



UNIVERSIDAD DE MENDOZA
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS DE MAESTRÍA EN TELEINFORMÁTICA

**“Modelización, análisis y selección
de tecnologías IoT para Smart
Farming regional mediante
ambientes de simulación”**

Autor: Darío Maximiliano Orozco

**Director: Dr. Ing. Pablo Javier Vidal
Codirector: Dr. Ing. Emmanuel Nicolás Millán**

San Luis - Noviembre 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios, todo lo que soy se lo debo a él. A toda mi familia, en especial a mi esposa Erica y a mis cinco hijos, por su amor y apoyo incondicional, y por ser la fuente inspiradora y movilizadora de mis actos.

A mi madre Hilda Ester por educarme con valores y convicciones y enseñarme el camino del esfuerzo y dedicación para lograr los objetivos.

A mis directores de tesis Dr. Ing. Pablo Javier Vidal y Dr. Ing. Emmanuel Nicolás Millán por su guía, dedicación para la concreción del presente trabajo, y al director de Posgrado Mg. Ing. Osvaldo Marianetti de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mendoza de la Maestría en Teleinformática, por el constante apoyo y predisposición en todo el proceso de gestación del trabajo de tesis.

Resumen

El concepto de la Agricultura Inteligente o Smart Farming en inglés surge como una necesidad del sector agrícola de incorporar nuevas tecnologías con el objetivo de incorporar herramientas que permitan potenciar la productividad del campo de manera eficiente y optimizar los procesos productivos del sector maximizando rendimientos y minimizando los costos. Con la utilización de las nuevas tecnologías emergentes aplicadas al agro y los recientes avances tecnológicos en el campo de Internet of Things - Internet de las Cosas (IoT), se le puede brindar al productor agrícola la posibilidad de digitalizar el campo para llevarlo a la agricultura inteligente del futuro.

El presente trabajo se basa en analizar el desempeño de las tecnologías IoT utilizadas en las Wireless Sensor Networks - Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) y establecer modelos comparativos mediante el uso de distintos escenarios de simulación de software para diferentes protocolos de comunicación y topologías de red aplicadas en Smart Farming, evaluando aquel que posea el mejor rendimiento de red para la recolección de datos del sector agrícola y con el menor costo de instalación posible.

Para lograr este cometido se buscó la herramienta de simulación más sólida y consistente de manera tal que nos permitiera evaluar escenarios del tipo real, para lo cual se seleccionó el simulador CupCarbon en combinación con la tecnología Lora, lo que arrojó los mejores resultados de acuerdo a las distintas pruebas realizadas.

Palabras Clave: Smart Farming, Sensores IoT, Simulador CupCarbon

ÍNDICE GENERAL

Resumen	3
I. Introducción	9
1.1 Planteamiento del Problema	10
1.2 Justificación	11
1.3 Objetivos	12
1.4 Objetivos Específicos	12
1.5 Hipótesis	13
1.6 Contexto general de la Tesis	13
II. Marco Teórico	14
2.1 Estado del arte	14
2.2 Sensores IoT	18
2.3 La agricultura inteligente basada en IoT	19
2.4 Modelo de Capas en Smart Farming	21
2.5 WSN en Smart Farming	23
2.5.1 Topologías WSN	23
2.6 Precision Farming	26
2.7 Ecosistema IoT para Smart Farming	27
2.7.1 Dispositivos IoT	27
2.7.2 Tecnología de la comunicación en Smart Farming	29
2.7.2.1 Protocolos en Smart Farming	31
2.7.2.2 Espectro en Smart Farming	33
2.7.2.3 Topología en Smart Farming	34
2.7.2.4 Escenarios de aplicación en Smart Farming	36
2.7.2.5 Desafíos en Smart Farming	39
2.8 Tecnologías LPWAN en Smart Farming	41
2.9 Simuladores	46
III. Metodología	50
3.1 Desarrollo	50
3.2 Comparación de Simuladores	51
3.3 Simulador CupCarbon	54
3.3.1 Características de CupCarbon	56
3.3.2 Lenguaje Senscript	58
3.3.3 Lista de Comandos	60
3.3.4 La Consola	60
3.3.5 Nodo sensor	62

3.3.6 Panel de radio	62
3.4 Métricas de Evaluación Cuantitativa	65
3.5 Experimentación	67
3.6 Descripción de los escenarios	68
3.6.1 Primer escenario	69
3.6.2 Segundo escenario	71
3.6.3 Tercer escenario	73
3.6.4 Cuarto escenario	80
3.6.5 Quinto escenario	84
IV. Resultados	86
4.1 Resultados Primer Escenario	86
4.2 Resultados Segundo Escenario	91
4.3 Resultados Tercer Escenario	95
4.4 Resultados Cuarto Escenario	98
4.5 Resultados Quinto Escenario	101
4.6 Costos Asociados al Proyecto	104
V. Conclusiones	106
VI. Bibliografía	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Infografía una granja inteligente en acción	15
Figura 2. Revoluciones de la agricultura	17
Figura 3. Componentes principales de la agricultura inteligente basada en IoT	20
Figura 4. Red Agrícola IoT	21
Figura 5. Relación entre capas en un desarrollo IoT	21
Figura 6. Tecnología de redes usadas en aplicaciones agrícolas	22
Figura 7. Topología Estrella	24
Figura 8. Topología Árbol	25
Figura 9. Topología Malla	26
Figura 10. Ecosistema IoT para la agricultura inteligente	27
Figura 11. Arquitectura común de un dispositivo IoT	28
Figura 12. Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica	30
Figura 13. Tecnologías inalámbricas, consumo de energía y distancia	31
Figura 14. Topología en Smart Farming	34
Figura 15. Aplicaciones de agricultura inteligente basada en IoT	35
Figura 16. Comunicación de extremo a extremo para agricultura inteligente	36
Figura 17. Tecnologías de comunicación de IoT	37
Figura 18. Tecnologías LPWAN con y sin licencia	37
Figura 19. Anchos de banda versus rango de todas las tecnologías	38
Figura 20. Ejemplo de escenario para las WSN basadas en LPWAN	45
Figura 21. Pantalla de Presentación CupCarbon	58
Figura 22. Pantalla Interfaz de Senscript	59
Figura 23. Consola	61
Figura 24. Panel de Parámetros de Radio	62
Figura 25. Panel de parámetros del dispositivo	64
Figura 26. Topología Estrella Primer Escenario	70
Figura 27. Parámetros configuración de Dispositivo de Radio	71
Figura 28. Topología Estrella Segundo Escenario	72
Figura 29. Ubicación Geográfica del Escenario Real	73
Figura 30. Vista de CupCarbon Escenario Real	74
Figura 31. Superficie Total del Escenario Real	75
Figura 32. Área de Superficie Seleccionada Tercer Simulación	75
Figura 33. Topología de Red Tercer Escenario	76
Figura 34. Red de Sensores Tercer Escenario	77
Figura 35. Zona de Cobertura de Radios Tercer Escenario	78

Figura 36. Mostrar/ Ocultar Nivel de Batería y Buffer	79
Figura 37. Nivel de Batería y Buffer Tercer Escenario	80
Figura 38. Área de Superficie Seleccionada Cuarta Simulación	81
Figura 39. Red de Sensores Cuarto Escenario	82
Figura 40. Captura Simulación Cuarto Escenario.	83
Figura 41. Red de Sensores Quinto Escenario	85
Figura 42. Consola Primer Escenario	86
Figura 43. Estado Batería vs Tiempo Total del Primer Escenario	89
Figura 44. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Primer Escenario	90
Figura 45. Estado Batería vs Tiempo Primer Escenario	90
Figura 46. Consumo Sensor vs Tiempo Primer Escenario	91
Figura 47. Consola Segundo Escenario	91
Figura 48. Estado Batería vs Tiempo Total del Segundo Escenario	93
Figura 49. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Segundo Escenario	93
Figura 50. Estado Batería vs Tiempo Segundo Escenario	94
Figura 51. Consumo Sensor vs Tiempo Segundo Escenario	94
Figura 52. Consola Tercer Escenario	95
Figura 53. Estado Batería vs Tiempo Total del Tercer Escenario	96
Figura 54. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Tercer Escenario	96
Figura 55. Estado Batería vs Tiempo Tercer Escenario	97
Figura 56. Consumo Sensor vs Tiempo Tercer Escenario	97
Figura 57. Consola Cuarto Escenario	98
Figura 58. Estado Batería vs Tiempo Total del Cuarto Escenario	99
Figura 59. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Cuarto Escenario	100
Figura 60. Estado Batería vs Tiempo Cuarto Escenario	100
Figura 61. Consumo Sensor vs Tiempo Cuarto Escenario	101
Figura 62. Consola Quinto Escenario	101
Figura 63. Estado Batería vs Tiempo Total del Quinto Escenario	102
Figura 64. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Quinto Escenario	103
Figura 65. Estado Batería vs Tiempo Quinto Escenario	103
Figura 66. Consumo Sensor vs Tiempo Quinto Escenario	103
Figura 67. Módulo de radio Lora	105
Figura 68. Módulo de radio Zigbee	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Soluciones disponibles sobre IoT en agricultura_____	18
Tabla 2. Funcionamiento de sensores/dispositivos_____	19
Tabla 3. Tecnologías de comunicación para la agricultura inteligente_____	29
Tabla 4. Comparativas tecnologías LPWAN_____	43
Tabla 5. Comparación de Simuladores_____	54
Tabla 6. Lista de Comandos CupCarbon_____	60
Tabla 7. Parámetros de Configuración Primer Escenario_____	70
Tabla 8. Parámetros de Configuración Segundo Escenario_____	72
Tabla 9. Parámetros de Configuración Tercer Escenario_____	78
Tabla 10. Descripción Nodos Sensores Tercer Escenario_____	79
Tabla 11. Parámetros de Configuración Cuarto Escenario_____	83
Tabla 12. Parámetros de Configuración Quinto Escenario_____	84
Tabla 13. Descripción Nodos Sensores Quinto Escenario_____	85
Tabla 14. Métricas Primer Escenario_____	87
Tabla 15. Métricas Segundo Escenario_____	92
Tabla 16. Métricas del Tercer Escenario_____	95
Tabla 17. Métricas del Cuarto Escenario_____	99
Tabla 18. Métricas del Quinto Escenario_____	102
Tabla 19. Costos Tercer Escenario _____	106
Tabla 20. Costos Cuarto Escenario _____	106
Tabla 21. Costos Quinto Escenario _____	106

I. Introducción

La agricultura inteligente o Smart Farming, es un enfoque moderno de la agricultura que consiste en la utilización de las nuevas tecnologías surgidas del nacimiento de la Cuarta Revolución Industrial para aumentar la eficiencia y la productividad, aprovechando al máximo los recursos y minimizando el impacto medioambiental.

El uso de sensores, drones, cartografía GPS y otras tecnologías digitales para recopilar y analizar datos sobre el suelo, el clima, el estado de los cultivos y otros factores que afectan a la agricultura, son parte de las herramientas que son la base fundacional de la agricultura inteligente con IoT, lo que permite que los agricultores realicen un monitoreo integral y tomen decisiones estratégicas.

La adopción de nuevas tecnologías de la agricultura inteligente ha permitido innovar en campos tales como [1]:

- integración de agricultura sostenible
- control de invernaderos
- agricultura de precisión
- monitoreo de cultivos
- control de cultivos para predicción
- monitoreo de ganado y gestión de granjas

Dicha innovación ha permitido que los productores agrícolas tengan acceso en tiempo real a información y análisis sobre sus tierras, cultivos, ganado, logística y maquinaria. Las herramientas que brinda Smart Farming permiten a los agricultores monitorear las explotaciones rurales de manera remota, sin la necesidad de la presencia física en el lugar, permitiéndoles tomar decisiones, ya sea para todo un campo, para un lote o un pequeño sector de este. Todo el proceso de Smart Farming está gestionado por software y supervisado por sensores, y su alcance es aplicable no solo para los grandes productores, también pueden utilizarlo los pequeños agricultores, u otros actores que realicen operaciones a menor escala y que tengan incumbencia con el sector agropecuario.

A través de la automatización con tecnología de la información, la agricultura puede volverse inteligente utilizando Internet de las cosas IoT. Los problemas como las condiciones climáticas adversas, el efecto ambiental en el cultivo, etc, que enfrentan

los agricultores, inspiraron a tomar la iniciativa para mejorar la agricultura global que está en peligro debido a la limitada conciencia técnica de los métodos productivos, que todavía dependen de técnicas agrícolas tradicionales que conducen a una menor productividad de los cultivos.

1.1 Planteamiento Del Problema

El uso de la tecnología en el campo ya está plenamente integrada a la vida cotidiana y se ha vuelto indispensable para el rendimiento productivo. Si bien la revolución tecnológica de la Agricultura 4.0 llegó para quedarse, aún queda mucho por hacer en materia de conectividad rural.

En la era digital donde predominan los datos, hay maneras de incorporar estas tecnologías al campo como es el caso del uso de sensores IoT y drones para el análisis de datos, que les permiten a los productores agropecuarios el monitoreo del suelo o cultivo para utilizar la información recopilada de una manera inteligente para tomar decisiones estratégicas sobre cómo y cuándo cultivar, así como manejar las plagas y enfermedades.

La problemática se centra en la necesidad de incrementar el rendimiento productivo del sector agropecuario de la región, con la complejidad inherente que supone instalar sistemas que permitan obtener acceso a los datos sobre parámetros y variables que sean de interés para potenciar la producción del campo.

El seguimiento de los cultivos es un proceso completo hasta que la cosecha se produce en la tierra. El proceso incluye el uso apropiado de las semillas, la humedad necesaria para un cultivo y la cantidad de pesticidas e insecticidas para ese cultivo. En un sistema agrícola, hay muchas etapas de cultivo y existen muchas amenazas. Los agricultores necesitan controlar el suelo, la humedad, las condiciones climáticas, el control de pesticidas, el nivel de riego, etc. Esto se puede lograr mediante sensores integrados con microcontroladores, que habilitan los servicios adecuados.

A medida que crece la cantidad de datos o métricas a medir, también crece la complejidad de la solución en la agricultura, y en función de ésta, el número de partes involucradas para la obtención de los flujos de información de datos. La implementación de sistemas no convencionales puede traer como consecuencia una mayor inversión en cuanto a la instalación de sensores, la interconexión de estos con las tecnologías y protocolos adecuados.

1.2 Justificación

La conectividad, sin dudas trae muchos beneficios para el productor ya que, a través del monitoreo de variables, le permite tener una mejor gestión de los aspectos productivos. Ello debe ir de la mano de la generación de una infraestructura IoT rural acorde, que posibilite la medición de esas variables de interés donde la experimentación y el ensayo rápido permitan disminuir tiempos y costos.

Como requisito previo al despliegue de estas tecnologías en el ámbito productivo agropecuario, es necesario contar con conectividad a internet de los establecimientos productivos y conectividad interna entre las distintas zonas del sector rural.

Al utilizar diferentes escenarios y tecnologías es de interés también evaluar la capacidad de comunicación que permite o brinda cada tecnología y las necesidades que pueden presentar cada una de ellas a fin de evaluar el costo/beneficio de estas.

Por lo que la implementación de sistemas de simulación de escenarios para el seguimiento de variables utilizando las tecnologías IoT permiten obtener indicadores para tomar decisiones óptimas sobre cuál es la solución a aplicar en cada caso.

Las instancias de simulación en los últimos años se han utilizado como parte de procesos de mejora, en los cuales se enfoca primero en desarrollar soluciones digitales en Smart Farming que sirvan como herramientas de apoyo a la toma de decisiones, incorporando de manera incremental modelos de actividades agrícolas heterogéneos, ya sean solas o en combinación con otros modelos, que permitan brindar soluciones de un costo muy bajo y de rápida respuesta ante contextos cambiantes.

En la Región de Cuyo y particularmente en la Provincia de San Luis, República Argentina, no se tiene conocimiento de un desarrollo tecnológico orientado a encontrar soluciones que permitan evaluar las diversas capacidades de las tecnologías existentes en la región y seleccionar aquella que brinde una solución integral, maximizando las características de funcionamiento de la red y minimizando los costos relacionados con la instalación en las zonas rurales, brindando soluciones eficientes para la recolección de datos que el sector agropecuario necesita en dicha región.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo se centra en evaluar diferentes alternativas de tecnologías IoT para las WSN en entornos de simulación de software, en busca de aquel que permita adaptarse de mejor manera a las necesidades de los clientes regionales y nacionales.

Buscando seleccionar la herramienta más robusta y versátil que permita evaluar cualquier porción de terreno, recolectar información sobre el rendimiento de instalaciones de red y sus costos asociados.

Para ello se definirán una serie de objetivos específicos con el fin de determinar cuál tiene mejor performance de adaptación a las condiciones de trabajo y a los distintos escenarios que pueden ser emulados en Smart Farming. A la vez de sentar las bases racionales para la toma de decisiones que contribuyan a potenciar la producción y el desarrollo sustentable a nivel regional y nacional.

1.4 Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo de este proyecto es necesario previamente cumplir los objetivos específicos que se listan a continuación:

1. Analizar entornos de simulación y las características que cada uno de ellos incorpora sobre las redes de transmisión de datos inalámbricos, en combinación con el uso de dispositivos IoT.

Evaluar los datos recopilados de manera continua y masiva, en los dispositivos fuentes o nodos sensores, verificando y certificando la inalterabilidad e integridad de estos sobre el sistema y con el objetivo de maximizar su aprovechamiento.

2. Seleccionar una plataforma de software que permita simular, configurando de manera clara y sencilla, múltiples instancias de Smart Farming teniendo en cuenta las características regionales y las tecnologías disponibles. De tal forma que se pueda emular un sistema casi real, buscando potenciar los sistemas de producción del sector agropecuario de la región y la posibilidad de evaluar la mejor alternativa técnica sin perder de vista los costos económicos para cada cliente.

3. Diseñar instancias regionales teniendo en cuenta las capacidades de los sistemas actuales que se pueden encontrar disponibles en Argentina. Se buscará evaluar la capacidad de brindar soluciones en tiempos razonables a los clientes y tener presente los posibles escenarios que puedan presentarse en una relación

cliente/empresa, para que mejore su rendimiento operativo de manera que aumente la productividad de las operaciones del sector.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados es que se hará evaluación del desempeño y análisis de las tecnologías y protocolos inalámbricos IoT mediante el uso de sensores, ensayados en distintos ambientes o escenarios utilizando el simulador para las WSN seleccionado.

1.5 Hipótesis

Para la realización de este trabajo de tesis se plantea la hipótesis, de que es posible utilizar software de simulación para describir un ambiente real y seleccionar tecnologías de comunicación inalámbricas acordes para aplicaciones de IoT en Smart Farming.

1.6 Contexto general de la Tesis

La característica de estudio del contexto general del presente trabajo de tesis, se basa en la simulación de escenarios previa selección de tecnologías IoT para Smart Farming regional, en particular se eligió un emplazamiento rural distante a unos 100 KM al sur de la capital de la Provincia de San Luis, ubicado en el paraje Alto Pelado.

II. Marco Teórico

En este capítulo se desarrolla el marco teórico describiendo en las distintas secciones: el estado del arte actual de Smart Farming, el uso de los dispositivos sensores IoT aplicados al sector agrícola, el modelo de capas en Smart Farming, las topologías, tecnologías y protocolos de comunicación de red involucrados en las WSN conjuntamente con las tecnologías Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) para Smart Farming, y el software de simulación de redes de sensores inalámbricas en soluciones para aplicaciones de IoT.

2.1 Estado del arte

En la sección se describe la importancia de la agricultura inteligente dentro del sector de la agroindustria, y los beneficios de aplicar las nuevas tecnologías emergentes a dicho sector.

La agricultura inteligente o Smart Farming es el término utilizado para describir la adopción de las modernas tecnologías de la información y las comunicaciones con el fin de mejorar, supervisar, automatizar y optimizar las operaciones y los procesos agrícolas.

El IoT se ha posicionado en las últimas dos décadas como una salida factible a diferentes necesidades del sector agrícola, producto de la constante evolución industrial. En el marco de la Industria 4.0, o también reconocida como la cuarta revolución industrial, es menester encontrar la convergencia entre nuevas tecnologías y su aplicación en el campo. Gracias a los avances tecnológicos en materia de IoT y la adopción más reciente de modernas tecnologías de Smart Farming es que en la actualidad innumerables explotaciones agrícolas en todo el mundo están empezando a utilizar nuevas tecnologías emergentes y se están viendo los beneficios que de ellas se derivan.

La agricultura inteligente aumenta la producción de cultivos, disminuye el desperdicio de agua y minimiza el uso excesivo de fertilizantes. Con la ayuda de sensores, este sistema basado en IoT puede ayudar a las granjas a realizar un seguimiento de los requisitos del terreno en cualquier lugar e incluso puede regar los campos con un dispositivo automático. Por lo tanto, estas estrategias agrícolas inteligentes ayudarán a los agricultores a minimizar los desechos y aumentar la eficiencia.

El empleo de Internet de las Cosas en la agroindustria contribuye a obtener información detallada del cultivo, el suelo y de las variaciones del clima en tiempo real, lo que facilita el proceso de siembra. Se suman a estos beneficios, la obtención de datos meteorológicos y previsiones locales, gestión y análisis del suelo, del riesgo y automatización, monitoreo de plagas, modelo y previsión de enfermedades, convirtiéndose en una herramienta clave para la gestión, control y análisis de datos para la toma de decisiones en este sector [2].

La Figura 1 muestra el ejemplo de una granja inteligente en acción.



Figura 1. Infografía una granja inteligente en acción. Fuente Iberdrola (2023)

La aplicación de las tecnologías mencionadas anteriormente tiene un impacto positivo sobre la agricultura y la ganadería.

A continuación, algunas de esas mejoras:

- Incremento de la producción: la optimización de todos los procesos relacionados con la agricultura y la ganadería incrementa las tasas de producción.
- Ahorro de agua: las predicciones meteorológicas y los sensores que miden la humedad de la tierra permiten regar solo cuando es necesario y durante el tiempo preciso.

- Incremento de la calidad: un análisis de calidad de la producción obtenida en relación con las estrategias utilizadas permite ajustar estas últimas para aumentar la calidad de la siguiente producción.
- Reducción de los costos: la automatización de los procesos de siembra, tratamiento y recolección en el caso de la agricultura reduce el consumo de recursos.
- Detección de plagas y cuidado de la salud: la detección temprana de plagas en los cultivos o de enfermedades en los animales permite minimizar este impacto sobre la producción y mejorar el bienestar animal.
- Aumenta la sostenibilidad: el ahorro en recursos como el agua de riego y el aprovechamiento máximo de las tierras reducen el impacto sobre el medio ambiente.

Las agroindustrias tienen un gran desafío: ser productivas y generar productos sostenibles, el primer paso es disponer de una plataforma inteligente de clase mundial que les permita integrar y optimizar todos los procesos, y sobre ella implementar tecnologías innovadoras que aporten inteligencia en la gestión de las operaciones agrícolas.

Las tres revoluciones industriales anteriores transformaron profundamente la industria agrícola de la agricultura autóctona y tradicional a la agricultura mecanizada y la agricultura de precisión reciente. El paradigma de la agricultura industrial mejora en gran medida la productividad, pero han surgido gradualmente una serie de desafíos en los últimos años. Se espera que la Industria 4.0 remodele la industria agrícola una vez más y promueva la cuarta revolución agrícola [3].

A lo largo de la historia del desarrollo agrícola hubo cuatro revoluciones distintas, a saber [4]:

1. La era de la agricultura tradicional caracterizada por la fuerza humana y animal.
2. La era de la agricultura mecanizada caracterizada por el uso de grandes maquinarias.
3. La era de la agricultura automatizada está caracterizada por un desarrollo de alta velocidad.
4. La era de la agricultura inteligente caracterizada por tecnologías emergentes

En la Figura 2 se observan las revoluciones de la agricultura.

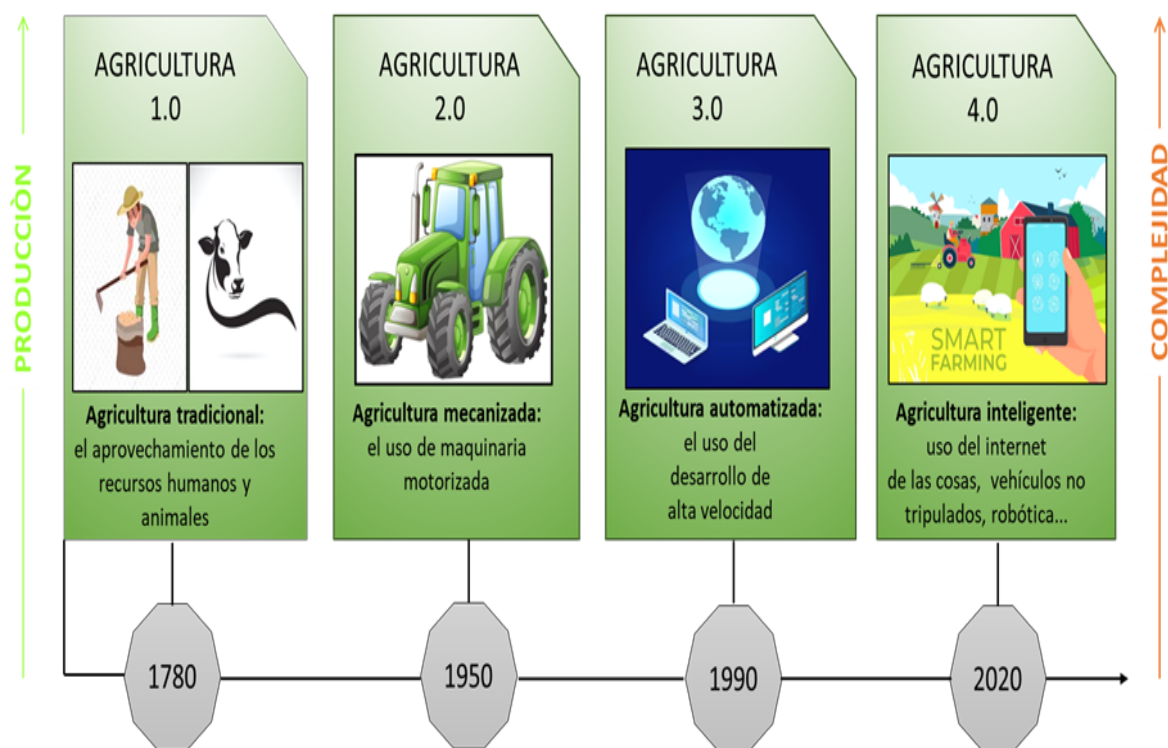


Figura 2. Revoluciones de la agricultura. Fuente: Friha, O (2021)

Con más detalle, la agricultura contemporánea toma prestada la lógica de la Industria 4.0 al combinar las tecnologías propias de la agricultura interconectada y la agricultura de precisión, como Internet de las Cosas, Big Data, Inteligencia artificial, etc. En este sentido, las aplicaciones de agricultura inteligente son encargadas de aportar mejoras significativas al sector, con un fuerte impacto económico, ambiental y social [5].

Los principales objetivos de esta revolución en curso se refieren a la introducción de la automatización y las tecnologías digitales en el sector agrícola que favorecen una transición hacia sistemas agrícolas inteligentes y sostenibles [6].

Actualmente, la perfecta integración de sensores inalámbricos e IoT en la agricultura inteligente puede elevar la agricultura a niveles que antes eran inimaginables. Al seguir las prácticas de la agricultura inteligente, IoT puede ayudar a mejorar las soluciones de muchos problemas agrícolas tradicionales, como la respuesta a la sequía, la optimización del rendimiento, la idoneidad de la tierra, el riego, el control de plagas, etc.

La Tabla 1 muestra las diferentes soluciones agrícolas de IoT propuestas por las principales empresas de tecnologías.

Tabla 1. Soluciones disponibles sobre IoT en agricultura. Fuente Farooq, MS (2020)

Industrias	Iniciativas y Soluciones
Samsung	Samsung toma la iniciativa en el campo de IoT al proporcionar su plataforma IoT de Samsung Data Systems (SDS), que conecta múltiples dispositivos IoT y protocolos de comunicación como Modbus, Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE), MQTT y LoraWAN.
Aero granjas	AeroFarms proporciona soluciones de cultivo en interiores mediante el análisis de datos relacionados con las plantas a través de tecnologías de big data, imágenes e inteligencia artificial.
Microsoft	Microsoft también trabaja en técnicas de cultivo basadas en datos para resolver los problemas desde la nube hasta el sensor. La firma de tecnología Bosch proporciona diferentes técnicas de análisis de sensores y técnicas de gestión de datos basadas en IoT para monitorear la productividad de los cultivos y las enfermedades.
Laboratorio de R-Style	R-Style Lab es la principal empresa proveedora de software de IoT que ofrece múltiples soluciones de software, como mantenimiento predictivo, inspecciones de drones y soluciones de monitoreo de cultivos/animales, y proporciona software integrado que se puede integrar fácilmente en rastreadores portátiles.
IBM	IBM ha proporcionado un servicio basado en IA llamado Watson Decisión, que es la mejor solución para mejorar la sostenibilidad, la cosecha y la calidad de la agricultura inteligente mediante el uso de tecnologías IoT e IA.
Intel	Intel ha desarrollado una plataforma Infiswift basada en IoT, que ayuda a aumentar la eficiencia de las soluciones agrícolas a través de servicios conectados avanzados.
Google	Google ha sugerido una visión para soluciones agrícolas avanzadas al unirse a la Iniciativa de Agricultura Abierta del MIT Media Lab para proporcionar un sistema alimentario más saludable.

La implementación de IoT en agricultura se considera la solución ideal porque en esta área existe la necesidad de monitoreo y control continuos. En el campo de la agricultura, IoT se utiliza en diferentes niveles en la cadena de producción industrial agrícola. Las principales aplicaciones de IoT en la agricultura son la agricultura de precisión, la ganadería y los invernaderos, que se agrupan en diferentes dominios de monitoreo. Todas estas aplicaciones se monitorean con la ayuda de diferentes sensores/dispositivos basados en IoT e interconectados mediante el uso de WSN, que ayudan a los agricultores a recopilar datos relevantes a través de dispositivos de detección [7].

Los sensores/dispositivos producen datos valiosos al detectar y monitorear múltiples variables de campo a través de WSN. Los datos generados a través de dispositivos de detección y monitoreo se transfieren a través de protocolos de comunicaciones (LoraWan, Sigfox, ZigBee, WiFi, RFID, Bluetooth, WiMax, MQTT) y en otras plataformas para una vista del usuario o agricultor.

2.2 Sensores IoT

Los sensores monitorizan los diferentes parámetros ambientales y variables en el campo de la agricultura. Los sensores comúnmente utilizados son sensores de temperatura, sensor de humedad, sensor de monitoreo del patrón del suelo, sensor de flujo de aire, sensor de ubicación, sensor de CO₂, sensor de presión. Las características significativas de los dispositivos/sensores de IoT que los hacen

adecuados para la agricultura son su (1) portabilidad; (2) confiabilidad; (3) memoria; (4) durabilidad; (5) potencia y eficiencia computacional; y (6) cobertura.

En la Tabla 2 se muestran los diferentes usos de los sensores y sus principales características.

Tabla 2. Funcionamiento de sensores/dispositivos. Fuente Farooq, MS (2020)

Enfermedad	Operaciones de sensores/dispositivos
Sensor de pH	Para monitorear la cantidad exacta de nutrientes en el suelo, se utilizan sensores de PH, que son eficientes para el crecimiento saludable de plantas y cultivos.
Sensor de gas	A través de la observación de las radiaciones infrarrojas, este sensor mide la cantidad de gases tóxicos en el ganado y los invernaderos. Un nodo sensor llamado Waspnote Plug & Sense! Smart Agriculture Xtreme ha sido diseñado para monitorear el contenido de agua del nivel de gas en el suelo.
Sensor detector de movimiento	El sensor se usa para rastrear/rastrear la ubicación de los animales y el campo, además, también detecta el movimiento de un objeto no deseado en el campo o la granja y genera alertas al agricultor para que tome medidas oportunas y evite la pérdida de cultivos.
Sensor ultravioleta y sensores infrarrojos pasivos (PIR)	Un sensor ultravioleta monitorea los rayos UV para el crecimiento efectivo de los cultivos. En el sensor PIR, se fija un detector de movimiento que rastrea el rango de movimiento de una persona en el campo. El sensor también tiene una propiedad de detección de luz: mientras rastrea un objeto, cambia la temperatura creciente en voltaje para analizar el crecimiento del cultivo.
Sensor de humedad del suelo	El sensor de suelo mide la cantidad de agua y el nivel de humedad en todo el campo]. Se implementó un sensor de humedad inalámbrico para monitorear el sistema de riego del invernadero. CropX Starter Kit–Soil Temperature 24/7 es un sensor de conexión celular que se usa para monitorear las múltiples condiciones del suelo.
Sensor de temperatura	Los cambios en la temperatura del suelo afectan la absorción de nutrientes y humedad del suelo. Se ha presentado un nuevo enfoque de detección para mapear la cantidad exacta de nutrientes en el suelo y la superficie del agua]. Se puede implementar una matriz de sensores de cultivo 3D con tecnología de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cualquier ubicación del campo para monitorear la temperatura, el CO ₂ y la humedad].
Sensor de humedad	La humedad deja un impacto negativo en el crecimiento de las hojas de las plantas, la fotosíntesis y la polinización. Por lo tanto, para detectar el nivel de humedad en el aire, este sensor mide directamente la temperatura y el contenido de humedad en el aire. Grofit proporciona diferentes dispositivos de monitoreo climático que pueden monitorear la temperatura del aire, la humedad del aire y la radiación solar. El rango de transmisión de datos del dispositivo es de hasta 200 m y almacena la medición durante un máximo de 30 días

2.3 La agricultura inteligente basada en IoT

IoT permite la visión de la agricultura inteligente a través de la recopilación, el análisis y el procesamiento de datos en tiempo real y permite la mejora de la gestión agrícola ganadera, al tiempo que ayuda a los agricultores a tomar decisiones más informadas.

La agricultura inteligente basada en IoT consta de cuatro componentes principales. Estos cuatro componentes principales son la estructura física, la adquisición de datos, el procesamiento de datos y el análisis de datos. La estructura física es el factor más importante en la agricultura de precisión para evitar cualquier suceso no

diseñado. Todo el sistema está diseñado de tal manera que controla los sensores, actuadores y dispositivos [8].

La Figura 3 muestra los componentes de la agricultura inteligente basada en IoT.

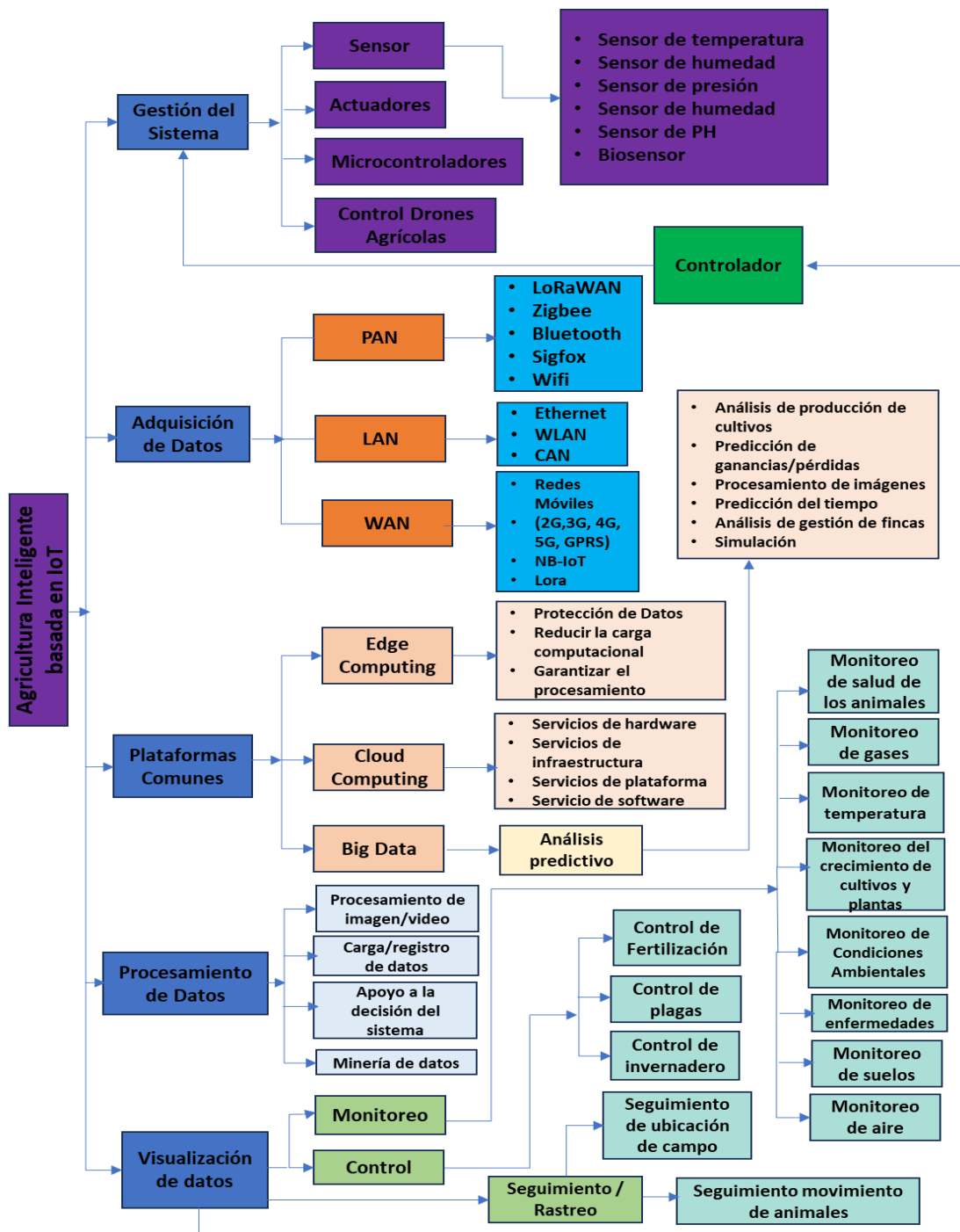


Figura 3. Componentes de la agricultura inteligente basada en IoT. Fuente Farooq, MS (2019)

La red agrícola IoT o la red IoT para agricultura es uno de los elementos vitales de IoT en la agricultura. Ayuda a monitorear los datos agrícolas y facilita la transmisión y recepción de datos agrícolas. Como se puede observar en la Figura 4, la red agrícola IoT consta de arquitectura de red agrícola de IoT, plataforma de red agrícola de IoT y protocolos y topologías de red agrícola de IoT.

