



LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO EN ELECTRÓNICA Y REDES



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Desarrollo de una aplicación web para el análisis y simulación de redes LPWAN con inteligencia artificial para agricultura inteligente en Colombia usando metodología Scrumban

Trabajo de investigación/grado para optar por el título en
Ingeniería de Sistemas

Santiago Sánchez Moya
Juan Daniel Rodríguez Hurtado

Director: Ing. Roberto Ferro Escobar PhD
CoDirector: Ing. Carlos Andrés Martínez Alayón MsC

Bogotá D. C. – Colombia
2025

Índice general

1. Resumen

El sector agrícola colombiano enfrenta múltiples desafíos derivados de la limitada adopción tecnológica, la falta de conectividad en zonas rurales y la creciente vulnerabilidad ante fenómenos climáticos. Estas condiciones dificultan el monitoreo oportuno de los cultivos y la toma de decisiones informadas, afectando la productividad y sostenibilidad del campo. Frente a esta problemática, se propone el desarrollo de una aplicación web para el análisis y simulación de redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) con inteligencia artificial, orientada a fortalecer la agricultura inteligente en Colombia.

La aplicación integrará agentes de IA capaces de analizar contextos específicos —como tipo de cultivo, ubicación, condiciones ambientales y presupuesto— para identificar las variables agrícolas más relevantes y realizar predicciones sobre el rendimiento de diferentes tecnologías LPWAN. Posteriormente, el sistema comparará protocolos como LoRa, Sigfox y NB-IoT, determinando cuál ofrece un mejor desempeño en función de parámetros como cobertura, costo, escalabilidad y eficiencia energética.

El desarrollo se llevará a cabo adoptando las prácticas del enfoque de desarrollo de Rapid Application Development (RAD), la metodología utilizada se basa en el prototipado rápido e implementación del feedback del usuario final para cerrar la brecha entre el producto propuesto por el equipo de desarrollo y el esperado por el usuario final, esto con el fin de asegurar la satisfacción del usuario final. Este proyecto busca contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo la innovación tecnológica, la sostenibilidad rural y la resiliencia climática del sector agrícola colombiano.

1.1 Palabras Clave

inteligencia artificial; redes LPWAN; agricultura inteligente; análisis predictivo; sostenibilidad rural.

2. Introducción

La agricultura, pilar histórico de la economía y sustento de millones en Colombia, se ve crecientemente amenazada por el cambio climático y la variabilidad ambiental extrema, que generan pérdidas significativas y reducen la competitividad del sector. Para mitigar estos riesgos, la adopción de la agricultura de precisión, basada en redes de sensores y análisis de datos, se presenta como una solución indispensable. Sin embargo, su implementación efectiva tropieza con una barrera crítica previa: la complejidad técnica y la incertidumbre en la toma de decisiones inicial para seleccionar y desplegar la infraestructura de conectividad adecuada, como las redes LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT, entre otras), en diversos contextos agrícolas.

Ante este panorama, la incorporación de tecnologías modernas como la inteligencia artificial (AI) y las redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) ofrece nuevas oportunidades para fortalecer la agricultura inteligente en Colombia. En este contexto, se propone el desarrollo de una aplicación web para el análisis y simulación de arquitecturas de redes LPWAN con inteligencia artificial, orientada a mejorar la toma de decisiones en el despliegue de tecnologías de monitoreo agrícola. La aplicación empleará un sistema de que incluye agentes de IA, el cual a partir de un contexto determinado —como tipo de cultivo, ubicación geográfica, presupuesto disponible y requerimientos de conectividad—, identificará las variables más relevantes y realizarán un análisis comparativo entre las distintas tecnologías LPWAN, seleccionando la que mejor se ajuste al escenario propuesto, proponiendo una arquitectura básica para su despliegue y recomendando los sensores más adecuados para el tipo de cultivo que se desea monitorear. Con base en dicho análisis, el sistema recomendará la red más adecuada según criterios de rendimiento, costo, cobertura y escalabilidad.

En este contexto, el presente proyecto se desarrolla en el marco del semillero SCISEN (Smart cities & sensor network), adscrito al grupo de investigación LIDER (Laboratorio de Investigación y desarrollo en Electrónica y redes) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Este grupo trabaja en diversas líneas de investigación internas, entre las que se destacan en este proyecto: Agro-inteligente (Smart Agro), internet de las cosas (IoT) y el desarrollo y programación de hardware, firmware y software para sistemas de comunicación. Estas líneas se encuentran alineadas con los ejes de investigación institucionales en ciencias de la computación, desarrollo regional sustentable, infraestructura y tecnología, redes de sensores inalámbricos y telecomunicaciones. Asimismo, el proyecto está directamente relacionado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU:

- ODS 2. Hambre Cero: Este proyecto contribuye a una agricultura más resiliente y productiva al facilitar la toma de decisiones informada para el despliegue de tecnologías de agricultura de precisión. Al ayudar a seleccionar la arquitectura de conectividad (LPWAN) más adecuada para cada contexto, la herramienta reduce la barrera de entrada y el riesgo de inversión en sistemas de monitoreo y predicción agroclimática. Esto, a su vez, permite a los productores implementar soluciones más eficaces para anticipar fenómenos climáticos adversos, optimizar recursos y reducir pérdidas, fortaleciendo así la seguridad alimentaria desde una perspectiva de planificación tecnológica robusta.
- ODS 9. Industria, Innovación e Infraestructura: El proyecto es una innovación directa en el ecosistema tecnológico agroindustrial. Desarrolla una herramienta digital avanzada (aplicación web con IA) que resuelve un cuello de botella crítico en la cadena de valor de la agricultura 4.0: la selección de arquitectura de conectividad. Al proporcionar un método accesible y basado en datos para diseñar redes LPWAN eficientes, promueve la construcción de una arquitectura tecnológica más resiliente, accesible y adecuada al entorno rural colombiano, fomentando directamente la innovación y la industrialización sostenible del sector.
- ODS 13. Acción por el Clima: La herramienta contribuye a la acción climática de manera indirecta pero potente, al ser un facilitador clave para la agricultura climáticamente inteligente. Al optimizar la elección de redes de sensores, maximiza la viabilidad y efectividad de los sistemas que monitorean variables climáticas y ambientales. Esto permite a los agricultores adaptar sus prácticas con base en datos precisos, mejorar la gestión de recursos como el agua y los insumos, y reducir la vulnerabilidad de los cultivos, promoviendo así una adaptación sistémica y basada en evidencia frente al cambio climático.

El desarrollo se llevará a cabo bajo la metodología ágil Scrumban, que combina la flexibilidad de Kanban con la estructura iterativa de Scrum, favoreciendo la gestión adaptativa de tareas y la entrega continua de valor. Esta propuesta busca contribuir al avance de la agricultura inteligente en Colombia, facilitando la integración de herramientas digitales en zonas rurales, optimizando el uso de recursos tecnológicos y promoviendo la sostenibilidad del sector.

Adicionalmente, se articula con el proyecto doctoral titulado “Estructuración de un modelo para el análisis, simulación y aplicación de tecnologías LPWAN, a través de la integración comunitaria de redes IOT al agro inteligente en sectores rurales colombianos”, cuyo investigador principal es el Ing. Carlos Andrés Martínez Alayón, bajo la dirección del docente tutor Roberto Ferro Escobar. Este proyecto ha sido institucionalizado sin recursos por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y está registrado en el Sistema de Información del Centro de Investigaciones (SICIUD), fortaleciendo su respaldo académico y científico. Con las siguientes especificaciones:

- Código SICIUD: 3370084523

- Estado: Vigente sin financiación
- Grupo de Investigación: Laboratorio de Investigación y desarrollo en Electrónica y redes.

El desarrollo de este proyecto contribuirá con los siguientes productos de investigación: La dirección de una tesis de pregrado, entrega de un informe de investigación, el desarrollo de un producto de desarrollo web y un artículo para la participación de una ponencia a un evento nacional o internacional.

3. Problema de Investigación

3.1 Planteamiento del problema

El sector agrícola colombiano es un pilar de la economía nacional, como parte del sector agropecuario, registró un crecimiento del 3.8 % en el segundo trimestre de 2025, respecto al mismo periodo en el 2024, aportando 0,4 puntos porcentuales al crecimiento total del PIB (DANE, 2025). A pesar de su relevancia, este sector enfrenta una limitación estructural en su modernización: la brecha de conectividad digital en zonas rurales (Alvarez et al., 2022). Esta restricción dificulta la adopción de la Agricultura 4.0, la cual depende de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) para optimizar recursos y mejorar la productividad.

En este contexto de conectividad limitada, persiste una incertidumbre técnica relacionada con la selección e integración adecuada de tecnologías LPWAN —como LoRaWAN o NB-IoT— para su despliegue en escenarios agrícolas específicos. Esta decisión involucra compensaciones entre cobertura (especialmente sensible en regiones con infraestructura limitada), consumo energético y costo (Chen et al., 2019). Actualmente, dicha selección se realiza de manera empírica debido a la ausencia de herramientas de apoyo, generando un alto riesgo de implementaciones subóptimas, ineficientes o económicamente inviables.

A ello se suma una desconexión entre las capacidades de las herramientas de simulación y las necesidades reales del entorno agrícola. Si bien existen simuladores como NS-3 o LoRaSim (Almuhaya et al., 2022), estos permiten modelar el comportamiento técnico de las redes LPWAN pero no traducen las necesidades del cultivo, terreno y condiciones ambientales en criterios de decisión tecnológica. Como resultado, se evidencia un vacío de investigación en la integración de modelos de desempeño de red con parámetros agronómicos, orientado a la generación de una recomendación tecnológica sistemática y fundamentada.

Las consecuencias de esta brecha son significativas: la falta de conectividad limita la capacidad de monitoreo y control de variables críticas del cultivo, perpetúa ineficiencias en el uso de recursos como agua y fertilizantes (Alvarez et al., 2022), incrementa la desigualdad digital y afecta la competitividad del sector agrícola colombiano en mercados globales (Flórez Martínez et al., 2021).

Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar una herramienta inteligente que, integrando simulación de redes LPWAN e inteligencia artificial, sirva como experto virtual para la selección de tecnologías de comunicación rurales, permitiendo predecir su desempeño según condiciones reales del terreno y los requerimientos del proyecto agronómico. Tal herramienta contribuiría a convertir una decisión compleja y especializada en una recomendación técnica sólida y accesible, respaldada en evidencia y simulación.

3.2 Formulación del problema

3.2.1 Pregunta principal de investigación ¿En qué medida una plataforma de software con agentes de inteligencia artificial que integra simulaciones de redes LPWAN y modelos de decisión agronómicos, asegura un alto rendimiento de la arquitectura de red, medido a través de la entrega de paquetes, según la densidad de nodos (nodos/ha) y reduce el tiempo de selección de tecnologías de conectividad para agricultura de precisión, en comparación con los métodos tradicionales actualmente utilizados por ingenieros en Colombia?

3.2.2 Sistematización del problema

1. ¿Cuáles son los criterios técnicos determinantes para seleccionar entre las tecnologías LPWAN en el contexto agrícola colombiano?
2. ¿Cómo se puede diseñar e implementar un sistema de inteligencia artificial que, integrado con un sistema de simulación de redes, traduzca los criterios identificados en una recomendación técnica cuantificable sobre la tecnología LPWAN óptima?
3. ¿En qué medida la recomendación de la plataforma genera una reducción significativa en los costos de implementación inicial y operativos, en comparación con una selección de tecnología realizada por expertos mediante métodos tradicionales?

4. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una plataforma de software inteligente que integre simulaciones visuales de la arquitectura de redes LPWAN y modelos de decisión agronómicos, potenciada por inteligencia artificial, para hacer más efectiva y eficiente la selección de tecnologías LPWAN en proyectos de agricultura de precisión en zonas rurales de Colombia.

Objetivos específicos:

1. Identificar y documentar los requerimientos técnicos y agronómicos determinantes para la selección de tecnologías LPWAN en el contexto agrícola colombiano, a través de la revisión literaria y la consulta con expertos, estableciendo los requisitos funcionales y no funcionales de la plataforma.
2. Diseñar una arquitectura de software que integre agentes de inteligencia artificial para la simulación y toma de decisiones de arquitecturas LPWAN.
3. Implementar el sistema de decisión y simulación automatizada para selección de tecnologías LPWAN, bajo un esquema de desarrollo orientado a prototipos, asegurando su afinidad con los requerimientos previamente definidos.
4. Evaluar y Cuantificar el impacto en eficiencia operativa y económica frente a métodos tradicionales.
5. Documentar detalladamente la arquitectura de software, el proceso de desarrollo orientado a prototipos y los resultados de la validación operativa y económica para garantizar la reproducibilidad, escalabilidad y transferibilidad de la solución a otros contextos agrícolas.

5. Justificación

El presente proyecto tiene como propósito ofrecer una solución tecnológica innovadora mediante el desarrollo de una aplicación web que permita analizar y simular redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) aplicadas a entornos agrícolas, utilizando inteligencia artificial (IA) generativa para la toma de decisiones en contextos rurales. Esta propuesta busca contribuir al fortalecimiento del sector agrícola colombiano, considerado un pilar estratégico de la economía nacional por su papel en la generación de empleo, el abastecimiento alimentario y el desarrollo regional.

En un contexto donde los efectos del cambio climático y la variabilidad de las condiciones ambientales afectan directamente la productividad del campo, se hace necesario incorporar herramientas tecnológicas que faciliten la planificación, monitoreo y predicción de variables agrícolas. Mediante el uso de IA, la aplicación podrá analizar escenarios específicos —tipo de cultivo, localización, presupuesto y requerimientos de conectividad— para determinar el protocolo LPWAN más adecuado entre alternativas como LoRa, Sigfox y NB-IoT, considerando criterios de cobertura, rendimiento, escalabilidad y costo.

- **Justificación Investigativa:** Desde una perspectiva científica y tecnológica, este proyecto representa un aporte significativo a las líneas de investigación en agricultura inteligente, internet de las cosas (IoT) y comunicaciones de baja potencia, al integrar un enfoque de análisis predictivo impulsado por IA generativa. El desarrollo se enmarca dentro de los objetivos del grupo de investigación LIDER (Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Redes) de la Universidad Distrital, a través del semillero SCISEN, articulándose con las áreas institucionales de ciencias de la computación, infraestructura tecnológica y telecomunicaciones. Asimismo, la aplicación de la metodología Scrumban permitirá gestionar el desarrollo del proyecto de manera iterativa y flexible, garantizando una evolución continua del producto y un enfoque orientado a resultados.
- **Justificación Social:** La implementación de esta herramienta beneficiará directamente a las comunidades agrícolas, especialmente en zonas rurales con limitaciones de conectividad y acceso a tecnología. Al ofrecer una plataforma accesible que asista a los actores técnicos en la selección de la red de comunicación más eficiente, se promueve la inclusión digital y el empoderamiento tecnológico del sector rural. Esto no solo contribuirá a reducir las brechas digitales, sino también a mejorar la calidad de vida de los productores mediante el uso de datos inteligentes para optimizar sus operaciones agrícolas.
- **Justificación Económica:** El uso eficiente de las tecnologías LPWAN en la agricultura

tiene un impacto económico directo al optimizar los costos de implementación de redes y mejorar la gestión de los cultivos. La aplicación propuesta permitirá evaluar la relación costo-beneficio de cada tecnología en función del contexto productivo, lo que reducirá pérdidas económicas derivadas de decisiones tecnológicas inadecuadas. Además, la posibilidad de simular escenarios antes de su implementación real representa un ahorro significativo en infraestructura y mantenimiento, contribuyendo al fortalecimiento de la economía local y nacional.

- **Justificación Ambiental:** El proyecto aporta al desarrollo sostenible mediante el fomento de prácticas agrícolas más eficientes y responsables con el medio ambiente. Al proporcionar información precisa sobre variables y condiciones agrícolas, los agricultores podrán reducir el uso innecesario de insumos como agua, fertilizantes y energía. De igual forma, el aprovechamiento de tecnologías de bajo consumo energético como las redes LPWAN contribuye a disminuir la huella ecológica de las operaciones agrícolas, promoviendo un modelo de producción más sostenible y resiliente ante el cambio climático.
- **Justificación Académica:** El presente proyecto se desarrolla bajo la modalidad de grado de investigación, investigación - creación, innovación reglamentada en el artículo 7 del acuerdo No.02 (marzo 2023) de consejo de facultad de ingeniería. Este proyecto se llevará a cabo con en el fin de que cada uno de sus autores opten por el título de Ingeniero de Sistemas.

6. Marco Referencial

6.1 Marco Teórico

6.1.1 Agricultura 4.0

Contexto y relevancia para Colombia

La Agricultura 4.0 constituye la integración de tecnologías emergentes —tales como el Internet de las Cosas (IoT), analítica avanzada de datos, automatización e inteligencia artificial— en los sistemas productivos agrícolas, con el propósito de optimizar procedimientos, incrementar la productividad y fortalecer la sostenibilidad de la actividad agrícola (Shafi et al., 2019). En el contexto colombiano, este enfoque adquiere una especial importancia debido al peso estratégico del sector rural y a la diversidad ecológica y climática que caracteriza los sistemas de producción del país.

No obstante, la literatura evidencia la existencia de rezagos estructurales en materia de adopción tecnológica. Únicamente el 1.7 % de las Unidades de Producción Agrícola (UPA) cuentan con conectividad a Internet y solo el 6.6 % poseen activos de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, lo cual supone una limitación crítica para el despliegue de infraestructuras digitales aplicables a esquemas de Agricultura 4.0 (Alvarez et al., 2022).

Asimismo, un reporte del año 2021 de la corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA) sostiene que la transición hacia sistemas agroindustriales inteligentes requiere no solo inversión en infraestructura tecnológica, sino también el fortalecimiento de capacidades humanas, así como procesos efectivos de transferencia de conocimiento técnico hacia los productores rurales (Flórez Martínez et al., 2021).

De este modo, la Agricultura 4.0 en Colombia se configura no únicamente como una transformación técnica, sino como un proceso socio-tecnológico que implica cambios en la organización productiva, la formación de capital humano y la gobernanza del conocimiento agrícola.

Retos: brecha digital e ineficiencias

A pesar de las ventajas potenciales que supone la Agricultura 4.0, su implementación enfrenta múltiples desafíos. Uno de los más significativos es la denominada brecha digital rural, entendida como la desigualdad en el acceso a tecnologías digitales entre agricultores tecnificados y pequeños productores tradicionales. Tovar-Quiroz (2023) evidencia que esta brecha no solo se manifiesta en infraestructura, sino también en alfabetización digital, acceso a plataformas inteligentes y capacidad de inversión en innovación tecnológica (Quiroz, 2023).

A ello se suma la baja disponibilidad de conectividad en zonas rurales colombianas, condición imprescindible para soportar sistemas de monitoreo remoto, transmisión de datos sensorados y comunicación distribuida entre dispositivos IoT (Alvarez et al., 2022).

AGROSAVIA advierte además que la adopción acelerada de tecnologías inteligentes podría agravar desigualdades existentes si no se acompaña de políticas de democratización tecnológica y apropiación social del conocimiento (Flórez Martínez et al., 2021).

Finalmente, en términos operativos, la integración de modelos de datos provenientes de sensores, imágenes satelitales y simulaciones agronómicas plantea grandes retos para la gestión eficiente de información y la toma de decisiones automatizada. Tovar-Quiroz (2023) identifica diez dominios en los que convergen estas tecnologías, destacando la necesidad de arquitecturas interoperables para lograr la integración funcional de múltiples fuentes de datos (Quiroz, 2023).

El rol del IoT y la Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión se constituye como un fundamento metodológico de la Agricultura 4.0. Esta se define como una estrategia de gestión basada en la captura y análisis de datos espacio-temporales, con el objetivo de optimizar decisiones relativas al uso de insumos, manejo de suelos y gestión de cultivos (Quiroz, 2023).

En este marco, el IoT emerge como un componente clave y se presentan arquitecturas IoT aplicables a la agricultura colombiana, donde se integran sensores ambientales, redes de comunicación de baja potencia y plataformas de visualización y análisis de datos (Chen et al., 2019)

Por su parte, AGROSAVIA enfatiza que la incorporación de sistemas de sensorización y teledetección puede transformar los procesos tradicionales de cultivo en sistemas de control inteligente, combinando el conocimiento empírico local con modelos predictivos y automatización (Flórez Martínez et al., 2021).

