



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 bajo la metodología ágil Scrumban, que combina la estructura iterativa de Scrum con la adaptabilidad de Kanban, facilitando un proceso de implementación flexible y colaborativo. 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 un agente 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 base 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 agrícola. 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 integran 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 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 de redes LPWAN y modelos de decisión agronómicos, potenciada por inteligencia artificial, para optimizar 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 ágil, asegurando su afinidad con los requerimientos previamente definidos.
4. **Evaluar** la precisión técnica de las recomendaciones mediante validación con expertos y mediciones reales.
5. **Cuantificar** el impacto en eficiencia operativa y económica frente a métodos tradicionales.
6. **Documentar detalladamente** la arquitectura de software, el proceso de desarrollo iterativo y los resultados de la validación operativa y económica para garantizar la reproducibilidad, escalabilidad y transferibilidad de la solución a otros contextos agropecuarios.

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 agricultores 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.

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 agropecuarios, 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: Arquitectura y Principios

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 principios arquitectónicos de las LPWAN están orientados a la máxima eficiencia:

- **Eficiencia Energética:** La prioridad es extender la vida útil de los nodos finales a más de diez años. Esto se logra mediante la optimización de protocolos de acceso al medio que permiten a los dispositivos permanecer en estados de inactividad profunda durante la mayor parte del tiempo, minimizando el consumo de potencia durante las transmisiones (Diane et al., 2025).
- **Largo Alcance:** Utilizan técnicas de modulación avanzadas, como el Chirp Spread Spectrum (CSS) en LoRa, y anchos de banda ultra-estrechos en NB-IoT, para mejorar la sensibilidad del receptor y permitir la comunicación efectiva a distancias de varios kilómetros en entornos rurales (Diane et al., 2025).
- **Baja Tasa de Datos:** Están optimizadas para la transmisión de pequeños paquetes de datos (kilobits por segundo o menos), lo cual es suficiente para lecturas periódicas de sensores (temperatura, humedad, estado binario), pero inadecuado para servicios multimedia o de alta throughput (Chen et al., 2018).
- **Alta Escalabilidad:** El diseño de la red permite que una única estación base o gateway gestione la conectividad de decenas de miles de dispositivos finales (Chen et al., 2018).

Análisis Comparativo de Tecnologías LPWAN

El ecosistema LPWAN presenta una diversidad de tecnologías que compiten en función de sus características operativas y el espectro de frecuencia que utilizan, lo cual influye directamente en el costo, la cobertura y la calidad de servicio (Ahmad et al., 2021).

1. **Tecnologías de Espectro Sin Licencia (ISM):** Estas tecnologías permiten el despliegue de redes privadas con bajo costo de infraestructura inicial, pero enfrentan desafíos en la gestión de interferencias.
 - **LoRaWAN:** Utiliza bandas ISM. Su modulación CSS le otorga un largo alcance superior (≤ 20 km en campo abierto) y robustez contra el ruido. Es la opción preferida para entornos agrícolas donde la construcción de una red privada y la maximización del alcance son prioritarias (Chen et al., 2018)

- **SigFox:** Opera con ultra-banda estrecha. Es una tecnología propietaria con un servicio centralizado, limitada a un tráfico muy bajo (mensajes pequeños y pocos por día). Su alcance es amplio, pero su baja capacidad de datos restringe su uso a aplicaciones de reporte de estado binario o seguimiento (Ahmad et al., 2021).
- **MIoTy y RPW (Rotating Polarization Wave):** Son tecnologías más recientes que buscan mejorar la fiabilidad y el rendimiento en ambientes industriales ruidosos, mejorando la eficiencia espectral en las bandas ISM (Ahmad et al., 2021).

2. **Tecnologías de Espectro Licenciado (3GPP):** Evolucionadas a partir de los estándares celulares, ofrecen seguridad, calidad de servicio (QoS) y se integran en la infraestructura móvil existente.

- **NB-IoT (Narrowband-IoT):** Estandarizada en 3GPP, utiliza un ancho de banda estrecho (200 kHz) dentro del espectro celular (700 – 900 MHz). Ofrece una cobertura extendida (≤ 15 km) y una mayor penetración en el subsuelo, siendo ideal para aplicaciones fijas de bajo throughput como la monitorización de medidores o sensores subterráneos (Chen et al., 2018).
- **LTE-M (LTE-Machine-to-Machine) / Cat-M1:** También estandarizada en 3GPP, opera con un ancho de banda mayor (~ 1.4 MHz), lo que le permite soportar tasas de datos más altas (≤ 1 Mbps) y mayor movilidad de los dispositivos. Es la elección óptima cuando la aplicación requiere actualizaciones más frecuentes o soporta tráfico de voz (Chen et al., 2018).
- **EC-GSM (Extended Coverage GSM):** Es una optimización del estándar 2G/GSM para mejorar la cobertura. Aunque relevante históricamente, su desarrollo se ha visto eclipsado por el enfoque más eficiente y moderno de NB-IoT (Chen et al., 2018).

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 o prohibitivamente 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 periodos 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 El fundamento de la Agricultura de Precisión reside en la capacidad de recolectar, procesar y utilizar datos espaciales y temporales para optimizar la gestión de insumos y mejorar la productividad de los cultivos (Alahmad et al., 2023). Esta capacidad depende intrínsecamente de la sensórica, que transforma las condiciones físicas, químicas y biológicas del agrosistema en información cuantificable (Rajak et al., 2023).

Variables Clave: Suelo, Ambiente y Estado del Cultivo

Para alimentar un sistema de Inteligencia Artificial (IA) capaz de generar prescripciones agronómicas, es indispensable monitorear un conjunto de variables interconectadas que definen el estado de salud y desarrollo del cultivo (Alahmad et al., 2023).