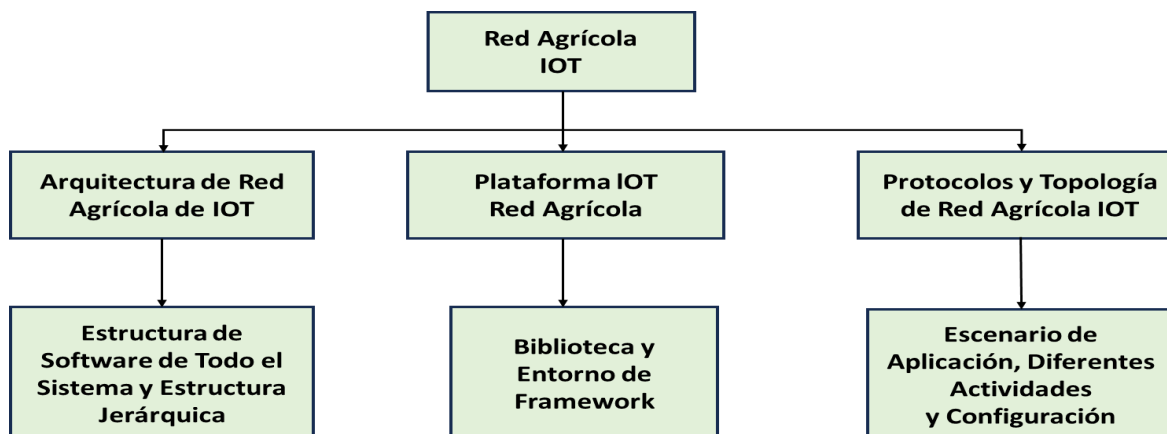


Figura 4. Red Agrícola IoT. Fuente Farooq, MS (2019)

2.4 Modelo de Capas en Smart Farming

La implementación y desarrollo de tecnologías IoT en el sector agricultor define de manera frecuente tres capas: capa de percepción (captura), capa de red (transporte) y capa de aplicación (implementación) [9].

La capa de percepción se refiere a los componentes de hardware y software asociados a la tecnología IoT implementada, que agrupa elementos tales como sensores, actuadores, transceptores, sistemas embebidos, tecnologías de radiofrecuencia y diferentes elementos de monitoreo.

La capa de red integra elementos que permiten la transferencia de información que proviene de determinados componentes de la capa de percepción e incorpora diferentes protocolos de comunicación, que se aplican mediante redes de telecomunicaciones y nodos de sensores.

La capa de aplicación es referida como la implementación de los desarrollos IoT mediante sistemas expertos o que implican algoritmos inteligentes para la toma de decisiones en los cultivos.

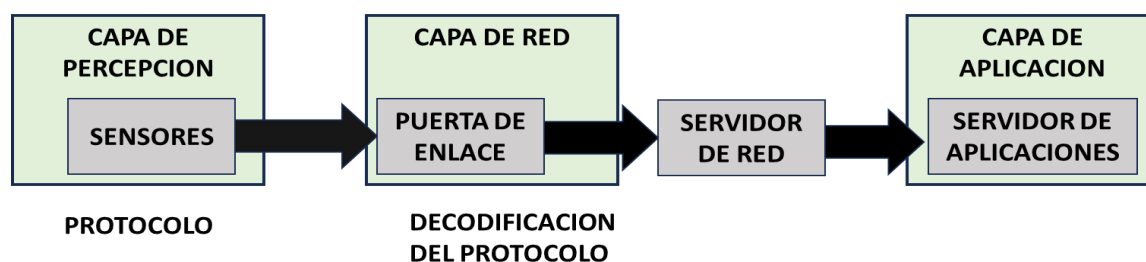


Figura 5. Relación entre capas en un desarrollo IoT. Fuente Soto, J. P. T (2020)

En la Figura 5 se puede observar la relación entre Capas en un desarrollo IoT, mencionadas anteriormente.

La capa de percepción en muchas aplicaciones monitorea variables de fácil captura, como lo son la temperatura y la humedad, entre otras. Estas variables físicas permiten obtener información relevante para el análisis de los suelos agrícolas y son monitoreadas en tiempo real en la mayoría de los casos.

En el caso de la capa de red, las tecnologías que suelen implementarse para los proyectos de IoT en el campo son la geolocalización GPS y los módulos de tecnología Lora o ZigBee. El primero por la importancia que suministra en los proyectos de análisis de suelos y producción, dado que la ubicación específica de patrones permite obtener mapeos de rendimiento e incluso predecir comportamientos de los suelos agrícolas para mejorar la producción. En el caso de los módulos Lora o Zigbee, su fácil implementación y su costo asociado los han catalogado como una de las tecnologías de transmisión de datos que se puede utilizar en regiones donde se tienen radios de largo alcance y donde no se tiene acceso a una red de datos como WiFi o ethernet.

En la Figura 6 se observan las tecnologías usadas para intercomunicar diferentes dispositivos IoT sobre las aplicaciones e implementaciones en la agricultura.

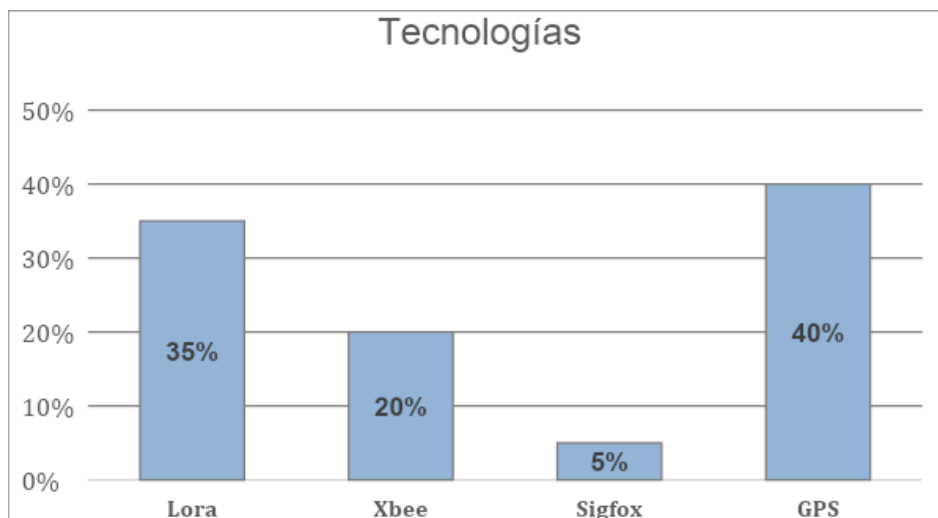


Figura 6. Tecnología de redes usadas en aplicaciones agrícolas. Soto, J. P. T (2020)

El 40% corresponde a la tecnología de sistema de posicionamiento global (GPS). Su utilización permite poder hacer seguimiento a una ubicación del cultivo en tiempo real.

Por otra parte, la tecnología Lora es implementada el 35% de veces. Cabe destacar que esta tecnología permite el monitoreo de cultivos agrícolas gracias a sus características que incluyen bajo consumo y largo alcance, lo que posibilita su implementación en diferentes entornos para operar de forma eficiente.

En el caso de la tecnología Xbee de ZigBee, su implementación llega al 20%. Esta tecnología permite evaluar variables medioambientales que hacen uso de sensores que recopilan información y las transmiten para su debido tratamiento o uso, todo esto bajo la plataforma IoT.

2.5 WSN en Smart Farming

A lo largo de los años, las redes de sensores inalámbricos se han aplicado con una mayor frecuencia en el sector agrícola, sentando las bases para el desarrollo de la agricultura inteligente.

Las WSN también se utilizan para informar a los agricultores sobre casi todos los aspectos del crecimiento de sus cultivos, así como sobre el estado de preparación de la maquinaria de la granja, lo que ayuda a prevenir la pérdida de cultivos y mejora la preparación del equipo que lo cultiva. Recientemente, los avances en el reconocimiento de imágenes y el procesamiento de señales digitales dieron aún más capacidades a WSN para determinar con precisión la calidad y la salud de los cultivos.

La WSN es un sistema que comprende transceptores de radiofrecuencia (RF), sensores, microcontroladores y fuentes de energía. Sin embargo, con el surgimiento del IoT se ha producido un cambio de paradigma desde el uso de WSN para la agricultura inteligente con el IoT como el principal impulsor de esta.

Las características únicas de WSN y su capacidad para autoorganizarse, la autoconfiguración y el autodiagnóstico lo han convertido en una buena elección para la agricultura inteligente y la industria alimentaria.

2.5.1 Topologías WSN

En los protocolos de comunicación inalámbrica utilizados en aplicaciones de IoT, existen tres tipos principales de topologías que pueden ser usadas para implementar una red de sensores inalámbricos: topología estrella, topología árbol y topología malla.

Topología Estrella

La topología estrella, como se observa en la Figura 7, es la configuración más simple y básica, se asemeja a una estructura en forma de estrella, con un nodo coordinador central o Gateway y varios dispositivos finales conectados a él. En esta topología todos los nodos sensores están comunicados directamente con la puerta

de enlace. Cabe destacar que, al tener una comunicación directa, mantienen el consumo de energía bajo y posee poca posibilidad de fallos de la red debido a que cada nodo tiene diferente ruta hasta comunicarse con la puerta de enlace.

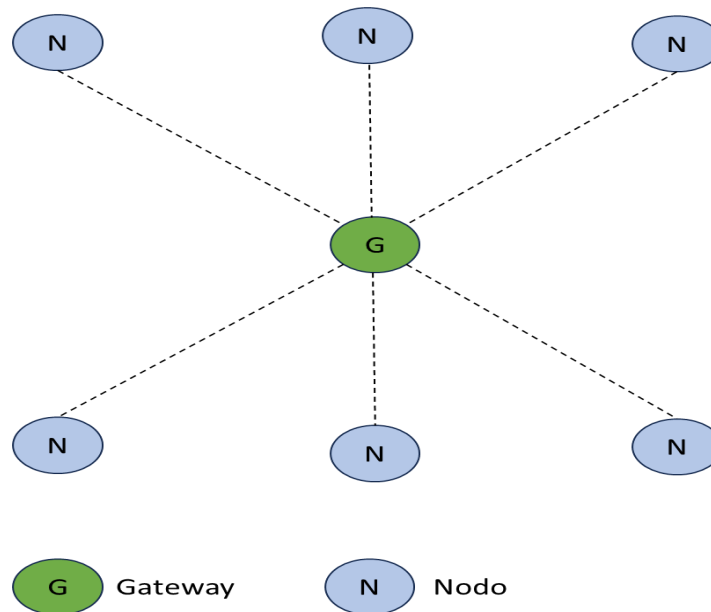


Figura 7. Topología Estrella.

Topología Árbol

La topología de árbol que se observa en la Figura 8 tiene un nodo coordinador central o Gateway, con algunos enrutadores y nodos secundarios. Esta topología de red tiene la ventaja de la redundancia y escalabilidad y con respecto a la desventaja de este tipo de red es que limita el tiempo de vida de la batería, a causa de que el consumo de energía para los nodos que implementan las comunicaciones de múltiples saltos por lo general es mayor para los que no tienen esta capacidad.

Los enrutadores desempeñan un papel importante a la hora de ampliar la cobertura de la red, permitiendo que los dispositivos que están alejados del nodo coordinador central se conectan y se comuniquen de forma eficaz. Sin embargo, una limitación de la topología de árbol es que, si el nodo central se desactiva o sufre una falla, los nodos secundarios conectados a él no podrán comunicarse con otros dispositivos en la red, incluso si están físicamente cerca uno del otro. Esta dependencia de un único nodo principal puede provocar un aislamiento de la red y una conectividad limitada.

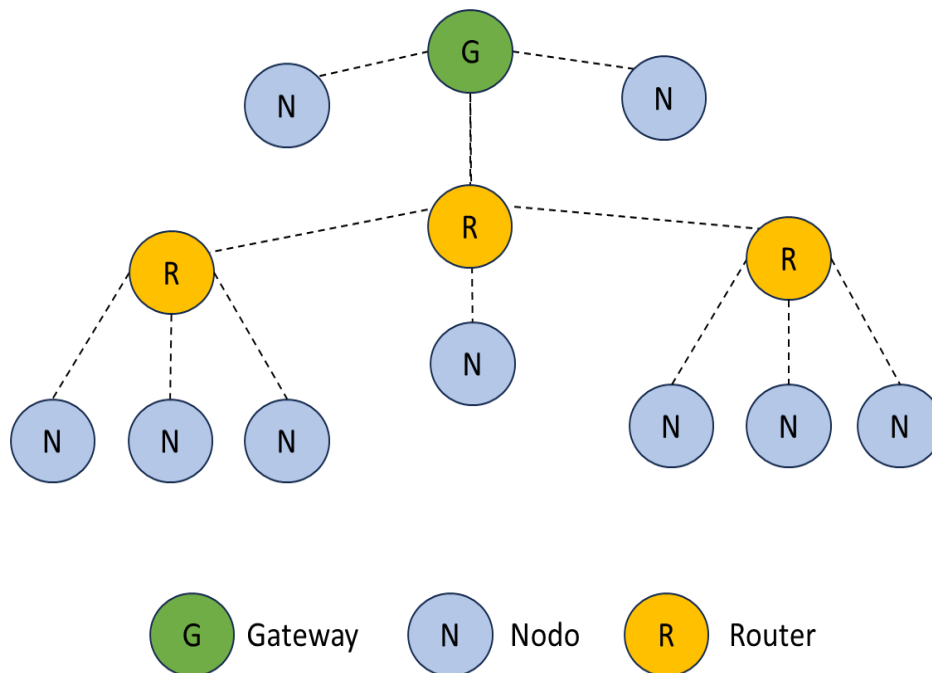


Figura 8. Topología Árbol.

Topología Malla

En la topología de malla de la Figura 9 se puede observar que, tenemos un coordinador central o Gateway, varios enrutadores y nodos, similar a la topología de árbol. Sin embargo, el factor diferenciador clave es la presencia de múltiples rutas potenciales para la transmisión de mensajes. Cada dispositivo en la red en malla puede comunicarse con cualquier otro dispositivo. Esta flexibilidad permite un mayor alcance de la red, ya que se pueden agregar dispositivos adicionales para ampliar el área de cobertura. Además, si una ruta de transmisión falla o se obstruye, el nodo afectado puede encontrar dinámicamente una ruta alternativa para llegar a su destino, eliminando así las zonas muertas dentro de la red. Además, la topología de malla simplifica el proceso de agregar o eliminar dispositivos de la red, ya que cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier dispositivo de destino dentro de la red. Esta flexibilidad y escalabilidad hacen que la topología de malla sea muy adecuada para aplicaciones de IoT donde la composición del dispositivo y los requisitos de conectividad pueden cambiar con frecuencia.

La desventaja de este tipo de red es que limita el tiempo de vida de la batería, a causa de que el consumo de energía para los nodos que implementan las comunicaciones de múltiples saltos por lo general es mayor para los que no tienen esta capacidad.

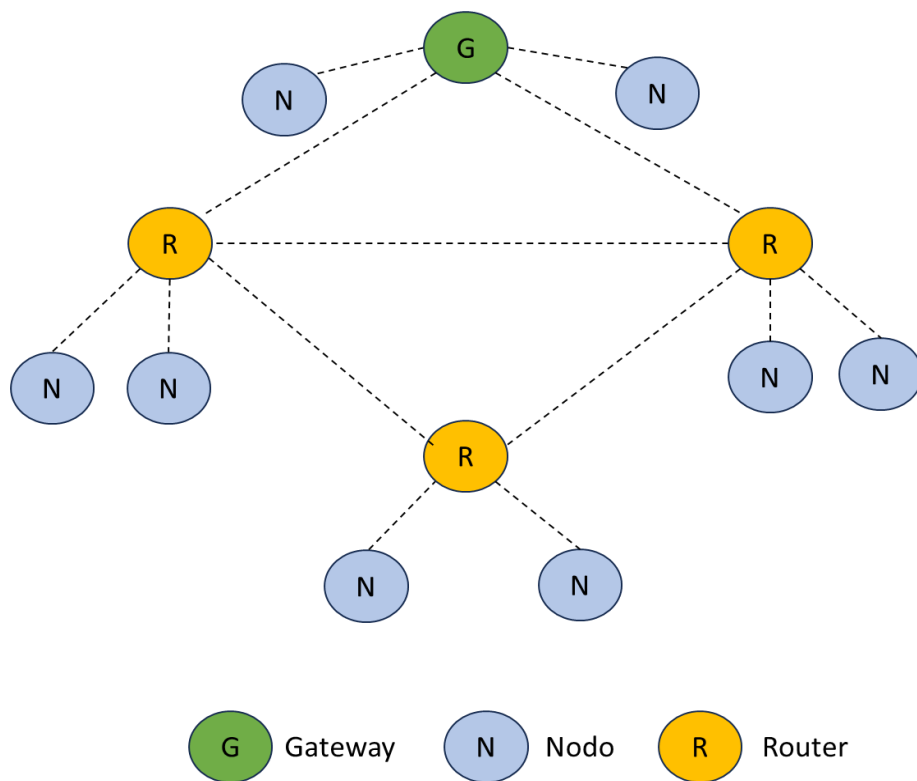


Figura 9. Topología Malla.

2.6 Precision Farming

La Agricultura de precisión o Precision Farming es todo lo que hace que la práctica de la agricultura sea más precisa, optimizada y controlada en lo que respecta al cultivo y la ganadería. Un componente vital es el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y una amplia gama de elementos, tales como hardware y software automatizados, vehículos autónomos y drones guiados por GPS, robótica, sensores y muestreo de suelo. El internet de las cosas en la agricultura ha permitido el desarrollo de Agricultura de Precisión, convirtiéndose en una herramienta de trabajo importante para desarrollar nuevas visiones en la forma de administrar los cultivos.

Los elementos que mide la agricultura de precisión permiten a través de los sensores cumplir las actividades de recolección de información primaria, para luego ser procesada y presentada en interfaces software para la toma de decisiones [10].

Estas nuevas tecnologías darán paso al desarrollo de agricultura sustentable, logrando optimizar recursos para los empresarios y mejorar los estándares de calidad, ofreciendo cultivos de calidad y con menor uso de fertilizantes y químicos que afectan a la salud de los consumidores, logrando ser más competitivos y proyectando la apertura de nuevos mercados.

2.7 Ecosistema IoT para Smart Farming

La descripción general del ecosistema IoT para la agricultura inteligente consta de dos componentes principales que prevalecen: Los dispositivos IoT y las tecnologías de la comunicación. La Figura 10 ilustra dentro del ecosistema IoT los componentes principales que son esenciales para cualquier aplicación de IoT [11].

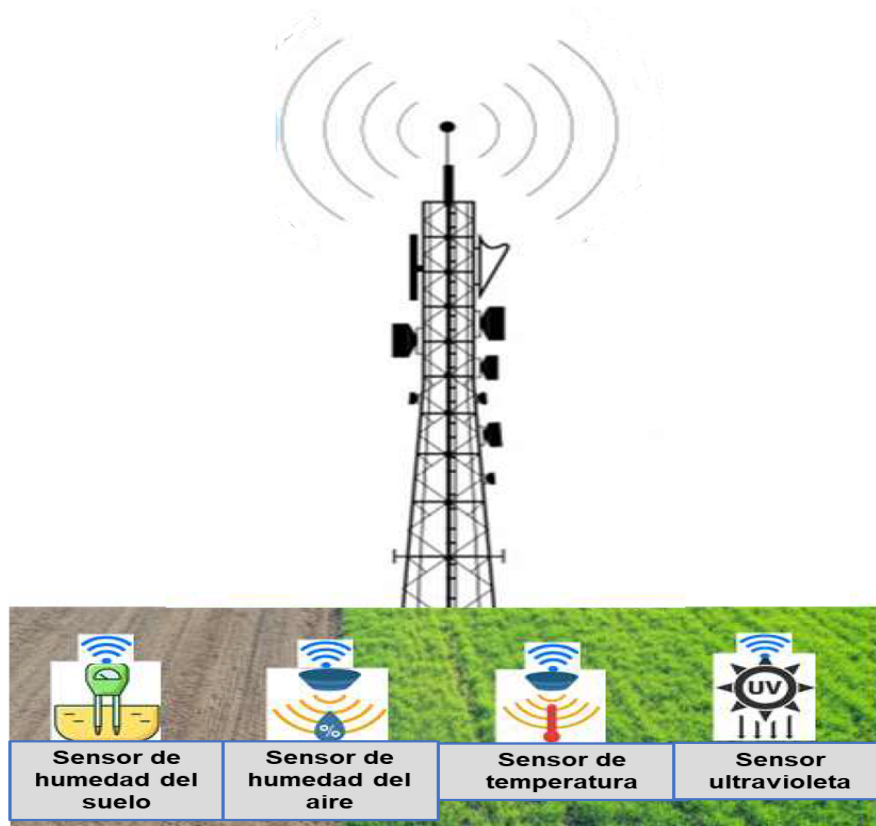


Figura 10. Ecosistema IoT para la agricultura inteligente. Fuente Quay, VK (2022)

La descripción de los componentes de IoT en relación con la agricultura se proporciona a continuación.

2.7.1 Dispositivos IoT

Los dispositivos IoT consisten en sistemas embebidos que interactúan con sensores y actuadores y requiere conectividad inalámbrica. Estos dispositivos IoT a veces se denominan nodos o sensores IoT. El dispositivo sensor consta de un transceptor de radiofrecuencia (RF), un sensor, un microcontrolador y una batería.

Los sensores se utilizan para monitorear y medir diferentes variables de la granja (por ejemplo, nutrientes del suelo, datos meteorológicos) y factores que afectan la producción.

La arquitectura común de un dispositivo IoT consta de sensores para recopilar información del entorno, actuadores basados en conexiones cableadas o

inalámbricas y un sistema integrado que tiene un procesador, memoria, módulos de comunicación, interfaces de entrada-salida y batería. En la Figura 11 se muestra la arquitectura común de un dispositivo IoT típico para la agricultura inteligente.

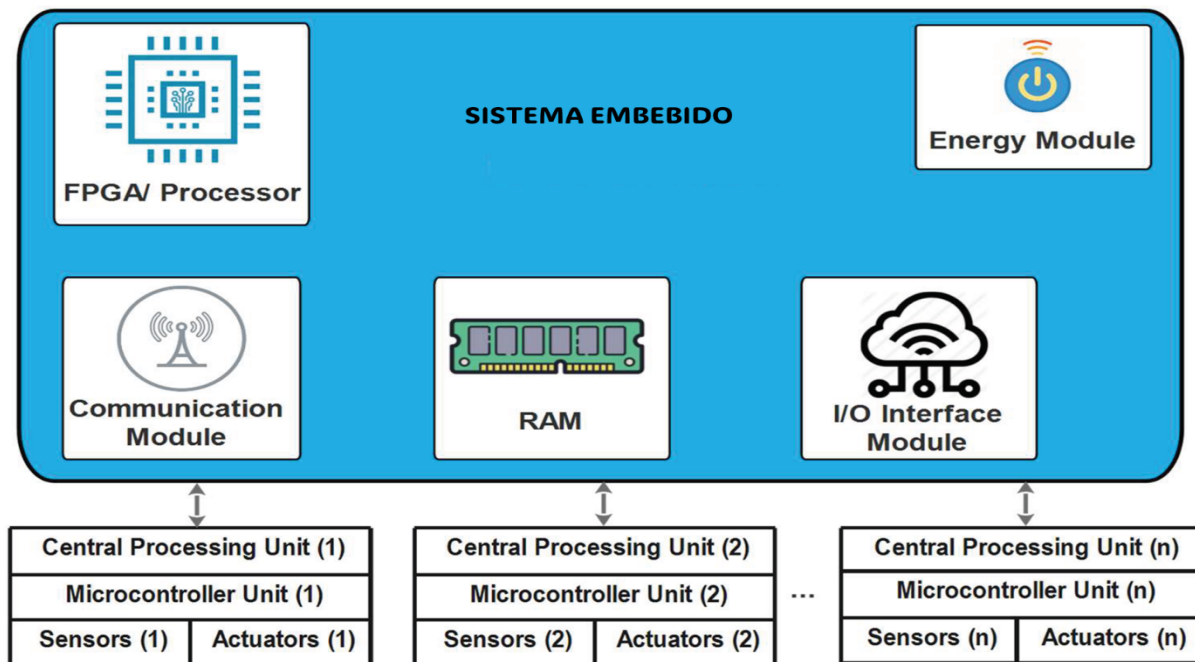


Figura 11. Arquitectura común de un dispositivo IoT. Fuente Quy, VK (2022)

Los sensores inalámbricos colocados estratégicamente alrededor de los campos brindan a los agricultores información actualizada en tiempo real, lo que les permite adaptar el cuidado que necesitan los cultivos, lo que se traduce en una mayor producción de alimentos con menos desperdicio.

Las soluciones agrícolas inteligentes son operaciones agrícolas que a menudo se implementa en grandes tierras de cultivo, al aire libre, por lo que los dispositivos que respaldan las soluciones necesitan algunas características únicas, como la capacidad de resistir los efectos del clima, la humedad y la inestabilidad de la temperatura a lo largo de su ciclo de vida útil.

Dependiendo de la operación requerida, existen varios sensores típicos que se aplican en el sector de la agricultura inteligente. Los sensores se pueden dividir en varias categorías típicas, como (1) sensor de ubicación, (2) sensor óptico, (3) sensor mecánico, (4) sensor electroquímico y (5) sensor de flujo de aire. Estos sensores se utilizan para recopilar información como la temperatura del aire, la temperatura del suelo, la humedad del aire, la humedad del suelo, la humedad de las hojas, la precipitación, la velocidad del viento, la dirección del viento, la radiación solar y la presión barométrica.

En la implementación de un dispositivo IoT, existen parámetros técnicos clave que deben tenerse en cuenta. Para la conectividad inalámbrica, se deben considerar los siguientes parámetros: el rango de distancia de comunicación, la velocidad de datos, la duración de la batería, la movilidad, la latencia, la seguridad y el costo de los dispositivos de puerta de enlace.

2.7.2 Tecnología de la comunicación en Smart Farming

La tecnología de la comunicación juega un papel fundamental en la implementación exitosa de sistemas IoT en Smart Farming, ya que opera tanto en escenarios de red de backhaul como de sensores.

Las soluciones de comunicación existentes y la tecnología se pueden clasificar en función de los estándares o protocolos, espectro, topología y escenarios de aplicación.

Tabla 3. Tecnologías de comunicación para la agricultura inteligente. Fuente Quy, VK (2022)

Tipo	Espectro	Distancia de transmisión	Tipo de Red	Frecuencia	Velocidad de datos
802.11a/b/g/n/ac	No licenciado	100 metros	WiFi	2,4–5 GHz	2–700 Mbps
802.11ah	No licenciado	1000 metros	WiFi	Varios Sub-GHz	78Mbps
802.11p	Con licencia	1 kilómetro	WiFi	5,9 GHz	3–27 Mbps
802.11af	Con licencia	1 kilómetro	WiFi	54–790	25–550 Mbps
Sigfox	Con licencia	Rural: 50 km Urbano: 10 km	LPWAN	Onda Z	100–600 bps
LoraWAN	Con licencia	20 kilómetros	LPWAN	Varios Sub-GHz	0,3–100 kbps
NB-IoT	Con licencia	35 kilómetros	LPWAN	Onda Z	250 kbps
LTE-3GPP	Con licencia	5 kilómetros	WWAN	1,4 MHz	200 kbps
EC-GSM	Con licencia	15 kilómetros	WWAN	Bandas GSM	240 kbps
WiMAX	Híbrido	50–80 kilómetros	WWAN	Varios Sub-GHz	70 Mbps
Bluetooth	No licenciado	100 metros	WPAN	2,4 GHz	2–26 Mbps
ZigBee	No licenciado	1 kilómetro	WHAN	2,4 GHz	250 kbps
Onda Z	No licenciado	100 metros	WHAN	900 MHz	100 kbps
6LoWPAN	No licenciado	30 metros	WHAN	Onda Z	250 kbps
NFC	No licenciado	20 centímetros	D2D	13,56 MHz	424 kbps

De acuerdo con los datos y valores que se muestran en la Tabla 3 los que indican que las tecnologías de comunicación de corto alcance tienen una distancia de transmisión de unos pocos metros, alta eficiencia energética y baja tasa de datos. Estos protocolos se emplean a menudo en redes de sensores, mientras que las tecnologías de comunicación de largo alcance tienen distancias de transmisión de varias decenas de kilómetros, consumen más energía y se instalan para comunicaciones backhaul de dispositivo a dispositivo.

Según la distancia de transmisión, las tecnologías inalámbricas se dividen en 3 categorías. Las de comunicación de corto alcance para distancias menores a 10 m, comunicación de medio alcance para la distancia de 10 m a 100 m, y comunicación de largo alcance para una distancia mayor a 100 m.

En la comparación de distancia y tasas de velocidad y energía de las tecnologías de comunicación inalámbricas de la Figura 12, se observa que la comunicación de corto alcance incluye identificación por radiofrecuencia, Bluetooth, banda ultra ancha, etc. WiFi y ZigBee se utilizan para la tecnología de comunicación de rango medio. En la comunicación de largo alcance, se utilizan redes celulares 2G/3G/4G/5G.

Las redes de área amplia de baja potencia LPWAN se utilizan en muchas aplicaciones y sus características incluyen bajo consumo de energía, baja velocidad de datos, área de cobertura grande, etc. [12].

La tecnología LPWAN no puede ser utilizada para transmisión de audio/video debido a su baja tasa de datos. Esta tecnología es adecuada en situaciones en las que es necesario transmitir a más distancias con tasas de datos más pequeñas.

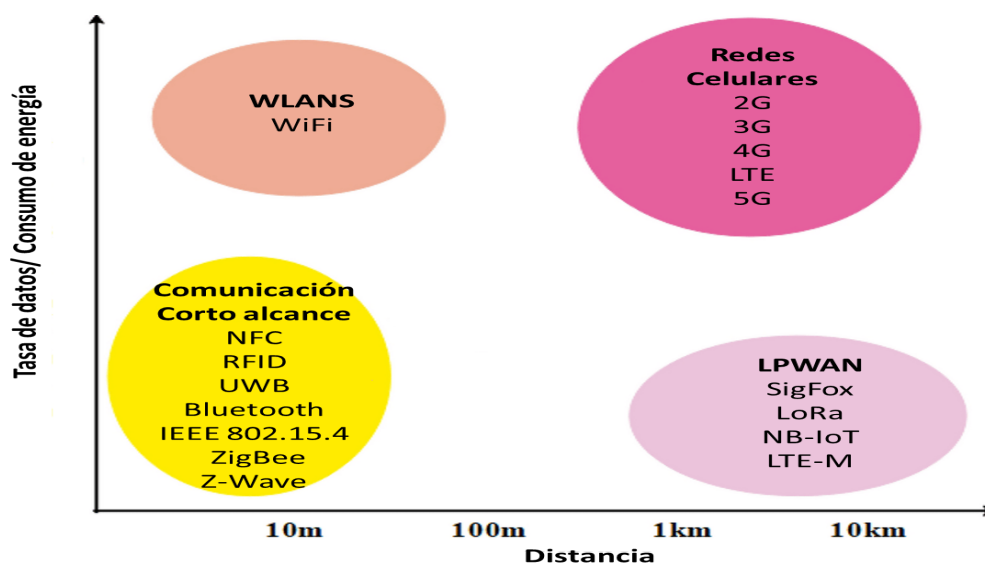


Figura 12. Comparativa de tecnologías de comunicación inalámbrica. K. Lova Raju (2021)

El área de cobertura en la agricultura inteligente hace que los dispositivos inalámbricos sean indispensables y se requieren soluciones para reducir su consumo de energía o extender la vida útil de la batería. Estas soluciones pueden incluir recolección de energía como celdas solares, sensores de bajo consumo de energía y comunicación.

2.7.2.1 Protocolos en Smart Farming

Existen varios protocolos o estándares existentes para comunicaciones inalámbricas propuestos para el sector de la agricultura inteligente. Con base en estos protocolos, los dispositivos en un sistema agrícola inteligente pueden interactuar, intercambiar información y tomar decisiones para monitorear y controlar las condiciones agrícolas y mejorar los rendimientos y la eficiencia de la producción.

Los estándares se clasifican como hemos mencionado anteriormente en corto alcance y largo alcance de comunicación. Los de corto alcance están habilitados para comunicaciones cercanas entre dispositivos, ejemplo de estos son; Bluetooth, ZigBee, Z-Wave, sistemas de identificación de frecuencia (RFID). Entre los estándares de largo alcance habilitados se encuentran Lora, Sigfox, IoT de banda estrecha (NB-IoT), que forman parte de LPWAN y hacen uso de baja potencia y puede cubrir un área amplia, en distancias que van desde los 100 m hasta los 10 km.

El consumo de energía también depende de los protocolos de comunicación utilizados en las aplicaciones Smart Farming. La Figura 13 muestra los protocolos de comunicación y el consumo de energía para cada uno de ellos. Los protocolos inalámbricos ZigBee y Lora se han identificado como los protocolos inalámbricos más adecuados para aplicaciones agrícolas debido a su bajo consumo de energía y rango de comunicación [13].

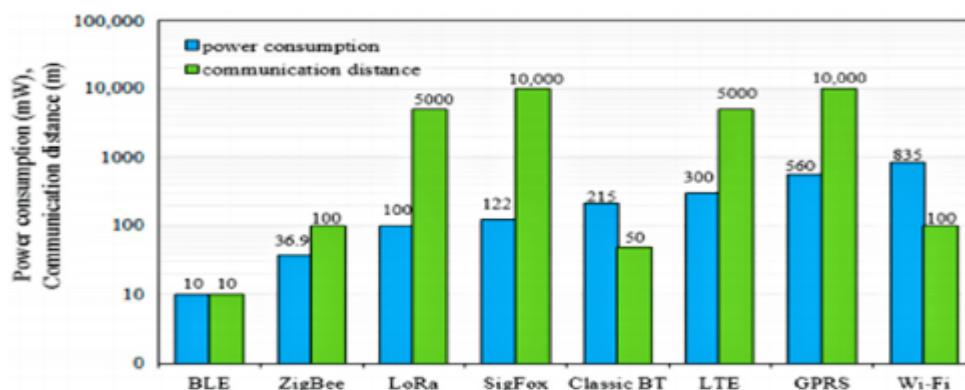


Figura 13. Tecnologías inalámbricas, consumo de energía y distancia. Fuente Jawad, H. M. (2017)

Si queremos implementar IoT a gran escala en la industria agrícola, debemos proporcionar una arquitectura de comunicaciones adecuada. Donde, los factores como el costo, la cobertura, el consumo de energía y la confiabilidad son críticos y deben considerarse antes de elegir el medio de comunicación [14].

Los protocolos de comunicación típicos de baja potencia que se usan comúnmente en la agricultura inteligente se pueden dividir como vimos en categorías de corto y largo alcance, según el alcance de la comunicación.

Teniendo en cuenta a ZigBee como uno de los protocolos principales de comunicación inalámbrica en aplicaciones de Smart Farming para corto alcance y a Lora, Sigfox y NB-IoT para aplicaciones de largo alcance, es que se describen a continuación.

ZigBee está diseñado principalmente para una amplia gama de aplicaciones, especialmente para reemplazar las tecnologías no estándar existentes. Dependiendo de los requisitos de la aplicación, los dispositivos basados en este protocolo pueden ser de tres tipos, incluido el coordinador, el enrutador y el usuario final. Además, las redes Zigbee admiten tres topologías diferentes denominadas estrella, árbol y malla. En función de estas características, y considerando además los requisitos de la aplicación agrícola, Zigbee puede desempeñar un papel vital, especialmente en el entorno de invernadero, donde generalmente se requieren comunicaciones de corto alcance. Durante el monitoreo de varios parámetros, los datos en tiempo real del nodo del sensor se transfieren a través de Zigbee al servidor final. Para aplicaciones como el riego y la fertilización, los módulos Zigbee se conectan en red para la comunicación, por ejemplo, en el riego por goteo que se utiliza para controlar el contenido del suelo, como la humedad.

Lora como tecnología inalámbrica es una plataforma de bajo consumo y largo alcance que se utiliza ampliamente en aplicaciones IoT. Al ser de bajo consumo de energía, ofrece conectividad LPWAN entre los sensores inalámbricos y la nube. Ha demostrado ser mucho más efectivo y confiable que Bluetooth, WiFi, etc.

Los sensores basados en Lora se pueden instalar en dispositivos más pequeños para un monitoreo confiable. Lo que es más importante, las señales Lora pueden penetrar objetos gruesos y aislados, incluso edificios, y por lo tanto pueden cubrir un área de red más grande.

En general, las redes basadas en Lora tienen un mayor rendimiento en términos de vida útil y, al mismo tiempo, presentan una carga de mantenimiento reducida. De

igual forma, presenta un sistema para lograr la trazabilidad de la información en el sistema de transporte de granos para asegurar la calidad de los alimentos mediante el monitoreo de los niveles de temperatura y humedad.

Sigfox también se utiliza para proporcionar servicios de conectividad de red a objetos de baja potencia. Se basa en tecnología de banda estrecha o banda ultra estrecha; por lo tanto, toma fragmentos de espectro muy estrechos y cambia la fase de la onda de radio portadora para codificar los datos. En base a estas características, ofrece un rendimiento de alto nivel, incluso si 100 sensores necesitan transmitir datos al mismo tiempo.

NBLoT es una nueva tecnología de radio con licencia que garantiza brindar una solución rentable, confiable y de bajo consumo. Puede coexistir con las redes celulares Long Term Evolution - evolución a largo plazo (LTE) - existentes, por lo tanto, no se requiere una nueva infraestructura para configurarla desde cero, por lo que el costo de instalación es bajo.

2.7.2.2 Espectro en Smart Farming

Las comunicaciones se pueden agrupar en espectro con licencia y sin licencia. En cuanto al espectro, cada dispositivo de radio utiliza ciertas bandas de frecuencia para la comunicación. La FCC (Comisión Federal de Comunicaciones) ha definido bandas de espectro sin licencia para operaciones con fines científicos, industriales y médicos. Estas bandas de espectro a menudo se aplican para niveles de baja potencia y aplicaciones de corto alcance. En consecuencia, una serie de tecnologías comunes para el sector de la agricultura inteligente, que van desde el control inalámbrico de máquinas, el uso de UAV (vehículo aéreo no tripulado) hasta tecnologías de comunicación como WiFi y Bluetooth, que utilizan bandas de espectro sin licencia.

Sin embargo, el uso de espectros sin licencia enfrenta varios desafíos, como la garantía de la calidad del servicio (QoS), el costo de establecer la infraestructura inicial y la interferencia generada por la gran cantidad de dispositivos IoT.

El inconveniente en el uso del espectro con licencia es el costo de suscripción para transmisión de datos y consumo de energía de transmisión en dispositivos IoT [15].

Un espectro con licencia generalmente se asigna a las redes móviles. Proporciona un tráfico de red más eficiente, más confiabilidad, mejora la QoS, ofrece seguridad, brinda una amplia cobertura e implica menores costos de infraestructura de

inicialización para los usuarios. Sin embargo, el uso de bandas de espectro con licencia ha enfrentado algunas limitaciones, como los altos costos de transmisión de datos y la baja eficiencia energética de los dispositivos IoT.

