf(" !TEMPERATURA NORMAL! \n");
        }
        /*rh = sht11_humidty();*/
        /*printf("Humedad relativa: %u%%\n",
            rand((unsigned) ((rh))) % 51 + 50); */

        if (rn >= 70 && rn <= 100){
            printf("Humedad relativa: %u%%\n", (unsigned)(rn-20)/2);
        }else if (rn > 30 && rn < 70){
            printf("Humedad relativa: %u%%\n", rn-10);
        }else{
            printf("Humedad relativa: %u%%\n", (unsigned)(rn-50)+2);
        }
    }
}

```

Figura 32. Script para detectar parámetros de temperatura y humedad a la salida de cada nodo sensor Sky. Fuente: El autor

3.2 Conclusiones

Considerando la obtención de un buen rendimiento en la red de sensores inalámbricos, se debe tener en cuenta la correcta elección de los componentes físicos que se van a ocupar en el diseño, esto se lo realiza para cada tipo de escenario, superficie y/o topología a diseñar. Se necesita conocer todos los factores importantes antes de su análisis tales como: la tecnología a usar, la topología, los protocolos de enrutamiento, comprobar si el follaje es denso o liviano en la zona boscosa, teniendo todo esto presente se tiene los resultados esperados.

Mediante el análisis teórico sobre factores climatológicos en el Distrito Metropolitano de Quito sobre incendios forestales, analizando todos los pros y contras se comprueba que la probabilidad de que ocurra un incendio dentro del parque Metropolitano Guangüiltagua forestal es moderada, por lo que es importante un modelamiento predeterminado para las pruebas de detección correcta de acuerdo con el diseño.

El estudio realizado, afirma que el sistema conformado por las 53 motas es viable para 50 hectáreas de terreno, se visualizó el efecto positivo que tiene las motas en la elección del protocolo de comunicación RPL y la topología en malla. Además, que con el estudio de propagación se asegura la posición de los nodos determinando la máxima potencia que puede recibir cualquier nodo receptor con las condiciones de ruido y de atenuación que se tiene en este escenario.

Al realizar las pruebas de simulación se comprobó que la red cuenta con redundancia de comunicación ya sea por los diferentes escenarios y las deficiencias físicas que pueda haber, adicional de poder alcanzar el rendimiento esperado en la red diseñada.

Con los resultados de la Figura 27 y Figura 28, en un escenario adverso se comprueba que el uso del simulador Cooja (Contiki) fue fundamental y de mucha ayuda para poder visualizar parámetros no solo de capa física sino también de capa transporte, revisar logs y mensajes de cada nodo sensor. Se comprobó que el diseño cumple con el objetivo planteado, ya que en las pruebas simuladas en varios entornos nos demuestra que las motas son factibles, crean nuevas rutas y son de bajo consumo energético importante para una futura implementación.

Se comprobó que la relación de temperatura y humedad están relacionadas entre sí y es por eso por lo que la detección es importante para determinar el inicio de un incendio forestal, analizando que no supere el umbral de 90°C que se definió y también de

analizar factores como CO₂ y CO que están presentes en el humo determinan la buena eficacia y eficiencia de la red.

3.3 Recomendaciones

Para un posicionamiento correcto de los nodos dentro del entorno a diseñar, se debe tener en cuenta el método de posicionamiento que mejor se adapta a nuestras necesidades. El terreno y la topología deben especificarse al inicio para evitar contratiempos y problemas en una propuesta de implementación.

Para un correcto coste de comunicación inalámbrica con el uso de Zigbee se recomienda analizar qué tipo de dato y protocolo se enviará hacia el Gateway; de acuerdo con eso el análisis de propagación de vital importancia para obtener un mayor alcance en la comunicación, disminuir el consumo de batería y menores retardos. De igual manera se recomienda tener en cuenta siempre la polarización de las antenas para determinar presupuesto en un enlace punto a punto.

Antes de realizar las pruebas de simulación en Cooja, tener en cuenta el consumo computacional del software, independientemente que se use una máquina virtual o directamente en un ambiente Linux, se recomienda memoria RAM y tarjeta de video avanzadas para no tener lentitud en la ejecución. En redes con número de nodos extensos, esto sería un problema.

Para un alcance o trabajo futuro en campo, se recomienda el uso del software XCTU de la empresa Digi, que es plataforma de configuración diseñada para los módulos XBee y Xbee PRO, que, al ser compatibles con varios modelos comerciales, se puede configurar los dispositivos físicamente, implementarlos en el área y con esto observar las características técnicas y se comunicación dentro de un entorno remoto y amigable.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), «Plan Específico de Gestión de Riesgos 2019-2030,» Instituto Geográfico Militar, Quito, 2019.
- [2] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), «Informe de Situación - No 031 cierre 2020 - Incendios Forestales,» SNGRE, Quito, 2021.
- [3] J. Atempa, A. Díaz, R. Ayala y V. Quintero, «Red de sensores inalámbrica para la detección de incendios forestales,» *Research in Computing Science*, nº 107, pp. 73-85, 2015.
- [4] Distrito Metropolitano de Quito, «Fondo Ambiental Quito,» Plan de Manejo Parque Metropolitano Guanguiltagua, 1 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.fondoambientalquito.gob.ec>. [Último acceso: 9 Julio 2021].
