

**Desarrollo de una aplicación web basada en agentes de inteligencia artificial
para el análisis, soporte a la decisión y simulación visual de arquitecturas
LPWAN en escenarios de agricultura de precisión en Colombia**

Santiago Sánchez Moya

Juan Daniel Rodríguez Hurtado

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero de Sistemas

Director:

Ing. Roberto Ferro Escobar, PhD

Codirector:

Ing. Carlos Andrés Martínez Alayón, MsC

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Proyecto Curricular de Ingeniería de Sistemas

Bogotá D. C., Colombia

2026

Índice general

1. Resumen	1
1.1. Palabras Clave	2
2. Introducción	3
3. Problema de Investigación	7
3.1. Planteamiento del problema	7
3.2. Formulación del problema	8
3.2.1. Pregunta principal de investigación	8
3.2.2. Sistematización del problema	9
4. Objetivos	10
4.1. Objetivo General	10
4.2. Objetivos Específicos	10
5. Justificación	12
6. Marco Referencial	15
6.1. Marco Teórico	15
6.1.1. Agricultura 4.0	15
6.1.2. Redes LPWAN: Tecnologías Habilitadoras de la Agricultura de Precisión .	17
6.1.3. Sensórica y Variables Agronómicas	29

6.1.4.	Simulación de Redes LPWAN	32
6.1.5.	Agentes de Inteligencia Artificial	33
6.1.6.	Agilismo, Kanban y Modelo de Prototipo	36
6.2.	Marco Conceptual	42
6.2.1.	Agricultura 4.0	42
6.2.2.	Brecha digital rural	42
6.2.3.	Agricultura de Precisión	42
6.2.4.	Internet de las Cosas (IoT) en agricultura	42
6.2.5.	Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)	43
6.2.6.	Topologías de red LPWAN	43
6.2.7.	Arquitectura LPWAN	43
6.2.8.	Tecnologías LPWAN	43
6.2.9.	Sensórica agrícola	44
6.2.10.	Variables agronómicas	44
6.2.11.	Simulación de redes LPWAN	44
6.2.12.	Inteligencia Artificial Generativa	44
6.2.13.	Agente de Inteligencia Artificial	45
6.2.14.	Sistema Multiagente	45
6.2.15.	Gobernanza de Agentes de IA	45
6.2.16.	Metodologías ágiles	45
6.2.17.	Kanban	45
6.2.18.	Modelo de Prototipado	46
7.	Metodología	47
7.1.	Planificación inicial	47
7.2.	Gestión del Proyecto mediante Kanban	48
7.3.	Ciclo de Vida del Desarrollo con Prototipado	48
7.3.1.	Análisis	48

7.3.2.	Diseño	49
7.3.3.	Implementación	49
7.3.4.	Pruebas	49
7.3.5.	Validación y Retroalimentación	49
7.4.	Despliegue y Mantenimiento	50
8.	Alcances y Limitaciones	51
8.1.	Alcances del proyecto	51
8.1.1.	Desarrollo de una Web App Funcional	51
8.1.2.	Integración de Modelos de IA para Predicción	51
8.1.3.	Proceso Iterativo de Prototipos	51
8.1.4.	Arquitectura Base Sólida y Escalable	52
8.1.5.	Validación Funcional y Técnica	52
8.1.6.	Implementación Final del Sistema	52
8.1.7.	Generación de Informes y Documentación Técnica	52
8.2.	Limitaciones del proyecto	53
8.2.1.	No se realizará integración con sensores físicos ni con redes WSN reales.	53
8.2.2.	No se implementará una red LPWAN operativa.	53
8.2.3.	El sistema no ejecutará simulaciones de propagación, consumo energético o comportamiento físico de dispositivos IoT.	53
8.2.4.	La inteligencia artificial no generará predicciones cuantitativas de compor- tamiento climático o agrícola.	53
8.2.5.	Los resultados dependen de la calidad y precisión del contexto ingresado por el usuario.	53
8.2.6.	Uso de planes gratuitos y APIs con acceso limitado	54
8.3.	Productos y Resultados de Investigación	54
9.	Presupuesto	56

Bibliografía**58**

Capítulo 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 inteligencia artificial capaces de analizar contextos específicos —como tipo de cultivo, ubicación geográfica, condiciones ambientales y presupuesto disponible— con el fin de identificar las variables agrícolas más relevantes y los sensores adecuados para su medición y monitoreo. Asimismo, proporcionará información comparativa sobre el rendimiento de distintas tecnologías LPWAN.