2.7.2.3 Topología en Smart Farming

El establecimiento de la banda de espectro de comunicación y el protocolo de operación de los dispositivos IoT depende de la estructura que implementa los dispositivos IoT para aplicaciones de agricultura inteligente. Las estructuras de red para la agricultura inteligente suelen tener dos tipos principales de nodos: sensores y nodos de retorno. Las características comunes de los nodos de sensores de IoT son la distancia de comunicación corta, la velocidad de datos baja y la eficiencia energética alta. Por el contrario, los nodos de backhaul de IoT a menudo requieren grandes distancias de transmisión, alto rendimiento y velocidades de datos. Por lo tanto, en función de cada nodo de la red IoT, el nodo sensor o el nodo backhaul selecciona e instala las tecnologías de comunicación apropiadas. En la figura 14 se observa una configuración de Topología en Smart Farming basada en IoT.

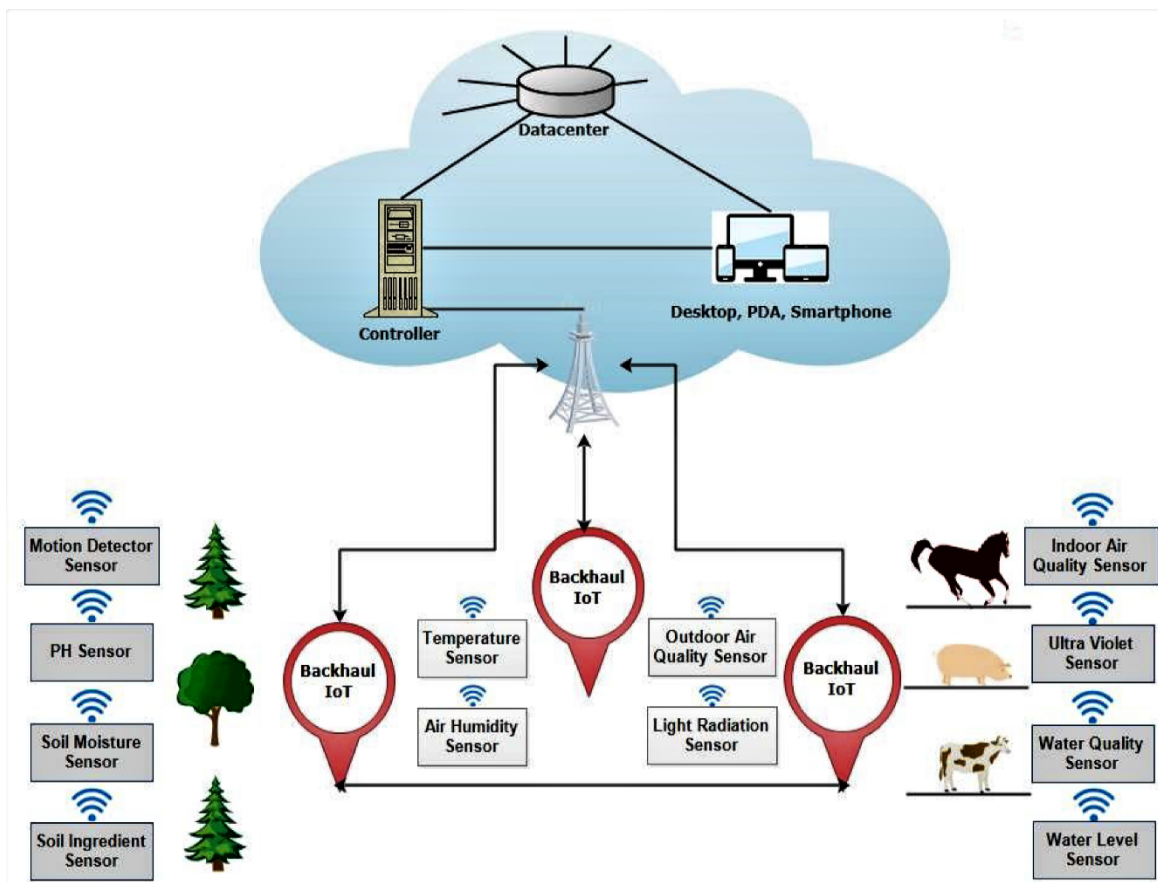


Figura 14. Topología en Smart Farming basada en IoT. Fuente Quy, VK (2022)

Los nodos sensores de IoT recopilan información del entorno agrícola, como la humedad del suelo, la humedad del aire, la temperatura, los ingredientes nutritivos

del suelo, las imágenes de plagas y la calidad del agua, y luego transmiten los datos recopilados a los dispositivos de backhaul de IoT.

Los nodos de backhaul de IoT, además de tener el rol de nodo sensor de IoT, también juegan un papel como nodos intermedios para recibir información de otros nodos de IoT y transmitirla al centro de control.

La Figura 15 muestra las distintas aplicaciones de la agricultura inteligente basada en IoT.

La elección del modo de comunicación también depende de los requisitos de las aplicaciones del dispositivo IoT, como por ejemplo algunas granjas requieren sensores que pueden operar con una velocidad de datos baja, pero necesitan trabajar durante largos períodos, por lo que exigen una batería de larga duración. Para tales escenarios, una nueva gama LPWAN es la que se encuentra a disposición.

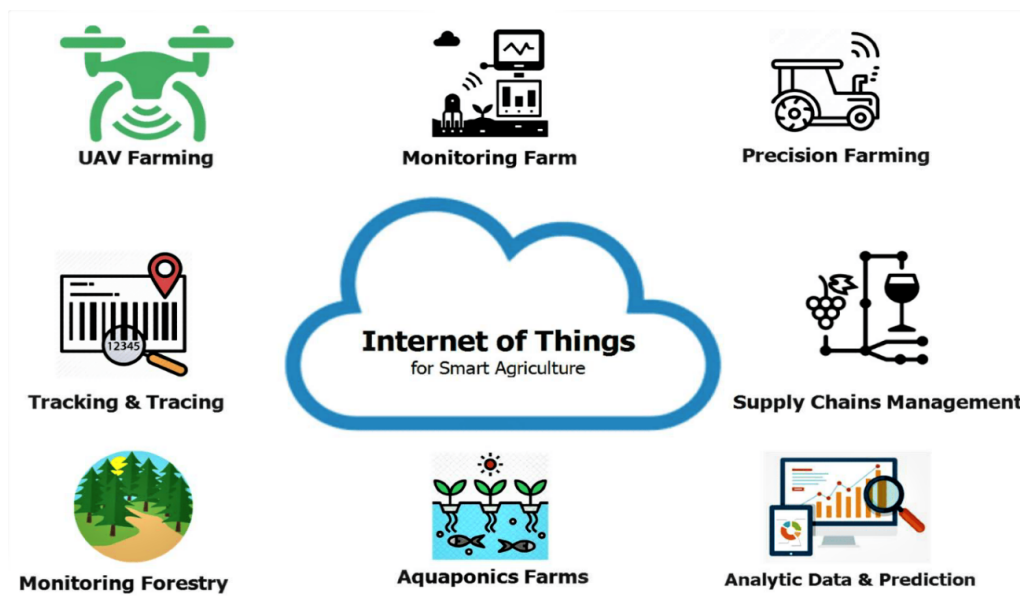


Figura 15. Aplicaciones de agricultura inteligente basada en IoT. Fuente Quay, VK (2022)

Actualmente, la gestión de cultivos y pastos son dos de las principales aplicaciones en las que las redes LPWAN son muy adecuadas y, considerando además su éxito, se pueden utilizar en muchos otros usos relacionados con la agricultura. En la Figura 16 se puede observar la comunicación de extremo a extremo para la agricultura inteligente, y como esta se pueden dividir en varias capas para interactuar entre sí a fin de proporcionar los servicios correspondientes.

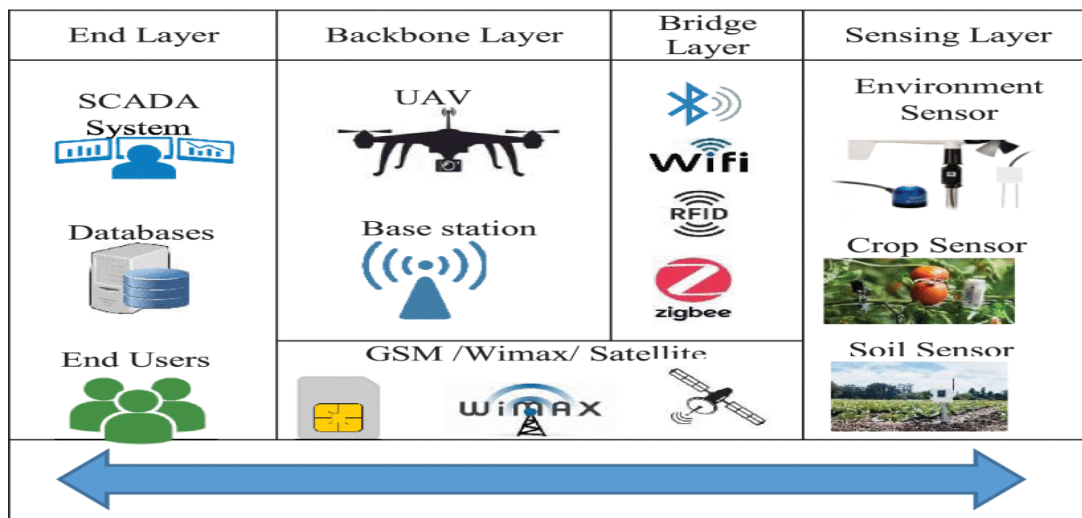


Figura 16. Comunicación de extremo a extremo para agricultura inteligente. Fuente Quay, VK (2022)

2.7.2.4 Escenarios de aplicación en Smart Farming

Los escenarios de aplicación de dispositivos IoT se pueden basar en sensores o red backhaul, y escenarios de despliegue.

Hay varias tecnologías de IoT que se han desarrollado recientemente, algunas de las cuales aún se encuentran en pruebas piloto. La elección correcta de la tecnología IoT es un gran desafío porque se requiere una gran inversión para implementar nuevas tecnologías.

Actualmente, se están desarrollando plataformas de software, dispositivos IoT y se está investigando sobre tecnologías de comunicación que pueden ofrecer implementaciones de IoT de bajo costo. La mayor parte del trabajo actual se centra en la creación de prototipos y pruebas a pequeña escala, y técnicas de multiplexación para el intercambio de datos de cientos a miles de sensores a una ubicación central.

Con el paso del tiempo, el término Internet se ha asociado a las cosas y ahora se lo identifica como IoT. Como su nombre lo indica, las cosas se conectan a Internet a través de las WSN, identificación por radiofrecuencia (RFID), Bluetooth, comunicación de campo cercano (NFC), LTE y varias otras tecnologías de comunicación inteligente. Esta asociación ayuda en la transferencia de información recopilada desde varios dispositivos a lugares destinados a través de Internet [16].

Las principales tecnologías de comunicación en IoT se exhiben en la Figura 17.

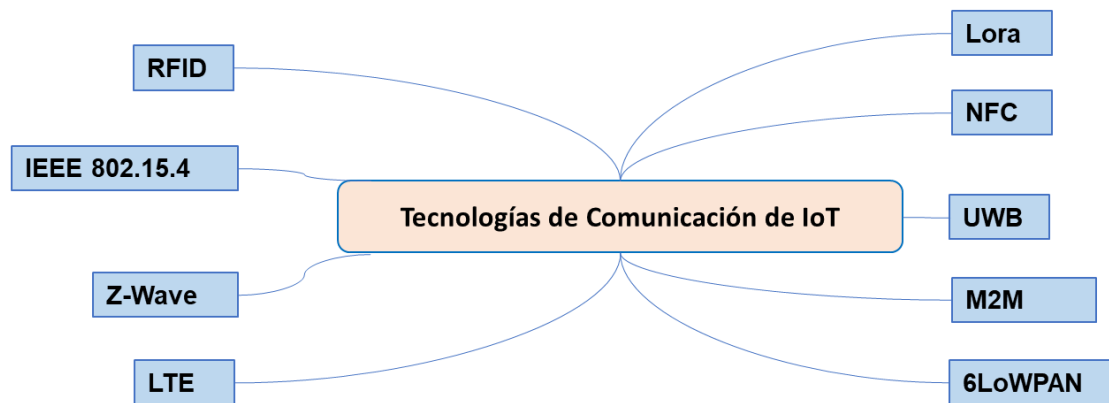


Figura 17. Tecnologías de comunicación de IoT. Fuente Khanna, A (2019)

Los desarrollos futuros en el campo agrícola solo son posibles si la mayoría de las tierras de cultivo están sujetas a sistemas de seguimiento. El enfoque principal es determinar un dispositivo para LPWAN con comunicación de bajo costo, baja potencia y largo alcance para el sector de la agricultura inteligente. La idea es proporcionar una comparación de las técnicas básicas de LPWAN utilizadas en la red de monitoreo agrícola para recopilar información de campo agrícola en tiempo real.

La Figura 18 muestra algunas de las tecnologías líderes bajo tecnología LPWAN con licencia y sin licencia. Los datos en tiempo real relacionados con la agricultura se pueden transferir al usuario final a través de una topología de red de sensores basada en LPWAN. Aquí se pueden analizar algunas tecnologías LPWAN comunes, que están diseñadas principalmente para sistemas de redes de sensores para enviar datos a bajo costo a un largo alcance [17].

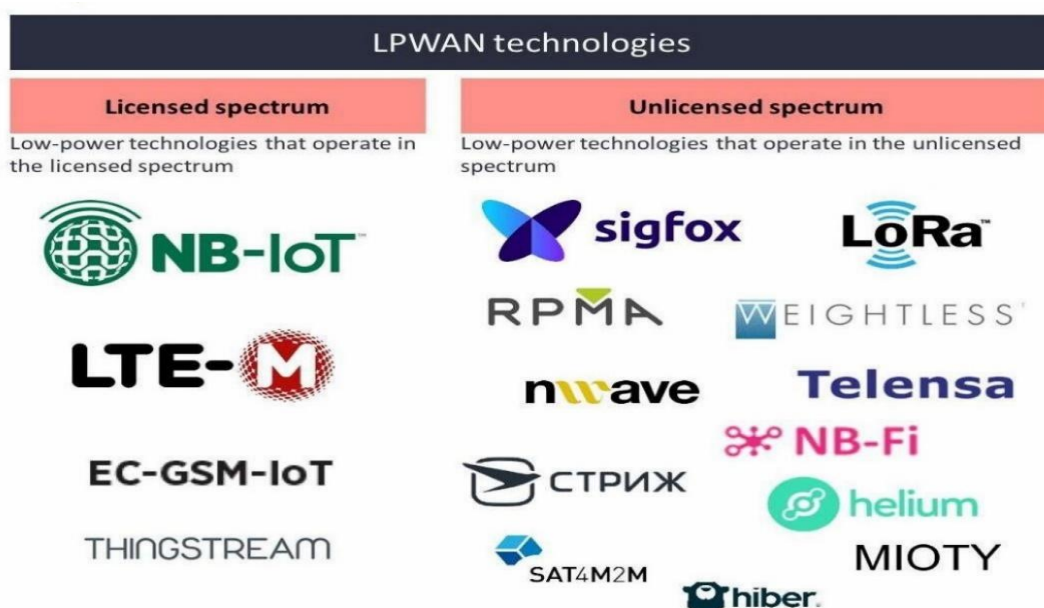


Figura 18. Tecnologías LPWAN con y sin licencia. Fuente Liya, ML (2020)

El advenimiento de la tecnología IoT de los últimos años provocó un aumento del número de dispositivos conectados, dando lugar a las nuevas tecnologías capaces de interconectar un gran número de dispositivos. Las tecnologías de comunicación inalámbrica actuales, como Bluetooth y ZigBee, tienen un alcance corto, mientras que las tecnologías de comunicación celular 3G, 4G y 5G tienen un alcance medio, pero están limitadas por el alto consumo de energía; sin embargo, esta limitación se ha mitigado con el surgimiento de tecnologías LPWAN de largo alcance como es el caso de la tecnología Lora y que tienen un menor consumo de energía [18].

En la Figura 19 se observa los anchos de banda versus rango de todas las tecnologías de comunicación inalámbrica.

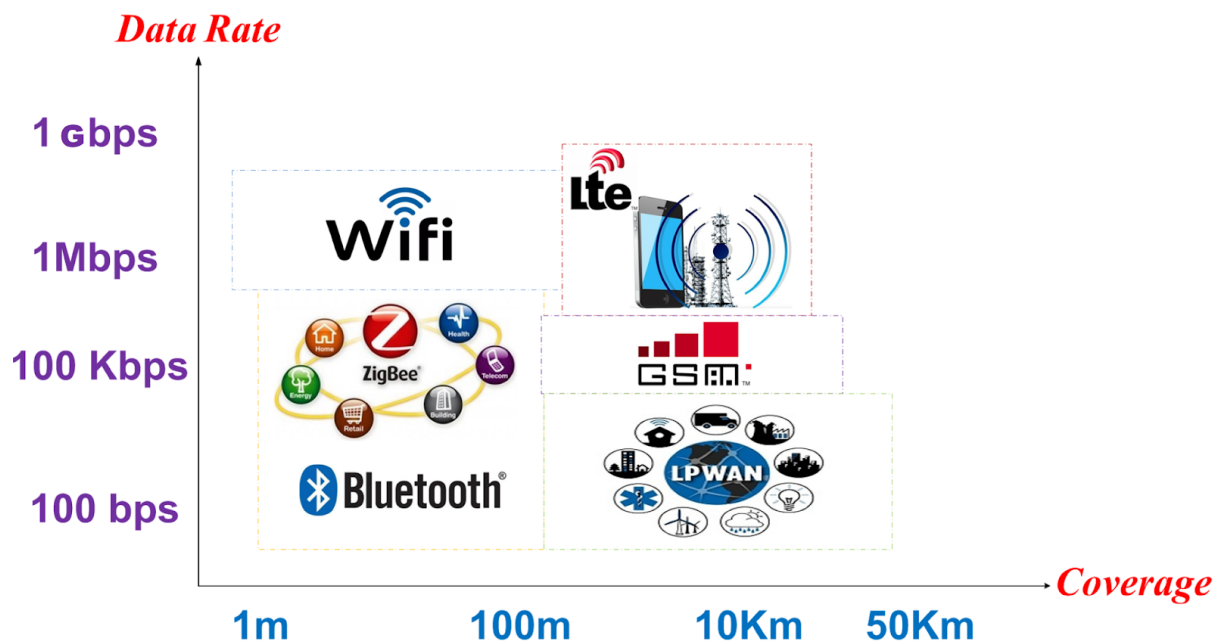


Figura 19. Anchos de banda versus rango de todas las tecnologías. Fuente Yascaribay, G (2022)

Junto con el rápido crecimiento del mercado de IoT, las aplicaciones de IoT para ambientes rurales tienen requisitos específicos, como largo alcance, baja velocidad de datos, bajo consumo de energía.

Recientemente, las tecnologías LPWAN se han vuelto más populares en el mercado de IoT, debido a sus características de comunicación inalámbrica de bajo costo, baja potencia y amplio rango.

Para elegir una tecnología LPWAN adecuada para las aplicaciones de IoT y pensando en un escenario acorde a un prototipo de Smart Farming, se deben considerar varios factores, incluidos el alcance, la cobertura, la vida útil del

dispositivo, la latencia, la escalabilidad, la duración de la carga útil, la complejidad de la implementación, la calidad del servicio y el costo de implementación.

2.7.2.5 Desafíos en Smart Farming

La ONU proyecta que la población mundial alcanzará los 9700 millones para 2050, lo que hará que la producción agrícola mundial aumente un 69 % entre 2010 y 2050, por lo que habrá una gran demanda de alimentos. Para satisfacer esta demanda, los agricultores y las empresas agrícolas recurren al Internet de las cosas para obtener análisis y mayores capacidades de producción.

Insider Intelligence proyectó en 2021 que habrá casi 12 millones de sensores agrícolas instalados en todo el mundo para 2023. Además, el gigante tecnológico IBM estima que la granja promedio puede generar medio millón de puntos de datos por día, lo que ayuda a los agricultores a mejorar los rendimientos y aumentar las ganancias [19].

Se estima que más de 75 millones de dispositivos basados en IoT están operando en la industria agrícola desde el año 2020. Además, la granja promedio espera generar 4,1 millones de puntos de datos diariamente para 2050.

IoT ha creado una revolución en casi todas las industrias del mundo. Las tecnologías y dispositivos de IoT detectarán, recopilarán, almacenarán y comunicarán datos a varios componentes en una aplicación como la agricultura inteligente. La revolución de la agricultura inteligente se refiere al uso, integración y despliegue de las últimas tecnologías, es el caso de IoT en la agricultura, con el objetivo de mejorar y aumentar la cantidad y calidad de la cosecha de cultivos [20].

El mayor de los desafíos es hacer que la agricultura inteligente sea sostenible, aparte de nutrirse de mayor capacidad tecnológica para sus desarrollos de producción.

De todas maneras, existen desafíos que están relacionados con la tecnología de agricultura inteligente. Estos incluyen hardware y dispositivos, redes, infraestructura, interferencia de señales, seguridad de datos, entre otros.

Dentro de las tecnologías emergentes adoptadas por la agricultura, el IoT sobresale de todas y se vuelve indispensable en las operaciones agrícolas, ya que se coloca al centro de estos desafíos y hace que la agricultura sea más inteligente y eficiente para cumplir con las expectativas del futuro. El IoT tiene la capacidad de simplificar estas tareas y hacerlas más previsibles, y cambiará aún más las actividades

agrícolas al proporcionar al agricultor un mayor control sobre su tierra y sus activos de una manera sin precedentes, maximizando así su eficacia.

La comunicación inalámbrica prevalece en los despliegues de la agricultura inteligente debido al alto costo que implicaría un cableado y sobre todo al problema del mantenimiento. A su vez, con el surgimiento de IoT ha habido un cambio de paradigma del uso de WSN para la agricultura inteligente, ubicando a IoT como el principal impulsor de la agricultura inteligente.

La infraestructura de IoT para el entorno agrícola es más complicada en comparación con otras aplicaciones. Esto se debe simplemente a que el entorno agrícola requiere un seguimiento continuo en tiempo real y admite condiciones ambientales más rigurosas y extremas.

En muchas áreas rurales, puede que aún no se disponga de una conectividad a Internet sólida y confiable. A menos que se mejoren significativamente el rendimiento de la red y las velocidades del ancho de banda, la implementación de la agricultura inteligente seguirá siendo un problema si no hay una inversión en conectividad rural.

Uno de los desafíos asociados con el uso de tecnologías digitales y, por lo tanto, para la transformación digital del sector agrícola y alimentario es que la cobertura de la red en las zonas rurales sigue siendo limitada.

Se espera que se implementen miles de millones de dispositivos IoT en el sector agrícola. Las puertas de enlace y los protocolos existentes deberán admitir una gran cantidad de dispositivos/nodos de IoT.

En la literatura científica, pocos estudios se han centrado en el uso de protocolos de comunicación como RFID/WiFi/Bluetooth para el seguimiento de variables relacionadas con el sector agrícola. Esto se debe al corto alcance y baja cobertura de estas tecnologías. Los sistemas tradicionales de comunicación de largo alcance, como las comunicaciones por satélite, WiMax y LTE/4G, son los más utilizados en este sector. Las soluciones basadas en la comunicación por teléfono celular podrían proporcionar un mayor rango de cobertura a costa de un mayor consumo de energía por parte de los dispositivos finales. Los requisitos de las aplicaciones de IoT han llevado a la aparición de las LPWAN.

En la agricultura inteligente, los dispositivos IoT se implementan en campo abierto con condiciones ambientales estrictas, estos equipos están expuestos directamente

a condiciones ambientales adversas, como lluvia, temperatura alta y humedad extrema.

El despliegue de dispositivos IoT masivos para fines agrícolas y de otro tipo causará problemas de interferencia, especialmente con los dispositivos IoT que utilizan el espectro sin licencia, como ZigBee, WiFi, Sigfox y Lora. La interferencia causada puede provocar la pérdida de datos y reducir la confiabilidad del ecosistema IoT.

En la agricultura, los dispositivos IoT son vulnerables a la manipulación física, como robo o ataques de depredadores y animales, cambio de dirección física o enlace. Además, para los dispositivos IoT, es difícil implementar algoritmos complejos y sofisticados debido a la memoria limitada, las capacidades de comunicación y el bajo consumo de energía. La puerta de enlace puede ser propensa a ataques de congestión, denegación de servicio (Denial of Service, DoS) y ataques de reenvío.

El diseño de los dispositivos IoT es muy importante y también el cumplimiento de estándares de fabricación, especialmente para dispositivos que se implementan en campo abierto. Como tal, los impactos externos pueden causar que los dispositivos IoT no se comuniquen y no puedan enviar los datos recopilados al servidor Gateway o concentrador central.

El futuro de IoT estará sujeto a los continuos avances en materia de WSN y a que los operadores telefónicos pongan a disposición la quinta generación 5G de tecnologías de comunicación móvil celular para proporcionar a los agricultores datos e información en tiempo real en cualquier momento y en cualquier lugar donde se encuentre su campo.

La aplicación de IoT en la agricultura trata de empoderar a los agricultores con las herramientas de decisión y las tecnologías de automatización que integran a la perfección productos, conocimientos y servicios para mayor productividad, calidad y rentabilidad.

2.8 Tecnologías LPWAN en Smart Farming

Las nuevas tecnologías LPWAN como lo mencionamos anteriormente, ofrecen comunicación de largo alcance, bajo consumo de energía y baja tasa de transmisión de datos. Estas tres características son específicas de las aplicaciones agrícolas, lo que hace que las nuevas tecnologías LPWAN sean adecuadas para su implementación en Smart Farming.

Las tecnologías de comunicación LPWAN más populares son SigFox, Lora y NB-IoT. La tecnología SigFox brinda una buena cobertura en áreas urbanas. La tecnología Lora permite hacer concesiones entre la cantidad de datos a transmitir, el alcance y la autonomía energética. La tecnología NB-IoT se basa en redes celulares.

Recientemente, ha surgido una nueva generación de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) para cerrar la brecha entre la tecnología de red inalámbrica y móvil.

La tecnología Lora tiene una alta escalabilidad y permite una alta densidad de nodos en un área de terreno amplia; estas son características muy deseables para aplicaciones en áreas rurales como la agricultura de precisión, que pueden contribuir a mejorar la transmisión de datos adquiridos de variables climáticas, visibilidad del estado de los cultivos, eficiencia en el uso del agua, niveles de fertilizantes y capacidad de producción de productos agrícolas.

En los últimos años, Sigfox y Lora se han ido posicionando en el mundo de las LPWAN. Sigfox fue desarrollado en Francia en 2010 y actualmente opera en diferentes países como Estados Unidos, Ecuador, México, Colombia, Sudáfrica y Australia, entre otros. Se caracteriza por utilizar una Banda Ultra Estrecha (UNB), ocupando poco espacio dentro del rango de frecuencias y empleando velocidades de datos bajas.

Del estudio comparativo de diferentes tecnologías LPWAN utilizadas para el monitoreo en tiempo real del campo agrícola, surge que las principales tecnologías LPWAN como Lora, Sigfox, NB-IoT, proporcionan una buena conectividad a los sensores desplegados para monitorear el campo agrícola.

En la tabla de la Tabla 4 se exhibe una comparación de las tecnologías LPWAN.

Tabla 4. Comparativas tecnologías LPWAN. Fuente Yascaribay, G (2022)

Tipos de tecnología LPWAN	LoraWAN	SIGFOX	NB-IoT
Cobertura	2–5 km zona urbana 10–20 km zona rural	3–10 km zona urbana 20–40 km zona rural	1 km zona urbana 10 km zona rural
Estándar	Alianza Lora	Sigfox	3GPP versión 13
Espectro con licencia	No	No	Sí
Frecuencia	Bandas ISM 433 MHz Asia, 868 MHz Europa, 915 MHz N. América	Bandas ISM 433 MHz Asia, 868 MHz Europa, 915 MHz N. América	Banda celular LTE
Modulación	Espectro ensanchado de chirp (CSS)	DBPSK/GFSK	QPSK/BPSK
Velocidad de datos	250 bps–50 kbps	100 bps	200 kbps
Banda ancha	125–250 kilociclos	100 Hz	200 kilociclos
Topología	estrella	estrella	Red LTE
Capacidad Dispositivo conectado	50 K por celda	50 K por celda	100 K por celda
Comunicación bidireccional	sí/semidúplex	Limitado/Semidúplex	sí/semidúplex
Protocolo	asincrónico	asincrónico	sincrónico
Mensaje por día	ilimitado	140 enlace ascendente 4 enlace descendente	ilimitado
Longitud máxima de carga útil	243 bytes	Enlace ascendente de 12 bytes Enlace descendente de 8 bytes	1600 bytes
Seguridad	Sí (AES 128b)	No	Sí (LTE)
Geolocalización	TDoA	RSSI	OTDoA
QoS	No	No	Sí
Consumo de energía	bajo	bajo	alto
Latencia	Bajo con clase C	alto	bajo
Inmunidad a interferencias	alto	alto	bajo
Costo de instalación por estación base	>1000 euros	>4000 euros	>15.000 euros
Costo final del dispositivo	3-5 euros	<2 euros	>20 euros

Las tecnologías Lora y Sigfox brindan los mejores resultados al considerar los parámetros de bajo costo y cobertura. Lora también es adecuado para establecer comunicación y despliegue de red local similar a Sigfox. Debido a su bajo retraso y alta QoS, NB-IoT se ubicó en la primera posición del mercado actual de IoT. Pero, el costo de NB-IoT es alto en comparación con otros.

Lora tiene ventajas en términos de costo, duración de la batería e implementación; además de disponibilidad comercial en varios países.

Por estos motivos, nos centramos en el uso de esta tecnología, que se adapta a las condiciones de las zonas rurales, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones agrícolas. La implementación de Lora permitirá la conexión de una gran cantidad de dispositivos de largo alcance con bajo consumo de energía, favoreciendo el monitoreo de las variables climáticas, el consumo de agua en los sistemas de riego y la fertilización de cultivos entre otros.

Las LPWAN son perfectas para dispositivos que necesitan enviar pequeñas cantidades de información a largas distancias. Estas distancias pueden ser de hasta 15 km en áreas rurales y de 1 a 5 km en áreas urbanas, con la ventaja adicional del bajo consumo de energía (es decir, las baterías asociadas pueden durar 10 años).

Estas LPWAN están ganando terreno y cuestionando tecnologías anteriores porque las LPWAN ofrecen conectividad inalámbrica mediante el uso de una topología en estrella y transmisión de radio de largo alcance con bajo consumo de energía. Las tecnologías LPWAN más famosas son las redes LoraWAN, Sigfox y NB-IoT [21].

Se ha demostrado que Sigfox y Lora son ventajosos en términos de duración, capacidad y costo de la batería. Mientras tanto, NB-IoT ofrece beneficios en términos de latencia y calidad de servicio.

Las WSN basadas en LPWAN se han vuelto ampliamente utilizadas en aplicaciones de la agricultura inteligente. Surgen como consecuencia múltiples escenarios para el monitoreo y seguimiento de recursos y campos agrícolas a gran escala.

En la Figura 20 se observa un ejemplo de estos escenarios que se pueden implementar con la interacción entre nodos/tractor/agricultor a infraestructura usando LoraWAN, Sigfox, NB-IoT y ZigBee.

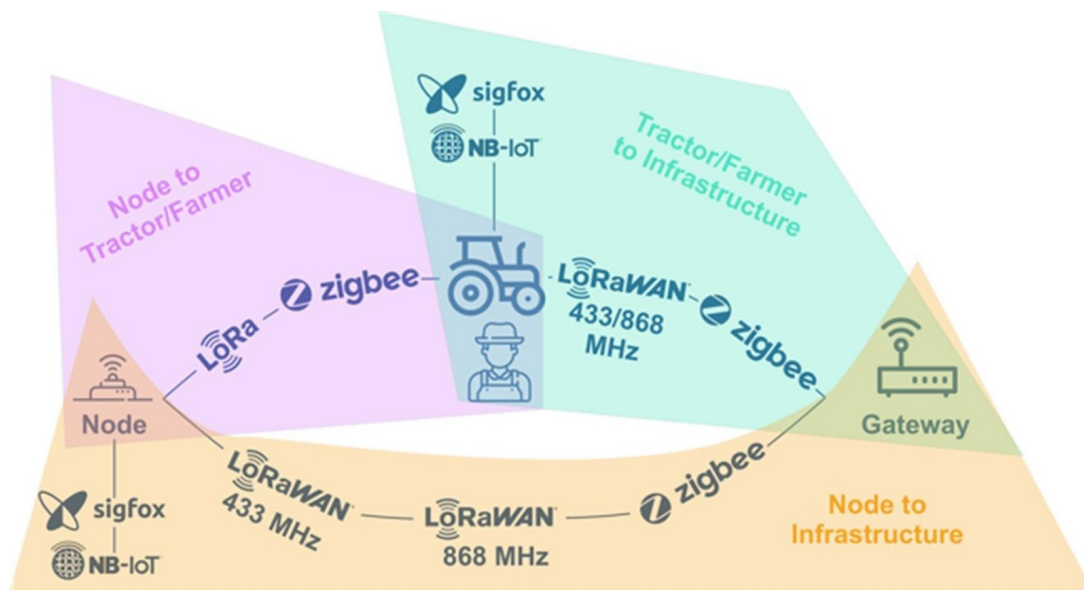


Figura 20. Ejemplo de escenario para las WSN basadas en LPWAN. Klaina, H (2022)

En Smart Farming, se requiere larga vida útil de la batería de los dispositivos sensores. Los dispositivos actualizan los datos detectados varias veces por hora. Por lo tanto, tecnologías como Sigfox y Lora son ideales para esta aplicación, de acuerdo con el estudio comparativo realizado de las tecnologías LPWAN para la implementación de IoT a gran escala.

La tecnología LPWAN reduce la velocidad de transmisión de datos y aumenta la cobertura de la red. Se usa en largas distancias (hasta 40 km) y es energéticamente eficiente, utilizando una batería que puede enviar algunos mensajes todos los días durante 10 años. Por lo tanto, LPWAN está demostrando ser útil y práctico en la agricultura inteligente. Varios estudios han investigado la confiabilidad de las LPWAN para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT).

Lora es la tecnología más adecuada para aplicaciones dedicadas a la agricultura inteligente. La tecnología Lora ofrece alta cobertura de red de hasta 20 km en áreas rurales, consume energía mínima y presenta la posibilidad de crear una red privada. A su vez, Lora ofrece muchas ventajas para las aplicaciones de IoT en la agricultura inteligente [22].

A diferencia de Sigfox, Lora también servirá para la implementación de la red local y la comunicación confiable cuando los dispositivos se mueven a altas velocidades. Por el contrario, NB-IoT servirá a los mercados de IoT de mayor valor que están dispuestos a pagar por una latencia muy baja y una alta calidad de servicio.

LoraWAN se considera la red de comunicación más adecuada de LPWAN para aplicaciones IoT en agricultura inteligente. Fomentando los usos futuros para aplicaciones reales de IoT en la agricultura [23].

2.9 Simuladores

Los ambientes de simulación pueden ayudar durante las fases de planificación de un proyecto para garantizar, que se eligió la tecnología correcta y los dispositivos adecuados para que la red a desplegarse antes de su instalación e implementación final pueda adaptarse a las condiciones requeridas en cada escenario simulado.

Las simulaciones se utilizan para realizar experimentos reproducibles, teniendo en cuenta el impacto de varios parámetros en el rendimiento general del sistema. Con este enfoque, se puede estudiar el rendimiento del nivel de las WSN en ciertos escenarios de condiciones difíciles, como es una gran cantidad de nodos finales o altas cargas de tráfico.

Los simuladores juegan un papel importante durante el desarrollo de las redes inalámbricas que permiten soluciones IoT, ya que las redes deben ser escalables y energéticamente eficientes sin comprometer la seguridad [24].

Un simulador que pueda calcular los ajustes de configuración óptimos para una red propuesta sería extremadamente valioso.

Varias tecnologías inalámbricas están permitiendo el crecimiento de la industria de IoT. Uno de estos, a saber, como vimos en la sección anterior es LoraWAN, que es muy popular en la comunidad de investigación, cuyo enfoque es optimizar el protocolo LoraWAN para un uso efectivo, y donde una de las herramientas fundamentales para ensayar prototipos y escenarios reales son los simuladores.

La tecnología Lora es candidata para la implementación del concepto IoT en aplicaciones agrícolas. A partir de los resultados obtenidos, el protocolo de comunicación LoraWAN proporciona un alto nivel de rendimiento en dichas aplicaciones.

La implementación de una red LPWAN y en particular la LoraWAN es un esfuerzo costoso e implica la invención mediante el uso de las tecnologías IoT. Las que pueden ser simuladas para garantizar que su solución planificada sea factible.

Se requiere una comparación entre los simuladores disponibles actualmente, para tener una guía en el diseño de redes inalámbricas y brindarles a los investigadores una herramienta esencial para la selección del simulador correcto.

Existen muchas plataformas de simulación para redes inalámbricas de sensores, como ns-2, ns-3, OMNET++, SensorSim, TOSSIM, y CupCarbon.

Una de las premisas fundamentales para utilizar un simulador en el caso de las WSN, es que sea fácil de usar y tenga una comunidad activa de investigación y desarrollo. Además, debe ofrecer actualizaciones frecuentes para mantenerse al día con la rápida implementación de redes inalámbricas y que no se vuelva obsoleto y reciba actualizaciones periódicas.

Para conocer cuál tecnología WSN potencia aún más los servicios del entorno para garantizar mejores soluciones en un rango de corto alcance, se han hecho análisis comparativos entre las tecnologías comúnmente más usadas como es el caso de Wifi, Bluetooth, y Zigbee, donde se consideró variables que posibilitaron establecer una comparativa entre ellas, haciendo uso del diseño de un modelo comparativo desarrollado en un entorno de simulación, el cual permitió mostrar los resultados obtenidos del análisis, y donde se determinó que la tecnología Zigbee es la que mejor se desempeña en aspectos de seguridad y conectividad para enriquecer y/o potenciar los beneficios del internet de las cosas [25].

Se comparó las tres tecnologías en aspectos como la heterogeneidad, escalabilidad, consumo de energía, procesamiento de datos, seguridad, transmisión de datos, y minimización de costos, debido a que estos campos son imprescindibles de cumplir en cada tecnología que se aplique en el entorno, para que exista un mejoramiento de las funcionalidades que ofrece.

La tecnología WIFI es la que cumple en mayor proporción con los requerimientos de transmisión y procesamiento de datos, ya que permite transmitir muchos tipos de datos como audio, videos, e imágenes a altas velocidades con un retardo mínimo, aunque requiere de mucho consumo de batería para solventar la ejecución de dichas funciones.

Zigbee es la tecnología que presenta mejores cualidades de desempeño en IoT actualmente, logrando disminuir ciertas limitantes del entorno, como la heterogeneidad de dispositivos, y la falta de seguridad, gracias a sus características de alta conectividad, integración de un robusto algoritmo de seguridad y al constante desarrollo que ha tenido en los últimos años. Es por esta razón que fue elegida la tecnología que mejor potencia a los servicios del internet de las cosas.

De las tres tecnologías analizadas, Bluetooth es la que más rezagada se mantiene debido a que su desarrollo no ha representado mayor impacto para cubrir los requerimientos relevantes del IoT, conservando la minimización de costos como su mayor fuerte.