En consecuencia, tanto la Agricultura de Precisión como las infraestructuras IoT proveen las bases tecno-operativas para evolucionar hacia modelos agrícolas más robustos, sostenibles y basados en evidencia cuantificable. Este enfoque integra los datos provenientes del entorno físico con modelos de decisión computacional, reduciendo la incertidumbre operativa y permitiendo una mayor eficiencia en el uso de recursos críticos como agua, fertilizantes y energía.

6.1.2 Redes LPWAN: Tecnologías Habilitadoras de la Agricultura de Precisión

Fundamentos: Toppologías, arquitectura y objetivos de diseño

Las Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) constituyen una categoría de tecnologías de comunicación inalámbrica diseñada para resolver el compromiso fundamental en la conectividad del Internet de las Cosas (IoT): la necesidad de operar con bajo

consumo de energía y largo alcance (Diane et al., 2025). Este equilibrio es crucial para el despliegue de dispositivos alimentados por batería que deben transmitir datos intermitentemente a lo largo de extensas áreas geográficas (Chen et al., 2018).

Los objetivos de diseño de las redes LPWAN están orientados a la máxima eficiencia y efectividad:

- **Largo rango de transmisión:** Las tecnologías LPWAN están diseñadas para ofrecer comunicaciones de largo alcance, alcanzando varios kilómetros en zonas rurales y entre 2 y 5 km en entornos urbanos, especialmente aquellas basadas en infraestructura celular como NB-IoT. Muchas de estas tecnologías operan en la banda Sub-1 GHz, cuyas características permiten una mayor penetración de la señal, menor atenuación y menor efecto de desvanecimiento por multirayectoria, además de presentar menos interferencias en comparación con la banda de 2.4 GHz. Tecnologías como LoRaWAN, SigFox, IEEE 802.11ah, IEEE 802.15.4g, Weightless y DASH7 aprovechan estas ventajas, mientras que RPMA opera en 2.4 GHz. El tipo de modulación es un factor clave en el alcance de comunicación, predominando la modulación de banda estrecha, como Ultra Narrowband (UNB), que permite transmisiones de varios kilómetros con bajo nivel de ruido, y la modulación de espectro ensanchado, que mejora la resistencia a interferencias mediante técnicas como DSSS, FHSS y CSS, empleadas por tecnologías como LoRa y RPMA (Diane et al., 2025).
- **Eficiencia Energética:** En las redes LPWAN, el consumo energético de los nodos depende principalmente de la topología de red, los ciclos de operación y los protocolos de comunicación empleados. Dado que los nodos suelen estar alimentados por baterías y se despliegan a gran escala, es fundamental maximizar su vida útil para reducir los costos de mantenimiento. Por esta razón, las LPWAN priorizan la topología en estrella sobre la topología en malla, evitando el sobreconsumo energético de los nodos intermedios. Además, el uso del duty cycle permite disminuir significativamente el consumo de energía al mantener los nodos en estado inactivo durante ciertos intervalos, aunque este mecanismo puede estar limitado por regulaciones del espectro. Finalmente, el empleo de protocolos de acceso al medio simplificados, como ALOHA en tecnologías como LoRaWAN y SigFox, contribuye a reducir la complejidad de los dispositivos y su consumo energético, mientras que NB-IoT utiliza mecanismos de acceso aleatorio propios de redes celulares (Diane et al., 2025).
- **Escalabilidad:** La escalabilidad constituye un aspecto fundamental en las LPWAN, ya que numerosos escenarios de aplicación demandan la capacidad de gestionar cientos de miles de dispositivos de manera simultánea. Este concepto hace referencia a la habilidad de la red para conectar una gran cantidad de nodos sin afectar la calidad ni la continuidad de los servicios ofrecidos. No obstante, la coexistencia de un elevado número de dispositivos puede

provocar interferencias, impactando de forma negativa el desempeño de la red. Para enfrentar estos desafíos, se implementan distintas estrategias orientadas a mejorar la escalabilidad, tales como la comunicación a través de múltiples canales, la instalación de varios gateways y los mecanismos de adaptación dinámica de la velocidad de transmisión de datos (Diane et al., 2025).

- **Bajo costo:** El creciente interés por las tecnologías LPWAN se debe, en gran medida, al bajo costo de los dispositivos. Por ejemplo, equipos basados en LoRa o SigFox pueden adquirirse por un valor aproximado de 3 a 5 dólares. Para reducir la inversión de capital, estas tecnologías emplean diversas estrategias, entre ellas el uso de transceptores con formas de onda menos complejas, lo que permite disminuir el tamaño del hardware, la tasa máxima de transmisión y los requerimientos de memoria. Como resultado, se reduce la complejidad del diseño y, por ende, el costo de fabricación.

Adicionalmente, una estación base puede gestionar decenas de miles de dispositivos finales distribuidos en un área de varios kilómetros, lo que contribuye a una disminución significativa de los costos operativos para los proveedores de red. Asimismo, las LPWAN operan tanto en bandas no licenciadas, como la banda ISM o los espacios en blanco de televisión, como en bandas licenciadas propiedad de los operadores, evitando así costos adicionales asociados al uso del espectro radioeléctricos (Diane et al., 2025).

- **Calidad del servicio** El creciente interés por las tecnologías LPWAN se debe, en gran medida, al bajo costo de los dispositivos. Por ejemplo, equipos basados en LoRa o SigFox pueden adquirirse por un valor aproximado de 3 a 5 dólares. Para reducir la inversión de capital, estas tecnologías emplean diversas estrategias, entre ellas el uso de transceptores con formas de onda menos complejas, lo que permite disminuir el tamaño del hardware, la tasa máxima de transmisión y los requerimientos de memoria. Como resultado, se reduce la complejidad del diseño y, por ende, el costo de fabricación.

Adicionalmente, una estación base puede gestionar decenas de miles de dispositivos finales distribuidos en un área de varios kilómetros, lo que contribuye a una disminución significativa de los costos operativos para los proveedores de red. Asimismo, las LPWAN operan tanto en bandas no licenciadas, como la banda ISM o los espacios en blanco de televisión, como en bandas licenciadas propiedad de los operadores, evitando así costos adicionales asociados al uso del espectro radioeléctricos (Diane et al., 2025).

- **Gestión de la interferencia:** El creciente interés por las tecnologías LPWAN se debe, en

gran medida, al bajo costo de los dispositivos. Por ejemplo, equipos basados en LoRa o SigFox pueden adquirirse por un valor aproximado de 3 a 5 dólares. Para reducir la inversión de capital, estas tecnologías emplean diversas estrategias, entre ellas el uso de transceptores con formas de onda menos complejas, lo que permite disminuir el tamaño del hardware, la tasa máxima de transmisión y los requerimientos de memoria. Como resultado, se reduce la complejidad del diseño y, por ende, el costo de fabricación.

Adicionalmente, una estación base puede gestionar decenas de miles de dispositivos finales distribuidos en un área de varios kilómetros, lo que contribuye a una disminución significativa de los costos operativos para los proveedores de red. Asimismo, las LPWAN operan tanto en bandas no licenciadas, como la banda ISM o los espacios en blanco de televisión, como en bandas licenciadas propiedad de los operadores, evitando así costos adicionales asociados al uso del espectro radioeléctricos (Diane et al., 2025).

Análisis Comparativo de Topologías y Arquitecturas LPWAN

El funcionamiento de las tecnologías LPWAN se fundamenta en los objetivos de diseño discutidos previamente y en las diferentes estrategias existentes para su implementación. En este apartado se analizan las distintas arquitecturas y topologías LPWAN, así como los aspectos relacionados con su interoperabilidad.

Topologías Los dos tipos principales de topología presentes en el espectro LPWAN son la topología en malla y la topología en estrella, siendo esta última la más utilizada frente a las estructuras en malla, debido a su valor agregado en términos de eficiencia energética y ampliación del rango de cobertura (Chilamkurthy et al., 2022).

- **Topología de estrella:** La topología de estrella consiste en una red de tipo punto a punto (P2P, por sus siglas en inglés), en la cual todos los nodos se conectan a un nodo central, denominado *hub* o *gateway*. Este gateway actúa como el único medio de comunicación entre los nodos de la topología, enruteando los mensajes hacia un servidor central, donde se gestionan aspectos como la redundancia, la detección de fallos y la seguridad. Este enfoque es ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo y en entornos peligrosos, donde el despliegue de cableado representa un alto riesgo (Chilamkurthy et al., 2022).

Entre las principales ventajas de una estructura basada en un único hub se encuentran la alta velocidad de transmisión de mensajes, la escalabilidad — ya que es posible añadir nuevos nodos de manera sencilla mediante su conexión directa al gateway— y el impacto limitado ante fallos a nivel de nodo, puesto que la desconexión de un nodo final no afecta al funcionamiento

del resto de la red. No obstante, esta topología presenta desventajas significativas, como la existencia de un único punto de fallo; si el gateway o hub central deja de funcionar, toda la red se vuelve inoperable y los nodos finales dejan de ser accesibles (Chilamkurthy et al., 2022).

- **Topología de malla:** Esta topología está compuesta por tres tipos de nodos: nodos sensores, gateways y nodos sensores enrutadores. En una topología de malla completamente conectada, cada nodo se comunica directamente con todos los demás nodos de la red. En contraste, en una topología de malla parcial, solo algunos nodos mantienen múltiples conexiones, mientras que otros se comunican únicamente con aquellos nodos con los que intercambian información de manera frecuente (Chilamkurthy et al., 2022).

Entre las ventajas de la topología de malla se destaca su diseño redundante, el cual permite la existencia de rutas alternativas para la transmisión de datos, mitigando el problema del punto único de fallo presente en la topología en estrella. Asimismo, este tipo de topología soporta el intercambio de datos bajo un enfoque *full-duplex* (FD), lo que contribuye a mejorar la escalabilidad de la red. Sin embargo, también presenta desventajas importantes, como el aumento de la complejidad debido a la presencia de múltiples enlaces entre nodos, el incremento de la latencia ocasionado por la comunicación multi-salto, el mayor costo de implementación y una reducción en la eficiencia energética derivada de su diseño redundante (Chilamkurthy et al., 2022).