Posteriormente, el sistema evaluará protocolos como LoRa, Sigfox y NB-IoT, determinando cuál presenta el mejor desempeño en función de parámetros tales como cobertura, costo, escalabilidad y eficiencia energética. Finalmente, ofrecerá al usuario una representación visual de la arquitectura de red que mejor se adapte a los requerimientos técnicos y operativos de su proyecto.

El desarrollo se llevará a cabo adoptando un enfoque híbrido que se compone del modelo de

prototipado y Kanban. La metodología utilizada se base 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 4.0, agricultura de precisión, agentes de inteligencia artificial, sensórica, Kanban, modelo de prototipado.

Capítulo 2

Introducción

La agricultura, pilar histórico de la economía y sustento de millones de colombianos, 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 análi-

sis 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 (apli-

cación 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 una metodología híbrida que combina el desarrollo iterativo e incremental del modelo de prototipado con las características ágiles y herramientas visuales del marco de trabajo Kanban. De este modo se favorece la gestión adaptativa de tareas y la entrega continua de valor alineado a las necesidades del usuario final. 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.

Capítulo 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 basada en agentes de inteligencia artificial, que integra simulaciones de redes LPWAN y modelos de decisión agronómicos, mejora la estimación del rendimiento de red (medido mediante Packet Delivery Ratio en función de la densidad de nodos) y reduce el tiempo de selección de tecnologías de conectividad para agricultura de precisión, en comparación con métodos tradicionales de análisis técnico?

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 visual 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?

Capítulo 4

Objetivos

4.1. 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.

4.2. 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.

Capítulo 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.

Capítulo 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. Se 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. Se identifican 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: Objetivos de diseño, topologías, arquitecturas

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 multitrayectoria, 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 (Chilamkurthy et al., 2022).
- **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 (año 2025). 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** La calidad de servicio (QoS) en tecnologías LPWAN debe adaptarse

a aplicaciones con requerimientos diversos, desde aquellas tolerantes al retardo, como la medición inteligente, hasta sistemas que exigen transmisión inmediata de alarmas. La QoS no depende de un único parámetro, sino del equilibrio entre rendimiento (throughput), latencia, variación de latencia (jitter) y tasa de error. Para mejorarla, la literatura propone distintas estrategias, como la optimización de parámetros de radio (por ejemplo, Spreading Factor y frecuencia portadora) para reducir colisiones y aumentar la tasa de entrega de datos, el uso de esquemas de corrección de errores y redundancia adaptativa para incrementar la tasa de entrega de paquetes, modelos analíticos para estimar la tasa de error de bit con mayor precisión y mecanismos de enrutamiento multi-salto basados en aprendizaje por refuerzo (Q-learning) que consideran retardo, interferencia, uso de ancho de banda y eficiencia energética. No obstante, el diseño de redes LPWAN implica compromisos entre variables como ancho de banda y tasa de datos, así como decisiones sobre espectro, modulación, acceso al canal y duplexidad, cuyos impactos pueden ser altos, moderados o bajos según el objetivo de desempeño buscado. (Chilamkurthy et al., 2022).

- **Gestión de la interferencia:** La gestión de interferencias en redes LPWAN es un desafío clave debido al uso frecuente del espectro no licenciado ISM, que, aunque reduce costos, incrementa la congestión y disminuye la confiabilidad en la transmisión de datos. La interferencia puede ser interna, cuando nodos de la misma red transmiten simultáneamente en frecuencias iguales o superpuestas (mitigada mediante técnicas de acceso al canal y diseño orientado a la escalabilidad), o externa, provocada por otras redes que comparten el mismo espectro. Para enfrentar este problema, se proponen diversas técnicas de optimización: el uso de radio cognitiva para detectar interferencias persistentes y cambiar dinámicamente a bandas menos congestionadas; el procesamiento espacial de señales para mejorar la relación señal-ruido (SNR) y eliminar interferencias prolongadas; el band steering, que desplaza la comunicación entre bandas como 2.4 GHz y 5 GHz según el nivel de congestión; el despliegue de múltiples estaciones base para aumentar la tasa de extracción de datos y fortalecer la señal en el receptor; y el uso de antenas inteligentes, que concentran la energía de transmisión hacia receptores

específicos y controlan la potencia de manera eficiente, mejorando así el SNR y reduciendo la interferencia. (Chilamkurthy et al., 2022).