Para hacer una comparativa sobre los otros protocolos que tienen rango de largo alcance y que integran las IoT, se debe cumplir ciertos requisitos para su aplicación. Las redes de sensores inalámbricos deben cumplir con parámetros tales como: costos mínimos de implementación y operación de la red, reducción de espacios en la instalación de los nodos, un bajo consumo de energía relacionado con un alto nivel de duración de la batería de los nodos, la autoconfiguración de los equipos para una autonomía sin empleo del ser humano.

Las redes LPWAN tienen como objetivo proporcionar comunicaciones de largo alcance, conectando dispositivos distribuidos en una gran área geográfica, y vienen a completar las tecnologías de comunicaciones inalámbricas tradicionales e inalámbricas de corto alcance para cumplir con los diversos requisitos de las aplicaciones de IoT.

El protocolo LoraWAN utiliza una topología de red de tipo estrella, en la que cada nodo Lora puede comunicarse directamente con el módulo del Gateway [26].

En el universo del IoT, Lora y su protocolo LoraWAN se han convertido en tecnologías representativas LPWAN. El consumo de energía en LPWAN, como en LoraWAN, juega un papel importante en la determinación de la vida útil de las redes de sensores inalámbricos.

Existen varios parámetros como el factor de propagación, la detección de actividad del canal, la tasa de código y las frecuencias del canal en el consumo de energía. Destacamos entre las métricas que se monitorean en los distintos escenarios la eficiencia energética y su impacto en la duración de la batería para un mejor rendimiento. El análisis se ha realizado con la plataforma CupCarbon, ya que cuenta con un entorno gráfico muy amigable y su resultado final es acorde a lo requerido para este tipo de tecnología [27].

CupCarbon es un simulador de red WSN, CupCarbon se volvió muy interesante con parámetros que lo convierten en una herramienta de punta en su uso hoy en día, como su poder de modelado, su interfaz gráfica, que son aspectos muy importantes en el análisis de una red de sensores, además de poder simular las tecnologías como Zigbee, WiFi, Lora que tiene en su plataforma.

El resto de los simuladores distintos a CupCarbon no incluye herramientas de diseño de sensores con interfaz intuitiva, adaptabilidad del diseño, programación Java y modelado energético. Además, es importante tener conocimientos de WSN para

entender cómo funcionan estos simuladores. Es por eso por lo que CupCarbon está demostrando ser una buena opción para trabajar en el análisis de las WSN.

WSN es una tecnología en pleno desarrollo y con mucho futuro. Además, están limitadas por un conjunto de parámetros, como la baja capacidad de procesamiento, la baja capacidad de almacenamiento o la energía limitada. El consumo de energía es el parámetro más limitante, ya que la estabilidad y disponibilidad de la red depende de la supervivencia de los nodos. Actualmente, existen varias aplicaciones que hacen uso de ellas. La implementación y despliegue de una WSN implica gastos importantes, por lo que es interesante simular el funcionamiento de nuestro diseño antes de desplegarlo. Por ello, existen en el mercado numerosos simuladores de red para emular el funcionamiento de este tipo de redes que aportan diferentes funcionalidades. En consecuencia, el simulador más adecuado dependerá de la aplicación que queramos desarrollar [28].

III. Metodología

En este capítulo se estudia los simuladores más importantes utilizados en redes de sensores inalámbricos, se profundiza en particular en el uso del simulador CupCarbon y sus características principales, las métricas de evaluación cuantitativa a utilizar, y se realiza la descripción de los distintos escenarios de prueba a simular.

3.1 Desarrollo

Con el presente proyecto se puede estudiar y desarrollar una simulación en escenarios rurales abiertos con herramientas que permitan visualizar las características de las señales de radio que cubren un amplio espectro tecnológico. El trabajo servirá como base para el estudio y comprensión de las redes de sensores, evitando un despliegue descontrolado de los mismos y generando gastos innecesarios. Al realizar este trabajo de investigación a mediano y largo plazo, en un entorno realista, sobre el mantenimiento, el rendimiento, la optimización de frecuencias, así como el consumo energético de los nodos. El mismo presenta como desafío encontrar el equilibrio adecuado entre las diferentes tecnologías y controlar los errores inducidos, por la interferencia, tasa de error y colisión de paquetes, entre otros. Si se obtiene este equilibrio, es evidente que posibilita investigaciones para desarrollar redes de sensores confiables y optimizados en términos de comunicaciones, acceso a recursos y enrutamiento. Por lo dicho anteriormente, esto se traduciría en ganancia para los sectores agropecuarios, la cual se mide en términos de rapidez de implementación y de confiabilidad de los despliegues.

En una primera etapa se realizará un análisis y comparación de las tecnologías existentes para la utilización en la agricultura inteligente, y luego se seleccionará las tecnologías con base en las restricciones observadas del contexto regional de trabajo, buscando llevar a cabo el proceso de implementación. Las tecnologías utilizadas en el proceso de comunicación entre dispositivos IoT varían de acuerdo con los diversos estándares proporcionados. En un entorno de desarrollo e implementación se puede prever los rangos de distancia, así como la tasa de transferencia de datos y el tipo de seguridad que ofrece cada tecnología. Se necesitan más nodos para proporcionar redundancia y los mecanismos de seguridad basados en software consumen más energía, lo que resulta en una vida útil más corta para el hardware. Esto entra en conflicto con el interés de los agricultores de mantener los costos bajos. Smart Farming les ayuda a maximizar el rendimiento del sector controlando los parámetros ambientales y ayudando a los agricultores a tomar

decisiones. Sin embargo, de esta manera los agricultores se vuelven dependientes de la exactitud de los datos recibidos.

En Smart Farming, se requiere larga vida útil de la batería de los dispositivos sensores. Los sensores de temperatura, humedad y alcalinidad podrían ayudar a reducir significativamente el consumo de agua y mejorar el rendimiento. Los dispositivos actualizan los datos detectados varias veces por hora.

Por lo tanto, tecnologías como Sigfox y Lora son ideales para esta aplicación, según Mekkia et al. (2019) de acuerdo con el estudio comparativo realizado de las tecnologías LPWAN para la implementación de IoT a gran escala.

La visibilidad de propagación y los modelos de interferencia están integrados y se incluyen en los protocolos de comunicación que se puedan utilizar. Esto no solo nos puede ayudar a explicar con detalle los conceptos básicos de las redes de sensores y cómo funcionan; sino que también nos puede ayudar a probar sus topologías inalámbricas, protocolos, etc.

Se busca que el proyecto sirva de modelo para analizar y evaluar, la influencia en los dispositivos de IoT utilizados en el rendimiento de protocolos de comunicación de tecnología inalámbrica como, por ejemplo: Lora WiFi y ZigBee, etc. midiendo parámetros como, por ejemplo: gasto de energía, colisión de paquetes, tasa de error de paquetes y el espectro bajo diferentes escenarios (campo abierto y con obstáculos) en función de la cantidad de dispositivos de IoT.

Se evaluarán diferentes características de los simuladores para seleccionar el más adecuado y el que ofrezca entornos de simulación que representan redes de sensores inalámbricos, y a su vez que brindan la posibilidad de simular algoritmos y escenarios en varios pasos, permitiendo configurar los nodos de forma dinámica para poder dividir los nodos en redes separadas o unir redes diferentes, una tarea que se basa en las direcciones de red y el canal, como así también por ejemplo; censar parámetros como el consumo de energía el cual se pueden calcular y mostrar en función del tiempo simulado. Esto nos permite aclarar la estructura, viabilidad e implementación realista de una red antes de su despliegue real.

3.2 Comparación de Simuladores

En la actualidad existen varias tecnologías de aplicaciones en las WSN que hacen uso de los sensores inalámbricos IoT, y su uso se ha incrementado exponencialmente en los últimos años, jugando un papel importante en el sector

agrícola. Es por ello, que existen en el mercado numerosos simuladores de red para emular el funcionamiento de este tipo de redes que aportan diferentes funcionalidades. En consecuencia, el simulador más adecuado dependerá de la aplicación o variables que queramos monitorear o mensurar en función de la infraestructura y capacidad en el sector agrícola que se implemente.

A la hora de analizar los diferentes dispositivos y componentes que pueden ser utilizados en una red inalámbrica de sensores, es necesario comparar mediante la simulación los diferentes protocolos de comunicación a utilizar, para poder determinar cuál tiene mejor rendimiento, y resulta más eficiente de acuerdo con los requisitos necesarios de un proyecto.

A continuación, describimos algunos de los protocolos más populares usados en WSN.

NS-2 Network-Simulator 2 (<https://www.nsnam.org/>) fue desarrollado en C++ y provee una interfaz de simulación a través de OTcl, una variante Orientada a Objetos de Tcl, El usuario describe una topología de red por medio de scripts OTcl, y luego el programa principal de ns-2 simula dicha topología utilizando los parámetros definidos.

NS-2 está diseñado para sistemas operativos Linux, FreeBSD, Solaris, Mac OS X y puede ejecutarse bajo Windows utilizando Cygwin. Fue licenciado bajo GPL versión 2. Actualmente posee diversas herramientas que permiten un manejo eficiente de escenarios de simulación como son virtualización, los diferentes generadores de tráfico y enrutamiento multicast, la desventaja del simulador mencionado es la escalabilidad limitada, tiene la facilidad de simular casi todo el stack de protocolos del modelo TCP, pero una desventaja es su sencilla interfaz.

NS-3 Network-Simulator 3 (<https://www.nsnam.org/>) es un simulador de red de eventos discretos, destinado principalmente a la investigación y el uso educativo, ayuda a romper los inconvenientes existentes en NS-2. Es una herramienta gratuita también. NS-3 se adapta a las redes reales, que luego actúan como un emulador.

El núcleo de simulación NS-3 admite la investigación en redes IP y no basadas en IP. Sin embargo, la gran mayoría de sus usuarios se enfoca en simulaciones inalámbricas/IP que involucran modelos para WiFi, WiMAX o LTE para las capas 1 y 2 y una variedad de protocolos de enrutamiento estáticos o dinámicos como OLSR y AODV para aplicaciones basadas en IP

OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++) (<https://omnetpp.org/>) es una biblioteca y un marco de simulación de C++ extensible, modular y basado en componentes, principalmente para crear simuladores de red. Incluye redes de comunicación alámbricas e inalámbricas, redes en chip, redes de cola, etc. La funcionalidad específica da soporte para redes de sensores, redes inalámbricas ad-hoc, protocolos de Internet, modelado de rendimiento, redes fotónicas, etc., y es proporcionada por marcos modelo, desarrollados como proyectos independientes. OMNET ++ ofrece un IDE basado en Eclipse, un entorno de tiempo de ejecución gráfico y una serie de otras herramientas. Hay extensiones para simulación en tiempo real, emulación de red, integración de bases de datos, integración de SystemC y varias otras funciones.

TOSSIM (<http://www.tinyos.net/>) es un simulador de eventos discretos que se implementa principalmente y está diseñado para probar los protocolos WSN. Simula aplicaciones completas de TinyOS. Funciona reemplazando componentes con implementaciones de simulación, permite la simulación mediante mapeos, lo que requiere un sólido conocimiento en programación a bajo nivel. TOSSIM admite dos interfaces de programación: Python y C++. Python le permite interactuar dinámicamente con una simulación en ejecución, como un potente depurador. Sin embargo, dado que el interpretador puede ser un cuello de botella en el rendimiento a la hora de obtener resultados, TOSSIM también dispone de una interfaz C++. No admite mediciones de energía, lo cual fue abordado por una herramienta de extensión llamada POWERTOSSIM.

CUPCARBON es un simulador de red de sensores inalámbricos de Smart City e Internet de las cosas (<http://cupcarbon.com/>) [29]. Es una herramienta utilizada no solo para explicar conceptos de manera básica de las WSN y su funcionamiento; sino que también ayuda a los científicos a probar sus topologías inalámbricas, protocolos, etc. Un entorno para la simulación son los eventos discretos en las WSN, usa script de programación llamado Sen Script permitiendo dar instrucciones a cada nodo o mota de manera independiente que pueden ser usados para plataformas como Arduino y Xbee obteniendo código para redes simples y algoritmos en WSN.

Por otra parte CupCarbon permite el desarrollo simulado de nodos a través de su entorno gráfico y sencillo manejo en las capas superiores, aunque no simula todo el stack de protocolos. Su interacción y fácil manejo en el despliegue hace que sea considerado actualmente en investigaciones de redes de sensores de IoT, el resto de los simuladores requieren ser adaptados para brindar una simulación precisa,

además su complejidad y la limitada documentación hace que sea más difícil el uso de los mismos.

En la Tabla 5 se observa una comparación de simuladores descritos anteriormente.

Tabla 5. Comparación de Simuladores

Comparación Simuladores WSN	Ns-2	Ns-3	Omnet++	Tossim	CupCarbon
Dedicado a WSN	No	No	Si	Si	Si
Lenguaje	Otcl	C++	C++	C++	Java
Plataforma SO	Free bsd, Linux, Solaris y Windows	Free bsd, Linux, Os-x, Solaris y Windows	Windows, Unix	Windows, Linux	Windows, Linux, Mac
Interfaz gráfica	En Simulación	En Simulación	Parcial	Parcial	Si
Mapa 3d	No	No	No	No	Si
Generador de eventos analógicos	Manualmente	Manualmente	Manualmente	Manualmente	Si
Generador de eventos digitales	Manualmente	Manualmente	Manualmente	Manualmente	Si
Sensor Meteorológico	No	No	No	No	Si
Agregado aleatorio de nodos sensores	Por script	Por script	No	No	Si
Energía de nodos	Si	Si	Si	Si	Si
Mostrar ocultar distancia de radio	No	No	No	No	Si
ZigBee	Si	Si	Si	Si	Si
Lora	No	No	No	No	Si
WIFI	Si	Si	Si	Si	Si
Generación automática de rutas	Por script	Por script	Por script	Parcial	Parcial
Documentación	Mucha	Media	Media	Poca	Media
Generación automática de gráficos	No	Parcial	No	Si	Si
Nodo móvil	Si	Si	Si	Si	Si
Costo	Gratis	Gratis	Gratis	Si	Gratis

CupCarbon es adecuado para este tipo de proyectos debido a su gran potencialidad de configuración y diseño, permitiendo un entorno gráfico más interactivo y fácil de manejar en comparación con los otros simuladores.

3.3 Simulador CupCarbon

Como vimos en la sección anterior es un simulador especialmente diseñado para redes WSN. Su objetivo es el diseño, visualización y validación de algoritmos para la monitorización ambiental, recogida de datos, etc. Permite crear escenarios con estímulos ambientales como fuegos, gases y objetos móviles. Ofrece dos entornos

de simulación. Permite por un lado el diseño de escenarios con movilidad y generación de eventos naturales y por otro la simulación de eventos discretos en WSN.

Brinda la posibilidad de observar el consumo de recursos que se producen por la naturaleza de las redes urbanas y rurales. Los sensores se pueden mostrar directamente en el mapa. Adicionalmente, la interfaz gráfica es otra de sus ventajas; es intuitivo para el usuario y permite realizar todas las funcionalidades a través de él. Otra ventaja es la falta de requisitos previos importantes. Lo único que necesitamos es acceso al programa y programación en Java. Por estas razones, interfaz intuitiva y conocimientos previos reducidos, es una herramienta adecuada para entornos académicos o de redes. La presencia de modelado de energía que se puede trazar es otra ventaja, ya que es un parámetro importante para probar en las WSN.

CupCarbon es un software de código abierto especializado en redes sensores, disponiendo de varias herramientas para su implementación, prueba y desarrollo de la red. Es posible configurar los datos de consumo de energía, ancho de banda, manejo de datos, protocolos de comunicación (ZigBee Lora y WiFi), establecer eventos aleatorios y generar gráficos de consumo de energía.

La red se puede diseñar gracias a su interfaz gráfica intuitiva haciendo uso de OpenStreetMap (OSM) donde se pueden colocar los sensores directamente. Además, cada sensor puede ser configurado individualmente por su línea de comandos haciendo uso de un lenguaje especialmente diseñado para CupCarbon llamado SenScript.

Los sensores se pueden ubicar directamente, aparte cada sensor puede ser configurado individualmente por su línea de comandos haciendo uso de un lenguaje especialmente diseñado para CupCarbon llamado SenScript [30].

El enrutamiento juega un papel importante en IoT, ya que los sensores son móviles por naturaleza y estos sensores móviles capturan y comunican los datos. Por lo tanto, también existe la necesidad de analizar y desarrollar protocolos de enrutamiento en las redes IoT [31].

CupCarbon tiene como objetivo proporcionar los siguientes beneficios que lo hacen significativo de los otros simuladores de redes de sensores inalámbricos convencionales.

- Facilita modelado y simulación de propagación de radio interferencias basadas en ruido de canal estable en manera más realista.
- Tiene en cuenta el entorno de implementación y cuantifica la incertidumbre de las simulaciones.
- Permite la representación de nodos móviles y ambientes dinámicos.
- Permite el estudio del comportamiento de una red o redes con gran cantidad de nodos en entornos prácticos (ciudad, campos, montaña, etc.).

Cada componente de CupCarbon tiene diferentes funciones para simular mejor las redes de sensores. Puede simular las capas PHY basadas en los protocolos ZigBee, Lora y WiFi. Ofrece la simulación de escenarios y algoritmos en varios niveles. Por ejemplo, en el primer nivel, determinará los nodos de interés en el área dada en el mapa, seguido de un nivel para analizar la naturaleza de la comunicación entre estos nodos para realizar una tarea determinada (por ejemplo, detección de un evento).

En el nivel final, describe la naturaleza del enrutamiento de datos a la estación base si se detecta un evento. La versión actual de CupCarbon permite configurar los nodos dinámicamente para que los nodos puedan dividirse en redes separadas o fusionarse en diferentes redes.

Esto permite aclarar la estructura, viabilidad e implementación realista de una red antes de su despliegue real. La visibilidad de propagación y los modelos de interferencia están integrados e incluyen los protocolos ZigBee, Lora y WiFi.

No solo puede ayudar a explicar visualmente los conceptos básicos de las redes de sensores y cómo funcionan; también puede ayudar a los científicos a probar sus topologías inalámbricas, protocolos, etc.

3.3.1 Características de CupCarbon

Proporciona modelado y simulación de propagación de radio para preparar los futuros despliegues de infraestructura IoT a gran escala para ciudades inteligentes en las mejores condiciones en términos de manera más realista [32].

- CupCarbon ofrece un marco de simulación de múltiples agentes.
- Nos permite ejecutar simulaciones y monitorear diferentes eventos y cambios a lo largo del tiempo.

- Proporciona integración en el entorno de OpenStreetMap, que ofrece una interfaz digitalizada y un repositorio de datos de ubicación geográfica, como calles, posiciones de viviendas, etc.
- CupCarbon nos permite configurar cualquier agente de sistema virtual sin el uso de programación de bajo nivel. Los agentes del sistema para crear secuencias de comandos de sus interacciones se pueden conectar a archivos de secuencias de comandos.

El uso de sistemas multiagente ayuda a una mejor optimización del tiempo de simulación aprovechando el paralelismo de agentes y eventos. CupCarbon está conformado por tres elementos principales los cuales son: un entorno de simulación de agentes múltiples, simulador móvil y finalmente el simulador WSN.

CupCarbon tiene como objetivo proporcionar los siguientes beneficios que lo hace significativo de los otros simuladores de red de sensores inalámbricos convencionales.

- Tiene en cuenta el entorno de despliegue y cuantifica la incertidumbre de las simulaciones.
- Permite la representación de nodos móviles y ambientes dinámicos
- Facilita el estudio del comportamiento de una red o redes con gran cantidad de nodos en entornos prácticos (ciudad, montaña, etc.).

Se puede crear un prototipo de cualquier WSN con su interfaz gráfica intuitiva utilizando el marco OpenStreetMap. Los nodos sensores se pueden colocar directamente en el mapa. Además, cada nodo sensor puede configurarse individualmente por su línea de comandos con el script.

La aplicación permite la simulación de eventos discretos dentro de la red de sensores, y se puede modelar el comportamiento de los nodos. Una de sus características es que los sensores pueden configurarse individualmente a través de sus líneas de comando, en un lenguaje especialmente diseñado llamado SenScript.

Las principales ventajas de esta plataforma es la posibilidad de preparar rápidamente cualquier red IoT real sin programar cada nodo sensor real individualmente, y permitir un estudio preciso de algunos parámetros basándose en redes reales en lugar de virtuales [33].

La interfaz gráfica de usuario de la plataforma CupCarbon en la versión 5.2, se muestra en la Figura 21.

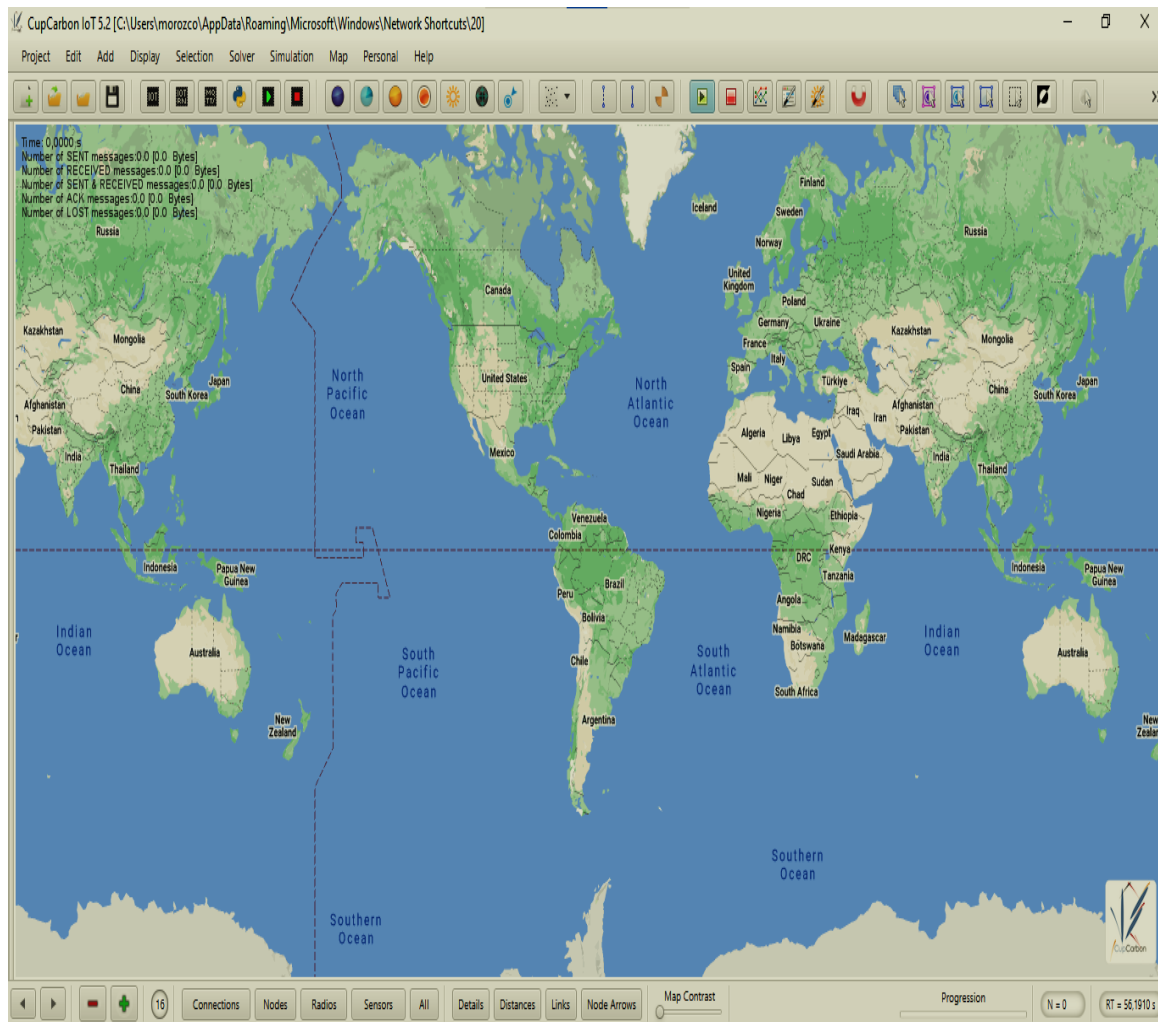


Figura 21. Pantalla de Presentación CupCarbon

3.3.2 Lenguaje Senscript

Senscript es el lenguaje de programación propio y es el script utilizado por CupCarbon, permite cambiar el comportamiento de diferentes componentes dentro del simulador. Con él es posible programar e implementar protocolos de agrupación, crear eventos que serán simulados, definir cómo se realizarán las transmisiones de datos y el comportamiento general de los nodos. Esto demuestra la gran versatilidad de este software, ya que es posible editar esta información sin limitarse a lo que ya está disponible en las herramientas o tener que modificar el código fuente del simulador.

Desde SenScript, también es posible generar códigos para plataformas de hardware como Arduino/XBee. En CupCarbon, el consumo de energía de los nodos se puede calcular y mostrar gráficamente en función del tiempo de simulación [34].

Los componentes básicos que se pueden agregar a la topología son el nodo, el sensor direccional, el sensor móvil, la estación base, el generador de eventos analógicos y el clima. El comportamiento de estos componentes se define mediante scripts.

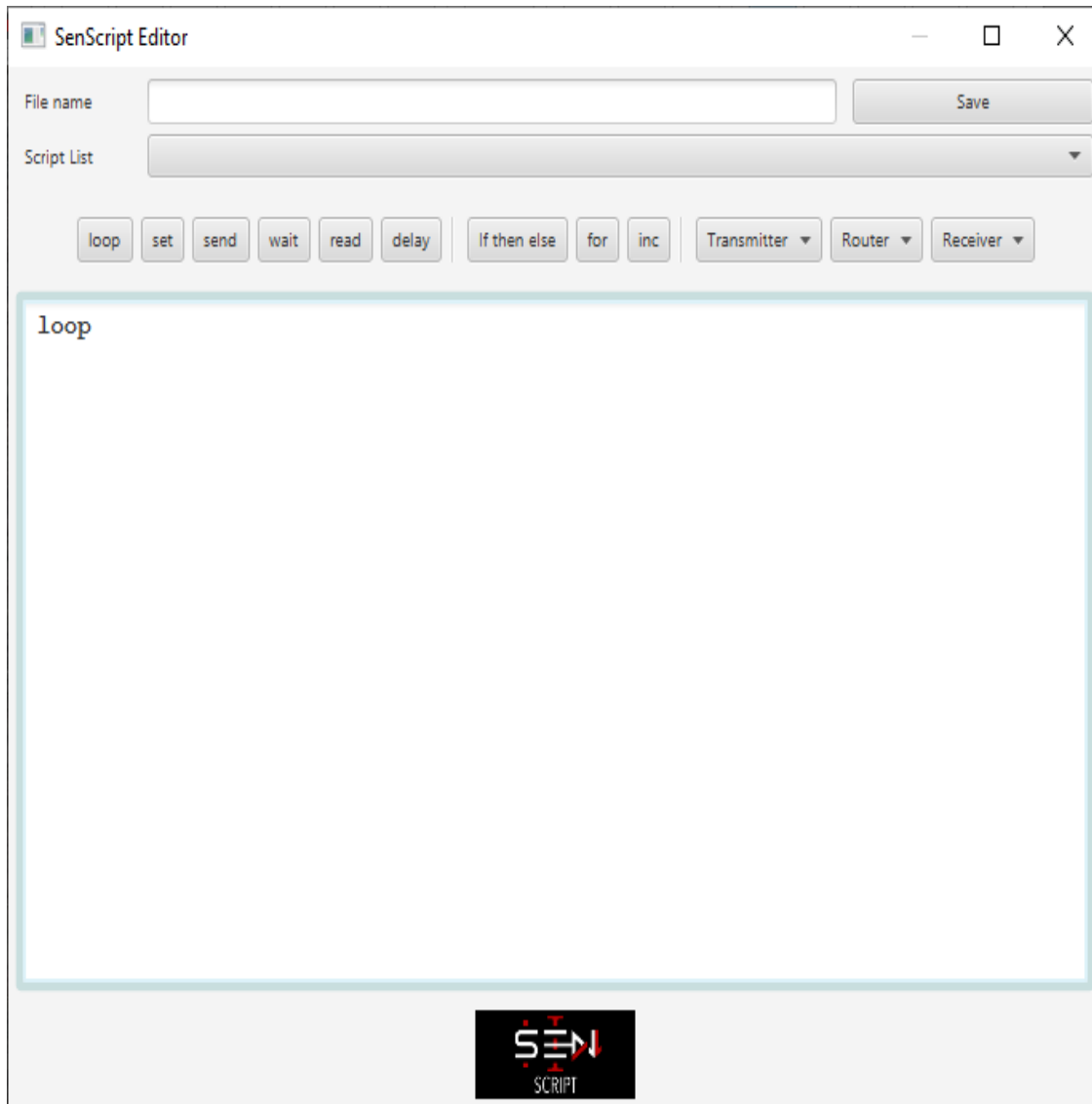


Figura 22. Pantalla Interfaz de Senscript.

La ventana de edición de secuencias de comandos se observa en la Figura 22 y permite accesos directos para crear secuencias de comandos básicas sin tener que profundizar demasiado en la programación.

SenScript es el script utilizado para programar los nodos sensores del simulador CupCarbon. Es un script donde las variables no están declaradas y sin tipos, pero se pueden inicializar (comando `set`). Para las variables de cadena, no es necesario utilizar las comillas. Una variable se usa por su nombre y su valor está determinado por `$`. Es posible usar la función de instrucción para agregar funciones complejas y adicionales programadas en Java (solo en modo de código fuente).

3.3.3 Lista de Comandos

En la Tabla 6 se observa el listado de comandos de Cupcarbon.

Tabla 6. Lista de Comandos CupCarbon.

Lenguaje	Sensor	Módulo Radio	Tarjeta Integrada	Mensajes de Datos	Móvil	Visualización
div / minus mod mult / plus inc / dec conc hash int max / min smax /smin and / or xor / not band / bor bxor / bnot for end if [else] end while end goto function math rand / randb rgauss set tab / vec tget / tset vget / vset angle / angle2 sadd / spop / nth charat / length	areadsensor dreadsensor getpos getpos2 getinfo rotate	atch atid atpl atmy atnd atnid atget drssi distance	loop stop buffer cbuffer delay led mark print printf battery time kill script rscript	data rdata vdata send receive wait read pick	move rmove route	simulation cprint edge

3.3.4 La Consola

El simulador utiliza la consola para mostrar algunos mensajes útiles para el usuario durante la simulación. Tiene dos partes. El primero de la izquierda se utiliza para mostrar mensajes sobre la simulación. También es posible mostrar mensajes de los sensores utilizando el comando SenScript *cprint*. El segundo a la derecha se usa para mostrar errores durante la simulación. En las nuevas versiones de CupCarbon, esta ventana de la consola está separada de la interfaz principal. La Figura 23 exhibe la consola.

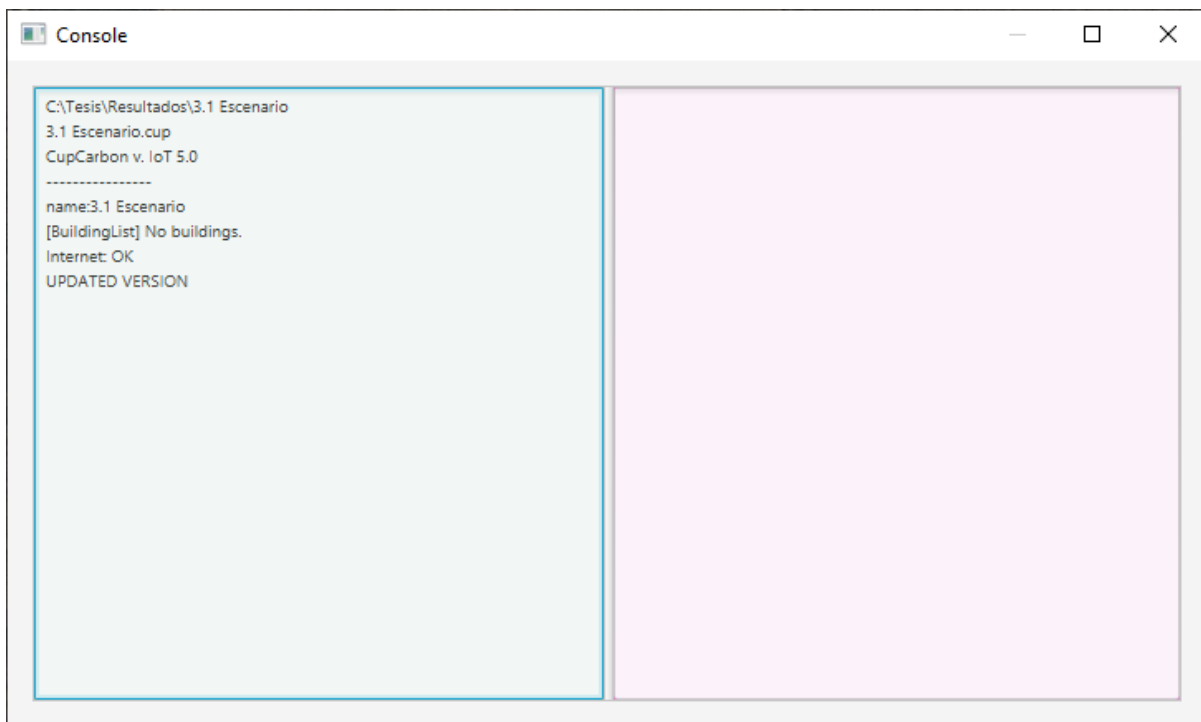


Figura 23. Consola. Fuente de autor

Los componentes básicos de CupCarbon son:

- **Nodo:** Es el más simple de todos los componentes. Tiene detección y comunicación de eventos omnidireccionales, comportamiento definido por script y puede programarse para leer información de otros componentes de simulación, enviar y recibir datos.
- **Sensor direccional:** Su comportamiento es idéntico al del nodo, diferenciándose únicamente en la comunicación, que sigue siendo omnidireccional, pero la detección de eventos toma una dirección específica. La dirección y el ángulo de apertura del sensor se pueden configurar en la pestaña de parámetros del dispositivo.
- **Sensor móvil:** Como su nombre lo indica, es un nodo móvil.
- **Estación base:** Su función principal es recibir los datos recopilados por los nodos de la red. Su comportamiento también está definido por scripts. A pesar de poder enviar datos, su objetivo principal es recibir y procesar información del resto de la red.
- **Generador de eventos analógicos:** este componente no es un sensor. Se coloca dentro del rango de un nodo para generar información para el sensor.
- **Clima:** es idéntico al generador de eventos analógico, excepto que se basa en el script creado manualmente para generar datos. No tiene la función de valores aleatorios.

3.3.5 Nodo sensor

Está compuesto por cuatro componentes que son: un microcontrolador (circuito integrado programable), una antena de radio (para comunicación inalámbrica), una batería y un conjunto de sensores o unidad de captura. La unidad de captura (que tiene una dimensión de unos pocos milímetros) captura o intercepta información ambiental (movimiento, temperatura, humedad, gas, etc.). Para poder comunicarse (leer o recibir información), se debe programar un sensor.

Según CupCarbon IoT Simulator et al. (2022) es posible integrar en la simulación dispositivos ESP32 que puedan comunicarse con otros dispositivos reales y virtuales.

3.3.6 Panel de radio

Mediante el panel de radio que se muestra en la Figura 24, se permite modificar los parámetros del módulo de radio de los nodos sensores seleccionados, como:

▼ Radio Parameters

Stand... LoRa

Radio Name radio1 of S44

Add

Remov

Current ▶

Radio Module List

radio1 [ZIGBEE] <-

radio2 [LORA]

Network Id (NID)

13108

▶

MY

0

▶

CH

0

▶

PL

100.0

▶

Radius

1000.0

▶

E_Tx

5.92E-5

▶

E_Rx

2.86E-5

▶

Sleeping Energy

1.0E-7

▶

Listening Energy

1.0E-6

▶

Data Rate

250000

▶

Spreading Factor

7

▶

Consumption Model

Tx

Classical (Tx)

▶

Rx

Classical (Rx)

▶

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

Figura 24. Panel de Parámetros de Radio.

1. El estándar del módulo de radio (ZigBee 802.15.4, Wifi y Lora)
2. Nombre de radio: El nombre del módulo de radio para agregar al nodo sensor. De forma predeterminada, se agrega automáticamente un módulo de radio ZigBee (802.15.4) para cada nodo de sensor con el nombre radio1. Este módulo de radio se puede cambiar y quitar.
3. Agregar: para agregar otro módulo de radio.
4. Quitar: para quitar el módulo de radio seleccionado.
5. Actual: para determinar qué módulo de radio de la lista es el actual, utilizado por el nodo sensor para comunicarse. SenScript utiliza esta parte durante la simulación. El módulo de radio actual se puede cambiar en el SenScript usando el comando de radio.
6. Lista de módulos de radio: la lista de módulos de radio agregados.
7. ID de red: la ID de red del módulo de radio seleccionado.
8. MY: la dirección MY del módulo de radio seleccionado.
9. CH: el canal del módulo de radio seleccionado.
10. Radio: el rango de radio del módulo de radio seleccionado. En el modo de propagación (al hacer clic en el icono de la barra de estado) se activa que este radio se calcula automáticamente dependiendo de la propagación de la señal y el entorno.
11. E_{Tx} : el consumo de energía de envío.
12. E_{Rx} : el consumo de energía de recepción.
13. *Sleeping Energy*: el consumo de energía al dormir.
14. *Listening Energy*: el consumo de energía de escucha.
15. Tasa de datos: la tasa de envío/recepción de datos (por defecto: 250k bits/s).
16. Factor de dispersión: sólo para módulos de radio Lora.
17. El modelo de consumo es donde podemos elegir el modelo de consumo para las transmisiones (Tx) y las recepciones (Rx) para cada módulo de radio. Se integran dos modelos, el clásico y el modelo de Heinzelman.

Es posible escribir una configuración específica como cualquier ecuación con las siguientes variables predefinidas:

- n : el número de bits transmitidos/recibidos.
- r : el alcance de la radio durante la transmisión.
- p : el porcentaje de la potencia de transmisión (igual a 0 para 0% y 1 para 100%). Se fija en el campo PL del mismo menú y se puede modificar dinámicamente durante la simulación mediante el comando `atpl` de SenScript.
- T : la temperatura del clima.
- etx : el consumo de energía para cada bit enviado. Se fija en el campo E_{Tx} del mismo menú.
- erx : el consumo de energía para cada bit recibido. Se fija en el campo E_{Rx} del mismo menú.

El modelo clásico se puede escribir de la siguiente manera:

$Tx: (n/8.0) * etx * P$

$Rx: (n/8.0) * erx$

En la Figura 25 se muestra el Panel de parámetros del dispositivo.

▼ Device Parameters		
Script file	Receiver.csc	1
GPS file		2
Natural Evt file		3
Id	11	4
Longitude	-2.244129180908203	5
Latitude	53.478137099676545	6
Elevation	0.0	7
Radius	0.0	8
Sensor Radius	20.0	9
Energy max	19160.0	10
Sensing Cons	1.0	11
UART D/Rate	9600	12
Drift (sigma)	3.0E-5	13
Sensing Unit		
Coverage	0.0	14
Direction	0.0	15

Figura 25. Panel de parámetros del dispositivo.