Arquitecturas Los dos tipos principales de topología presentes en el espectro LPWAN son la topología en malla y la topología en estrella, siendo esta última la más utilizada frente a las estructuras en malla, debido a su valor agregado en términos de eficiencia energética y ampliación del rango de cobertura (Chilamkurthy et al., 2022).

- **Componentes principales de una arquitectura LPWAN** La arquitectura típica de una red LPWAN se compone de varios elementos funcionales claramente diferenciados:

1. **Dispositivos finales (End Devices o Nodos LPWAN):** Son los encargados de capturar datos del entorno (sensores, actuadores) o ejecutar las acciones según la aplicación. Operan con recursos limitados (energía, memoria y capacidad de cómputo) y se comunican mediante enlaces inalámbricos de largo alcance y bajo consumo (Chilamkurthy et al., 2022).
2. **Estaciones de acceso / gateways / concentradores:** Actúan como el punto de enlace entre los dispositivos finales y la infraestructura de red. Reciben los datos transmitidos por los nodos, garantizan la integridad del enlace radioeléctrico (BER, seguridad, QoS)

y reenvía la información hacia el núcleo de la red. En algunas tecnologías, estos dispositivos pueden incorporar capacidades de edge computing y almacenamiento local (Chilamkurthy et al., 2022).

3. **Núcleo de red (Core o Network Server):** Es responsable del control y enrutamiento del tráfico, la traducción de protocolos, la gestión de la movilidad, el control de admisión y, en ciertos casos, el tratamiento prioritario de los datos. También cumple un rol clave en la interoperabilidad entre tecnologías y en la descarga de procesamiento hacia el borde (Chilamkurthy et al., 2022).
4. **Servidores de aplicación y nube:** Se encargan del almacenamiento, procesamiento a análisis de los datos recolectados, apoyándose en plataformas de cloud y técnicas de big data. Además, permiten la visualización, exportación de la información y la integración con aplicaciones de IOT y servicios externos (Chilamkurthy et al., 2022).

■ **Tipos de Arquitectura LPWAN** Las LPWAN pueden organizarse bajo diferentes enfoques arquitectónicos, dependiendo de la tecnología, el entorno de despliegue y los requerimientos de la aplicación:

1. **Arquitectura básica o tradicional LPWAN:** Presenta conectividad directa entre los dispositivos finales y el gateway (topología de estrella). Es simple, eficiente energéticamente y adecuada para aplicaciones de monitoreo a gran escala. La comunicación se realiza en un solo salto, lo que reduce la complejidad de los nodos finales (Chilamkurthy et al., 2022).
2. **Arquitecturas híbridas con tecnologías de acceso externas:** En este enfoque, tecnologías como ZigBee, Wi-Fi u otras redes de corto alcance proporcionan conectividad inicial a los dispositivos, mientras que una LPWAN actúa como red de transporte hacia la nube. Este tipo de arquitectura es común en LPWAN celulares, donde el gateway de la red local se integra con la infraestructura LPWAN, formando una arquitectura mixta (Chilamkurthy et al., 2022).
3. **Arquitecturas híbridas multi-LPWAN:** Utilizan múltiples tecnologías LPWAN (por ejemplo, LoRa y SigFox) de manera simultánea para conectar diferentes tipos de dispositivos o cubrir áreas con requisitos heterogéneos. Cada tecnología gestiona los nodos dentro de su zona de cobertura, y el núcleo de red centraliza funciones como autenticación, registro reminder, asignación de recursos y control del tráfico. Este enfoque es especialmente útil para aplicaciones complejas que demandan flexibilidad, redundancia y diversidad tecnológica (Chilamkurthy et al., 2022).

4. Arquitecturas LPWAN cognitivas: Representan una evolución hacia arquitecturas inteligentes, apoyadas en IA y aprendizaje automático. Permiten la coexistencia e interoperabilidad de múltiples tecnologías LPWAN, optimizando dinámicamente el uso de recursos de red. Estas arquitecturas son clave para aplicaciones avanzadas como ciudades inteligentes, Green IoT, salud digital, hogares inteligentes y sistemas autónomos (Chilamkurthy et al., 2022).

Análisis Comparativo de Tecnologías LPWAN

Las tecnologías de Red de Área Extensa de Baja Potencia (LPWAN) se dividen principalmente en dos categorías según el espectro de frecuencia que utilizan: banda con licencia (celular), gestionada por el consorcio 3GPP, y banda sin licencia (ISM), que engloba a tecnologías propietarias y abiertas. Este análisis compara sus características técnicas clave, rendimiento e idoneidad para distintos objetivos de diseño IoT.

- **Tecnologías en Banda con Licencia (3GPP):** Estas tecnologías operan en espectro licenciado (principalmente 700-900 MHz), lo que garantiza una comunicación confiable sin interferencias, pero conlleva costos de suscripción. Son ideales para aplicaciones que requieren alta confiabilidad, movilidad y cobertura nacional (Chilamkurthy et al., 2022).
 - **LTE-M (LTE Cat M1 / eMTC):** Basada en LTE, ofrece la mayor tasa de datos (hasta 1 Mbps), soporta movilidad (handover) y voz (VoLTE). Es la más adecuada para aplicaciones que requieren latencia baja (150 ms) y una mayor cantidad de datos, como rastreo de activos y wearables, aunque con un consumo energético moderado-alto.
 - **NB-IoT:** Optimizada para IoT, utiliza un ancho de banda muy estrecho (200 kHz). Destaca por su excepcional **cobertura** (hasta 15 km, presupuesto de enlace de 164 dB) y gran **profundidad de penetración**, siendo óptima para sensores estáticos en ubicaciones remotas o subterráneas (e.g., medidores inteligentes). Su latencia es mayor (hasta 10 s).
 - **EC-GSM-IoT:** Una evolución de GSM/GPRS. Ofrece un equilibrio entre cobertura, capacidad (50k dispositivos/celda) y coste, aprovechando la infraestructura GSM existente. Es una opción para modernizar redes M2M tradicionales.
- **Tecnologías en Banda Sin Licencia (Non-3GPP):** Operan en bandas ISM sub-GHz (e.g., 868 MHz, 915 MHz) o 2.4 GHz, sin costos de espectro pero sujetas a restricciones de duty cycle y potencial interferencia. Permiten el despliegue de redes privadas (Chilamkurthy et al., 2022).
 - **SigFox:** Utiliza Banda Ultra Estrecha (UNB). Se caracteriza por su **extremo bajo costo, mayor alcance** (50 km rural) y **minimización del consumo energético** (6 nA en sleep).

Es adecuada para aplicaciones de uplink muy esporádico con mensajes diminutos (12 bytes), pero su escalabilidad de carga es limitada (140 mensajes/día) y la capacidad de downlink es muy reducida.

- **LoRaWAN:** Utiliza modulación CSS de espectro ensanchado. Ofrece un buen equilibrio entre **alcance** (15 km rural), **consumo energético** y **flexibilidad** (diferentes clases de dispositivos A/B/C). Su arquitectura de red abierta y la capacidad de desplegar gateways privados la hacen muy popular para redes IoT corporativas y de ciudades inteligentes. La tasa de datos es baja (0.3-50 kbps) y depende del factor de ensanchamiento (SF).
- **RPMA (Ingenu):** Opera en la banda de 2.4 GHz, lo que le otorga un gran ancho de banda y alta **escalabilidad estructural**. Ofrece la mayor tasa de datos entre las tecnologías sin licencia (624 kbps uplink). Sin embargo, su alcance es limitado (10 km rural) debido a la mayor atenuación de la frecuencia y sufre interferencia de otras tecnologías (Wi-Fi, Bluetooth).
- **Telensa:** Tecnología UNB especializada en aplicaciones de control como alumbrado público inteligente. Ofrece comunicación bidireccional full-duplex y una vida útil de batería de 8 años, pero con un alcance modesto (4 km rural) y baja tasa de datos.
- **Weightless:** Conjunto de estándares abiertos. **Weightless-P** es el más completo, ofreciendo comunicación bidireccional confiable con acknowledgments, buena gestión de interferencias y movilidad, comparable a una versión ligera de LTE para IoT.
- **DASH7 (D7AP):** Protocolo derivado de RFID activo. Se destaca por soportar **movilidad**, comunicación **asíncrona** y **baja latencia**, ideal para activos en movimiento como logística. Su principio de diseño es BLAST (Bursty, Light, Asynchronous, Stealth, Transitional).
- **NB-Fi:** Enfocada en lograr la **máxima cobertura y penetración** (hasta 30 km, presupuesto de enlace de 174 dB) en banda sin licencia, con una tasa de datos mínima (11 bps). Es adecuada para aplicaciones donde el único requisito es recibir una señal de sensores muy remotos.

Comparativa Sintética por Objetivos de Diseño: La elección de la tecnología óptima implica negociar entre distintos objetivos, ya que ninguna domina en todos los aspectos.

- **Eficiencia Energética y Vida Útil:** Las tecnologías **sin licencia** (especialmente SigFox, LoRaWAN, D7AP) son generalmente superiores. SigFox es líder absoluto en consumo en modo sleep. Las tecnologías celulares (NB-IoT, LTE-M) implementan modos de ahorro (PSM, eDRX) para alcanzar vidas de 10 años.