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 hub o hub actúa como el único medio de comunicación entre los nodos de la topología, enrutando 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 hub) 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 LPWAN:

La arquitectura básica de una red LPWAN está compuesta esencialmente por dispositivos finales, estaciones de acceso o gateways, el núcleo de red (core o network server) y servidores de aplicación, incluyendo la conexión a internet y servicios en la nube para respaldo y procesamiento de datos (Chilamkurthy et al., 2022).

■ **Componentes principales de la arquitectura LPWAN**

- **Dispositivos finales (End Devices):** Su función principal es recopilar información relevante según la aplicación. Los datos capturados pueden enviarse a capas superiores

de la arquitectura para su procesamiento o para generar una respuesta según la implementación. La información recolectada se transmite comúnmente a la estación de acceso mediante un canal de radio dedicado, y posteriormente al backend de la red IoT (Chilamkurthy et al., 2022).

- **Estación de acceso / Gateway / Concentrador:** Proporciona el enlace radioeléctrico para la administración de dispositivos y el intercambio de tráfico. Garantiza la integridad del enlace de radio considerando métricas como la tasa de error de bit (BER), seguridad y calidad de servicio (QoS). La estación base se comunica con el gateway o concentrador, el cual en algunos casos es denominado núcleo (core) (Chilamkurthy et al., 2022).
- **Núcleo de red (Core):** Es responsable del control y enrutamiento del tráfico de usuario. Actúa como enlace entre la estación de acceso y la red IoT, además de funcionar como traductor entre los protocolos utilizados por la estación de acceso y aquellos soportados por la red. Dependiendo de la tecnología, el concentrador puede ofrecer capacidades de computación en el borde y almacenamiento de datos para reducir la carga en la nube, especialmente en aplicaciones que requieren asistencia en tiempo real y baja latencia. También puede proporcionar tratamiento prioritario, control de admisión robusto y soporte de movilidad en determinadas tecnologías LPWAN (Chilamkurthy et al., 2022).
- **Servidor LPWAN y servidores de aplicación:** El servidor LPWAN se encarga del aprovisionamiento, registro y operación de las entidades de la red. Puede compartir o ampliar funcionalidades esenciales del núcleo como el enrutamiento de tráfico, seguridad y manejo de prioridades. Los servidores de aplicación y la nube gestionan la base de datos que almacena los mensajes recibidos de los dispositivos conectados, y pueden analizar y actuar sobre los datos mediante técnicas de análisis de grandes volúmenes de información (Chilamkurthy et al., 2022).

■ Variantes arquitectónicas

Las LPWAN pueden organizarse bajo diferentes enfoques arquitectónicos, dependiendo de

la tecnología, el entorno de despliegue y los requerimientos de la aplicación:

- **Arquitectura híbrida con tecnologías de acceso externas:** En este esquema, tecnologías como ZigBee o Wi-Fi proporcionan conectividad primaria al dispositivo mediante su propia arquitectura. Posteriormente, el gateway de dicha red preliminar se interconecta con el punto de acceso de la LPWAN, generando una arquitectura mixta. Este enfoque es particularmente común en LPWAN de tipo celular (Chilamkurthy et al., 2022).
- **Arquitectura híbrida multi-LPWAN:** Permite que los dispositivos tengan acceso a múltiples redes LPWAN (por ejemplo, SigFox y LoRa). Cada LPWAN recopila datos de los dispositivos dentro de su zona de cobertura, con estaciones base instaladas según el área cubierta. El tráfico puede transmitirse hacia el núcleo y la nube a través del gateway LPWAN o de los nodos. En estas arquitecturas mixtas, las entidades del núcleo o del servidor de red gestionan funciones como autenticación, registro, asignación de recursos y control del tráfico (Chilamkurthy et al., 2022).
- **Arquitecturas LPWAN cognitivas:** Se investigan nuevas arquitecturas basadas en inteligencia artificial y aprendizaje automático para crear soluciones LPWAN cognitivas. Estas buscan soportar comunicaciones sofisticadas, gestionar aplicaciones IoT diversas y habilitar redes definidas por software. Permiten la coexistencia e interoperabilidad de múltiples tecnologías LPWAN, facilitando servicios inteligentes más eficientes en aplicaciones como ciudades inteligentes, Green IoT, monitoreo de salud, hogares inteligentes y conducción automatizada (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 1 % en EU 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, fabricas): 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.