Cualquier modificación se considera solo si es seguida por un clic en el botón aplicar con flecha gris derecha situada en la parte derecha del campo correspondiente.

Este panel permite modificar los parámetros de los objetos seleccionados como:

1. Script file: para asignar el archivo SenScript
2. GPS File: para asignar el archivo de ruta
3. Natural Event File: para asignar el archivo de evento natural generado desde el generador de Natural Event
4. Id: para asignar un Id
5. Longitud: para asignar una longitud
6. Latitud: para asignar una latitud
7. Elevación: para asignar una elevación
8. Radio: para asignar un radio para el nodo del sensor (este no es el radio de radio)
9. Radio del sensor: para asignar un radio para la unidad de detección
10. Energía máxima: la energía inicial de la batería
11. Consumo de detección: el consumo de detección en unidades (no se considera en esta versión de CupCarbon)
12. Tasa de datos UART: la tasa de datos UART que representa el tiempo necesario para enviar datos (bytes) al búfer del módulo de radio.
13. Deriva (sigma): la deriva del reloj.
14. La cobertura de una unidad de detección (caso de nodo de sensor direccional).
15. La dirección (rotación) de una unidad de detección (caso de nodo de sensor direccional).

3.4 Métricas de Evaluación Cuantitativa

Para evaluar el desempeño de los protocolos implementados en CupCarbon, se consideraron varias métricas cuantitativas calculadas durante la recepción de los paquetes de datos.

Tasa de entrega de paquetes (PDR): esta métrica es la relación entre la cantidad de paquetes enviados por un nodo de origen y la cantidad de paquetes recibidos por el destino, según lo establecido por:

$$PDR = \sum NRX_i / \sum NTX_i \times 100\%$$

donde NRX_i representa la cantidad de paquetes de datos recibidos con éxito por un nodo de destino i y NTX_i es la cantidad de paquetes enviados a este dispositivo.

Rendimiento (THR): es el número de paquetes de datos transmitidos con éxito a su destino final en un canal de comunicación determinado por unidad de tiempo; El THR se puede calcular de la siguiente manera:

$$THR = NRX_i / \text{Tiempo total de simulación}$$

Retraso de extremo a extremo (E2ED): es el tiempo promedio requerido para que una cantidad de paquetes de datos se transmiten con éxito a través de la red desde un nodo de origen a un destino específico; se puede definir matemáticamente por:

$$E2ED = \sum (TRX_i - TTX_i) / NRX_i$$

donde NRX_i es el número de paquetes de datos recibidos por el nodo i , TRX_i representa el momento en que se recibió el paquete de datos y TTX_i es el momento en que se envió el paquete.

Jitter medio (JIT): representa la variación del retardo medio de extremo a extremo en la entrega de paquetes de datos en una red, que puede provocar una situación de irregularidad en la recepción de paquetes de datos; la fórmula está dada por:

$$Jitter = \sum (E2ED_{ik} - E2ED_{ik-1}) / NRX_i$$

donde $E2ED_{ik}$ es el retraso promedio de un instante dado k , $E2ED_{ik-1}$ es el retraso promedio del instante anterior y NRX_i es el número de paquetes de datos recibidos por el nodo i .

Modelo clásico de consumo de energía

Este es el modelo estándar de consumo de energía adoptado por el simulador CupCarbon. Para calcular cuánta energía de batería consume un nodo durante la transmisión de paquetes de datos, la siguiente expresión:

$$ETX = (n/8) \times ETX_b \times P$$

Donde n es el número de bits transmitidos o recibidos, $ETXb$ es el consumo de energía necesario para transmitir un byte y P es la potencia de transmisión expresada en porcentaje. Del mismo modo, el consumo de energía durante la recepción de datos se puede obtener de la siguiente manera:

$$ERX = (n/8) \times ERXb$$

Donde n es el número de bits transmitidos o recibidos y $ERXb$ es el consumo de energía necesario para recibir un byte.

3.5 Experimentación

Uno de los principales problemas que presentan las zonas agrícolas rurales es la falta de conectividad o la mala calidad de la conexión. Por esta razón es que, para la zona de incumbencia regional rural del presente trabajo, presentamos un método que se puede utilizar para la evaluación del rendimiento de los sistemas de comunicación utilizados en IoT para la agricultura, considerando métricas como la tasa de entrega de paquetes, el consumo de energía y las colisiones de paquetes.

Para lograr este objetivo, realizamos un análisis de los principales protocolos LPWAN y experimentamos su campo de aplicación, utilizando como herramienta de prueba y error al simulador CupCarbon.

El simulador CupCarbon dispone de varias herramientas de prueba desarrollo e implementación de redes de sensores inalámbricos. Se pueden configurar los datos de consumo de energía, ancho de banda, tasa de datos y protocolos de comunicaciones de manera tal que se le permite a un usuario diseñar, visualizar, depurar y validar algoritmos distribuidos para monitorear recopilaciones de datos ambientales de la red de sensores inalámbricos.

CupCarbon ofrece la posibilidad de simular algoritmos y escenarios en varios pasos. Por ejemplo, podría haber un paso para determinar los nodos de interés, seguido de un paso relacionado con la naturaleza de la comunicación entre estos nodos para realizar una tarea determinada, como la detección de un evento, generar gráficos de consumo y finalmente, un paso que describa la naturaleza del enrutamiento a la estación base en caso de que se detecte un evento.

La visibilidad de propagación y los modelos de interferencia están integrados en CupCarbon e incluyen los protocolos Lora, ZigBee, y WiFi.

Se puede crear una topología de red seleccionando los componentes y arrastrándolos a la posición deseada en el mapa. Además, permite la visibilidad y el impacto de la interferencia inalámbrica y la propagación de la señal. En principio se evaluará el desempeño de los protocolos de comunicación Lora y ZigBee.

CupCarbon proporciona valores predeterminados para el rango según la tecnología de comunicación inalámbrica, por ejemplo, 100 m, 400 m y 5 km para Zigbee, WiFi y Lora, respectivamente.

Lora tiene un ancho de banda muy pequeño para el protocolo de procesamiento de datos utilizado y su característica principal, es el soporte para largas distancias, lo cual es propicio para el caso de este primer escenario de simulación.

El protocolo tiene como característica principal la capacidad de transmitir en grandes distancias, llegando a distancias entre nodos de los 15 km en zonas urbanas y de hasta 30 km en zonas rurales.

El nodo del sensor de CupCarbon contiene cuatro partes principales: módulos de radio, una unidad de detección y una batería, su comportamiento está definido por scripts, estos brindan información clave para la vida útil del sensor como el consumo de energía, parámetro fundamental para la comparación de protocolos.

El consumo de energía se puede calcular y mostrar como una función del tiempo simulado. Esto permite aclarar la estructura, la viabilidad y la implementación realista de una red antes de su despliegue real.

Se elige para el ejemplo graficar el nivel de batería y consumo de energía para los nodos sensores, la estación base se considera que no tiene consumo considerable al estar alimentada por una fuente externa.

El valor de configuración de la energía máxima de las baterías en J (julios) de los sensores viene definida por defecto a 19.160 J, valor que se puede modificar para obtener una mejor interpretación de la gráfica de consumo de energía, esto se realiza configurando los parámetros de los dispositivos de los nodos.

3.6 Descripción de los escenarios

En esta sección describimos las configuraciones de cada escenario elegido para su análisis, de acuerdo con el criterio de selección de las topologías y tecnologías de comunicación utilizadas para la simulación de estos.

3.6.1 Primer Escenario

Para el primer escenario tomamos como referencia una estación Base que la describimos como Base_SinK_11 y diez sensores que van de S1 a S10. La estación base y los sensores se configuraron con el protocolo de comunicación Lora con la topología del tipo estrella. (Por ser un diseño flexible, de largo alcance, de bajo consumo de energía y de bajo costo hace que Lora sea una de las mejores opciones a WSN, haciéndolos ideales para aplicaciones en entornos rurales a gran escala con difícil acceso a la energía).

Estación base Base_SinK_11: Su función principal es recibir los datos recopilados por los nodos de la red. Su comportamiento también está definido por scripts. A pesar de poder enviar datos, su objetivo principal es recibir y procesar información del resto de la red.

En este escenario configurado en el editor de Senscript, se genera un algoritmo que crea una gran cantidad de mensajes enviados por todos los nodos sensores de la red y recepcionado por la estación base. Para tal caso utilizamos en la estación base Base_SinK_11 la configuración en modo receptor y en los nodos sensores restantes S1-S10 la configuración en modo transmisor. El objetivo es simular el algoritmo de inundación (que envía varios datos al mismo tiempo de los nodos hacia la estación base) y los pasos para su implementación resultan ser simples.

SenScript es el script utilizado para programar los nodos sensores del simulador CupCarbon. Es un script donde las variables no se declaran, pero se pueden inicializar (comando set).

El código de implementación de los nodos sensores para la transmisión se encuentra en el archivo Transmitter.csc en el editor SenScript, como se aclaró en secciones anteriores este es el script utilizado para programar los nodos sensores del simulador de CupCarbon. Para simplificar la simulación, todos los nodos sensores para la transmisión usan el mismo código y se describe a continuación:

<i>//Transmitter</i>	<i>//Receiver</i>
<i>loop</i>	<i>loop</i>
<i>send 1 11</i>	<i>wait</i>
<i>delay 1000</i>	<i>read v</i>
<i>send 0 11</i>	<i>mark v</i>
<i>delay 1000</i>	

Por su parte el código de implementación de la estación base para la recepción se encuentra en el archivo Receiver.csc en el editor SenScript:

Los parámetros de configuración de la primera topología ensayada se observan en la Tabla 7 y se consideran los valores por defecto que trae configurado el simulador.

Tabla 7. Parámetros de Configuración Primer Escenario.

Parámetros de Simulación	1er Escenario
Cantidad de Nodos	11
Topología	Estrella
Tecnología inalámbrica	LORA
Tasa de transmisión	250 kbps
Transmisión ETx	5.92E-5 J
Recepción ETx	2.86E-5 J
Tiempo de simulación	30 min
Tamaño del escenario	100 m

Para la simulación de los nodos sensores y estación base los mismos fueron configurados y monitoreados en la topología de tipo estrella como muestra la Figura 26, en la pantalla de configuración de CupCarbon para el primer escenario.

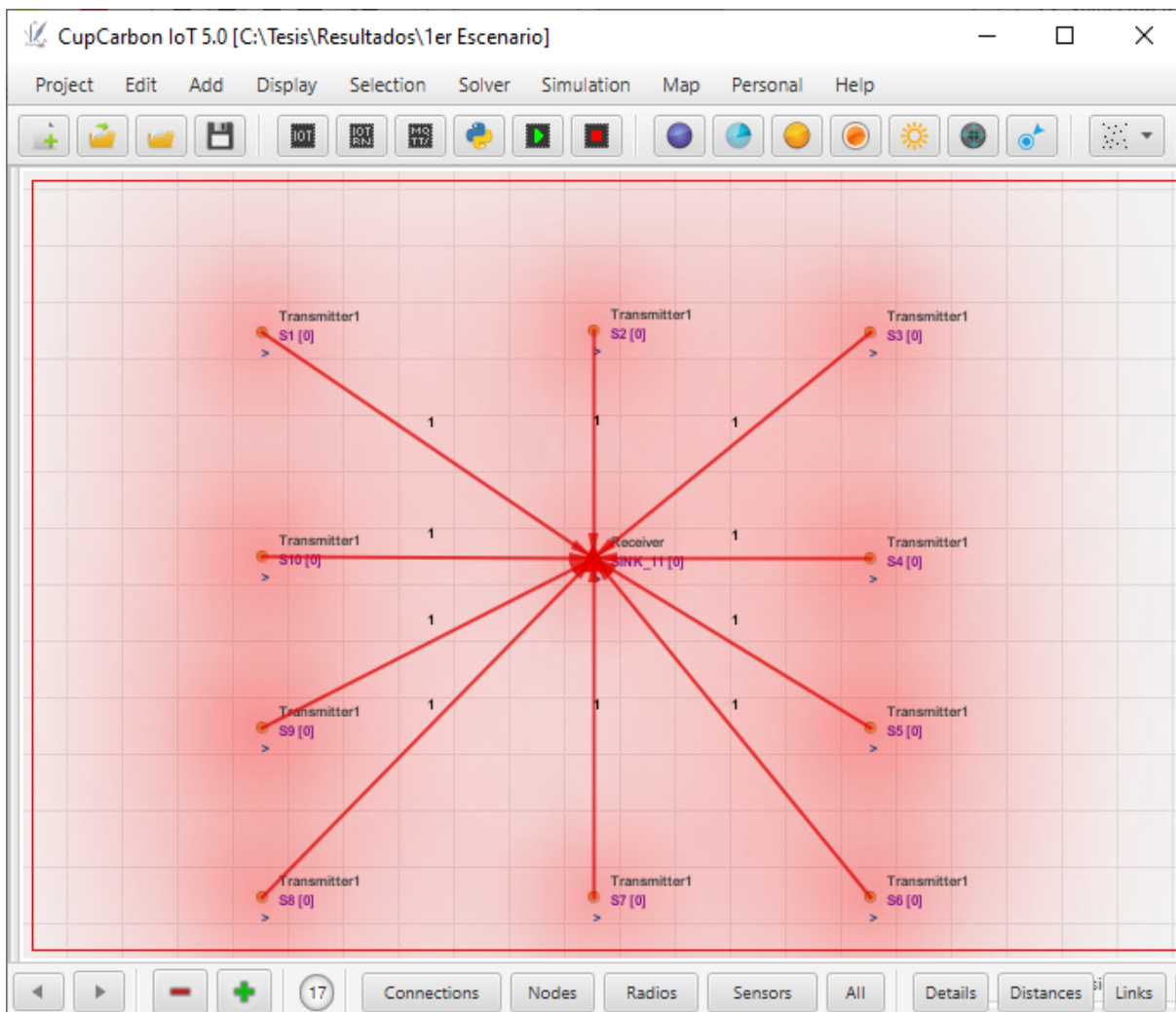


Figura 26. Topología Estrella Primer Escenario.

3.6.2 Segundo Escenario

Para este segundo escenario de simulación seleccionamos nuevamente a la estación Base_SinK_11 y a los nodos sensores de S1 a S10. Se considera para este escenario de simulación una topología del tipo estrella, pero esta vez con la tecnología ZigBee con distancias entre los nodos o sensores y la estación base menor a los 100 metros.

En la Figura 27 se observa la configuración de los dispositivos de transmisión, en este caso el nodo sensor S1, donde se replica la configuración a los demás nodos.

The figure consists of two side-by-side screenshots of a simulation software interface. The left screenshot shows the 'Device Parameters' window, and the right screenshot shows the 'Radio Parameters' window.

Device Parameters Window:

- Script file: Transmitter.csc
- GPS file: (empty)
- Natural Evt. file: (empty)
- Id: 1
- Longitude: -2.2453200817108154
- Latitude: 53.47845315871484
- Elevation: 0.0
- Radius: 0.0
- Sensor Radius: 20.0
- Energy max: 9999.953113600002
- Sensing Cons: 1.0
- UART D/Rate: 9600
- Drift (sigma): 3.0E-5
- Sensing Unit: Coverage: 0.0, Direction: 0.0
- Buttons: Radio Parameters, Marker Parameters, Simulation Parameters

Radio Parameters Window:

- Standard: 802.15.4
- Radio Name: radio1 of SINK_11
- Buttons: Add, Remove, Current
- Radio Module List: radio1 [ZIGBEE] <-, radio2 [LORA]
- Network Id (NID): 13108
- MY: 0
- CH: 0
- PL: 100.0
- Radius: 100.0
- E_Tx: 5.92E-5
- E_Rx: 0.0
- Sleeping Energy: 1.0E-7
- Listening Energy: 1.0E-6
- Data Rate: 250000
- Buttons: Marker Parameters, Simulation Parameters

Figura 27. Parámetros configuración de Dispositivo de Radio.

También se muestra en la Figura 27, la configuración de los parámetros de radio, a diferencia del escenario anterior se ha seleccionado ZigBee como tecnología de comunicación para los módulos de radio de la estación base y los nodos sensores, y donde se configuran también los parámetros de radio en cuanto al BW ancho de banda y consumo de energía se refiere.

La Tabla 8 exhibe la configuración de los parámetros del segundo escenario.

Tabla 8. Parámetros de Configuración Segundo Escenario.

Parámetros de Simulación	2do Escenario
Cantidad de Nodos	11
Topología	Estrella
Tecnología inalámbrica	ZIGBEE
Tasa de transmisión	250 kbps
Transmisión ETx	5.92E-5 J
Recepción ETx	2.86E-5 J
Tiempo de simulación	30 min
Tamaño del escenario	100 m

Los sensores y estación base fueron monitoreados y configurados en la topología del tipo estrella, y en la Figura 28 se exhibe el alcance de zona de cobertura de propagación de cada uno de los radios, que CupCarbon lo muestra como si fuera un mapa de calor.

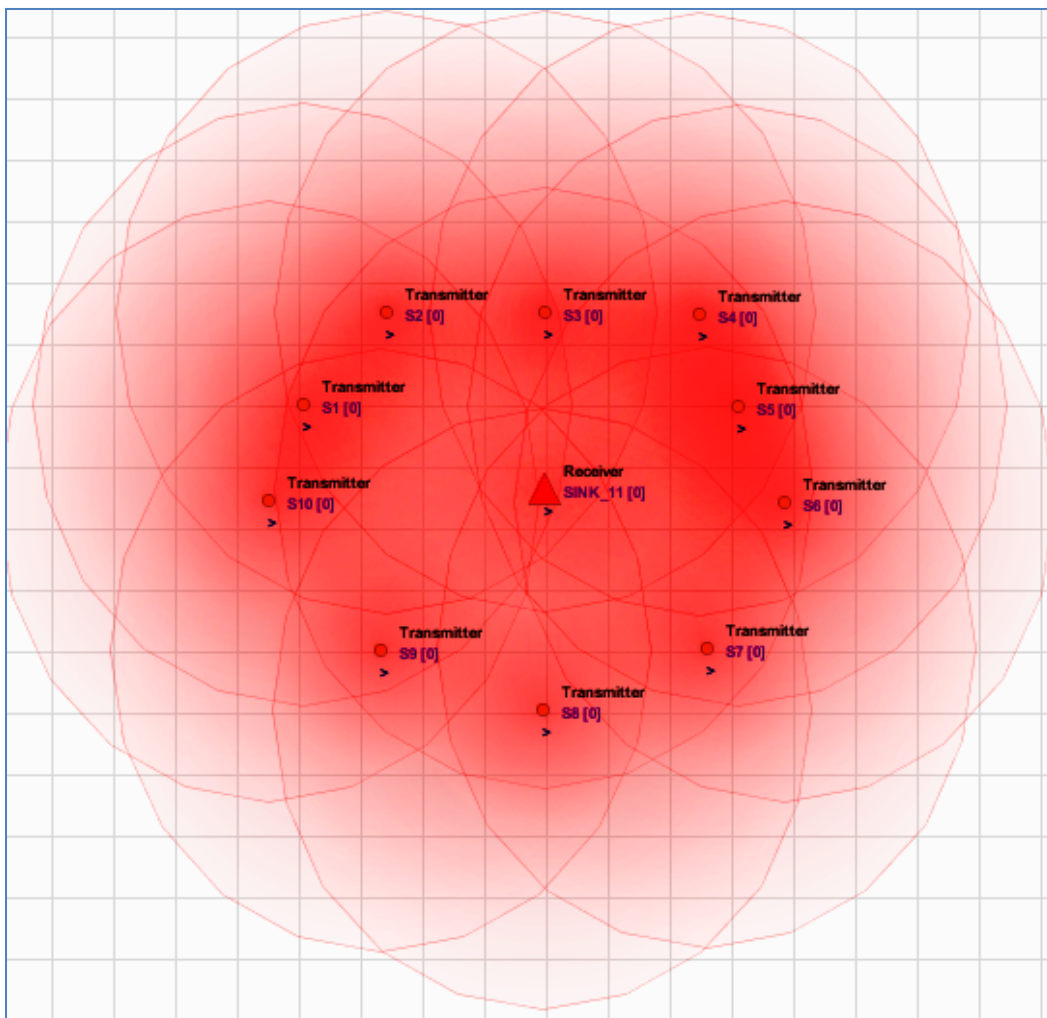


Figura 28. Topología Estrella Segundo Escenario.

3.6.3 Tercer Escenario

El simulador CupCarbon provee de una visión muy cercana a la realidad, dado que simular dentro de este entorno nos permite poder analizar un número importante de variables a tener en cuenta en el diseño de una red.

La provincia de San Luis se encuentra clasificada en la región de Zona III en cuanto a la consideración de los emplazamientos geográficos para la instalación de estructuras de mástiles.

Mediante el uso del simulador CupCarbon se planteó el diseño de una red de nodos de sensores, para esto consideramos un escenario real en un emplazamiento productivo de la zona centro de la Provincia de San Luis, ubicada al Sur del Departamento Juan Martín de Pueyrredón distante a 100 Km de la Capital de la Provincia, más específicamente en la Localidad de Alto Pelado como se muestra en la Figura 29, que posee los siguientes datos de ubicación geográfica:



Figura 29. Ubicación Geográfica del Escenario Real.

La infraestructura con la que cuenta el campo en la zona elegida para las simulaciones incluye un mástil de estructura de 42 metros de altura con arriostraje

anclaje y balizamiento para soporte de equipos y antenas. El lugar cuenta con suministro eléctrico, por lo que facilita la conexión de la estación base o Gateway a una fuente de energía externa sin el perjuicio que quede sin energía la mayor parte del tiempo operativo. A su vez hay instalado un sistema autónomo de energía a través de panel solar y demás accesorios para alimentar exclusivamente a los equipos de telecomunicaciones que se vinculan mediante un enlace punto a punto vía tecnología inalámbrica con una red propietaria para el acceso de datos e Internet.

Aprovechando la utilidad que posee CupCarbon al contener OSM y la API Google Maps, permite ejecutar simulaciones en ubicaciones geográficas localizadas y usar un fondo semejante a una vista panorámica real. En la Figura 30 se observa la ubicación real en la pantalla de CupCarbon.

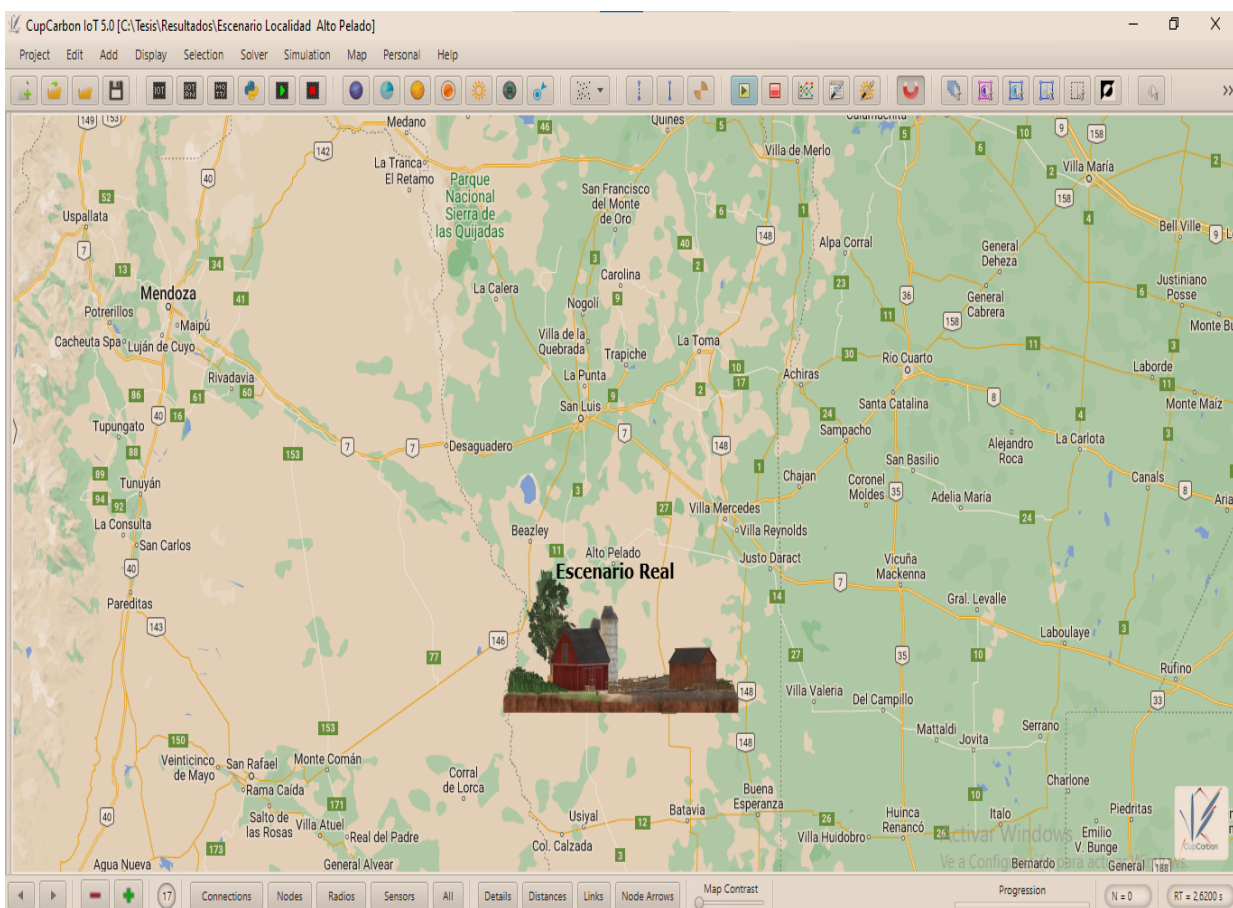


Figura 30. Vista de CupCarbon Escenario Real.

La Figura 31 exhibe la superficie total de 661 hectáreas del campo productivo donde se realizarán las simulaciones para los hipotéticos casos reales.

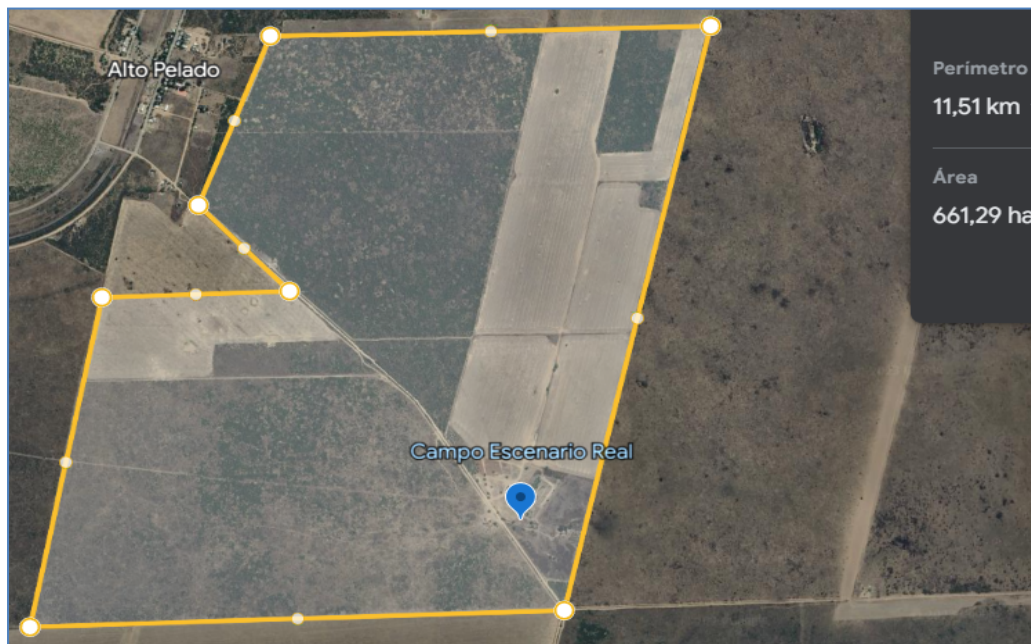


Figura 31. Superficie Total del Escenario Real.

Se consideró, en primera instancia para la distribución de los sensores y la estación base, un área de superficie seleccionada de 22,55 ha como muestra la Figura 32, y donde se encuentran los puntos de interés más importantes para la teledetección.

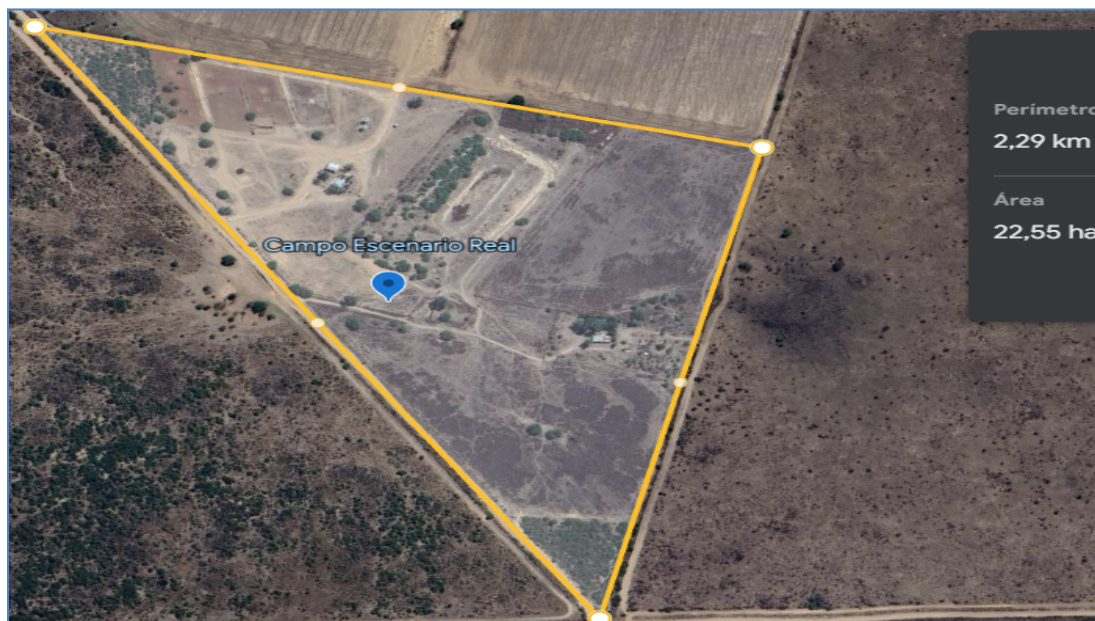


Figura 32. Área de Superficie Seleccionada Tercer Simulación.

Para comparar el rendimiento entre los protocolos en un escenario casi real, consideramos en primera instancia un escenario basado en la premisa en el que los nodos sensores realizan mediciones de distintos tipos de variables, enviando periódicamente los datos medidos a un nodo central o estación base. Estos sensores son los responsables de recolectar información de variables como temperatura, presión, humedad etc.

En la Figura 33 se observa la topología de la red a simular en este tercer escenario.

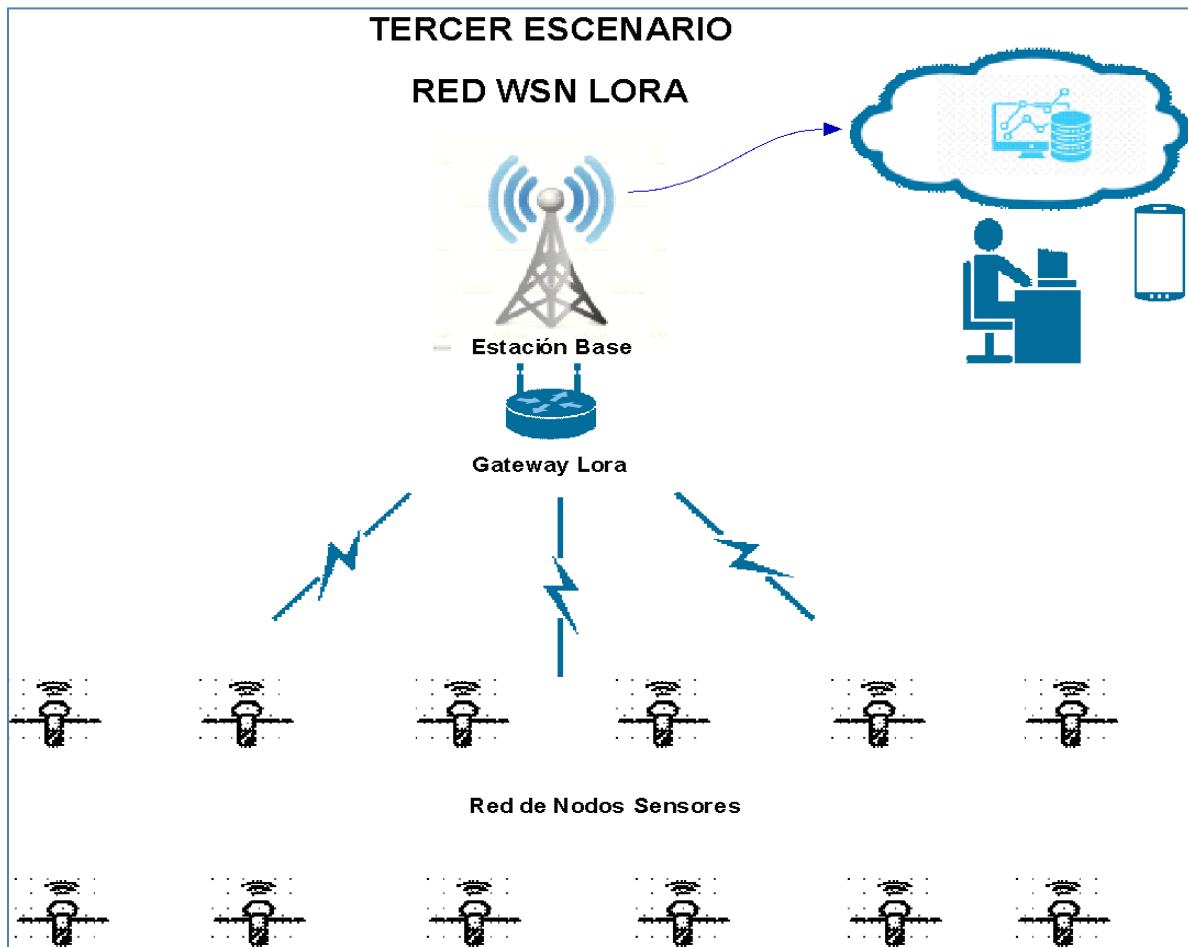


Figura 33. Topología de Red Tercer Escenario.

Como destacamos en secciones anteriores una de las principales ventajas del simulador CupCarbon radica en la visualización de escenarios para despliegues de redes WSN en un entorno más real, esto lo realiza mediante la herramienta de interfaz gráfica intuitiva que utiliza el marco de OSM, que permite circunscribir la red WSN a implementar y los nodos sensores a utilizar, directamente en el lugar geográfico del sitio a simular.

En la Figura 34 se muestra la red de sensores que está compuesta por 20 nodos distribuidos dentro del perímetro elegido de 2,29 km.



Figura 34. Red de Sensores Tercer Escenario.

La distribución de los sensores y la estación base se desplegó dentro del área de superficie seleccionada de 22,55 ha, para la simulación, de manera tal que la disposición de estos se encuentre dentro de los rangos de distancias que utiliza la tecnología Lora para los módulos de radio en una configuración de topología del tipo estrella.

CupCarbon también nos permite dentro de sus parámetros de configuración, establecer la opción de las zonas de coberturas de los radios de acuerdo con la tecnología de comunicación determinada en los módulos de radio de los sensores, que para este caso en particular es a través del protocolo Lora, de esta forma se verifica que los sensores y la estación base se encuentren en el mismo radio de cobertura y tienen la conectividad suficiente entre estos dispositivos para establecer los vínculos de comunicación de datos correspondientes.

La Zona de Cobertura de Radios de los nodos del Tercer Escenario se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Zona de Cobertura de Radios Tercer Escenario.

Los parámetros de configuración del tercer escenario se muestran a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de Configuración Tercer Escenario

Parámetros de Simulación	3er Escenario
Cantidad de Nodos	20
Topología	Estrella
Tecnología inalámbrica	LORA
Tasa de transmisión	250 kbps
Transmisión ETx	5.92E-5 J
Recepción ETx	2.86E-5 J
Tiempo de simulación	30 min
Tamaño del escenario	22,55 ha

La Tabla 10 exhibe los puntos de interés y la descripción de los nodos sensores y estación base a utilizar en esta instancia de simulación, como así también los datos a considerar.

Tabla 10. Descripción Nodos Sensores Tercer Escenario.

Puntos de Interés	Sensores	Datos Por Medir
Estación Base	SINK_1	Recolección de Datos de los Sensores
Acueducto	S2	Sensor de Presión
Represa	S3	Sensor de Presión
Criadero de Cerdos	S4	Sensor de Proximidad
Feedlot Engorde de Ganado	S5	Sensor de Proximidad
Silo de Semillas	S6	Sensor de Humedad
Tanque Cisterna de agua	S7	Sensor de Presión
Bascula para Ganado	S8	Sensor de Peso
Criadero Avícola	S9	Sensor de Luz
Silo Bolsas	S10	Sensor de Humedad
Perímetro de Fuego	S11	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S12	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S13	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S14	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S15	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S16	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S17	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S18	Sensores de Temperatura
Perímetro de Fuego	S19	Sensores de Temperatura
Trafo de Tensión Reductor	S20	Sensor de Luz

En la Figura 36 se observa dentro del menú de CupCarbon en la opción **Display**, la posibilidad de **Mostrar/Ocultar** los niveles de batería y **Mostrar/Ocultar** los niveles de buffer de los nodos de sensor seleccionados.

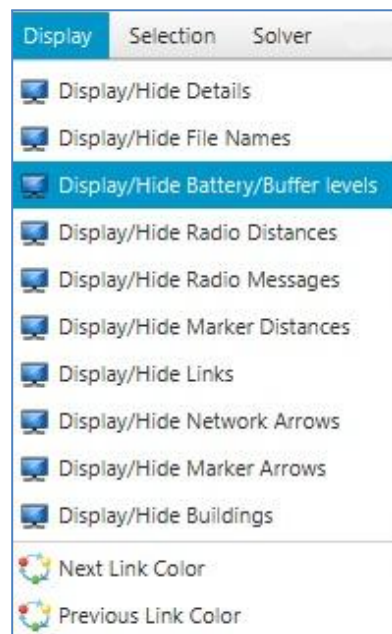


Figura 36. Mostrar/ Ocultar Nivel de Batería y Buffer

Esta es una más de las herramientas versátiles que ofrece el simulador, como se observa en la Figura 37 la que nos permite visualizar el nivel de batería y buffer que

posee cada nodo sensor y estación base ensayada, que luego del tiempo de ejecución de la simulación nos muestra la pérdida de energía o consumo de cada nodo sensor.