- **Costo Total:** Las tecnologías **sin licencia** tienen ventaja al eliminar tarifas de suscripción y permitir redes privadas. SigFox y NB-Fi ofrecen costos operativos muy bajos. Las tecnologías **con licencia** implican un costo recurrente, pero aprovechan infraestructura existente.
- **Cobertura y Penetración:** **NB-IoT** lidera en la banda con licencia. En la banda sin licencia, **SigFox** y **NB-Fi** ofrecen los mayores alcances, mientras que D7AP y Weightless-P tienen un alcance más corto.
- **Escalabilidad:**
 - *Escalabilidad Estructural (dispositivos por celda):* Superior en tecnologías **sin licencia** como D7AP, Weightless-P, LoRaWAN y SigFox (hasta millones). Las tecnologías celulares manejan decenas de miles (NB-IoT: 50k, LTE-M: 80k-1M).
 - *Escalabilidad de Carga (mensajes por dispositivo):* Superior en tecnologías **con licencia**, al no tener restricciones de duty cycle. Las tecnologías sin licencia están limitadas por regulación (e.g., 140 mensajes/día en SigFox, duty cycle del 1EU para LoRa).
- **Manejo de Interferencias:** Las tecnologías **con licencia** están libres de interferencias accidentales. Entre las sin licencia, **LoRaWAN** (CSS) y **Weightless-P** (saltos de frecuencia + FEC) son muy robustas. Las que usan UNB (SigFox, NB-Fi) también minimizan el riesgo.
- **Calidad de Servicio (QoS), Movilidad y Latencia:** Las tecnologías **con licencia** (especialmente LTE-M y NB-IoT) ofrecen la mejor QoS garantizada, soporte nativo para handover y las latencias más bajas. Entre las sin licencia, **Weightless-P** y **D7AP** son las que mejor soportan movilidad y comunicaciones bidireccionales confiables.

Discusión y Aplicabilidad: No existe una tecnología LPWAN única óptima para todos los casos. La selección debe basarse en los requisitos específicos de la aplicación:

- **Aplicaciones de Monitoreo Masivo y Estático** (e.g., medidores, agricultura): **NB-IoT** (por cobertura/penetración) o **SigFox/LoRaWAN** (por coste y energía).
- **Aplicaciones con Movilidad o Baja Latencia** (e.g., logística, wearables): **LTE-M** (mejor opción celular) o **D7AP/Weightless-P** (en redes privadas).
- **Redes Privadas y Control Industrial** (e.g., ciudades inteligentes, fábricas): **LoRaWAN** (flexibilidad y ecosistema) o **Weightless-P** (QoS y confiabilidad).
- **Aplicaciones con Datos más Voluminosos o Voz** (e.g., vigilancia, teleasistencia): **LTE-M** es la opción predominante.

La tendencia futura apunta hacia la convergencia y coexistencia de múltiples tecnologías en arquitecturas híbridas, donde una plataforma de gestión unificada pueda seleccionar dinámicamente la mejor conexión disponible para cada dispositivo y aplicación (<empty citation>).

Aplicación en el Monitoreo Agrícola

Las LPWAN proporcionan la **base tecnológica** sobre la cual se sustentan los sistemas de Agricultura de Precisión. Su aplicación en el monitoreo agrícola es crucial por las siguientes razones, que justifican la necesidad de seleccionar la tecnología adecuada:

- **Viabilidad en Campos Extensos:** La capacidad de largo alcance permite conectar sensores distribuidos en grandes parcelas de cultivo donde otras tecnologías son inviables u extremadamente caras de implementar. Esto es fundamental para obtener datos de alta resolución espacial (Chen et al., 2018).
- **Sostenibilidad Operativa:** El bajo consumo energético garantiza que los sensores permanezcan operativos durante períodos prolongados (años) sin intervención humana para recargar o reemplazar baterías, reduciendo significativamente los costos de mantenimiento y operación.
- **Insumo para la Inteligencia Artificial (IA):** Las LPWAN son el canal de comunicación que traslada los datos críticos de campo (clima, suelo, estado hídrico) hacia las plataformas de IA, las cuales procesan esta información para generar prescripciones agronómicas (Chen et al., 2018). La selección errónea de la LPWAN puede resultar en fallas de conectividad, comprometiendo la calidad de los datos y, por ende, la precisión de las recomendaciones del sistema inteligente.

6.1.3 Sensórica y Variables Agronómicas La agricultura de precisión se fundamenta en la captura sistemática de datos agronómicos mediante sensores, los cuales permiten monitorear las condiciones del cultivo y el ambiente en tiempo real o casi real. Esta capacidad de medición precisa y continua resulta esencial para la toma de decisiones informadas, la optimización de insumos y la mitigación de riesgos asociados a la variabilidad climática. En el contexto del despliegue de redes LPWAN para el monitoreo agrícola, la selección de la sensórica adecuada y la comprensión de las variables que miden constituyen un paso crítico previo al diseño de la arquitectura de comunicación.

Sensórica en la agricultura de presición

Los sensores son dispositivos que convierten señales del mundo físico (por ejemplo, humedad, temperatura, composición química) en datos digitales, actuando como la interfaz primaria entre el campo y los sistemas de información (Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision

Crop.pdf). Su integración en componentes de maquinaria, suelo, plantas o animales proporciona información vital sobre el estado del sistema agroproductivo (Alahmad et al., 2023).

Para el desarrollo de sistemas IoT agrícolas (Ag-IoT), la selección del sensor apropiado debe considerar factores como bajo consumo de energía, compatibilidad en la transferencia de información, precisión, sensibilidad, repetibilidad y durabilidad (Alahmad et al., 2023). Existe una amplia variedad de sensores clasificables según el parámetro físico que miden:

- **Sensores Químicos:** Miden propiedades como el pH del suelo y agua, conductividad eléctrica, salinidad, y concentraciones de gases (CO, O, CH) y nutrientes (nitratos). Se dividen principalmente en fotodetectores y electroquímicos (Alahmad et al., 2023).
- **Sensores Ópticos:** Utilizan la reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda para determinar materia orgánica del suelo, humedad, color, contenido de clorofila en plantas, estrés hídrico y detección de enfermedades foliares. Tecnologías como cámaras multiespectrales, hiperespectrales y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) son clave para la teledetección y estimación de rendimiento (Alahmad et al., 2023).
- **Sensores Electromecánicos y de Humedad:** Incluyen sensores de humedad del suelo (que miden la constante dieléctrica), sensores de presión, acelerómetros y celdas de carga. Son fundamentales para medir la compactación del suelo, el crecimiento de frutos, el viento y el peso continuo de las plantas (Alahmad et al., 2023).
- **Sensores Acústicos:** Detectan cambios en las frecuencias sonoras, útiles para identificar plagas (como barrenadores de madera) mediante el sonido que generan al alimentarse o moverse, y para estimar la altura del dosel del cultivo (Alahmad et al., 2023).
- **Sensores Térmicos:** Monitorean la temperatura de hojas, suelo y ambiente. Los datos de temperatura foliar se utilizan para predecir la producción, estimar la evapotranspiración y programar el riego (Alahmad et al., 2023).

Variables Agronómicas Críticas para el Monitoreo

Las variables agronómicas monitoreables definen el estado de salud del cultivo y del suelo, guiando las intervenciones de manejo. La cantidad y frecuencia de datos requeridos dependen del cultivo específico, las condiciones ambientales y los objetivos del productor (Alahmad et al., 2023). Las variables más relevantes, vinculadas a los sensores antes descritos, incluyen:

- **Variables Edáficas (del Suelo):**

- **Humedad del Suelo:** Parámetro fundamental para la programación eficiente del riego. Se mide comúnmente con sensores capacitivos o de resistencia eléctrica (Alahmad et al., 2023).
- **Nutrientes (N, P, K) y pH:** Determinan la fertilidad del suelo y la necesidad de fertilización. Sensores electroquímicos y ópticos permiten estimaciones in situ, aunque su medición en tiempo real sigue siendo un desafío en desarrollo (Alahmad et al., 2023).
- **Temperatura del Suelo:** Afecta la germinación de semillas y la actividad microbiana. Se mide con sensores térmicos (Alahmad et al., 2023).
- **Conductividad Eléctrica (CE):** Indica la salinidad del suelo y la concentración de iones. Se mide con sensores eléctricos (Alahmad et al., 2023).

■ Variables Ambientales y Climáticas:

- **Temperatura y Humedad del Aire:** Condicionan la evapotranspiración, la aparición de enfermedades y el estrés térmico de los cultivos. Se monitorean con sensores térmicos y de humedad (capacitivos o resistivos) (Alahmad et al., 2023).
- **Precipitación y Viento:** Afectan la programación de riego, la aplicación de agroquímicos y los riesgos de erosión. Se miden con pluviómetros y anemómetros (sensores mecánicos o acústicos) (Alahmad et al., 2023).
- **Radiación Solar:** Determina la fotosíntesis y el crecimiento. Se mide con sensores de radiación o piranómetros (Alahmad et al., 2023).

■ Variables del Cultivo:

- **Salud y Vigor Vegetal:** Se evalúa mediante índices espectrales (como NDVI) obtenidos con sensores ópticos montados en drones, tractores o satélites, que indican el contenido de clorofila y la cobertura foliar (Alahmad et al., 2023).
- **Detección de Estrés y Enfermedades:** Combinaciones de sensores ópticos (para detectar cambios de color o textura), térmicos (para identificar estrés hídrico) y acústicos (para detectar plagas) permiten una identificación temprana (Alahmad et al., 2023).
- **Estado Fenológico y Rendimiento:** Cámaras y sensores de flujo de masa permiten monitorear el desarrollo del cultivo y estimar o cuantificar el rendimiento en la cosecha (pyingkodi2022sensor)

6.1.4 Simulación de Redes LPWAN

Estado del Arte de Herramientas de Simulación y sus Métricas de Desempeño

El siguiente análisis se basa en el artículo: *A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions* (Almuhsaya et al., 2022), la simulación de redes LPWAN (específicamente LoRaWAN) es crucial para evaluar el rendimiento de la red a gran escala. A continuación, se detallan las herramientas de simulación tratadas en el artículo y sus métricas de desempeño.

Herramienta	Descripción y Plataforma	Características Clave	Métricas de Desempeño Evaluadas
LoRaSim	Simulador de eventos discretos y probabilístico implementado en Python.	Simula un único gateway (puerta de enlace) LoRaWAN que sirve a varios dispositivos finales (EDs). Incorpora el efecto de captura y la asignación de factor de dispersión (SF) y potencia.	Packet Reception Ratio (PRR) y capacidad de la red (escalabilidad).
LoRaWANSim	Módulo para el simulador de red ns-3 basado en C++.	Extiende el modelo ALOHA para incluir el efecto de captura y la interferencia inter-SF. Soporta comunicación multicanal, multi-SF, multi-gateway y bidireccional. Soporta las Clases A y C de LoRaWAN.	Consumo de energía, Packet Delivery Ratio (PDR) y latencia de la red.
FAD	Simulador de eventos discretos implementado en Python.	Enfocado en simulaciones de gran escala. Introduce un modelo de canal LoRaWAN realista y considera el efecto de captura.	PDR y consumo de energía.
Simu-LoRa	Implementado en MATLAB.	Diseñado para evaluar el rendimiento de los dispositivos finales y diferentes factores de dispersión (SF). Se centra en la capa física (PHY).	Eficiencia energética y PDR.