1. Variables del Suelo: Definen el medio de crecimiento y la disponibilidad de recursos.

- **Humedad del Suelo:** Es la variable más crítica, ya que determina el estrés hídrico y la necesidad de riego (Rajak et al., 2023).
- **Temperatura del Suelo:** Afecta la germinación, la actividad microbiana y la absorción de nutrientes (Rajak et al., 2023).
- **Composición Química (pH, CE):** El pH influye en la disponibilidad de nutrientes, mientras que la Conductividad Eléctrica (CE) se correlaciona con la salinidad y la concentración de nutrientes solubles (Soussi et al., 2024)

2. Variables Ambientales (Microclima): Definen el entorno inmediato del cultivo.

- **Temperatura y Humedad Ambiental:** Variables atmosféricas que afectan la transpiración, la evaporación y la incidencia de enfermedades y plagas (Rajak et al., 2023).

- **Precipitación y Radiación Solar:** Determinan la energía disponible para la fotosíntesis y la recarga de la humedad del suelo (Alahmad et al., 2023).
- **Velocidad y Dirección del Viento:** Variables necesarias para la modelación de la evaporación y la dispersión de aerosoles y patógenos (Alahmad et al., 2023).

3. Variables del Estado del Cultivo (Fenología): Indican la salud y el desarrollo de la planta.

- **Índices de Vegetación:** Obtenidos principalmente mediante sensores remotos (satelitales, aéreos o montados en drones), como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Estos índices miden la actividad fotosintética y se correlacionan directamente con el rendimiento y el estrés (Alahmad et al., 2023).
- **Altura y Densidad Foliar:** Variables de crecimiento que se pueden medir en el lugar con sensores ultrasónicos o de manera remota con tecnologías LiDAR (Alahmad et al., 2023).

Tipos de Sensores y Compatibilidad con LPWAN

La selección del sensor no solo depende de la variable a medir, sino también de su compatibilidad energética y de comunicación con las Redes LPWAN (Rajak et al., 2023).

- **Sensores Capacitivos:** Son el estándar para medir la humedad del suelo. Funcionan midiendo la constante dieléctrica del suelo, la cual cambia con el contenido de agua. Son de bajo costo y, crucialmente, consumen baja potencia, lo que los hace ideales para la integración con nodos LoRaWAN o NB-IoT (Rajak et al., 2023).
- **Sensores Electroquímicos:** Utilizados para medir el pH y otros iones. Requieren una calibración y mantenimiento más intensivos, y aunque su consumo de potencia es generalmente bajo, la complejidad de la medición in situ y el costo pueden limitar su despliegue masivo en comparación con los sensores de humedad (Soussi et al., 2024).
- **Sensores Ópticos y Remotos:** Incluyen cámaras multiespectrales o hiperespectrales (para obtener índices como el NDVI) y fotodiodos. Son fundamentales para evaluar el estado del cultivo a escala de campo. Aunque el sensor en sí es activo, la plataforma de adquisición (dron o satélite) no utiliza directamente la red LPWAN. Sin embargo, los datos de prescripción resultantes del análisis de estas imágenes sí deben ser transmitidos a los actuadores vía LPWAN (Omia et al., 2023).
- **Sensores Termopares y Resistivos (DHT):** Comunes para medir temperatura y humedad ambiente. Son de bajo costo y presentan una buena eficiencia energética para el monitoreo microclimático (DE SENSORES, s.f.)

La baja tasa de datos de las LPWAN impone una restricción: solo los sensores que generan datos de pequeño tamaño (valores discretos como temperatura, humedad, o pH) son directamente compatibles. Los datos de gran volumen (como imágenes de alta resolución) deben ser procesados en el borde o de forma remota, y solo los resultados resumidos se transmiten por la red LPWAN (Alahmad et al., 2023).

Densidad de Sensores y Frecuencia de Reporte

La eficacia de la Agricultura de Precisión depende de la resolución espacial y temporal de los datos, que se define por la densidad de la red de sensores y su frecuencia de reporte (Alahmad et al., 2023; Soussi et al., 2024).

- **Densidad de Sensores:** La heterogeneidad del suelo y del microclima requiere una densidad de muestreo adecuada. El muestreo por celdas (ej., un sensor por cada hectárea) es una estrategia común, pero la ubicación óptima debe ser determinada por análisis de variabilidad espacial del campo (Soussi et al., 2024) . Una mayor densidad mejora la precisión del modelo de IA, pero aumenta linealmente la carga de tráfico en la red LPWAN.
- **Frecuencia de Reporte:** La necesidad de actualización de los datos varía: mientras que la temperatura del suelo puede medirse cada pocas horas, la humedad en condiciones de riego activo puede requerir muestreos más frecuentes (DE SENSORES, s.f.). Un reporte más frecuente (ej., cada 10 minutos) permite una detección más rápida de anomalías, pero consume más batería y satura el ancho de banda limitado de las LPWAN (Chen et al., 2018).

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* (Almuhaya 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 periodos 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

7. Metodología

La metodología adoptada en este proyecto se fundamenta en principios de ingeniería de software ágil, complementada con Scrumban, 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

- Ahmad, Z., Hashim, S. J., Rokhani, F. Z., Al-Haddad, S. A. R., & Sali, A. (2021). LPWAN state of the art: Trends and future directions. *Smart City Conference*, (13).
- 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* [Recuperado 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>
- 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 SENSORES, M. (s.f.). MONITOREO DE CULTIVOS CON INTERNET DE LAS COSAS. *Revista de divulgación científica y tecnológica. ISSN, 2444, 4944*.
- Diane, A., Diallo, O., & Ndoeye, 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., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8), 2647.