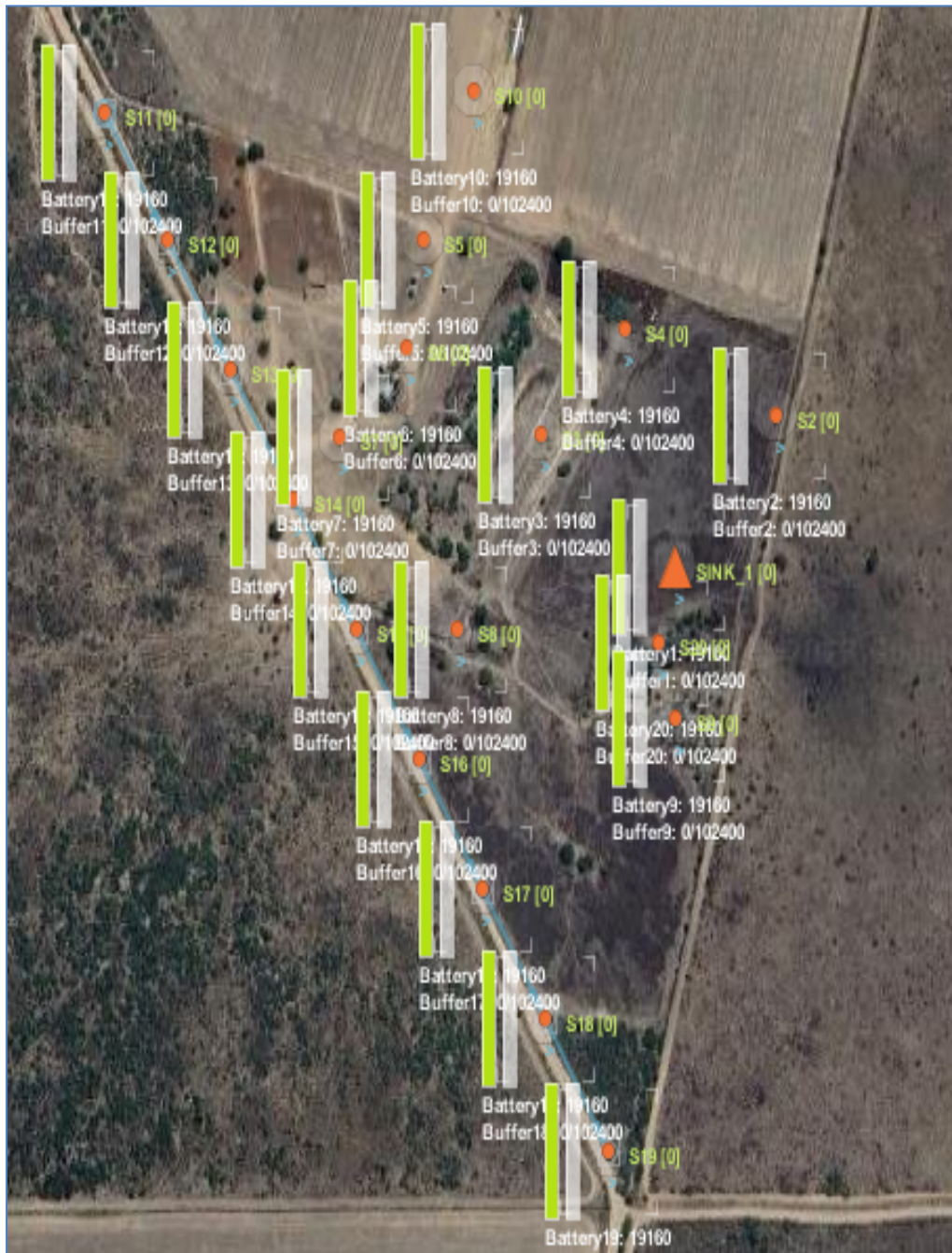


Figura 37. Nivel de Batería y Buffer Tercer Escenario.

3.6.4 Cuarto Escenario

Para el despliegue de esta cuarta instancia de simulación real de la red WSN, se consideró un perímetro de 6,89 km, en donde se ubicarán los sensores y estación base, compuesta por total 106 nodos sensores incluyendo a una estación base que es la encargada de recolectar la información de estos.

La Figura 38 muestra la superficie de distribución elegida para los 106 nodos sensores en un área total de superficie de 160,23 ha, éste despliegue de más de 100 sensores demuestra la capacidad que tiene CupCarbon de representar grandes áreas dentro de la simulación, y donde la recolección de datos que se reporta desde cada nodo sensor remoto puede ser de distintas variables, tales como temperatura, humedad y presión ambiente, salinidad, conductividad y altura de napas freáticas e Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) entre otras.

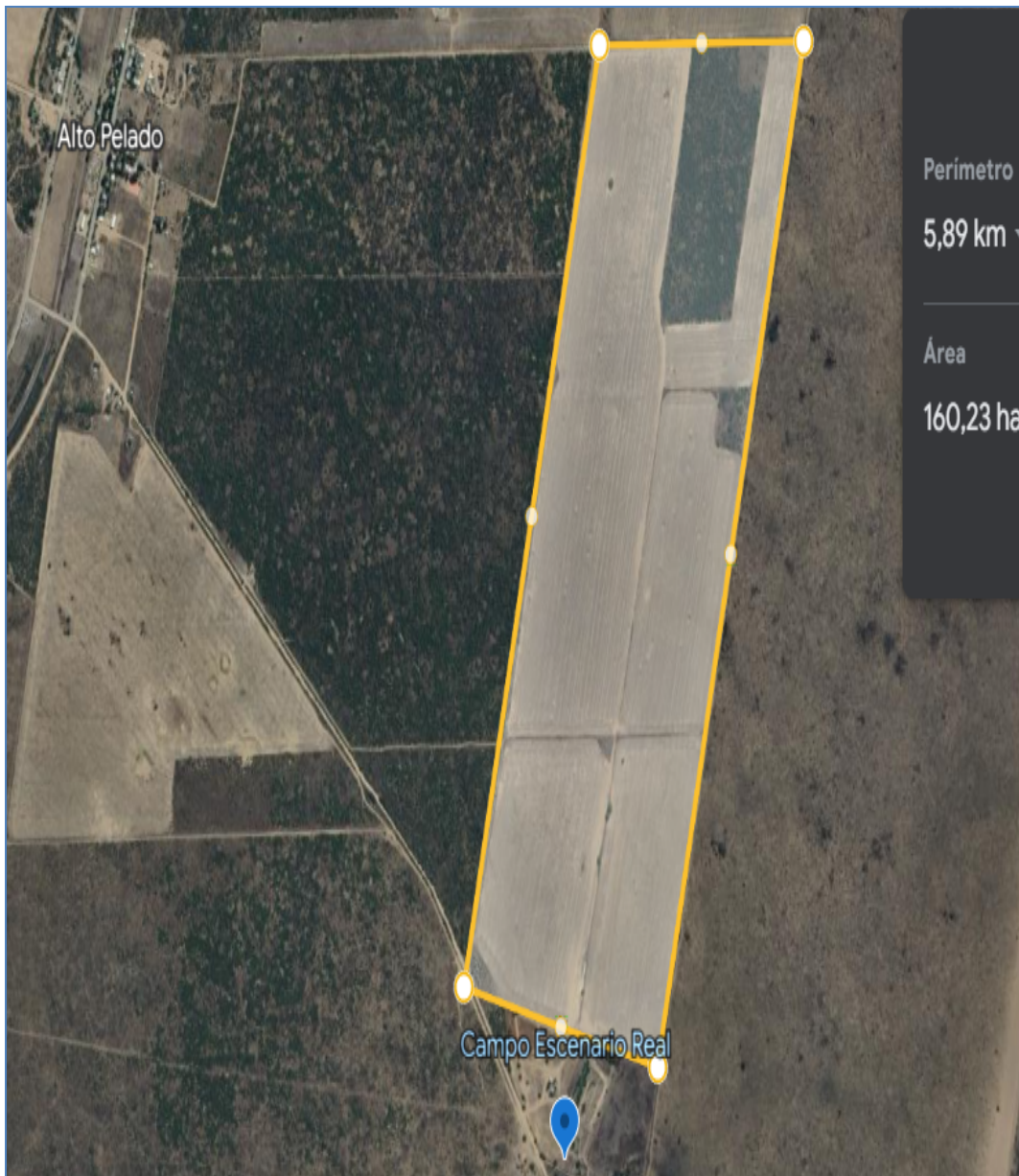


Figura 38. Área de Superficie Seleccionada Cuarta Simulación.

La Figura 39 nos muestra la red de sensores configurada con los dispositivos y sus módulos de radios correspondientes para el protocolo Lora y nuevamente dispuestos en la topología estrella.



Figura 39. Red de Sensores Cuarto Escenario.

La Tabla 11 muestra los parámetros de configuración seleccionados con el protocolo Lora para este cuarto escenario de simulación.

Tabla 11. Parámetros de Configuración Cuarto Escenario

Parámetros de Simulación	4to Escenario
Cantidad de Nodos	106
Topología	Estrella
Tecnología inalámbrica	LORA
Tasa de transmisión	250 kbps
Transmisión ETx	5.92E-5 J
Recepción ETx	2.86E-5 J
Tiempo de simulación	30 min
Tamaño del escenario	160,23 ha

En la Figura 40 se exhibe la pantalla de CupCarbon en un instante capturado de la simulación para este cuarto escenario, donde se observa el intercambio de información entre la estación base que sirve de sumidero o Gateway a los nodos sensores dentro del área total de simulación.

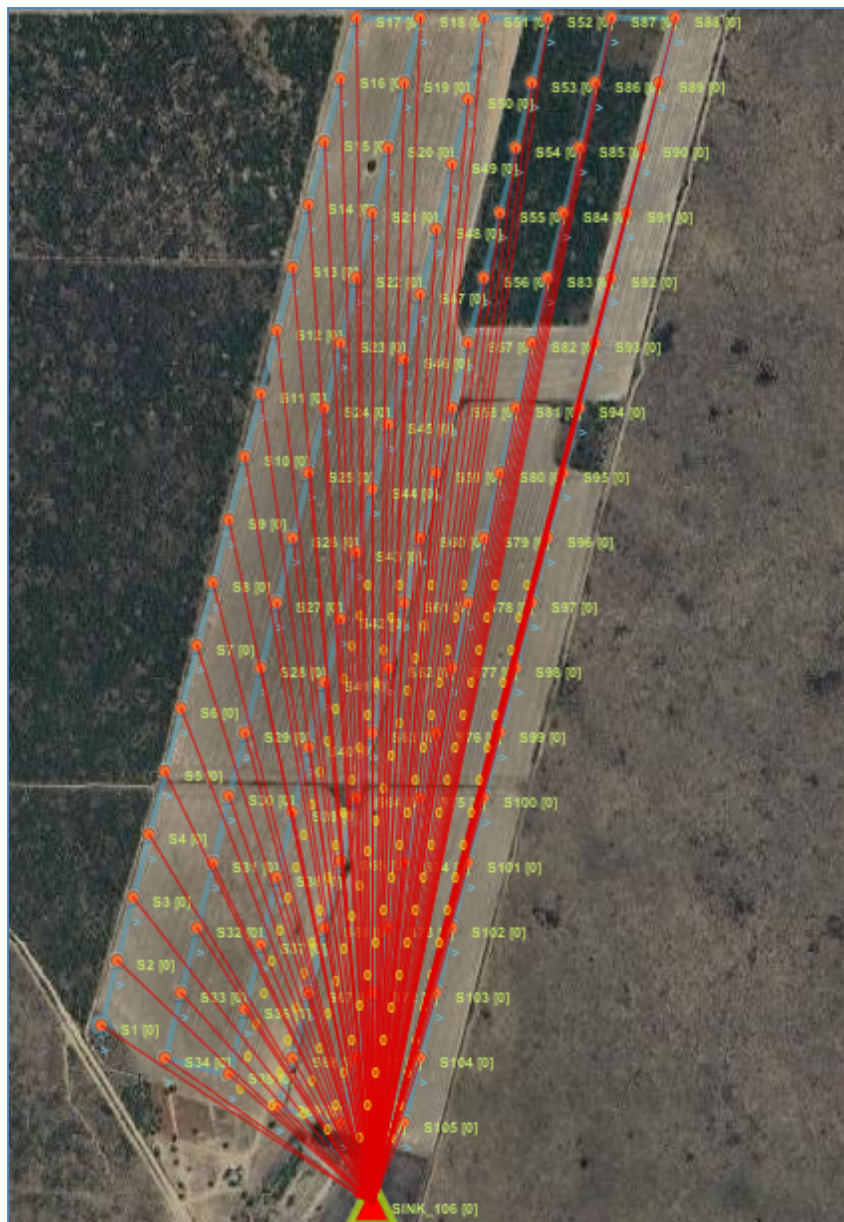


Figura 40. Captura Simulación Cuarto Escenario.

3.6.5 Quinto Escenario

Se considera para este quinto escenario de simulación, una red compuesta por 19 nodos distribuidos en 22,5 ha. Para el despliegue de estos se utiliza la tecnología Zigbee y la topología del tipo malla, considerando que las distancias entre los nodos transmisores o sensores y los nodos enrutadores y la estación base debe ser menor a los 100 metros.

En comparación con el escenario 3 en donde se utilizó la topología estrella y la tecnología Lora para la distribución de los nodos sensores y la estación base, para este caso se tuvieron que usar mayor cantidad de sensores para poder censar los puntos de interés debido a la limitación en cuanto a la distancia de cobertura o alcance de la tecnología Zigbee, lo que trae aparejado incrementar el número de nodos sensores en una cantidad de 8 y utilizar los mismos en modo de ruteo para alcanzar la estación base.

La Tabla 12 muestra los parámetros de configuración seleccionados con el protocolo Lora para este quinto escenario de simulación.

Tabla 12. Parámetros de Configuración Quinto Escenario.

Parámetros de Simulación	5to Escenario
Cantidad de Nodos	19
Topología	Malla
Tecnología inalámbrica	ZIGBEE
Tasa de transmisión	250 Kbps
Transmisión ETx	5.92E-5 J
Recepción ETx	2.86E-5 J
Tiempo de simulación	30 min
Tamaño del escenario	22,5 ha

La Figura 41 exhibe la pantalla de CupCarbon para la simulación de este quinto escenario con un despliegue de sensores en una topología de malla, entre la estación base o Gateway con los nodos sensores encargados de la transmisión, y utilizando los nodos de ruteo como intermediarios para tener cobertura dentro del área total de simulación.



Figura 41. Red de Sensores Quinto Escenario

La Tabla 13 muestra los puntos de interés y la descripción de los nodos sensores y estación base utilizados en esta instancia de simulación, donde se destaca la utilización de 9 nodos de S21 a S29 para poder enrutar los datos de los sensores que nos interesa medir hacia la estación base encargada la que se encarga de la recolección de los mismo.

Tabla 13. Descripción Nodos Sensores Quinto Escenario.

Puntos de Interés	Sensores	Datos Por Medir
Estación Base	SINK 1	Recolección de Datos de Todos los Sensores
Acueducto	S2	Sensor de Presión
Represa	S3	Sensor de Presión
Criadero de Cerdos	S4	Sensor de Proximidad
Engorde de Ganado Feedlot	S5	Sensor de Proximidad
Silo de Semillas	S6	Sensor de Humedad
Tanque Cisterna de agua	S7	Sensor de Presión
Bascula para Ganado	S8	Sensor de Peso
Criadero Avícola	S9	Sensor de Luz
Silo Bolsas	S10	Sensor de Humedad
Enrutamiento	S21 al S29	Sensor de Ruteo

IV. Resultados

En este capítulo se informan los resultados de la simulación para cada uno de los escenarios planteados en la sección anterior. Se analizará el desempeño de los protocolos a implementar, conjuntamente se hará un análisis de las métricas del tráfico de paquetes, el estado y consumo de las baterías de los sensores con respecto al tiempo de simulación predeterminada, y los costos asociados de implementación de una red WSN.

4.1 Resultados Primer Escenario

Visualizamos en la Figura 42 la imagen de la captura de pantalla de la consola, que resulta del tráfico de paquetes de la primera simulación, en donde se observan los números de paquetes enviados y recibidos, así como los paquetes perdidos y los mensajes de reconocimiento ACK. Estos parámetros se toman en consideración para evaluar las métricas cuantitativas calculadas por el envío y la recepción de los paquetes de datos.

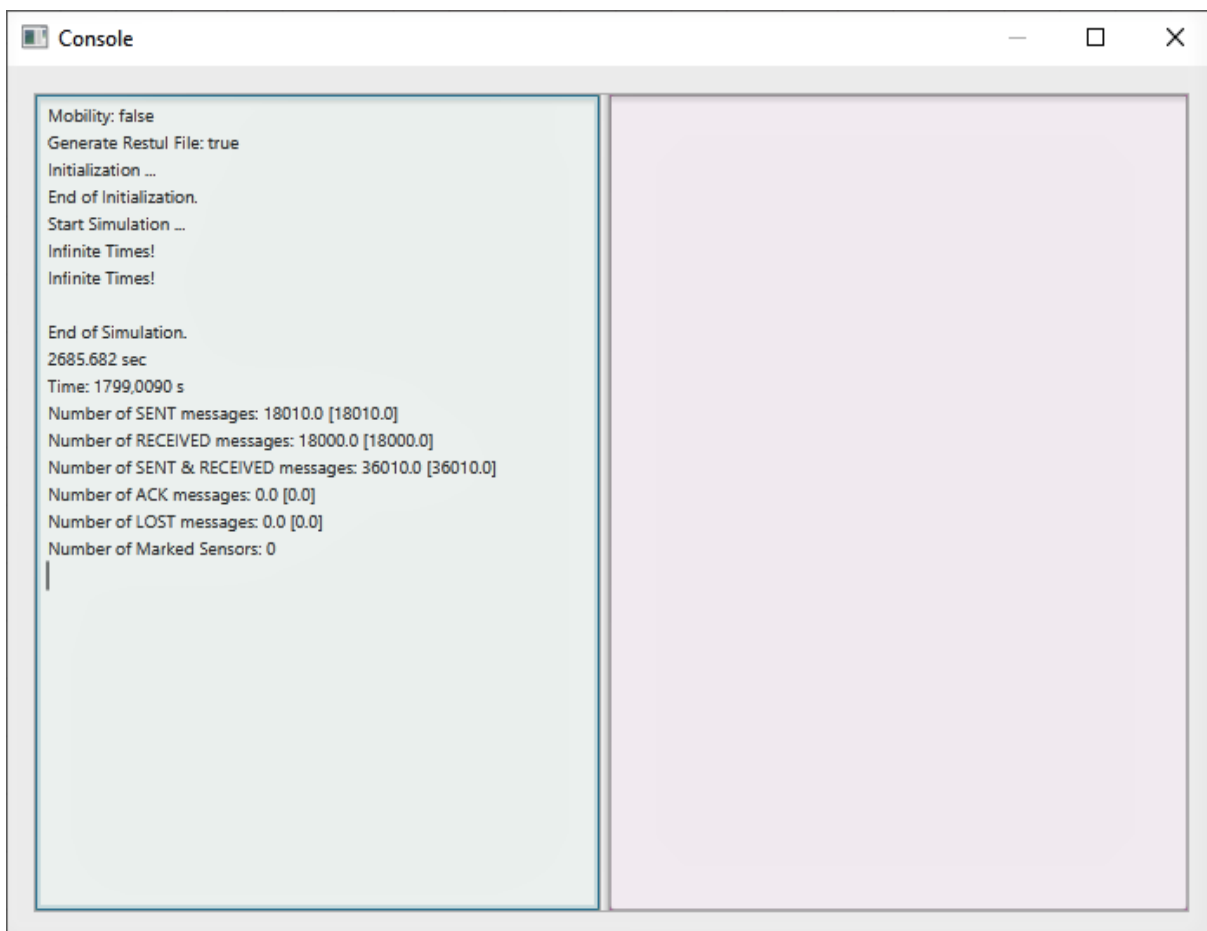


Figura 42. Consola Primer Escenario.

El tiempo de simulación se estableció en 30 min o 1.800 seg. De los datos de la captura de consola de la Figura 42 surgen de que el tiempo total de ejecución de la simulación tiene un valor de 1799,0031 seg, y el tiempo real simulado entregado por el sistema es de 3614,14 seg, este último valor está asociado a la propia complejidad del sistema de simulación. El tiempo total de ejecución real y la complejidad del tiempo real de simulación son puntos que considerar para el cálculo de las métricas.

En la Figura 39 se observa también que no hay tráfico de mensajes *ACK*, esto se debe a que no hay reconocimientos de mensajes cuando estos se envían en modo de transmisión, y como es el caso de este primer escenario ensayado y de acuerdo con la topología estrella empleada, en donde los nodos sensores *S1-S10* configurados en modo transmisión solo envían mensajes a la estación base *Base_Sink_11* que se encuentra configurada en modo recepción.

Para reportar los resultados de este primer escenario, se consideran las siguientes métricas: Tasa de entrega de paquetes, Throughput o Rendimiento, Retraso de extremo a extremo y Jitter medio.

La Tabla 14 muestra los resultados de las métricas del tráfico de paquetes en esta primera instancia de simulación, con múltiples ejecuciones consideradas a los 600 s, 1200 s y 1800 s.

Tabla 14. Métricas Primer Escenario.

Métricas	1er Escenario
Tiempo Real Simulación RT (seg)	2.685,68
Paquetes enviados	18.010,00
Paquetes recibidos	18.000,00
Tiempo Total (seg)	1.799,01
Tasa de entrega de paquetes (PDR)	1,00
Rendimiento (THR) pps	10,01
Retraso de extremo a extremo (E2ED) s	0,10
Jitter medio (JIT) ms	0,02

Para que una infraestructura WSN sea confiable, debe ofrecer una gran tasa de entrega de paquetes, parámetro a través del cual es posible evaluar cuántos paquetes de datos se entregaron con éxito al destino.

La primera métrica calculada fue el *PDR*, que con el valor obtenido en 1 vemos que el parámetro se toma como óptimo, ya que la misma cantidad de paquetes enviados es la misma que los paquetes recibidos.

Esto se toma como una gran ventaja a la hora de extender el tiempo de vida de una red basada en dispositivos con autonomía de batería propia, como es el caso de los nodos sensores utilizados en la simulación de redes inalámbricas.

El rendimiento o tasa de transferencia es el segundo valor de métrica calculado que para el caso de esta primera simulación es de 10,01 pps, y se expresa en paquetes por segundo o bits por segundo *bps*.

El rendimiento medido, ya sea por un sistema implementado real o un sistema simulado, es un parámetro que define la eficiencia de una red.

Como tercera métrica evaluada consideramos al retraso de extremo a extremo, este tiempo de retardo o latencia, está compuesta por los componentes de tiempo de espera en la cola de transmisión, tiempo de transmisión y procesamiento en los nodos y tiempo de propagación. Mientras menor es el valor de este parámetro de latencia mejor es el comportamiento del sistema en cuanto a la eficiencia de entrega de datos.

El valor calculado de latencia es de 0,10 s para esta simulación, que se encuentra en el rango de valores bajos de dicho parámetro.

Una red con bajo rendimiento y alta latencia tiene dificultades para enviar y procesar grandes volúmenes de datos, lo que provoca congestión. Por el contrario, una red con alto rendimiento y baja latencia responde y es eficiente.

Otro parámetro para considerar es el Jitter que es una fluctuación medida en milisegundos, que mide la variación de retardo entre los paquetes que recibimos. Si una red se congestiona, el tiempo de espera aumenta, y por tanto el *Jitter*. Las conexiones confiables constantemente reportan la misma latencia una y otra vez. Mucha variación o *Jitter* es una indicación de problemas en una red.

Como última métrica medimos este parámetro Jitter o fluctuación del retardo, que es la variabilidad del tiempo de ejecución de los paquetes, y se la considera como la primera consecuencia de un retraso de la señal en una red. En este caso de la primera simulación el valor de *Jitter* obtenido 0,02 ms es muy pequeño e indica una escasa e imperceptible fluctuación del retardo de paquetes, por lo que la conexión entre los nodos sensores y la estación base resulta muy estable.

Además, también se obtuvieron para el protocolo Lora seleccionado, los gráficos de estado batería y el consumo del sensor por nodo en función del tiempo y según el modelo clásico proporcionado por el simulador CupCarbon.

En la Figura 43 se muestra la captura de pantalla del estado de batería de un sensor con respecto al tiempo de simulación total. Para ello seleccionamos al nodo sensor S1 y la estación Base *SinK_11*, la que no consume energía en las simulaciones ya que la consideramos alimentada por una fuente de energía externa. Dicha figura muestra un bajo valor de consumo aproximado a 25 J en el nivel de batería en el tiempo de simulación, por lo que el agotamiento de la batería es mínimo.

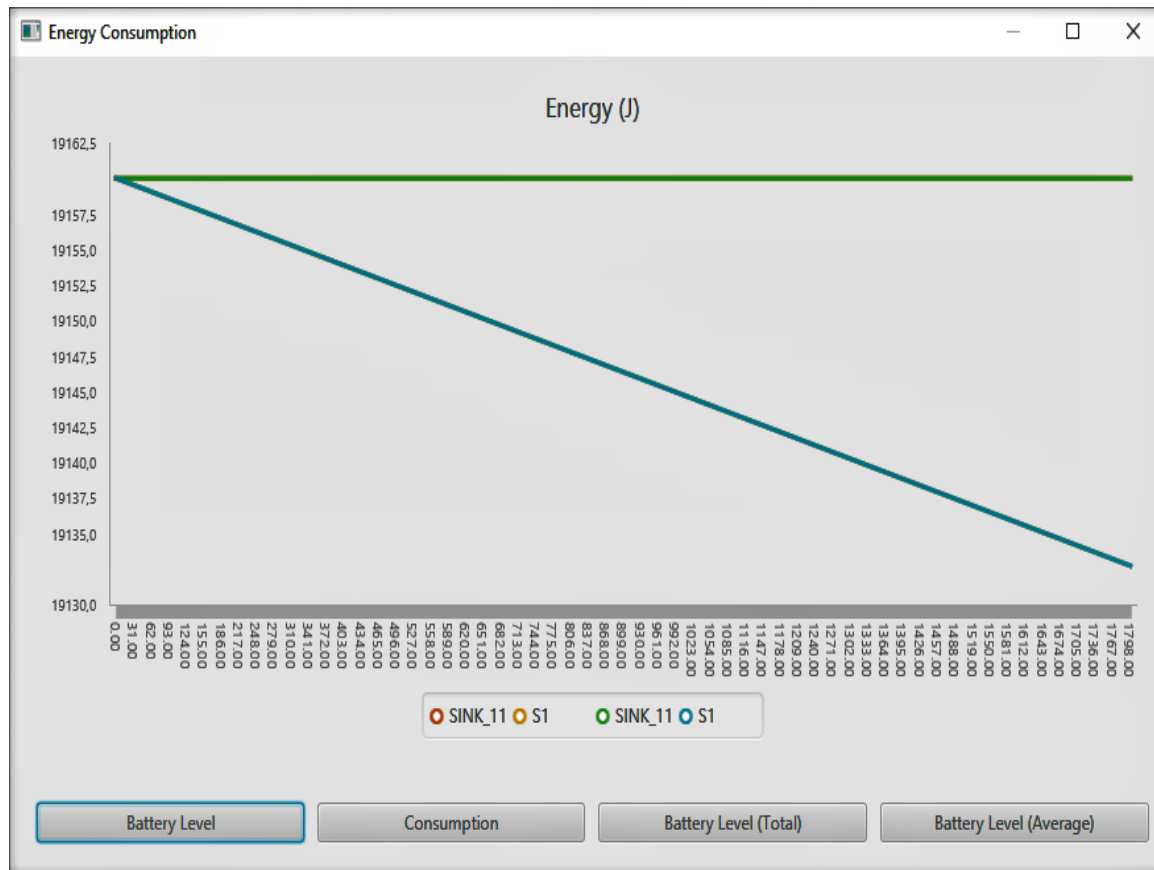


Figura 43. Estado Batería vs Tiempo Total del Primer Escenario.

En la Figura 44 se observa la captura de pantalla del consumo de energía de un sensor con respecto al tiempo total de simulación, con picos de consumo muy bajos del orden de los 0,01 J.

En las Figuras 45 y Figura 46 se muestran, el nivel de batería durante el proceso de simulación y el consumo de energía que posee el nodo sensor, para la marca de tiempo de 0 a 10 seg.

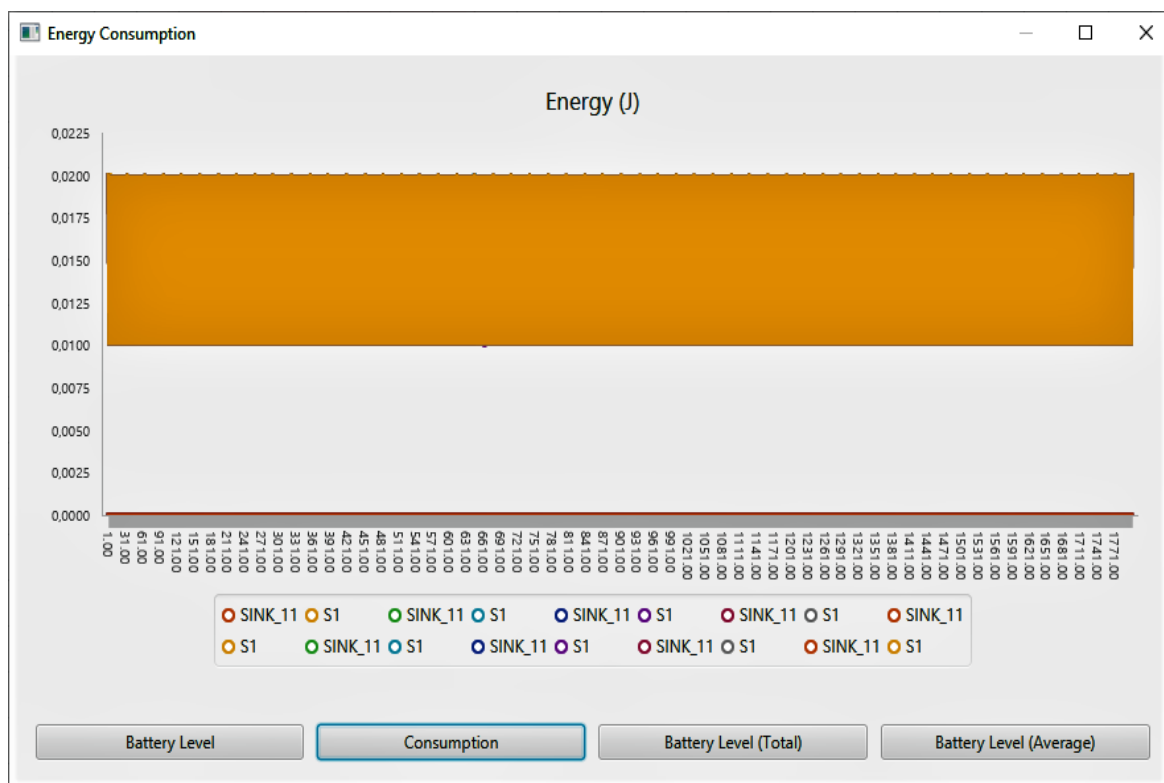


Figura 44. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Primer Escenario.

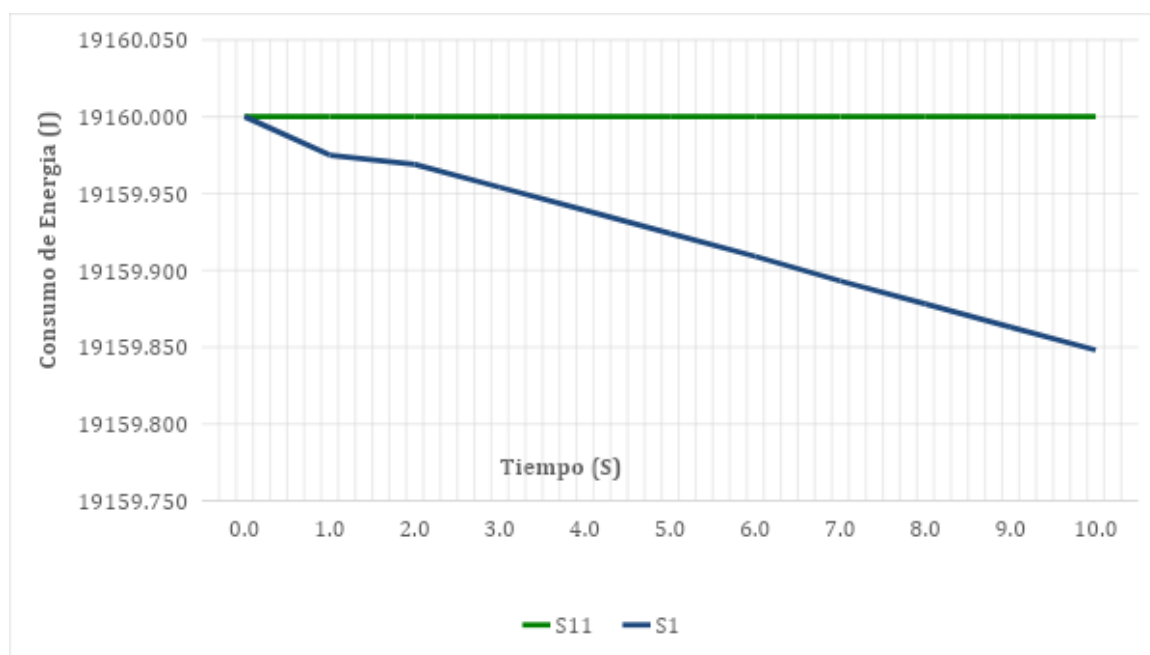


Figura 45. Estado Batería vs Tiempo Primer Escenario.

De las figuras 43 a 46 se puede observar que el consumo del nivel de batería del nodo sensor es muy bajo para el caso de aplicación del protocolo Lora en una configuración de topología en estrella, por lo que esta configuración en los nodos sensores puede mejorar significativamente su vida útil.

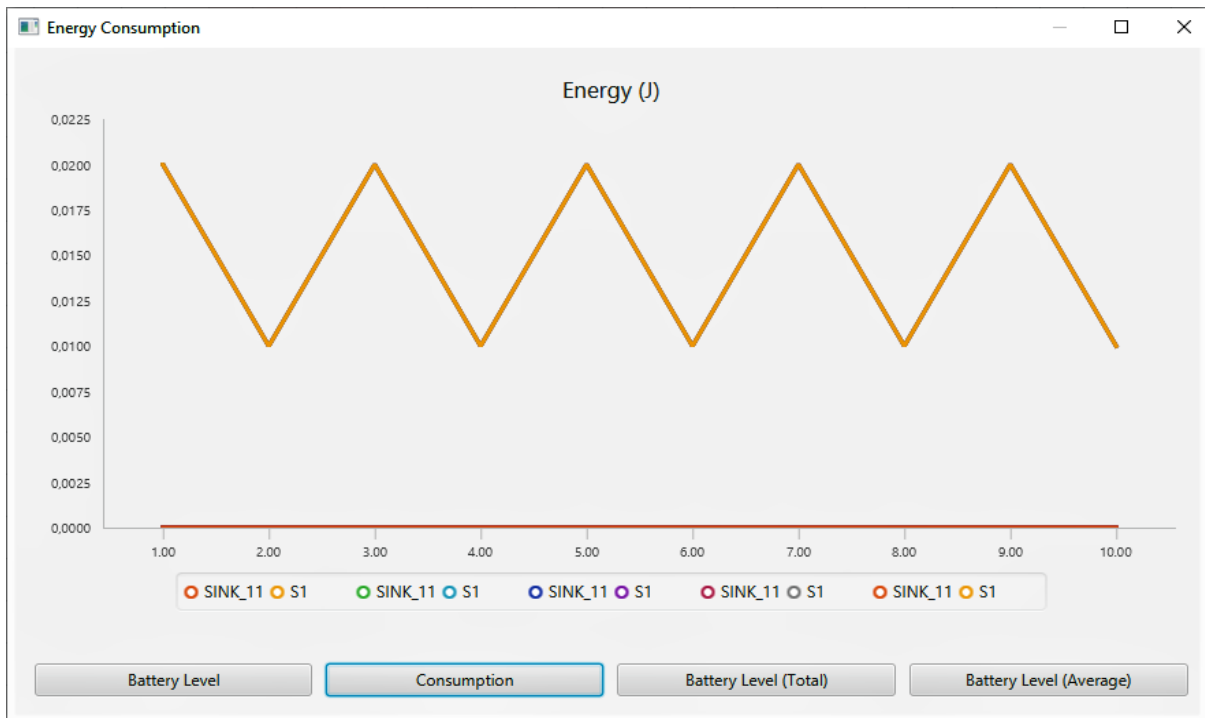


Figura 46. Consumo Sensor vs Tiempo Primer Escenario.

4.2 Resultados Segundo Escenario

En este segundo escenario evaluamos la simulación con los parámetros de configuración para el protocolo Zigbee. Se exhibe en la Figura 47 la captura de pantalla de la consola del tráfico de paquetes, donde se puede observar los números de paquetes enviados-recibidos.

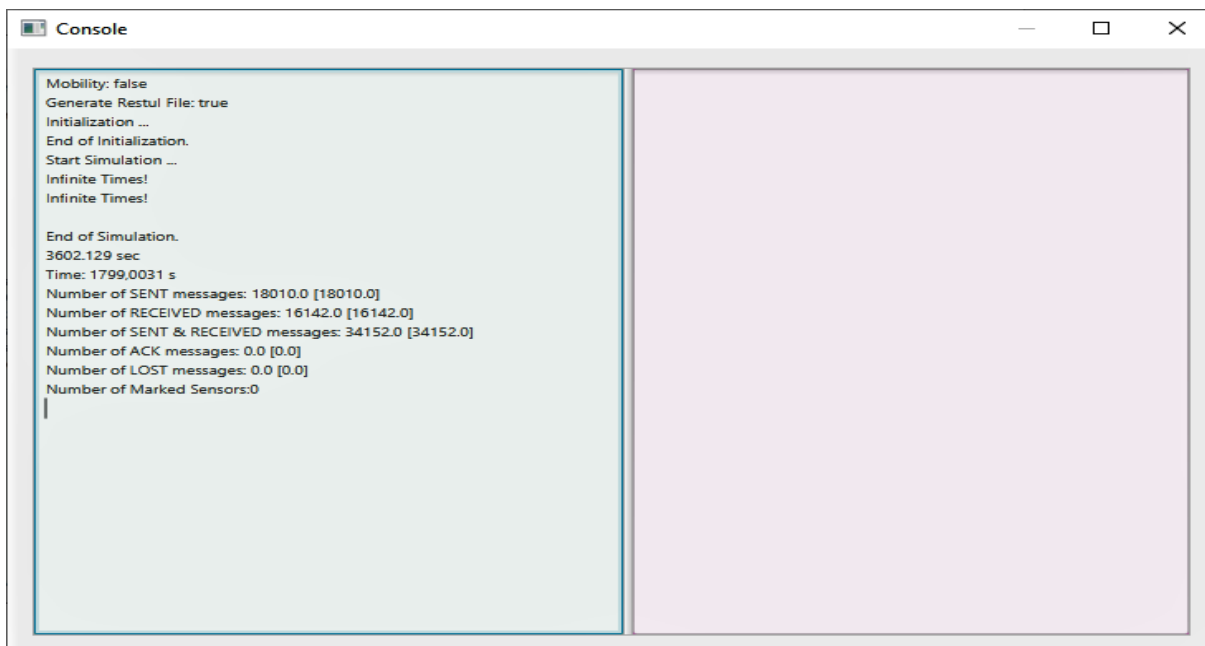


Figura 47. Consola Segundo Escenario.