Cuadro 6.1: Comparativa de herramientas de simulación para redes LoRaWAN

6.1.5 Agentes de Inteligencia Artificial

Definición y diferencia con la IA generativa tradicional

Un agente de Inteligencia Artificial (IA) se define como una entidad que percibe su entorno y actúa dentro de él de forma autónoma con el objetivo de lograr sus metas («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.). Los agentes son una pieza fundamental de la arquitectura de los sistemas de IA(Gutowska & Stryker, 2025).

La diferencia con la IA generativa tradicional (como los grandes modelos de lenguaje) radica en que un agente de IA no solo genera contenido o respuestas, sino que también incluye capacidades de percepción, razonamiento y acción en un entorno para alcanzar un objetivo específico (Gutowska & Stryker, 2025). La IA generativa puede ser un componente que el agente utiliza para razonar o planificar.

Características clave: autonomía, capacidad de decisión, autoaprendizaje y adaptación

Las características fundamentales de los agentes computacionales incluyen:

- **Autonomía:** La capacidad de operar sin la necesidad de un control humano o de la interacción directa en cada paso. Un agente de IA puede ejecutar tareas y tomar decisiones de forma independiente (Gutowska & Stryker, 2025).
- **Capacidad de Decisión:** Un agente posee un espacio de diseño de agente que le permite tomar decisiones basadas en sus percepciones y metas. Estos diseños progresan gradualmente desde lo simple hasta lo complejo («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.).
- **Autoaprendizaje y Adaptación:** Aunque no se detalla explícitamente el “autoaprendizaje” o “adaptación” como términos, el libro sobre Fundamentos de Agentes Computacionales aborda cómo la IA moderna se explica a través de agentes computacionales, y cómo las nuevas ediciones incluyen capítulos sobre aprendizaje profundo (deep learning) e IA generativa, lo que implica mecanismos de mejora y ajuste de comportamiento («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.).

Arquitectura de sistemas multiagente y flujos de trabajo

Un Sistema Multiagente es una arquitectura donde múltiples agentes especializados interactúan para resolver problemas complejos (Gutowska & Stryker, 2025).

La Arquitectura de Referencia Multiagente (MARA) es una documentación de Microsoft que se enfoca en los desafíos únicos de orquestar, gobernar y escalar sistemas donde varios agentes

colaboran, en lugar de centrarse en un agente individual («Multi-agent reference architecture», 2025).

Los flujos de trabajo en estos sistemas implican:

- **Orquestación:** Gestionar las interacciones de los agentes.
- **Gobernanza:** Establecer reglas y límites.
- **Escalabilidad:** Asegurar que el sistema pueda crecer y manejar más agentes o tareas («Multi-agent reference architecture», 2025).

Aplicación en sistemas de recomendación y soporte a la decisión

Los agentes de IA son la base de los agentes computacionales, un concepto central en la IA que se aplica a diversas áreas.

- **Soporte a la Decisión:** El concepto de agentes se relaciona directamente con los modelos de razonamiento y de causalidad («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.). Los agentes pueden ser diseñados para razonar y evaluar la información, lo que es esencial para el apoyo a la decisión.
- **Sistemas de Recomendación:** Al igual que en el soporte a la decisión, los agentes se utilizan para aplicar técnicas de aprendizaje profundo y razonamiento a grandes volúmenes de datos, una tarea habitual en los sistemas de recomendación modernos («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.).

Gobernanza y límites de los agentes autónomos

La **gobernanza** es un componente clave en la Arquitectura de Referencia Multiagente. El objetivo es establecer el marco para la orquestación y gestión de los agentes («Multi-agent reference architecture», 2025).

Los límites y desafíos de estos sistemas incluyen:

- **Complejidad:** La necesidad de diseñar el sistema para el cambio, equilibrando la extensibilidad a largo plazo con una ingeniería pragmática para el lanzamiento («Multi-agent reference architecture», 2025).
- **Ética y Responsabilidad:** La IA, incluido el diseño de agentes, tiene un impacto social que debe ser considerado. Las características de autonomía y capacidad de decisión de los agentes plantean desafíos éticos importantes («Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources», s.f.).

6.1.6 Metodologías Ágiles (Scrum + Kanban) *La información presentada en esta sección se basa completamente en (Grotenfelt, 2021)*

Las metodologías ágiles representan un conjunto de prácticas y marcos de trabajo cuyo objetivo principal es la entrega rápida y continua de valor al cliente, fomentando la adaptabilidad y la respuesta al cambio. El desarrollo de *software* ágil y su implementación se centran en el estudio de cómo estos enfoques pueden afectar el trabajo de un equipo de desarrollo. Dos de los marcos ágiles más populares son Scrum y Kanban, que a menudo se utilizan conjuntamente.

Marco de Scrum

Scrum es uno de los marcos de trabajo ágiles más utilizados, diseñado para implementar las prácticas y valores de la agilidad. Este marco se basa en la división del trabajo en períodos de tiempo fijos y cortos llamados sprints.

Un sprint es un *time-box* que tiene una duración de un mes o menos, durante el cual se crea un incremento de producto potencialmente utilizable, integrado y completo. El sprint actúa como el contenedor para todos los demás eventos de Scrum.

Roles de Scrum

El equipo de Scrum está compuesto por tres roles principales:

- Product Owner (PO): Responsable de maximizar el valor del producto y gestionar la pila del producto.
- Scrum Master (SM): Asegura que Scrum sea comprendido e implementado, y ayuda al equipo a eliminar impedimentos.
- Equipo de Desarrollo (Development Team): Profesionales encargados de crear el incremento de producto utilizable; son autoorganizados y multifuncionales.

Eventos de Scrum

- Planificación del Sprint (Sprint Planning)
- Scrum Diario (Daily Scrum)
- Revisión del Sprint (Sprint Review)
- Retrospectiva del Sprint (Sprint Retrospective)

Framework de Kanban

Kanban se centra en el flujo del trabajo, la visualización del proceso y la limitación del trabajo en curso (WIP). El nombre proviene del japonés y significa “señal visual”.

Prácticas Clave

- Visualización del flujo de trabajo mediante el tablero Kanban.
- Limitación del WIP para evitar sobrecarga y mejorar la eficiencia del flujo.

Métricas Ágiles

Las métricas permiten inspeccionar el progreso y detectar oportunidades de mejora.

Métricas de Progreso y Alcance

- Gráfico burn-down: muestra la cantidad de trabajo restante en función del tiempo.
- Gráfico burn-up: indica el trabajo completado frente al alcance total.

Métricas de Flujo y Eficiencia

- Tiempo de ciclo (cycle time): mide el tiempo desde que una tarea entra en estado “en progreso” hasta que se completa.
- Tiempo de espera (lead time): mide el tiempo total desde que se solicita una tarea hasta su entrega final.

6.2 Marco Conceptual

El marco conceptual establece los conceptos fundamentales dentro del contexto de esta investigación, orientada al diseño y evaluación de una plataforma de software con IA basada en simulación de redes LPWAN y modelos de decisión agronómica para Agricultura de Precisión en entornos rurales. Este marco permite delimitar el significado operativo de los términos clave y articularlos en una estructura coherente que conecta la infraestructura tecnológica con la toma de decisiones inteligentes en el sector agrícola.

6.2.1 Agricultura 4.0 Se entiende por **Agricultura 4.0** el paradigma socio-tecnológico que integra tecnologías digitales avanzadas —Internet de las Cosas (IoT), analítica de datos, inteligencia

artificial (IA), automatización y computación en la nube— en los sistemas productivos agrícolas, con el objetivo de optimizar el uso de recursos, incrementar la productividad y mejorar la sostenibilidad ambiental.

En esta investigación, la Agricultura 4.0 se concibe como el **marco aplicativo** que da sentido al uso de redes LPWAN, la sensórica distribuida y los modelos de decisión agronómica, especialmente en contextos rurales con limitaciones de conectividad.

6.2.2 Agricultura de Precisión La **Agricultura de Precisión** es un enfoque operativo de la Agricultura 4.0 basado en la gestión diferencial de los cultivos mediante el análisis de datos espacio-temporales. Su propósito es reducir la variabilidad productiva y optimizar la aplicación de insumos (agua, fertilizantes y energía) en función de las condiciones reales del suelo, el ambiente y el estado del cultivo.

Dentro del presente trabajo, la Agricultura de Precisión actúa como el **dominio funcional** sobre el cual se definen las variables agronómicas, la densidad de sensores y los requisitos de comunicación de la red.

6.2.3 Internet de las Cosas (IoT) Agrícola El **IoT agrícola** se define como la red de dispositivos físicos interconectados —sensores, actuadores y nodos inteligentes— que capturan datos del entorno agrícola y los transmiten a plataformas de procesamiento para su análisis y explotación.

En este estudio, el IoT agrícola se materializa mediante nodos sensores de bajo consumo energético conectados a través de redes LPWAN, actuando como la capa de adquisición de datos del sistema.

6.2.4 Redes LPWAN Las **Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)** son tecnologías de comunicación inalámbrica diseñadas para ofrecer largo alcance, bajo consumo energético y bajo costo, permitiendo la conectividad de dispositivos IoT en entornos extensos y de difícil acceso.

Conceptualmente, las LPWAN constituyen la **infraestructura de comunicaciones** que habilita la transmisión de datos agronómicos desde el campo hasta las plataformas de procesamiento, siendo un factor crítico en el rendimiento del sistema de Agricultura de Precisión.

6.2.5 Arquitectura LPWAN La **arquitectura LPWAN** se refiere a la organización funcional de los componentes que conforman la red, incluyendo dispositivos finales, gateways, núcleo de red y servidores de aplicación. Esta arquitectura define cómo fluye la información, cómo se gestiona la escalabilidad y cómo se garantiza la eficiencia energética y la calidad del servicio.