- [5] Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cuenca, «Ruta de intervención para articular la Gestión Ambiental en el GAD Cantonal de Cuenca,» Universidad del Azuay, Cuenca, 2019.
- [6] J. E. Peralta Arellano, «Plan de contingencia contra incendios forestales en el Sector de “El Batán”,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/15888>. [Último acceso: 06 08 2022].
- [7] FLACSO Sede Ecuador, «Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): Conocimiento e intervención pública del riesgo,» *Letras Verdes*, Vols. %1 de %21390-6631, nº 11, pp. 27-52, 2012.
- [8] Centro de Operaciones de Emergencia Metropolitano (COEM), «Informe del plan de prevención y respuesta para la época seca en Quito 2020,» Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Quito, 2020.
- [9] J. J. Vargas Rodríguez, «Incendios forestales en Quito: acción humana o acción de la naturaleza,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14884>. [Último acceso: 15 Diciembre 2022].
- [10] P. A. Albuja Mariño, «EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL PARQUE METROPOLITANO GUANGÜILTAGUA DE LA CIUDAD DE QUITO,» *UISRAEL Revista Científica*, vol. II, nº 1, pp. 11-30, 4 10 2015.
- [11] E. J. Guaña Moya, «Diseño de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura,» 9 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16809>. [Último acceso: 14 Agosto 2021].
- [12] J. Salazar, «Redes inalámbricas,» European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering, Barcelona, 2016.
- [13] J. Martin Moreno y D. Ruiz Fernandez, «Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4),» Alicante, 2007.

- [14] J. Teixeira, «Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection 2,» 13 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/105593>. [Último acceso: 07 Enero 2023].
- [15] . F. A. González Pazmín, W. A. Mosquera Luna y G. D. Useche Ospinal, «Diseño de una red inalámbrica de sensores para apoyar actividades de agricultura de precisión en el Jardín Botánico de Cali,» Universidad Autónoma de Occidente, Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10614/5085>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [16] . L. G. Cifuentes Rodríguez, «Cuantificación de las tasas de remoción de carbono y su acumulación en la biomasa aérea en los parques metropolitanos del Municipio de Quito,» Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, Quito, 2021.
- [17] Libelium, «Waspote Libelium,» 2011. [En línea]. Available: <https://development.libelium.com/waspote/>. [Último acceso: Enero 2023].
- [18] Digi XBee® 3, «Digi XBee3 RF Module,» Noviembre 2006. [En línea]. Available: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001543.pdf>. [Último acceso: 20 Enero 2023].
- [19] E. J. Barzola Solorzano y J. L. Cuadrado Gagñay, «Diseño y simulación de una red de sensores inalámbricos para la prevención de incendios forestales en el bosque protector cerro colorado en la ciudad de Guayaquil,» DSpace Repository, Guayaquil, 2017.
- [20] J. T. Treviño Cortés , «Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF,» Universidad de las Américas Puebla, Puebla, 2003.
- [21] Union Internacional de Telecomunicaciones (UIT), «Atenuación debida a la vegetación,» *RECOMENDACIÓN UIT-R P.833-10*, nº R00-SG03, pp. 1-35, 2021.
- [22] I. M. Zamora, «LinkedIn Corporation,» 19 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/nica2009/lecture-4-analisis-radioprop-p2>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [23] ANRG, «Contiki Tutorials,» 4 Noviembre 2016. [En línea]. Available: https://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Contiki_tutorials. [Último acceso: Diciembre 2022].

5 ANEXOS

ANEXO I. Tabla de coordenadas de los elementos de la red de sensores inalámbrica.

ANEXO I

ELEMENTOS	LATITUD	LONGITUD
<i>Gateway</i>	0°10'58.35"S	78°27'39.25"O
<i>Coordinador</i>	-0,185272421	-78,46514333
<i>Nodo 1</i>	-0,185435705	-78,46331521
<i>Nodo 2</i>	-0,185435705	-78,46331521
<i>Nodo 3</i>	-0,185435705	-78,46331521
<i>Nodo 4</i>	-0,185272421	-78,46514333
<i>Nodo 6</i>	-0,185272421	-78,46514333
<i>Nodo 7</i>	-0,185214553	-78,46701475
<i>Nodo 8</i>	-0,185530344	-78,46701471
<i>Nodo 9</i>	-0,185530344	-78,46701471
<i>Nodo 10</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 11</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 12</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 13</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 14</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 15</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 16</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 17</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 18</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 19</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 20</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 21</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 22</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 23</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 24</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 25</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 26</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 27</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 28</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 29</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 30</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 31</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 32</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 33</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 34</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 35</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 36</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 37</i>	-0,186234417	-78,46639419
<i>Nodo 38</i>	-0,187034661	-78,46644568
<i>Nodo 39</i>	-0,187871724	-78,46758997
<i>Nodo 40</i>	-0,187871724	-78,46758997

<i>Nodo 41</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 42</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 43</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 44</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 45</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 46</i>	-0,187034659	-78,46644567
<i>Nodo 47</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 48</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 49</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 50</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 51</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 52</i>	-0,187223035	-78,46578826
<i>Nodo 53</i>	-0,187223035	-78,46578826