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 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

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 precisión

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 (CO₂, O₂, CH₄) 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 en el sitio, 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).

6.1.4. Simulación de Redes LPWAN

Estado del Arte: 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 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
LoRaSim	Simulador de eventos discretos en Python.	Simula un único gateway para varios dispositivos finales (EDs). Incorpora efecto de captura y asignación de SF.	Packet Reception Ratio (PRR) y escalabilidad.
LoRaWANSim	Módulo para ns-3 basado en C++.	Soporta comunicación multicanal, multi-gateway y bidireccional. Incluye Clases A y C.	Consumo de energía, PDR y latencia.
FAD	Simulador de eventos discretos en Python.	Enfocado en gran escala. Introduce un modelo de canal realista y considera el efecto de captura.	PDR y consumo de energía.
Simu-LoRa	Implementado en MATLAB.	Diseñado para evaluar la capa física (PHY) y diferentes factores de dispersión (SF).	Eficiencia energética y PDR.

Cuadro 6.1: Comparativa de herramientas de simulación para redes LoRaWAN. Elaboración propia.

6.1.5. Agentes de Inteligencia Artificial

Inteligencia Artificial Generativa

La inteligencia artificial generativa corresponde a una clase de sistemas de IA diseñados para producir nuevo contenido, como texto, código o representaciones simbólicas a partir de patrones aprendidos en grandes volúmenes de datos. Este tipo de sistemas se basa principalmente en modelos de aprendizaje profundo, en particular modelos de lenguaje de gran escala (Large Language Models, LLM), entrenados sobre corpus extensos y heterogéneos de información (Feuerriegel et al., 2024).

La característica distintiva de la IA generativa es su capacidad de generalización, permitiéndole responder a tareas no vistas previamente mediante razonamiento contextual y generación probabilística de salidas plausibles, más que mediante reglas determinísticas (Feuerriegel et al., 2024). En este sentido, los sistemas generativos no “recuperan” respuestas exactas, sino que construyen resultados en función del contexto de entrada y del conocimiento internalizado durante el entrenamiento.

Asimismo, estos modelos presentan limitaciones inherentes, como sesgos aprendidos de los datos, ausencia de comprensión semántica en sentido humano y la imposibilidad de garantizar la corrección factual de sus salidas. (Feuerriegel et al., 2024) Por esta razón, los sistemas basados en IA generativa deben integrarse dentro de arquitecturas más amplias, donde sus resultados puedan ser evaluados, validados o complementados por otros componentes del sistema.

Agentes de Inteligencia Artificial

Los agentes de inteligencia artificial representan una evolución conceptual de los sistemas de IA tradicionales, al incorporar explícitamente nociones de autonomía, percepción, acción y orientación a objetivos. Un agente autónomo es una entidad computacional capaz de operar de manera independiente en entornos dinámicos, gestionando su estado interno y tomando decisiones sin intervención humana directa (He et al., 2025).

En el documento de *LLM-Based Multi-Agent Systems for Software Engineering* define como

atributos esenciales de un agente:

- Autonomía,
- Percepción del entorno,
- Capacidad de razonamiento orientado a objetivos,
- Interacción social con otros agentes o humanos, y
- Capacidad de aprendizaje y adaptación.

En el caso particular de los agentes basados en LLM, estos integran un modelo de lenguaje como núcleo cognitivo del agente, complementado con componentes de memoria, percepción y ejecución de acciones. De modo que estos agentes son sistemas que utilizan el LLM para razonar sobre observaciones, objetivos y retroalimentación, permitiéndoles planificar y actuar de forma iterativa (He et al., 2025).

No obstante, pese a sus capacidades, los agentes basados en LLM no poseen entendimiento real del entorno, sino que operan mediante inferencias estadísticas, lo que implica riesgos cuando se les otorga mayor autonomía sin mecanismos de control adecuados (He et al., 2025).

Sistemas Multiagente

Un sistema multiagente se define como un marco computacional compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan entre sí con el fin de resolver problemas complejos que no pueden ser abordados eficientemente por un único agente. Estos sistemas se caracterizan por la cooperación, coordinación y especialización funcional de sus agentes (He et al., 2025).