En el contexto de esta investigación, la arquitectura LPWAN es el objeto de evaluación mediante simulación, considerando diferentes configuraciones y parámetros de diseño.

6.2.6 Topología de Red La **topología de red** describe la forma en que los nodos se interconectan dentro de una LPWAN, principalmente bajo esquemas de estrella o malla. La topología influye directamente en el consumo energético, la latencia, la escalabilidad y la resiliencia de la red.

Este concepto es clave para analizar el impacto de la densidad de sensores y el número de gateways sobre el desempeño global de la red.

6.2.7 Sensórica Agrícola La **sensórica agrícola** comprende el conjunto de sensores físicos empleados para medir variables del suelo, del ambiente y del estado del cultivo. Estos sensores transforman fenómenos físicos y químicos en datos digitales utilizables por los sistemas de análisis y decisión.

En esta investigación, la sensórica define la carga de datos que debe soportar la red LPWAN y condiciona la frecuencia de reporte y la vida útil de los nodos.

6.2.8 Variables Agronómicas Las **variables agronómicas** son los parámetros medibles que describen el estado del sistema agrícola, tales como humedad del suelo, temperatura, precipitación, pH, índices de vegetación y variables microclimáticas.

Estas variables constituyen la **entrada principal** de los modelos de decisión agronómica y determinan los requisitos de resolución espacial y temporal del sistema de monitoreo.

6.2.9 Densidad de Nodos La **densidad de nodos** se define como el número de sensores desplegados por unidad de área (e.g., nodos por hectárea). Este concepto está directamente relacionado con la resolución espacial de los datos y con la carga de tráfico en la red LPWAN.

En este trabajo, la densidad de nodos es una variable clave para evaluar el rendimiento de la arquitectura de red mediante simulación.

6.2.10 Simulación de Redes LPWAN La **simulación de redes LPWAN** es una técnica de modelado computacional que permite reproducir el comportamiento de una red bajo diferentes condiciones de configuración, tráfico y entorno, sin necesidad de un despliegue físico.

Conceptualmente, la simulación actúa como una **herramienta de evaluación y apoyo a la toma de decisiones**, permitiendo analizar métricas de desempeño como la entrega de paquetes, la latencia y el consumo energético.

6.2.11 Desempeño de la Red El **desempeño de la red LPWAN** se refiere al conjunto de métricas que caracterizan su comportamiento operativo, tales como tasa de entrega de paquetes, retardo, consumo energético y escalabilidad.

Estas métricas permiten evaluar la idoneidad de una arquitectura LPWAN para soportar aplicaciones de Agricultura de Precisión en escenarios rurales.

6.2.12 Modelos de Decisión Agronómica Los **modelos de decisión agronómica** son sistemas computacionales, apoyados en técnicas de inteligencia artificial y análisis de datos, que transforman los datos recolectados en recomendaciones o prescripciones agronómicas.

En esta investigación, dichos modelos dependen directamente de la calidad, oportunidad y continuidad de los datos transmitidos por la red LPWAN.

6.2.13 Agentes de Inteligencia Artificial Los **agentes de inteligencia artificial (IA)** son entidades computacionales autónomas capaces de percibir su entorno, razonar sobre la información disponible y ejecutar acciones orientadas al cumplimiento de objetivos específicos. Estos agentes pueden integrar modelos de aprendizaje automático, reglas de decisión y acceso a herramientas externas para adaptarse dinámicamente a diferentes escenarios.

En esta investigación, los agentes de IA actúan como componentes inteligentes encargados de interpretar los datos agronómicos recolectados, interactuar con los resultados de la simulación de redes LPWAN y apoyar la toma de decisiones en contextos de Agricultura de Precisión.

6.2.14 Aplicación Web Una **aplicación web** es una plataforma de software accesible mediante un navegador, que integra interfaces de usuario, lógica de negocio y servicios de procesamiento de datos. Estas aplicaciones facilitan la interacción entre los usuarios y los sistemas computacionales complejos de forma intuitiva y centralizada.

Dentro del contexto de este trabajo, la aplicación web constituye la **capa de interacción** del sistema, permitiendo visualizar los resultados de la simulación de la red LPWAN, gestionar configuraciones del despliegue y acceder a las recomendaciones generadas por los modelos y agentes de decisión.

6.2.15 Retrieval-Augmented Generation (RAG) El **Retrieval-Augmented Generation (RAG)** es una arquitectura de inteligencia artificial que combina modelos generativos con mecanismos de recuperación de información desde fuentes externas, tales como bases de datos, repositorios documentales o históricos de mediciones.

En esta investigación, RAG permite a los agentes de IA enriquecer sus procesos de razonamiento incorporando conocimiento contextual proveniente de datos agronómicos históricos, resultados de simulación y parámetros de la red LPWAN, mejorando la calidad y pertinencia de las recomendaciones generadas.

6.2.16 Arquitectura Multiagente La **arquitectura multiagente** es un enfoque de diseño de sistemas en el cual múltiples agentes de IA interactúan entre sí de manera cooperativa o coordinada, cada uno con responsabilidades y capacidades específicas, para resolver problemas complejos de forma distribuida.

En el marco de este estudio, la arquitectura multiagente permite separar funciones como el análisis de desempeño de la red, la interpretación agronómica de los datos y la generación de recomendaciones, favoreciendo la modularidad, escalabilidad y robustez del sistema.

6.2.17 Orquestación de Agentes La orquestación de agentes se refiere al conjunto de mecanismos que gestionan la coordinación, secuenciación y comunicación entre múltiples agentes de IA, definiendo flujos de interacción, dependencias y reglas de ejecución.

En esta investigación, la orquestación de agentes asegura que los procesos de simulación de la red, análisis de datos agronómicos y generación de decisiones se realicen de manera coherente, controlada y reproducible, alineando las acciones de los agentes con los objetivos del sistema.

6.2.18 Gobernanza de Sistemas de IA La gobernanza de sistemas de IA comprende los principios, políticas y mecanismos técnicos orientados a garantizar el uso responsable, transparente y controlado de los sistemas inteligentes. Esto incluye aspectos como la trazabilidad de decisiones, el control de salidas, la gestión de datos y la validación de resultados.

7. Metodología

La metodología adoptada en este proyecto se fundamenta en principios de ingeniería de software ágil, complementada con Scrum, con el propósito de garantizar un desarrollo iterativo, incremental y controlado del sistema. El ciclo de vida del proyecto se estructura en cinco fases principales, diseñadas para abordar de manera organizada el levantamiento de requerimientos, la planificación, el diseño, el desarrollo, la validación y el despliegue del sistema, asegurando la pertinencia y calidad de cada entrega.

Cada fase ha sido definida para aportar valor específico al proyecto y permitir un flujo de trabajo coherente, donde la retroalimentación y la mejora continua son elementos centrales, especialmente durante la construcción de prototipos y su validación.

7.1 Fase 1: Preparación y Levantamiento de Requerimientos

Objetivo: Establecer una base sólida para el proyecto, definiendo el alcance, los objetivos y recursos, y recopilando información detallada sobre las necesidades de los usuarios y stakeholders.

7.1.1 Análisis de stakeholders Identificación de los actores clave, sus roles y expectativas, con el fin de priorizar requerimientos según relevancia.

7.1.2 Levantamiento de requerimientos Recolección de requerimientos funcionales y no funcionales mediante entrevistas, encuestas y revisión de sistemas existentes.

7.1.3 Selección de tecnologías Evaluación y elección de herramientas y frameworks que aseguren escalabilidad, integración con la red de sensores (WSN) y un desarrollo eficiente dentro del marco de Scrum.

7.2 Fase 2: Planificación y Diseño del Sistema

Objetivo: Estructurar y organizar los componentes del sistema, definiendo la arquitectura y los flujos de información para garantizar coherencia y efectividad en el desarrollo.

7.2.1 Priorización del backlog Organización de funcionalidades y tareas según valor para el usuario y complejidad de implementación, permitiendo un flujo de trabajo iterativo.

7.2.2 Diseño de arquitectura de alto nivel Elaboración de diagramas de alto nivel que representen la estructura de módulos y microservicios.

7.2.3 Definición de procesos y documentación Elaboración de diagramas de alto nivel que representen la estructura de módulos, microservicios y la conectividad con la red de sensores. Establecimiento de estándares de modelado gráfico para representar el comportamiento esperado del sistema, el flujo de información y la interacción detallada entre sus componentes.

7.2.4 Planificación de iteraciones Scrumban Establecimiento de ciclos de trabajo flexibles que faciliten entregas incrementales y ajustes continuos basados en la retroalimentación de prototipos.

7.3 Fase 3: Implementación y Desarrollo del Prototipo

Objetivo: Construir prototipos funcionales del sistema, asegurando la correcta integración de los componentes y la validación de los modelos de inteligencia artificial. Esta fase se desarrollará de manera cíclica, permitiendo refinamientos continuos antes de alcanzar la versión final.

7.3.1 Desarrollo del Backend y APIs de Microservicios: Implementación de la lógica de negocio por servicio, definición estricta de APIs RESTful o gRPC para la comunicación entre componentes, y gestión de la persistencia de datos (bases de datos).

7.3.2 Desarrollo del Frontend y Visualización de Decisiones: Construcción de interfaces responsivas y centradas en el usuario, con un enfoque especial en la visualización clara de datos de contexto y las recomendaciones/justificaciones de la IA.

7.3.3 Integración de modelos de IA para uso de variables agrícolas: La inteligencia artificial será un componente clave en la Web App, ya que permitirá la predicción de variables agrícolas con base en los datos recolectados. En esta fase, se integrarán modelos de aprendizaje automático entrenados con datos históricos y en tiempo real, con el objetivo de proporcionar pronósticos precisos sobre parámetros como la humedad del suelo, la temperatura ambiental y los niveles de precipitación.

7.3.4 Aseguramiento de Calidad y Mantenibilidad: Aplicación rigurosa de control de versiones y estándares de codificación (linter, code review).

7.4 Fase 4: Pruebas y Validación

Objetivo: Verificar que los prototipos cumplan con los requerimientos funcionales y de calidad, mediante pruebas estructuradas y ajustes iterativos. Esta fase también se desarrollará de manera cíclica, en estrecha interacción con la fase 3 (Desarrollo), permitiendo la mejora continua de los prototipos..