La Tabla 15 muestra los valores resultantes de las métricas de la segunda simulación, como la tasa de entrega de paquetes y el rendimiento entre otros.

Tabla 15. Métricas Segundo Escenario.

Métricas	2do Escenario
Tiempo Real Simulación RT (seg)	3.602,13
Paquetes enviados	18.010,00
Paquetes recibidos	16.142,00
Tiempo Total (seg)	1.799,00
Tasa de entrega de paquetes (PDR)	0,90
Rendimiento (THR) pps	8,97
Retraso de extremo a extremo (E2ED) s	0,11
Jitter medio (JIT) ms	2

De la Tabla 15 se observa que el valor del PDR obtenido es de 0,90 que se toma como un valor alto en tasa de entrega de paquetes y está dentro de los parámetros óptimos respecto a la misma cantidad de paquetes enviados y recibidos para una red.

El rendimiento medido en esta segunda simulación tiene un valor de 8,97 pps que determina un valor apropiado de eficiencia de la red. El retraso de extremo a extremo tiene un valor de 0,11 s que es conveniente para redes de baja latencia.

Por los valores que arrojan estas dos últimas métricas, es que afirmamos que la red tiene un alto rendimiento y baja latencia por lo cual resulta ser eficiente.

El valor del Jitter 2 ms es baja y también representa una fluctuación disminuida, que en situaciones de alta variación en los valores de latencia pueden dar lugar a la no regularidad en la entrega de los paquetes de datos, aunque las transmisiones se estén realizando de forma periódica, además de ser un indicio de sobrecarga de la red.

Las Figuras 48 y 49 muestran los resultados gráficos de energía del estado de la batería con respecto al tiempo total de simulación y el consumo de un sensor con respecto al tiempo de simulación total. Para ello seleccionamos nuevamente a la estación base SinK_11 y el nodo sensor S1, para obtener el muestreo de los niveles de batería y consumo de energía.

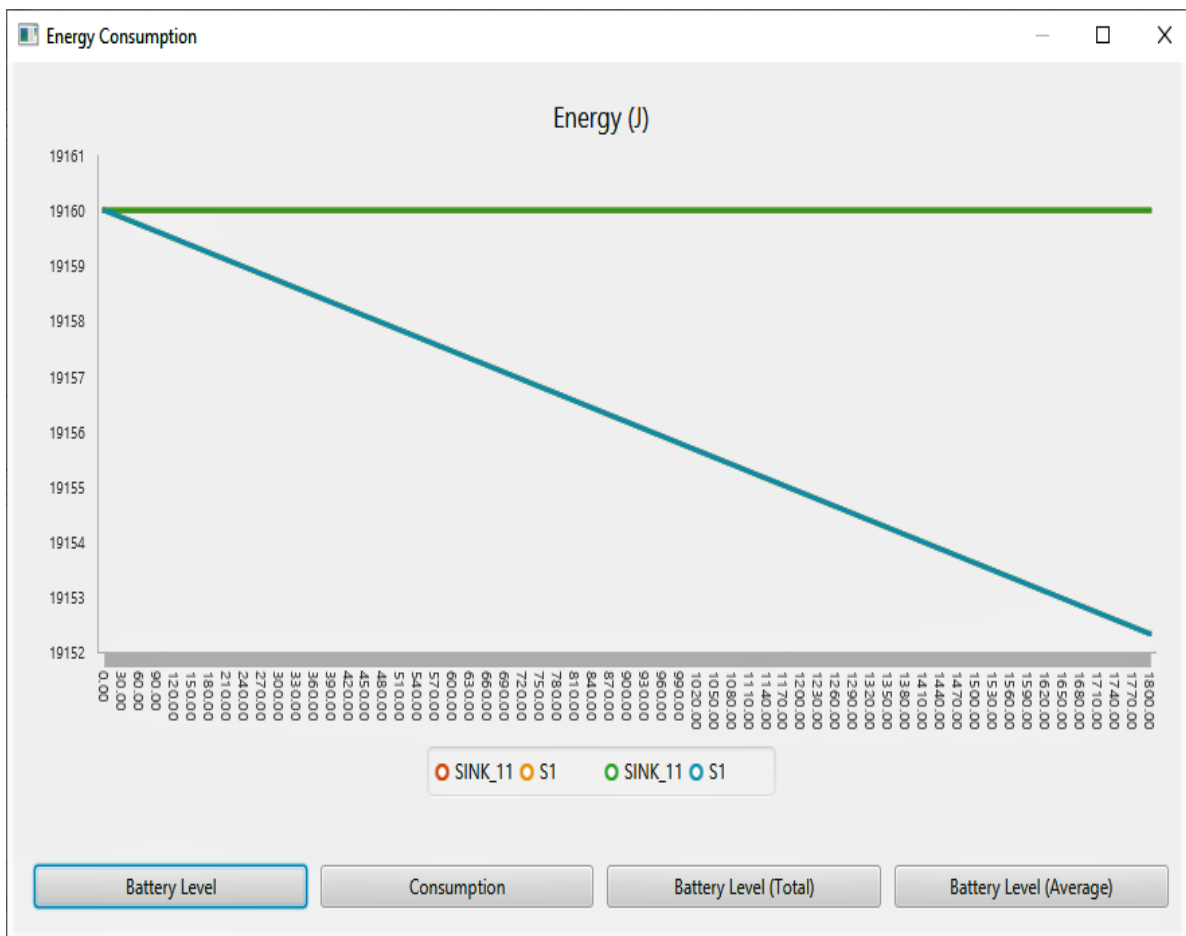


Figura 48. Estado Batería vs Tiempo Total del Segundo Escenario.

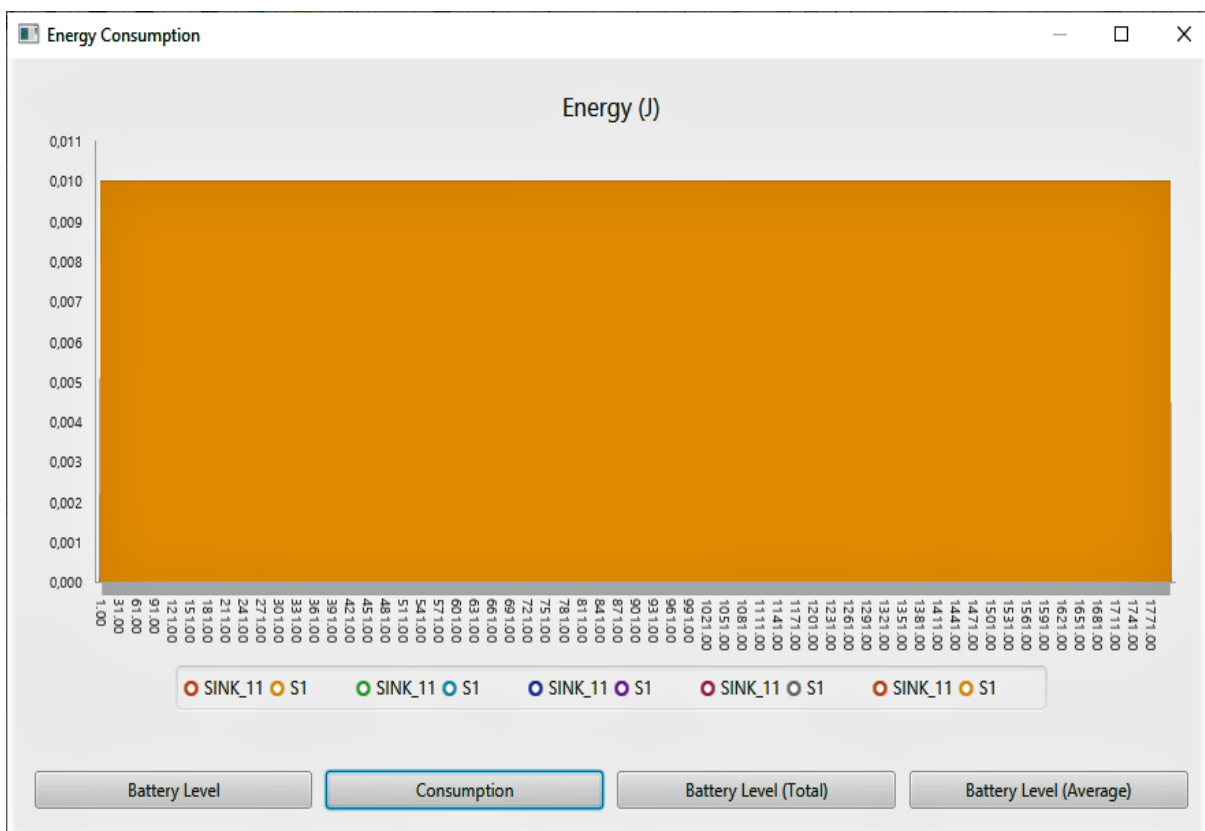


Figura 49. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Segundo Escenario.

Para una mejor interpretación de los diagramas de energía a partir de la herramienta de visualización de eventos con la que cuenta CupCarbon, seleccionamos de ahora en adelante un tiempo de 10 seg para el resto de las simulaciones, tal como se muestra en las Figuras 50 y 51.

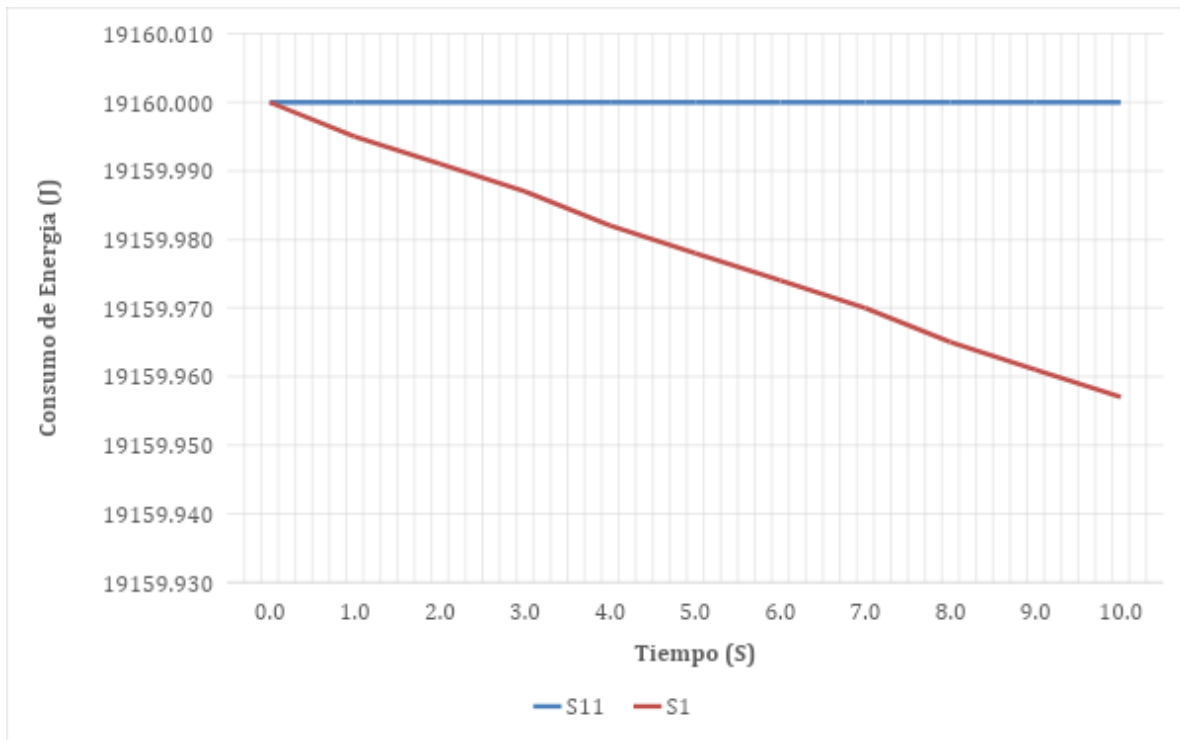


Figura 50. Estado Batería vs Tiempo Segundo Escenario.



Figura 51. Consumo Sensor vs Tiempo Segundo Escenario.

Se observa que para este segundo escenario en la simulación de red de sensores para el protocolo Zigbee, los tipos de consumo energético que existen en la topología estrella es similar como el caso del protocolo Lora analizado en la primera

simulación, debido a que los nodos cumplen el mismo rol y al tener parámetros energéticos iguales su tasa de envío o gasto energético resulta ser semejante.

4.3 Resultados Tercer Escenario

En este tercer escenario y con los parámetros de configuración seleccionado para el protocolo Lora y en una configuración de topología del tipo estrella, evaluamos la simulación para el caso real. En la Figura 52 se muestra la captura de pantalla de la consola del tráfico de paquetes para dicha simulación.



Figura 52. Consola Tercer Escenario.

Tabla 16. Métricas del Tercer Escenario.

Métricas CupCarbon	3er Escenario
Tiempo Real Simulación RT (seg)	2.688,79
Paquetes enviados	34.219,00
Paquetes recibidos	34.200,00
Tiempo Total (seg)	1.799,01
Tasa de entrega de paquetes (PDR)	0,99
Rendimiento (THR) pps	19,01
Retraso de extremo a extremo (E2ED) s	0,05
Jitter medio (JIT) ms	0,55

La Tabla 16 exhibe los resultados de las métricas del tráfico de paquetes, vemos que el valor del PDR obtenido es de 0,99, lo que indica un valor óptimo medido para un sistema simulado como real. El rendimiento medido tiene un valor de 19,01 pps que determina un valor apropiado para la eficiencia de la red en condiciones de un entorno real. El retraso de extremo a extremo tiene un valor de 0,05 s indicando un

valor de baja latencia para la red simulada. El valor del Jitter es de 0,55 ms indicando una mínima fluctuación.

Las Figuras 53 y 54 muestran los resultados gráficos de energía del estado de la batería con respecto al tiempo de simulación y el consumo de un sensor con respecto al tiempo de simulación total. Para ello seleccionamos a la estación base *SinK_1* y el nodo sensor *S10*.

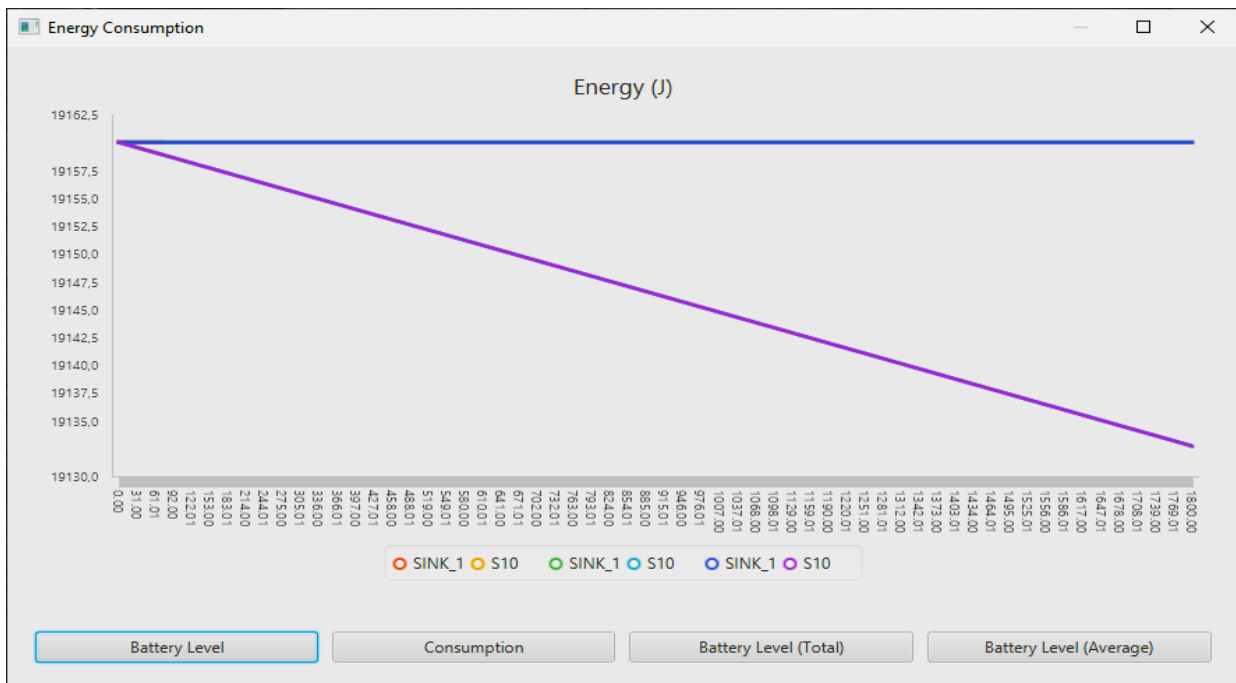


Figura 53. Estado Batería vs Tiempo Total del Tercer Escenario.

La Figura 53 exhibe un bajo valor de consumo aproximado a 28 J en el nivel de batería en el tiempo de simulación, por lo que el agotamiento de la batería resultaría mínimo.

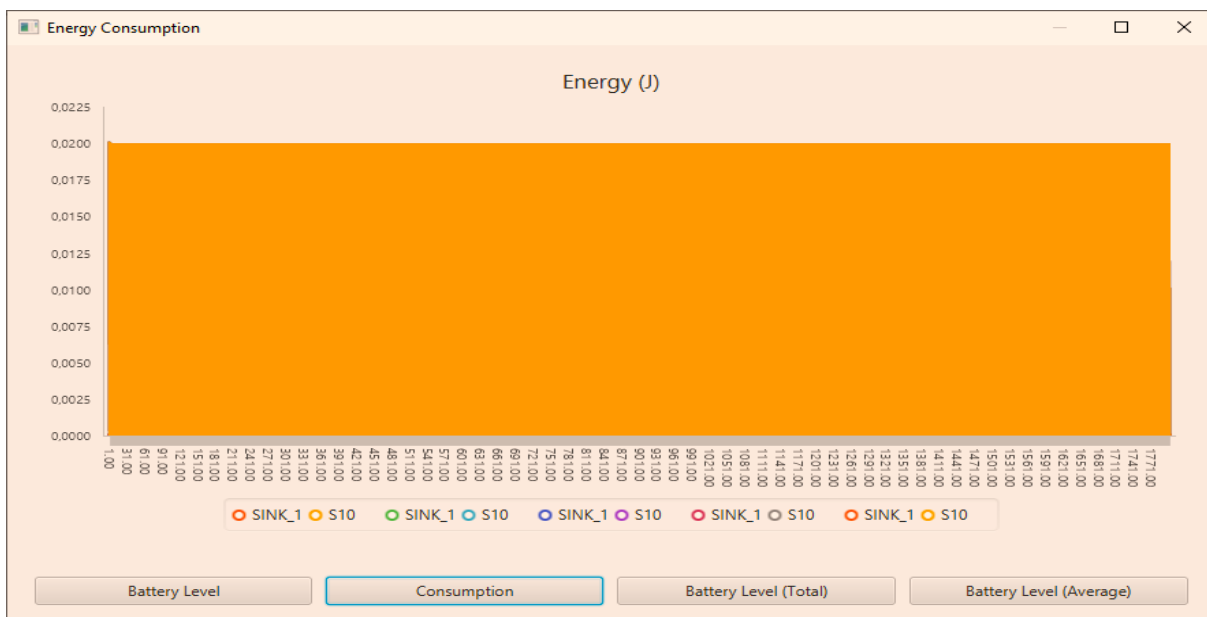


Figura 54. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Tercer Escenario.

En la Figura 54 se observa la captura de pantalla del consumo de energía de un sensor con respecto al tiempo total de simulación, con picos de consumo muy bajos del orden de los 0,02 J.

En las figuras 55 y 56 se observan los muestreos obtenidos de los niveles de batería y consumo de energía, para una marca de tiempo de 10 segundos.

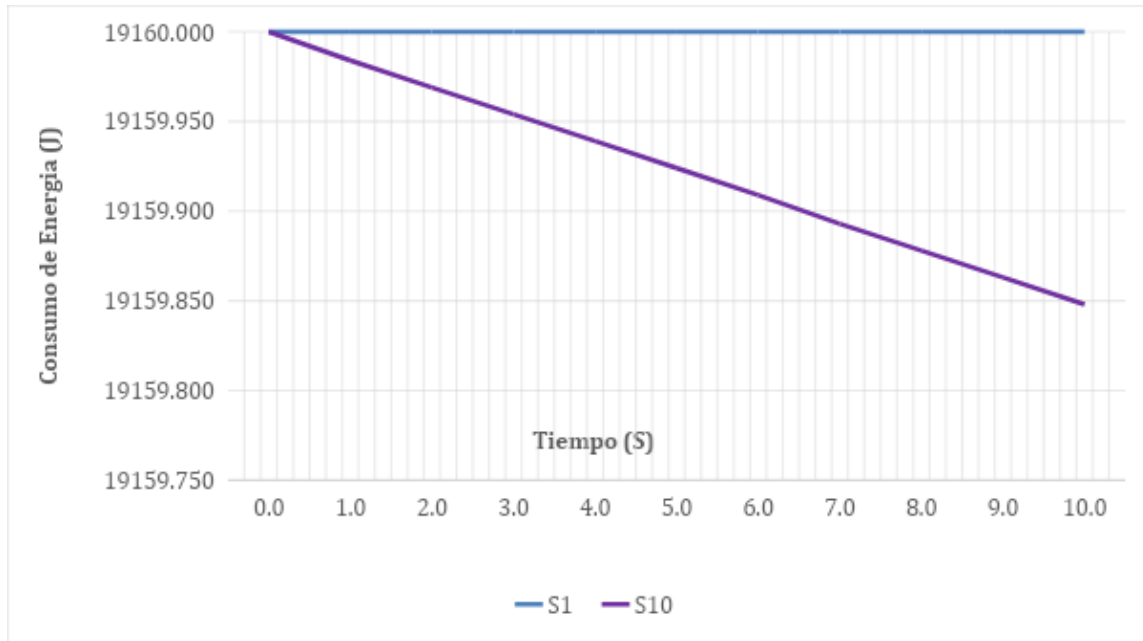


Figura 55. Estado Batería vs Tiempo Tercer Escenario.

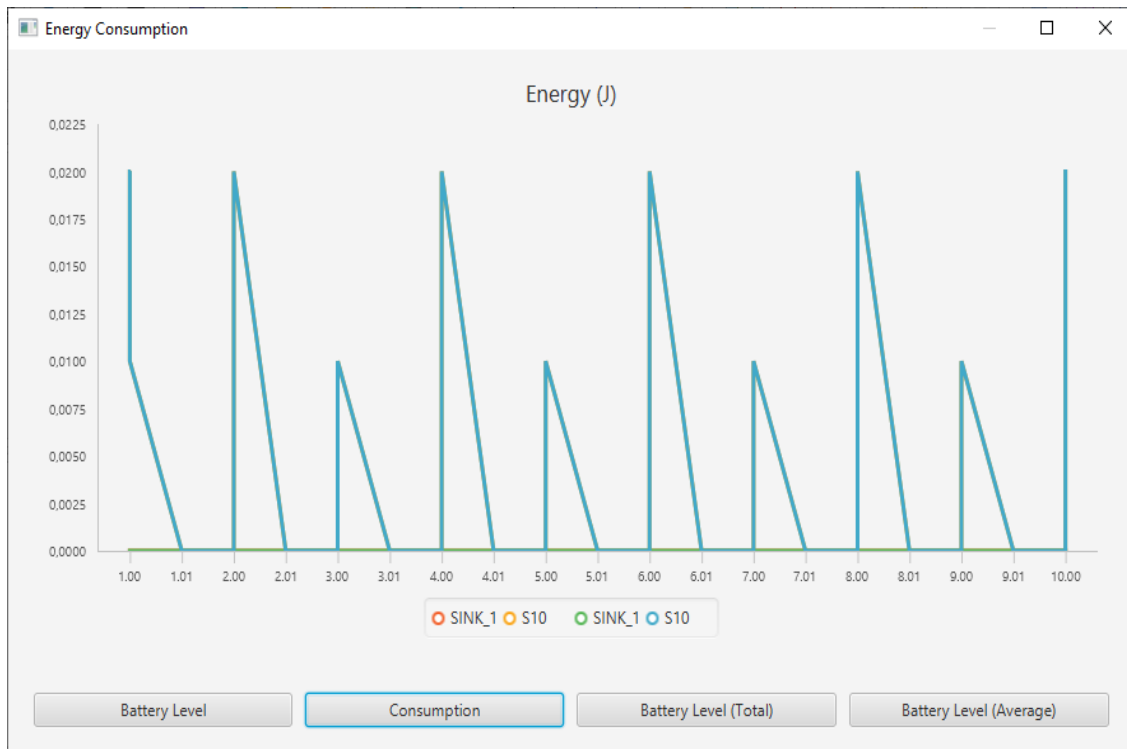


Figura 56. Consumo Sensor vs Tiempo Tercer Escenario.

4.4 Resultados Cuarto Escenario

La Figura 57 muestra la captura de la consola resultado del cuarto escenario de simulación de un caso real, donde se configuraron 105 nodos sensores y una estación base, con los parámetros de configuración seleccionado para el protocolo Lora, y en una configuración de topología del tipo estrella.

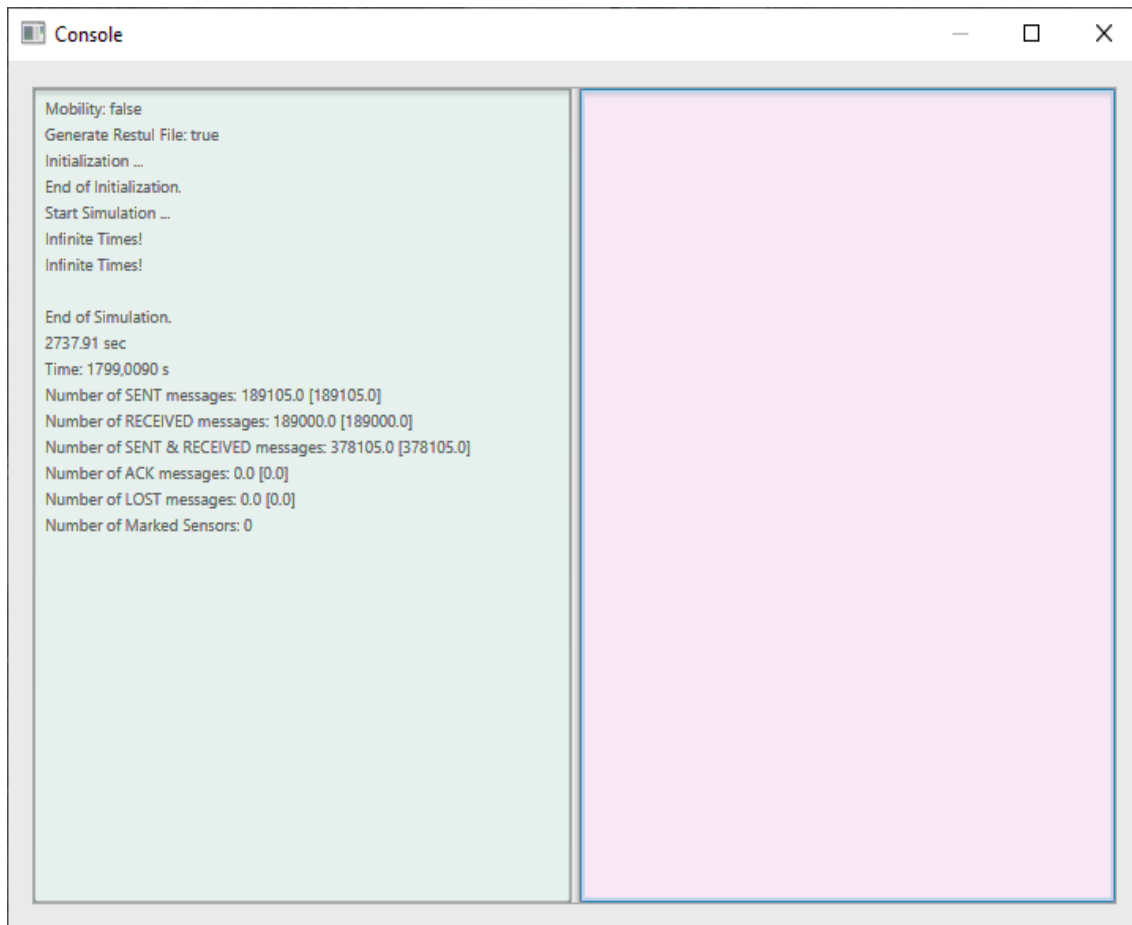


Figura 57. Consola Cuarto Escenario.

La Tabla 17 exhibe los resultados de las métricas del tráfico de paquetes. Las infraestructuras de WSN aceptables ofrecen una gran tasa de paquetes entregados PDR vemos que el valor obtenido para este cuarto escenario es de 0,99. por lo que indica un valor óptimo medido para un sistema simulado como real con gran cantidad de sensores. El rendimiento medido tiene un valor de 105,06 pps para la eficiencia de la red en condiciones de un entorno real. El retraso de extremo a extremo tiene un valor de 0,10 s indicando un valor de baja latencia para la red simulada. El valor del Jitter es de 0,016 ms indicando una mínima fluctuación.

Tabla 17. Métricas del Cuarto Escenario.

Métricas CupCarbon	4to Escenario
Tiempo Real Simulación RT (seg)	2.737,091
Paquetes enviados	189.105,00
Paquetes recibidos	189.000,00
Tiempo Total (seg)	1.799,009
Tasa de entrega de paquetes (PDR)	0,99
Rendimiento (THR) pps	105,06
Retraso de extremo a extremo (E2ED) s	0,010
Jitter medio (JIT) ms	0,016

En las Figuras 58 y 59 se observan los resultados obtenidos en esta simulación, para la energía del estado de la batería con respecto al tiempo de simulación y el consumo de un sensor con respecto al tiempo de simulación total. Para ello seleccionamos nuevamente a la estación base *Sink_106* y el nodo sensor *S1*, para obtener el muestreo de los niveles de batería y consumo de energía.

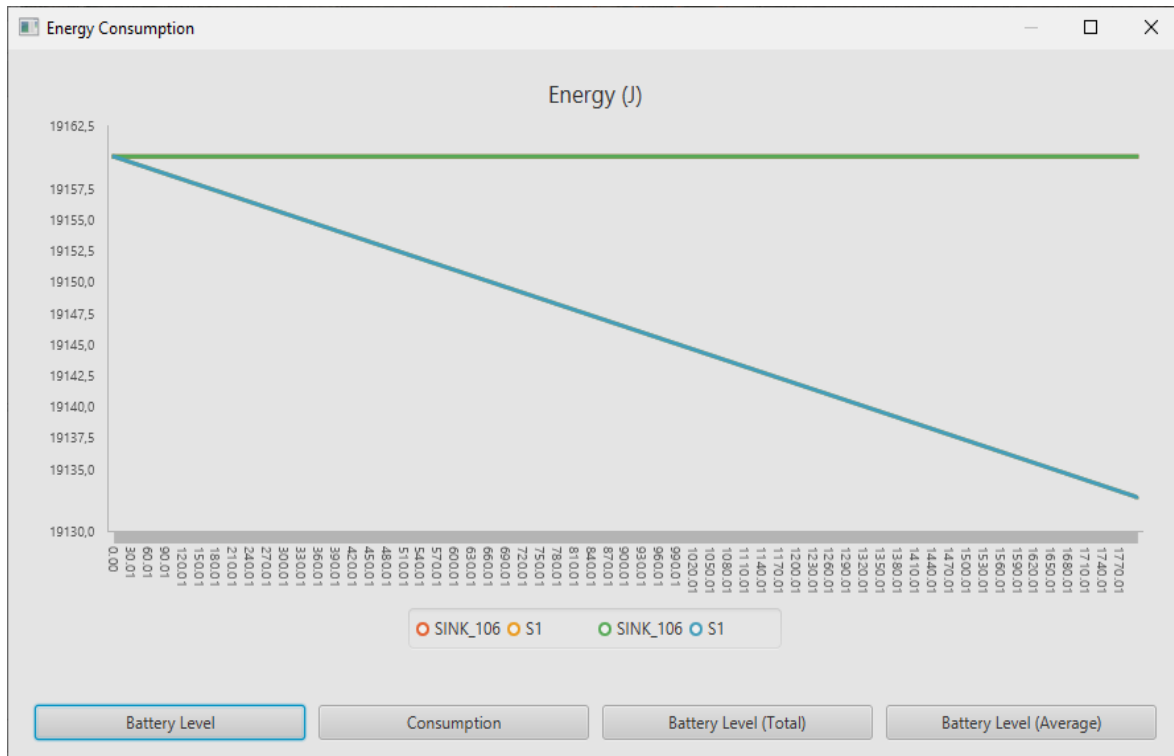


Figura 58. Estado Batería vs Tiempo Total del Cuarto Escenario.

La Figura 58 muestra un valor de consumo aproximado de 37 J en el nivel de batería en el tiempo de simulación, por lo que el agotamiento de la batería resultaría mínimo.

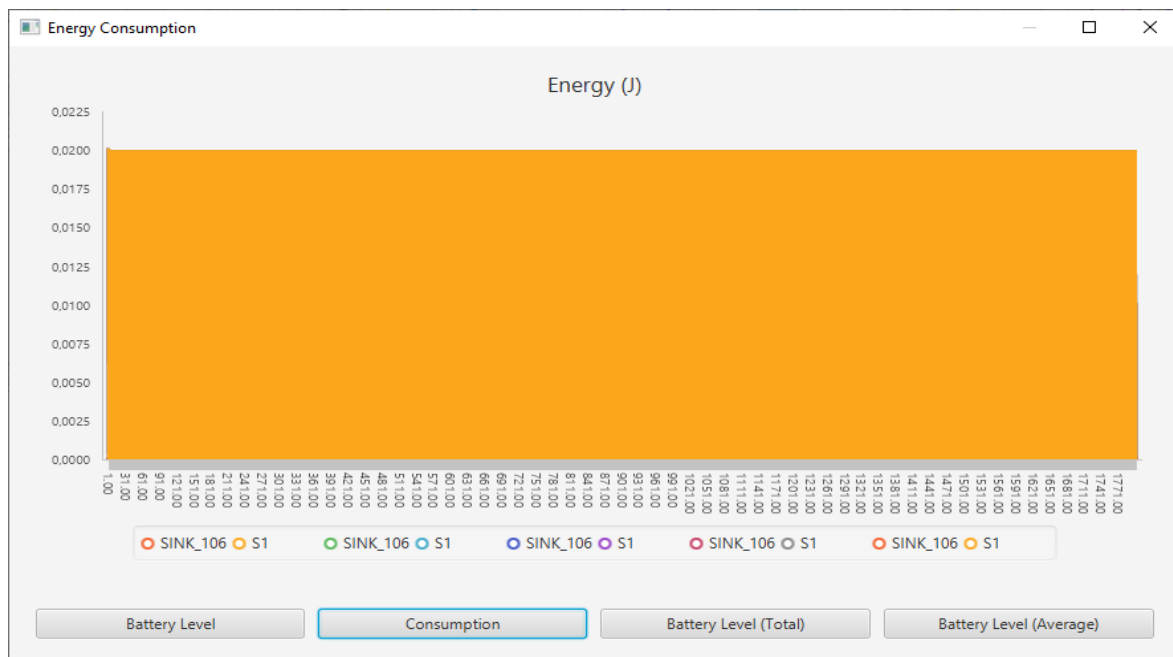


Figura 59. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Cuarto Escenario.

En la Figura 59 se muestra la captura de pantalla del consumo de energía de un sensor con respecto al tiempo total de simulación, con picos de consumo muy bajos del orden de los 0,02 J.

En las figuras 60 y 61 se muestran los muestreos obtenidos de los niveles de batería y consumo de energía, para una marca de tiempo de 10 segundos.

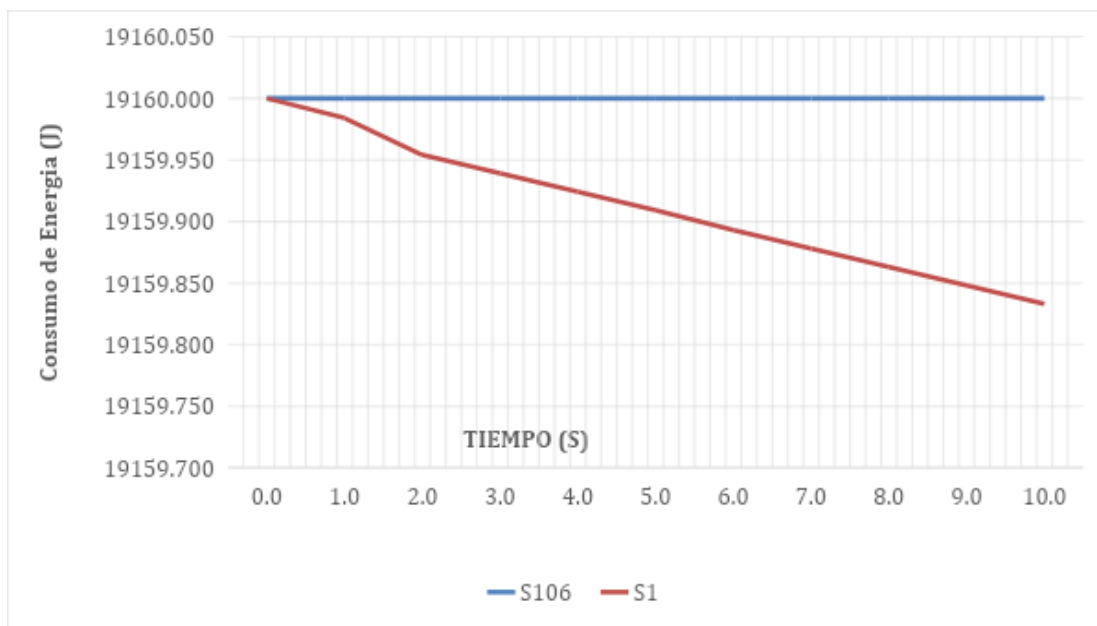


Figura 60. Estado Batería vs Tiempo Cuarto Escenario.