7.4.1 Pruebas Unitarias, integración y Carga

- Pruebas Unitarias: Evaluación del correcto funcionamiento interno de las funciones y clases en cada microservicio de forma aislada
- Pruebas de Integración: Verificación de que la comunicación y el contrato de APIs entre los microservicio y los brokers de mensajes operen según lo esperado.
- Pruebas de Carga: Medición del rendimiento del sistema (throughput y latencia) bajo el tráfico esperado para asegurar una experiencia de usuario fluida, especialmente en los servicios de API y la base de datos.

7.4.2 Validación y Monitoreo del Desempeño de Modelos de IA:

- Evaluación de Precisión y Desempeño: Pruebas del modelo en escenarios de prueba controlados y con datos históricos para medir métricas clave.
- Detección de Sesgos (Bias) y Desviación (Drift): Establecimiento de mecanismos para identificar si el modelo de IA está generando resultados sesgados o si su rendimiento se degrada con el tiempo o con datos del mundo real.

7.4.3 Integración de modelos de IA para uso de variables agrícolas:

- Incorporación de Retroalimentación: Uso de la metodología Scrumban para priorizar rápidamente los bugs detectados durante las pruebas y las mejoras funcionales sugeridas por los stakeholders o usuarios de prueba.
- Gestión del Backlog: Mantenimiento de un backlog priorizado y visible, que alimente continuamente el trabajo de la Fase 3: Desarrollo (lo que refuerza la naturaleza cíclica entre las dos fases).

- Criterios de Aceptación: Definición clara de los criterios que deben ser cumplidos para que un prototipo o una funcionalidad sea considerada "Hecha" y lista para pasar a la siguiente iteración o despliegue.

7.5 Fase 5: Despliegue y Evaluación Final

Objetivo: Entregar el sistema completo, validado y documentado, asegurando su integración final y preparación para su operación en condiciones reales.

7.5.1 Integración final de módulos y microservicios Consolidación de todos los componentes desarrollados en un sistema coherente y funcional.

7.5.2 Pruebas de Aceptación y Validación en Escenario Real Las Pruebas de Aceptación del Usuario (UAT) son cruciales para verificar el cumplimiento de los requerimientos y las expectativas de los stakeholders en un entorno de producción o staging final. Durante esta etapa, se realiza la Validación de la Cadena de Datos y Decisión, que sigue el flujo de información a través del funcionamiento del sistema. Adicionalmente, se llevan a cabo pruebas exhaustivas de Seguridad y Resiliencia para asegurar la protección de las APIs y la estabilidad del sistema ante fallos simulados.

7.5.3 Documentación Integral, MLOps y Transición a Operación La fase culmina con la Documentación Integral, la cual abarca un mapa detallado de la arquitectura de microservicios, la documentación de las APIs y, fundamentalmente, la Documentación Operacional (Runbooks y MLOps). Estos manuales son esenciales para el monitoreo, la respuesta a incidentes y el proceso de reentrenamiento y deployment de nuevos modelos de IA. El proceso finaliza con el Plan de Go-Live, que incluye la estrategia de implementación, la capacitación a usuarios clave y el establecimiento de un período de garantía para la transición exitosa a la operación y el soporte continuo.

La interacción entre la Fase 3 (Desarrollo e Implementación) y la Fase 4 (Pruebas y Validación) se establecerá bajo un modelo de Entrega y Mejora Continua. Esta dinámica cíclica, basada en iteraciones cortas, permite la construcción incremental de microservicios funcionales, su validación inmediata a través de pruebas de integración y pruebas de data pipeline, y la incorporación ágil de feedback del usuario. Este enfoque asegura la evolución progresiva del sistema, minimizando el riesgo, manteniendo una alta calidad del código (gracias a los artefactos de CI/CD), y garantizando una alineación constante con los requerimientos cambiantes del usuario y las condiciones de los datos reales del contexto colombiano.

8. Alcances y Limitaciones

8.1 Alcances del proyecto

8.1.1 Desarrollo de una Web App Funcional El proyecto contempla la construcción de una plataforma web plenamente operativa que permita gestionar la información agrícola, visualizar datos relevantes y acceder a funcionalidades clave definidas en los requisitos del sistema.

8.1.2 Integración de Modelos de IA para Predicción El sistema incluirá modelos de aprendizaje automático entrenados con datos históricos y digitales disponibles, con el fin de predecir variables agrícolas específicas. La IA será un componente activo dentro de la Web App, permitiendo generar análisis y pronósticos dentro del flujo de la aplicación.

8.1.3 Proceso Iterativo de Prototipos El alcance incluye un ciclo iterativo de creación, evaluación y mejora de prototipos (fases 7.2 a 7.4). Cada iteración permitirá refinar tanto la interfaz como el desempeño funcional y predictivo del sistema hasta obtener un prototipo final robusto.

8.1.4 Arquitectura Base Sólida y Escalable El proyecto abarca el diseño y construcción de una arquitectura inicial estable (fase 7.1), que sirva como plataforma para las iteraciones posteriores. La arquitectura será escalable, modular y preparada para recibir futuras expansiones del sistema.

8.1.5 Validación Funcional y Técnica El proyecto comprende la validación del comportamiento de la Web App mediante pruebas de funcionamiento, análisis de desempeño y revisión del comportamiento de los modelos de IA. Esto asegura que el sistema cumpla con los criterios de calidad establecidos.

8.1.6 Implementación Final del Sistema El alcance incluye la consolidación de todas las funcionalidades definitivas, la integración global de los componentes, pruebas finales y la entrega de una versión estable, lista para operar.

8.1.7 Generación de Informes y Documentación Técnica Se incluye la elaboración de documentación técnica y metodológica relevante, informes de análisis, justificaciones de decisiones de diseño y bitácoras del proceso iterativo, con el fin de garantizar claridad, trazabilidad y soporte para futuras mejoras.

8.2 Limitaciones del proyecto

8.2.1 No se realizará integración con sensores físicos ni con redes WSN reales. El sistema operará exclusivamente con datos de entrada proporcionados por el usuario o mediante datasets de referencia.

8.2.2 No se implementará una red LPWAN operativa. El análisis comparativo será conceptual y basado en literatura técnica, métricas estimadas y modelos analíticos derivados del contexto ingresado.

8.2.3 El sistema no ejecutará simulaciones de propagación, consumo energético o comportamiento físico de dispositivos IoT. La aplicación procesará información contextual para ofrecer recomendaciones fundamentadas, mas no simulaciones numéricas avanzadas.

8.2.4 La inteligencia artificial no generará predicciones cuantitativas de comportamiento climático o agrícola. Su función se limitará a la identificación, interpretación y estructuración de variables relevantes para la toma de decisiones tecnológicas.

8.2.5 Los resultados dependen de la calidad y precisión del contexto ingresado por el usuario. Ambigüedades, inconsistencias o información insuficiente pueden afectar la pertinencia de las recomendaciones.

Bibliografía

- Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A. (2023). Applying IoT sensors and big data to improve precision crop production: a review. *Agronomy*, 13(10), 2603.
- Almuhaya, M. A., Jabbar, W. A., Sulaiman, N., & Abdulmalek, S. (2022). A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*, 11(1), 164.
- Alvarez, Y. A. M., Molano, J. I. R., & Bravo, L. E. C. (2022). Colombian agriculture: approaching agriculture 4.0. *Ingeniería Solidaria*, 18(2), 1-19.
- Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents — Online Learning Resources* [Re-cuperado de <https://artint.info/3e/resources/index.html>]. (s.f.). artint.info. <https://artint.info/3e/resources/index.html>
- Chen, M., Miao, Y., Jian, X., Wang, X., & Humar, I. (2018). Cognitive-LPWAN: Towards intelligent wireless services in hybrid low power wide area networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 3(2), 409-417.
- Chen, M., Miao, Y., Jian, X., Wang, X., & Humar, I. (2019). Cognitive-LPWAN: Towards Intelligent Wireless Services in Hybrid Low Power Wide Area Networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 3(2), 409-417. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2018.2873783>
- Chilamkurthy, N. S., Pandey, O. J., Ghosh, A., Cengeramaddi, L. R., & Dai, H.-N. (2022). Low-power wide-area networks: A broad overview of its different aspects. *Ieee Access*, 10, 81926-81959.
- DANE. (2025, agosto). *Producto Interno Bruto (PIB) Trimestral. II trimestre de 2025 (preliminar)* (inf. téc.) (Boletín técnico). DANE. Bogotá D.C., Colombia. <https://www.dane.gov.co>
- DE SENORES, M. (s.f.). MONITOREO DE CULTIVOS CON INTERNET DE LAS COSAS. *Revista de divulgación científica y tecnológica*. ISSN, 2444, 4944.
- Diane, A., Diallo, O., & Ndoye, E. H. M. (2025). A systematic and comprehensive review on low power wide area network: characteristics, architecture, applications and research challenges. *Discover Internet of Things*, 5(1), 7.
- Flórez Martínez, D. H., Zambrano Muñoz, A. d. P., & Perdomo Villamil, Y. L. (2021). Agroindustria 4.0: Megatendencias para las actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación en el sector agropecuario.
- Grotenfelt, J. (2021). Agile software development and implementation of Scrumban. *Sensors*, 21(3), 695.

- Gutowska, A., & Stryker, C. (2025, noviembre). *AI Agents. The 2025 Guide To AI Agents* [Consultado el: 19 de noviembre de 2025]. IBM. <https://www.ibm.com/think/ai-agents#605511093>
- Multi-agent reference architecture* [Recuperado de <https://microsoft.github.io/multi-agent-reference-architecture/print.html>]. (2025). Microsoft. <https://microsoft.github.io/multi-agent-reference-architecture/print.html>
- Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B.-K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15(2), 354.
- Quiroz, A. D. T. (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores. *Informador técnico*, 87(2), 195-211.
- Rajak, P., Ganguly, A., Adhikary, S., & Bhattacharya, S. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100776.
- Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S. A., Zaidi, S. A. R., & Iqbal, N. (2019). Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*, 19(17), 3796.
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8), 2647.