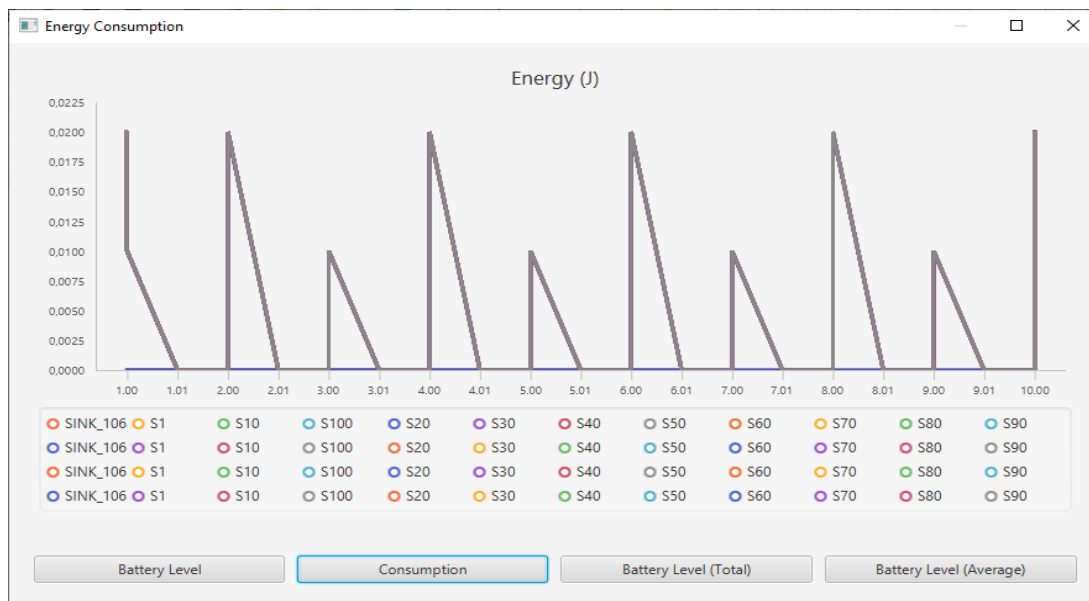


Figura 61. Consumo Sensor vs Tiempo Cuarto Escenario.

4.5 Resultados Quinto Escenario

La Figura 62 exhibe la captura de la consola resultado del quinto escenario de simulación de un caso real, donde se configuraron 19 nodos sensores y una estación base, con los parámetros de configuración seleccionado para el protocolo Zigbee en una configuración de topología del tipo malla.

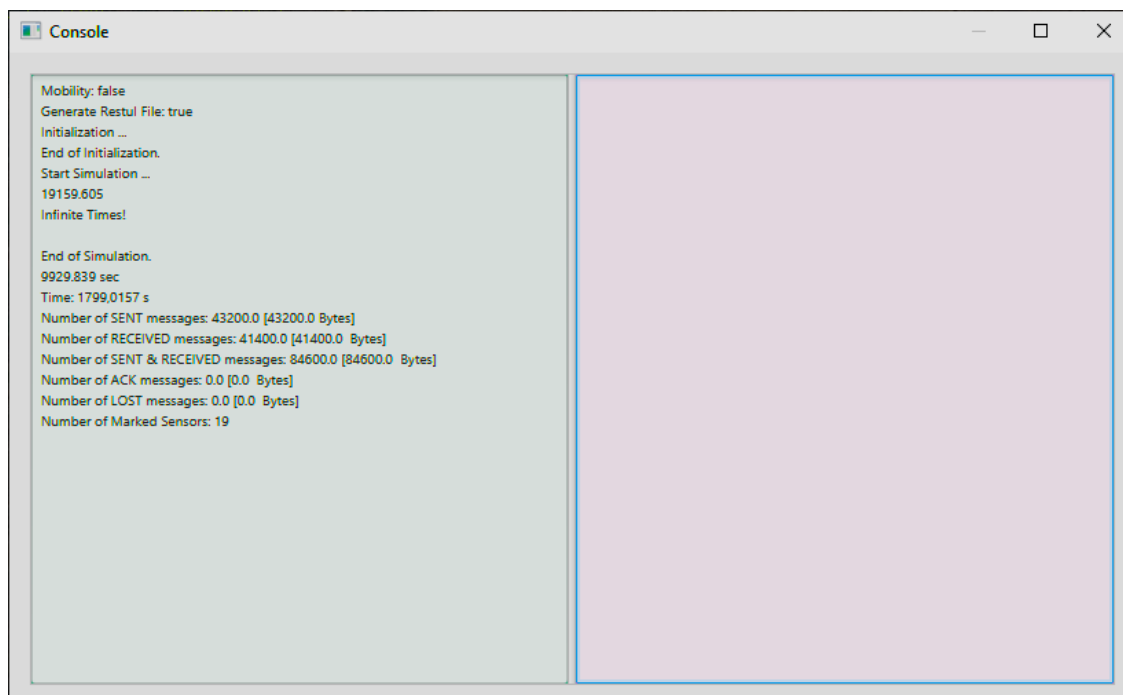


Figura 62. Consola Quinto Escenario.

La Tabla 18 muestra los resultados de las métricas del tráfico de paquetes, vemos que el valor del PDR obtenido es de 0,95, lo que indica un valor óptimo medido para un sistema simulado como real con gran cantidad de sensores. El rendimiento

medido tiene un valor de 23,01 pps para la eficiencia de la red en condiciones de un entorno real. El retraso de extremo a extremo tiene un valor de 0,010 s indicando un valor de baja latencia para la red simulada. El valor del Jitter es de 0,37 ms indicando una mínima fluctuación.

Tabla 18. Métricas del Quinto Escenario.

Métricas CupCarbon	5to Escenario
Tiempo Real Simulación RT (seg)	9.929,839
Paquetes enviados	43.200,000
Paquetes recibidos	41.400,000
Tiempo Total (seg)	1.799,016
Tasa de entrega de paquetes (PDR)	0,95
Rendimiento (THR) pps	23,01
Retraso de extremo a extremo (E2ED) s	0,010
Jitter medio (JIT) ms	0,37

En las Figuras 63 y 64 se reflejan los resultados de esta simulación de energía del estado de la batería con respecto al tiempo de simulación y el consumo de un sensor con respecto al tiempo de simulación total. Para ello seleccionamos nuevamente a la estación base SinK_1 y el nodo sensor S10, para obtener el muestreo de los niveles de batería y consumo de energía.

La Figura 63 exhibe un valor de consumo aproximado de 8 J en el nivel de batería en el tiempo de simulación, por lo que el agotamiento de la batería resulta mínimo.

En la Figura 64 se muestra la captura de pantalla del consumo de energía de un sensor con respecto al tiempo total de simulación, con picos de consumo relativamente bajos del orden de los 0,01 J.

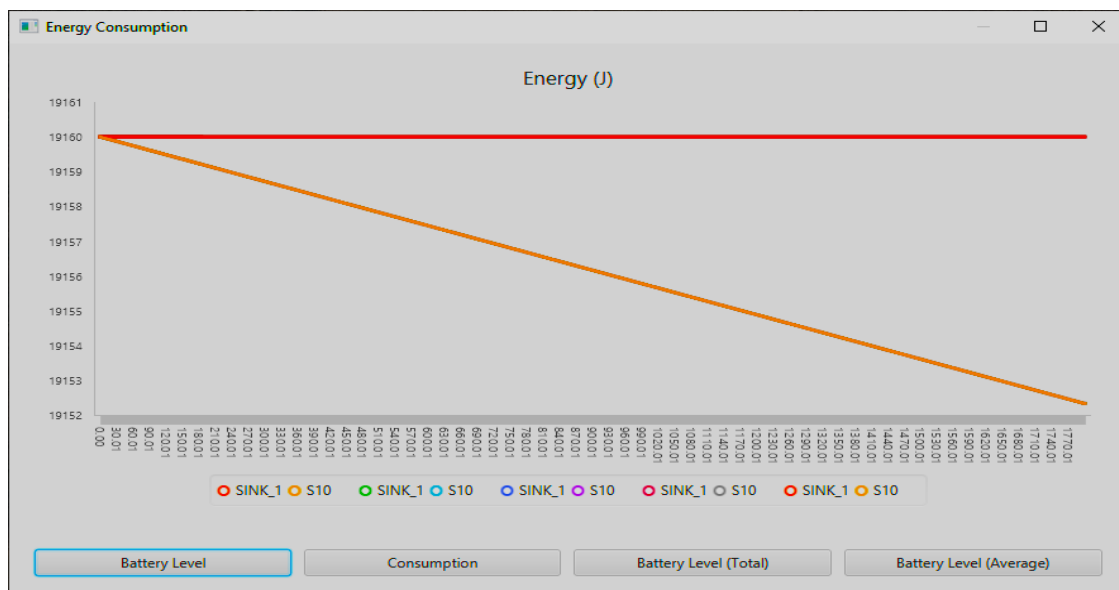


Figura 63. Estado Batería vs Tiempo Total del Quinto Escenario.

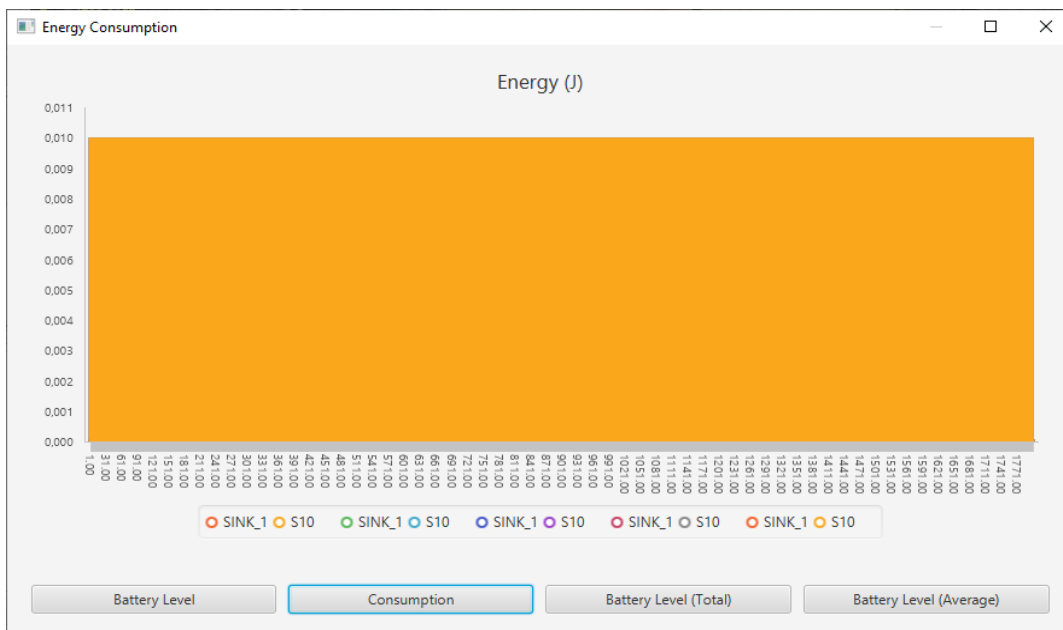


Figura 64. Consumo Sensor vs Tiempo Total del Quinto Escenario.

En las figuras 65 y 66 se observan los muestreos de los niveles de batería y consumo de energía, para una marca de tiempo de 10 segundos.

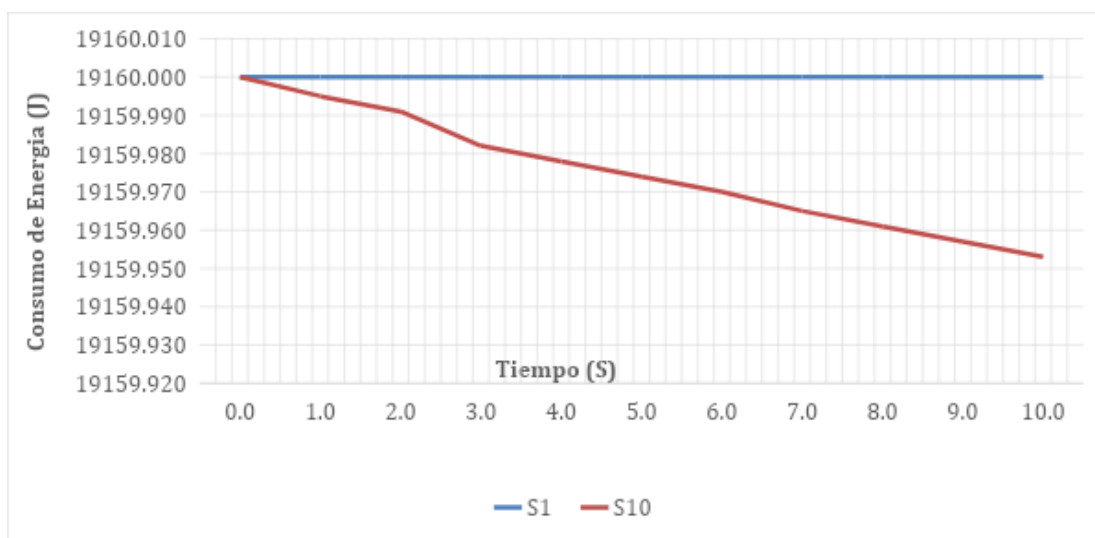


Figura 65. Estado Batería vs Tiempo Quinto Escenario.

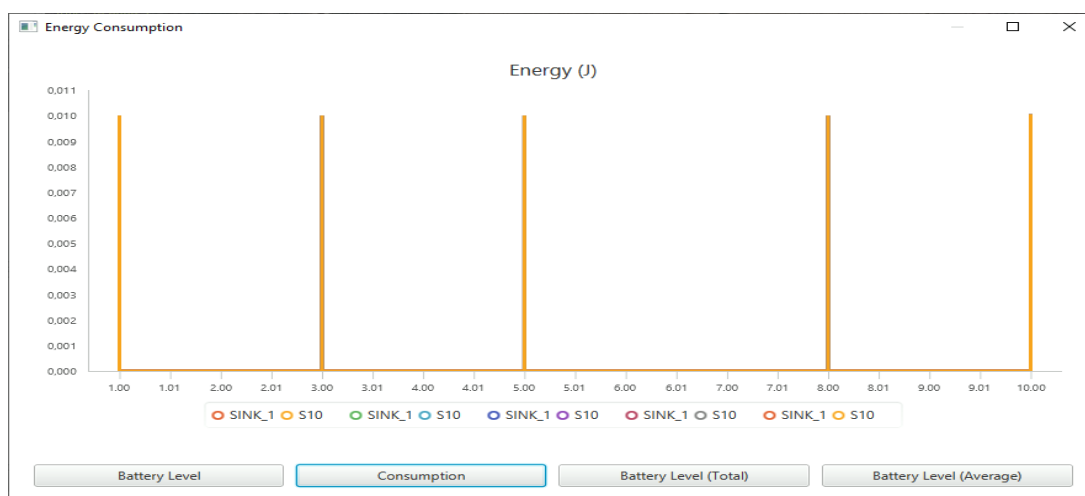


Figura 66. Consumo Sensor vs Tiempo Quinto Escenario.

Un factor que afecta al rendimiento en una red es la topología implementada, ya que hace referencia a la cantidad de dispositivos de red, el ancho de banda de los enlaces de red y la distancia entre los dispositivos de una ruta de red.

La tecnología Zigbee utilizada para este quinto escenario en topología de malla, si bien permite una mayor flexibilidad en cuanto al alcance de la red ya que se pueden agregar dispositivos adicionales para ampliar el área de cobertura, tiene como desventaja el aumento en la cantidad de dispositivos sensores utilizados como nodos de ruteo, ya que Zigbee tiene la limitación en la cobertura de 100 m, y en el caso de despliegues en grandes superficies como son las zonas rurales como la del presente proyecto, se deben usar una mayor cantidad de nodos de ruteo para cubrir los sectores de interés.

4.6 Costos Asociados Al Proyecto

Se incorpora un presupuesto que contiene los costos de financiamiento para llevar adelante la solución propuesta en cada uno de los escenarios de casos reales y de acuerdo con las siguientes descripciones:

- Software (Simulación de estaciones bases y nodos IoT).
- Infraestructura (Torres, energía eléctrica, paneles solares, baterías, antenas, etc.).
- Dispositivos IoT (Gateway, nodos sensores, etc.).
- Mano de Obra, (Desarrollo, configuración, instalación en campo de la solución propuesta).

Para llevar adelante la solución planteada en los escenarios de simulación real, se debe considerar una inversión económica en cuanto a los dispositivos a utilizar en cada caso, ya sea nodos o sensores IoT, estaciones base, *Gateway* multiprotocolo, entre otros.

De acuerdo con la tecnología de comunicación empleada en los escenarios para el desarrollo de la infraestructura de los dispositivos IoT a desplegar, nos encontraremos con las dos tecnologías ensayadas en la solución propuesta: Lora y Zigbee.

De acuerdo con la disponibilidad en los mercados para adquirir este tipo de dispositivos para los prototipos de soluciones ensayadas y teniendo en cuenta la disponibilidad de estos en la actualidad es que consideramos los siguientes modelos

utilizados para módulos de radio en la tecnología Lora (SX1262, SX1276, SX1277, SX1278, ORX1279) [35].

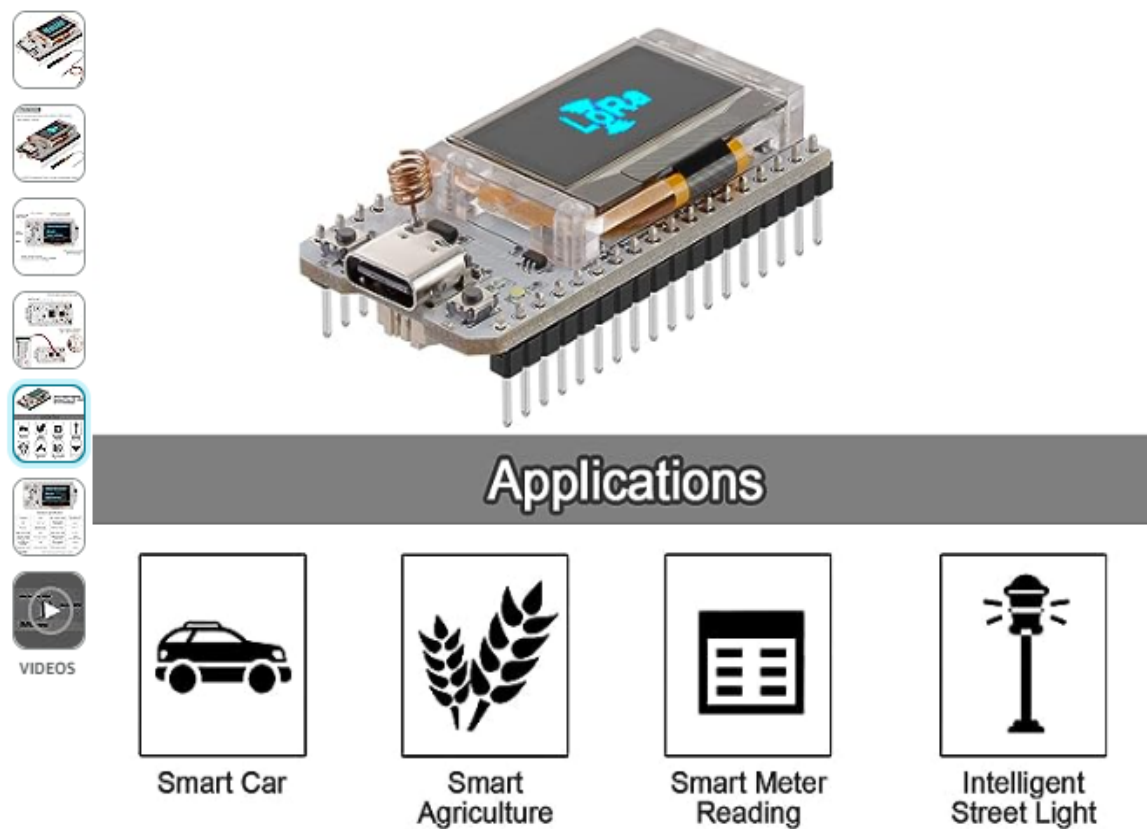


Figura 67. Módulo de radio Lora. Fuente MakerFocus (2023)

Existen dos tipos de módulos muy utilizados en la tecnología Zigbee: XBee y XBee Pro [36].

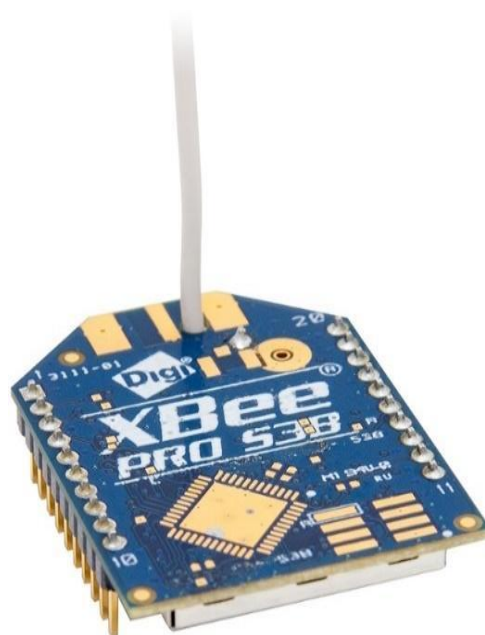


Figura 68. Módulo de radio Zigbee. Fuente DIGI (2023)

En las Figuras 67 y 68 se exhiben los módulos de radio Lora Zigbee respectivamente.

Las Tablas 19 al 21 exhiben los costos asociados para llevar adelante la solución propuesta en cada uno de los escenarios de los casos reales.

Tabla 19. Costos Tercer Escenario.

TERCER ESCENARIO	DESCRIPCIÓN	CANT	COSTO UNIT. USD	COSTO TOTAL USD	COSTO TOTAL PESOS
Software	Simulación de estaciones bases y nodos IoT	1	USD 0,00	USD 0,00	\$ 0,00
Infraestructura	Torres, energía eléctrica, paneles solares, baterías, antenas, etc.	1	USD 5.500,00	USD 5.500,00	\$ 2.010.250,00
Dispositivos IoT	ESP32 SX1262 863 928MHz, LoraWAN WiFi Bluetooth	20	USD 50,00	USD 1.000,00	\$ 365.500,00
Mano de obra	Desarrollo, configuración, instalación en campo	1	USD 1.625,00	USD 1.625,50	\$ 593.937,50
TOTAL				USD 7.887,50	\$ 2.969.687,50

Tabla 20. Costos Cuarto Escenario.

CUARTO ESCENARIO	DESCRIPCIÓN	CANT	COSTO UNIT. USD	COSTO TOTAL USD	COSTO TOTAL PESOS
Software	Simulación de estaciones bases y nodos IoT	1	USD 0,00	USD 0,00	\$ 0,00
Infraestructura	Torres, energía eléctrica, paneles solares, baterías, antenas, etc.	1	USD 5.500,00	USD 5.500,00	\$ 2.010.250,00
Dispositivos IoT	ESP32 SX1262 863 928MHz, LoraWAN WiFi Bluetooth	106	USD 50,00	USD 5.300,00	\$ 1.937.150,00
Mano de obra	Desarrollo, configuración, instalación en campo	1	USD 2.700,00	USD 2.700,50	\$ 986.850,00
TOTAL				USD 13.500,00	\$ 4.934.250,00

Tabla 21. Costos Quinto Escenario.

QUINTO ESCENARIO	DESCRIPCIÓN	CANT	COSTO UNIT. USD	COSTO TOTAL USD	COSTO TOTAL PESOS
Software	Simulación de estaciones bases y nodos IoT	1	USD 0,00	USD 0,00	\$ 0,00
Infraestructura	Torres, energía eléctrica, paneles solares, baterías, antenas, etc.	1	USD 5.500,00	USD 5.500,00	\$ 2.010.250,00
Dispositivos IoT	DIGI XBP9B-DMWT-002 RF TXRX Module, XBee-PRO 900HP	19	USD 130,00	USD 2470,00	\$ 902.785,00
Mano de obra	Desarrollo, configuración, instalación en campo	1	USD 1.407,50	USD 1.407,50	\$ 514.441,25
TOTAL				USD 9.377,50	\$ 3.427.476,25

El software CupCarbon elegido para los escenarios de las distintas instancias de simulación, al ser libre y con fines educativos, carece de costos de licencias de software. Con la nueva versión de CupCarbon 6.0 se abre la posibilidad de utilizar el protocolo MQTT para simular nodos virtuales y nodos reales basados en ESP32, Android, Raspberry y cualquier otro dispositivo.

V. Conclusiones

El exponencial desarrollo de la tecnología IoT ha ofrecido una vasta oportunidad para la implementación de la agricultura inteligente, la cual ha proporcionado a los agricultores acceso a una mayor visión de sus operaciones agrícolas. Podemos asegurar que las ventajas del uso del IoT en la cadena productiva del sector agrícola trajo aparejados beneficios significativos; entre ellos es de remarcar el potencial incremento de la eficiencia de la productividad agrícola, ya que los datos obtenidos como el estado del cultivo y otras variables ayudan en la planificación y toma de decisiones oportunas basadas en información en tiempo real, que en la práctica es lo que se conoce como Smart Farming.

Este trabajo tuvo por objetivo evaluar las posibles alternativas de tecnologías IoT utilizadas en WSN, realizando un análisis comparativo de las mismas y de diferentes entornos de simulación de software, para seleccionar finalmente aquel que permita adaptarse a la mejor solución de acuerdo con las necesidades concretas de los posibles clientes regionales y en particular a los de la provincia de San Luis.

La provincia de San Luis al día de la fecha necesita incursionar en el desarrollo de nuevas implementaciones de tecnología para el sector agropecuario, por lo que resulta importante subrayar las ventajas que ofrece la implementación tecnológica de los sistemas IoT con el fin de aumentar la eficiencia y la producción del sector agropecuario de la región.

Teniendo en cuentas estas necesidades, se realizó un análisis comparativo que permitió evaluar entre las diferentes tecnologías inalámbricas de las WSN y en particular se comparó entre Lora y Zigbee, para determinar cuál de ellas posee un mejor desempeño en los ambientes de simulación propuestos, a la hora de la transmisión de datos, consumo de energía, escalabilidad de la red, etc. A través de la experiencia de las instancias de simulación realizadas queda demostrado que es necesario hacer un análisis del entorno donde se vaya a desplegar una red WSN, sobre todo teniendo en cuenta las distancias de comunicación de las tecnologías inalámbricas a implementar en el despliegue de redes de sensores IoT para un entorno rural.

A partir de los resultados obtenidos, se ha podido demostrar que la tecnología Lora es la que cumple de mejor manera con los requerimientos del entorno IoT para los escenarios de simulación experimentados, ya que por su tecnología robusta y de largo alcance permite potenciar las funcionalidades de una red WSN cuando es aplicada en un ambiente de una zona rural, dado que la misma permite alcanzar distancias que con otros módulos de comunicación inalámbrica no se conseguirían, y optimizar el uso de recursos en cuanto al consumo de energía se refiere. De las topologías ensayadas se optó por la topología estrella, dada su simplicidad y facilidad de implementación, y esta elección se debe al fácil despliegue de los nodos sensores y la practicidad de comunicación para enviar datos a la estación base.

Como plataforma de software para emular los escenarios ensayados se seleccionó el simulador CupCarbon, que es una herramienta de simulación del tipo científico-educativa, utilizada para el diseño, estudio y comparación de las redes de sensores inalámbricos. El software tiene la ventaja de ser gratuito, con una interfaz simple, interactiva e intuitiva y de fácil manejo en el despliegue de escenarios. Posee funciones orientadas en WSN, por lo que es compatible de forma nativa con los protocolos Lora, ZigBee y WiFi. Permite un rápido y preciso despliegue de nodos sensores, como así también obtener los perfiles de consumo por nodo y por protocolo según el modelo clásico proporcionado por el propio simulador, brindando a la vez la posibilidad de configurar y simular la red seleccionada antes de la implementación inicial, lo que se traduce en una reducción de los tiempos y costos de instalación e implementación. Esto nos da la posibilidad de simular cualquier infraestructura en el sector agrícola similar a un caso real y establecer eventos aleatorios y generar gráficos de consumo de energía, que es un parámetro importante para probar en las WSN.

Como desventaja podemos mencionar el conocimiento previo que hay que poseer en cuanto a la programación en Java, hasta familiarizarse con el entorno de configuración Senscript que es el lenguaje de programación propio del simulador, o bien conocer el lenguaje Python que la última versión también lo utiliza.

En cuanto a trabajos futuros esta tesis puede servir como guía para analizar otros puntos de interés que no han sido abordados en este trabajo, como es la utilización de otras tecnologías que pueden aplicarse al ámbito rural para aplicaciones de IoT en Smart Farming. Considerar otras arquitecturas de mayor envergadura en zonas rurales de la misma región o a nivel nacional y que aporten una mayor escalabilidad en cuanto a una cantidad de nodos sensores utilizados, como así también el uso de

otros protocolos de enrutamiento dinámicos que consideren otros tipos de nodos como es el caso de los nodos móviles.

Una selección de los resultados más importantes de esta tesis se presentaron en un trabajo de investigación publicado y presentado en el congreso XII EnIDI 2023 (con referato, 25 al 27 de Octubre en San Rafael, Mendoza). El trabajo se tituló "Modelado, análisis y selección de tecnologías IoT para Smart Farming regional a través de entornos de simulación" y estará incluido en los procedimientos de dicho encuentro.

Finalmente, de la experiencia adquirida durante el desarrollo del presente trabajo surge la necesidad de que se fomente el alcance de las tecnologías IoT aplicadas al sector agrícola y se expanda las ventajas que la agricultura inteligente le otorga como valor agregado a dicho sector, incentivando un mayor desarrollo de las aplicaciones en zonas rurales de la región, para lo cual se recomienda ante una implementación similar tener en cuenta los costos asociados que implican una inversión de este tipo de tecnologías, pero a su vez tener bien a considerar los grandes beneficios económicos y medioambientales que puede generar su implementación en las áreas del sector productivo agropecuario.

VI. Bibliografía

- [1] Abraham, A., Dash, S., Rodrigues, JJ, Acharya, B. y Pani, SK (Eds.). (2021). *Agricultura inteligente basada en IA, Edge e IoT*. Prensa académica. 1ª Edición. ISBN: 9780128236956.
- [2] Smart Farming y agricultura de precisión. Iberdrola (2023) en línea [Disponible] <https://www.iberdrola.com/innovacion/smart-farming-agricultura-precision>
- [3] Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, GP y Abu-Mahfouz, AM (2020). De la Industria 4.0 a la Agricultura 4.0: estado actual, tecnologías habilitadoras y desafíos de investigación. *Transacciones IEEE sobre informática industrial*, 17 (6), 4322-4334. doi: 10.1109/TII.2020.3003910
- [4] Friha, O., Ferrag, MA, Shu, L., Maglaras, L. y Wang, X. (2021). Internet de las cosas para el futuro de la agricultura inteligente: un estudio exhaustivo de las tecnologías emergentes. *IEEE/CAA Revista de Automatica Sinica*, 8 (4), 718-752. doi: 10.1109/JAS.2021.1003925
- [5] Gagliardi, G., Lupia, M., Cario, G., Cicchello Gaccio, F., D'Angelo, V., Cosma, AIM, & Casavola, A. (2021). Una solución de internet de las cosas para la agricultura inteligente. *Agronomía*, 11 (11), 2140. doi.org/10.3390/agronomy11112140
- [6] Bersani, C., Fossa, M., Priarone, A., Sacile, R., & Zero, E. (2021). Modele el control predictivo versus el control de relé tradicional en un invernadero de alta eficiencia energética. *Energías*, 14 (11), 3353. <https://doi.org/10.3390/en14113353>
- [7] Farooq, MS, Riaz, S., Abid, A., Umer, T. y Zikria, YB (2020). El papel de la tecnología IoT en la agricultura: una revisión sistemática de la literatura. *Electrónica*, 9 (2), 319. doi.org/10.3390/electronics9020319
- [8] Farooq, MS, Riaz, S., Abid, A., Abid, K. y Naeem, MA (2019). Una encuesta sobre el papel de IoT en la agricultura para la implementación de la agricultura inteligente. *Acceso IEEE*, 7, 156237-156271. doi: 10.1109/ACCESO.2019.2949703
- [9] Soto, J. P. T., Suárez, J. D. L. S. S., Rodríguez, A. B., & Cainaba, G. O. R. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos (revista descontinuada)*, (22), 86-105. doi: 10.21501/21454086.3253
- [10] Vite, H., Vargas, O., Vargas, L., & Johanna, V. (2018). Internet de las cosas aplicado a la producción agropecuaria. *Internet de las cosas. Machala, Ecuador: Grupo Compás*. ISBN: 978-9942-770-94-3.

- [11] Quy, VK, Hau, NV, Anh, DV, Quy, NM, Ban, NT, Lanza, S., Randazzo, G. y Muzirafuti, A. (2022). Agricultura inteligente habilitada por IoT: arquitectura, aplicaciones y desafíos. *Ciencias Aplicadas*, 12 (7), 3396. doi.org/10.3390/app12073396
- [12] K. Lova Raju, V. Vijayaraghavan (2021). Internet de las cosas, plataforma en la nube ThingSpeak, módulos NRF24L01, sensores, actuadores, Aplicaciones agrícolas. doi.org/10.21203/rs.3.rs-586227/v1
- [13] Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), 1781. doi.org/10.3390/s17081781
- [14] Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A. y Aggoune, EHM (2019). Agricultura inteligente basada en Internet de las cosas (IoT): hacia hacer que los campos hablen. *Acceso IEEE*, 7, 129551-129583. doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609
- [15] Elijah, O., Rahman, TA, Orikumhi, I., Leow, CY e Hindia, MN (2018). Una descripción general de Internet de las cosas (IoT) y análisis de datos en la agricultura: beneficios y desafíos. *Diario de Internet de las cosas de IEEE*, 5 (5), 3758-3773. doi:10.1109/JIOT.2018.2844296
- [16] Khanna, A. y Kaur, S. (2019). Evolución del Internet de las Cosas (IoT) y su importante impacto en el campo de la Agricultura de Precisión. *Informática y electrónica en la agricultura*, 157, 218-231. doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039
- [17] Liya, ML y Arjun, D. (octubre de 2020). Un estudio de la tecnología LPWAN en el campo agrícola. En 2020, *Cuarta Conferencia Internacional sobre I-SMAC (IoT en redes sociales, móviles, análisis y nube) (I-SMAC)* (págs. 313-317). IEEE. doi:10.1109/I-SMAC49090.2020.9243410
- [18] Yascaribay, G., Huerta, M., Silva, M. y Clotet, R. (2022). Evaluación del desempeño de los sistemas de comunicación utilizados para el internet de las cosas en la agricultura. *Agricultura*, 12 (6), 786. doi.org/10.3390/agricultura12060786
- [19] Agricultura inteligente en 2020: cómo los sensores de IoT están creando una industria de agricultura de precisión más eficiente, febrero de 2021 en línea [Disponible] <https://www.businessinsider.com/smart-farming-iot-agriculture>

- [20] Kassim, MRM (noviembre de 2020). Aplicaciones de IoT en agricultura inteligente: problemas y desafíos. En *la conferencia IEEE de 2020 sobre sistemas abiertos (ICOS)* (págs. 19-24). IEEE. doi:10.1109/ICOS50156.2020.9293672
- [21] Klaina, H., Guembe, IP, Lopez-Iturri, P., Campo-Bescós, M. Á., Azpilicueta, L., Aghzout, O., ... & Falcone, F. (2022). Análisis de tecnologías inalámbricas de red de área amplia de baja potencia en agricultura inteligente para monitoreo de granjas a gran escala y comunicaciones de tractores. *Medida*, 187, 110231. doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110231
- [22] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. y Meyer, F. (2019). Un estudio comparativo de tecnologías LPWAN para la implementación de IoT a gran escala. *TIC express*, 5 (1), 1-7. doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005
- [23] Miles, B., Bourennane, EB, Boucherkha, S. y Chikhi, S. (2020). Un estudio del rendimiento del protocolo LoraWAN para aplicaciones de IoT en agricultura inteligente. *Comunicaciones informáticas*, 164, 148-157. doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.009
- [24] Marais, JM, Abu-Mahfouz, AM y Hancke, GP (2019, noviembre). Una revisión de los simuladores LoraWAN: requisitos y limitaciones de diseño. En *2019 conferencia internacional multidisciplinaria de tecnologías de la información e ingeniería (IMITEC)* (págs. 1-6). IEEE. doi:10.1109/IMITEC45504.2019.9015882
- [25] Villamar Alvarado, A. A. (2022). *Análisis comparativo de tecnologías WSN en base a la seguridad y su forma de operación, aplicado al entorno IOT* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática.). <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/59641>
- [26] Lavric, A. y Petrariu, AI (mayo de 2018). Protocolo de comunicación LoraWAN: La nueva era del IoT. En *2018 Conferencia Internacional sobre Desarrollo y Sistemas de Aplicaciones (DAS)* (págs. 74-77). IEEE. doi: 10.1109/DAAS.2018.8396074
- [27] Sánchez, EB y Sadok, DFH (2020). Análisis de protocolos Lora y LoraWAN utilizando CupCarbon. En *Telemática y Computación: 9° Congreso Internacional, WITCOM 2020, Puerto Vallarta, México, 2 al 6 de noviembre de 2020, Actas 9* (págs. 352-376). Publicaciones internacionales Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-62554-2_26

- [28] Lopez-Pavon, C., Sendra, S., & Valenzuela-Valdés, JF (2018). Evaluación del Simulador de Red CupCarbon para Redes de Sensores Inalámbricos. *Protocolo y Algoritmos de red*, 10, 1-27. doi.org/10.5296/npa.v10i2.13201
- [29] CupCarbon IoT Simulator. (2022). CupCarbon IoT 5.0. en línea [Disponible] http://freenwork.com/cupcarbon/cupcarbon_user_guide.pdf
- [30] Vera Briones, M. I. (2021). *Implementación de una red de sensores inalámbricos WSN para monitorización de condiciones ambientales en sitios indoor* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática.). <http://repositorio.ug.edu.ec>
- [31] Johari, R. y Adhikari, S. (febrero de 2020). Enrutamiento en red IoT mediante simulador CupCarbon. En 2020, *Séptima Conferencia Internacional sobre Procesamiento de Señales y Redes Integradas (SPIN)* (págs. 301-306). IEEE. doi.org/10.1007/978-3-030-94507-7_21.
- [32] Bounceur, A. (2016, marzo). CupCarbon: una nueva plataforma para diseñar y simular redes de sensores inalámbricos de IoT y ciudades inteligentes (SCI-WSN). En *Actas de la Conferencia Internacional sobre Internet de las cosas y Computación en la Nube* (págs. 1-1). doi.org/10.1145/2896387.2900336
- [33] Bounceur, A., Clavier, L., Combeau, P., Marc, O., Vauzelle, R., Masserann, A., ... & Lounis, M. (enero de 2018). CupCarbon: Una nueva plataforma para el diseño, simulación y visualización 2D/3D de propagación de radio e interferencias en redes IoT. En 2018, *15.ª conferencia anual de redes y comunicaciones del consumidor (CCNC) del IEEE* (págs. 1-4). IEEE. doi:10.1109/CCNC.2018.8319179
- [34] Noreen, U. (2018). *Modelado de interferencias para simulador 3D de redes de sensores dedicadas a ciudades inteligentes* (tesis doctoral, Université de Bretagne occidentale-Brest). <https://theses.hal.science/tel-02140316>
- [35] MakerFocus (2023) en línea [Disponible] <https://www.makerfocus.com/products/makerfocus-esp32-lora-development-board-wi-fi-bluetooth-with-0-96inch-oled-display-and-2dbi-antenna-1#>
- [36] Digi (2023) en línea [Disponible] <https://es.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/sub-1-ghz-rf-modules/xbee-pro-xsc>