Con la integración de modelos de lenguaje, han surgido los sistemas multiagente basados en LLM, los cuales se componen de dos elementos principales:

- Una plataforma de orquestación, encargada de coordinar las interacciones.
- Un conjunto de agentes especializados, cada uno con roles y responsabilidades diferenciadas.

Estos sistemas permiten dividir tareas complejas en subtareas, asignarlas a agentes con diferentes roles y combinar los resultados mediante mecanismos de comunicación estructurada. Sin embargo, el estudio resalta que la investigación en este campo aún es incipiente y que existen desafíos abiertos relacionados con la escalabilidad, la coherencia global del sistema y la evaluación del desempeño colectivo (He et al., 2025).

Gobernanza de Agentes de Inteligencia Artificial

La gobernanza de agentes de IA surge como un campo emergente orientado a gestionar los riesgos, impactos y responsabilidades asociados con el despliegue de agentes autónomos. El documento *Agent Governance: A Field Guide* define la gobernanza de agentes como el conjunto de mecanismos técnicos, organizacionales, legales y sociales destinados a asegurar que los agentes operen de forma segura, transparente y alineada con los objetivos humanos (Kraprayoon et al., 2025).

El texto enfatiza que los agentes presentan desafíos particulares frente a otros sistemas de IA debido a su capacidad de tomar múltiples decisiones encadenadas a lo largo del tiempo, interactuar con herramientas externas y actuar con menor supervisión humana directa. Esto dificulta la atribución de responsabilidades y aumenta la complejidad del control del sistema (Kraprayoon et al., 2025).

Como respuesta, el documento propone una taxonomía de intervenciones de gobernanza, que incluye categorías como:

- Alineación,
- Control,
- Visibilidad,
- Seguridad y robustez, y
- Integración social

orientadas a mitigar riesgos y facilitar la supervisión del comportamiento de los agentes (Kraprayoon et al., 2025).

6.1.6. Agilismo, Kanban y Modelo de Prototipo

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. Uno de los marcos ágiles más populares es Kanban, el cual puede ser usado en múltiples contextos más allá del desarrollo de software (Grotenfelt, 2021).

De manera general, el enfoque ágil se caracteriza por ser iterativo e incremental, priorizando entregas parciales funcionales en lugar de un único producto final al término del proyecto. Asimismo, promueve la colaboración constante entre equipos multidisciplinarios, la participación activa del cliente, la adaptabilidad frente a cambios en los requisitos y la mejora continua de los procesos (Hossain, 2023). Estas características permiten que los equipos respondan con mayor flexibilidad a entornos dinámicos y a necesidades cambiantes.

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” (Grotenfelt, 2021).

En este marco, las tareas se representan mediante tarjetas que se desplazan a través de distintas columnas en un tablero Kanban, reflejando las etapas del proceso de desarrollo. Una de sus prácticas fundamentales es limitar el trabajo en progreso (WIP) para evitar la sobrecarga del equipo y mejorar la eficiencia del flujo. El ingreso de nuevas tareas al sistema depende de la capacidad disponible, lo que favorece una entrega continua y sostenible (Hossain, 2023). Kanban resulta especialmente adecuado en contextos donde existe un flujo constante de solicitudes o cambios, permitiendo gestionar el trabajo de manera dinámica.

Procesos centrales de Kanban

- Visualización del flujo de trabajo mediante el tablero Kanban.
- Limitación del WIP para evitar sobrecarga y mejorar la eficiencia del flujo.
- Gestión continua del flujo de trabajo basada en la capacidad disponible.
- Hacer explícitas las políticas del proceso
- Implementar ciclos de feedback.
- Mejora colaborativa.

(Hossain, 2023)

Características del Enfoque Ágil

Entre las principales características del enfoque ágil se destacan:

- Desarrollo iterativo e incremental.
- Colaboración constante entre equipos multidisciplinarios.
- Enfoque centrado en el cliente y en la entrega temprana de valor.
- Flexibilidad y adaptabilidad ante cambios en requisitos.
- Entrega continua de incrementos funcionales.
- Equipos autoorganizados y empoderados.
- Transparencia en el progreso y en la toma de decisiones.
- Mejora continua mediante retrospectivas y ciclos de retroalimentación.
- Uso de herramientas modernas como integración continua y pruebas automatizadas.

- Énfasis en software funcional sobre documentación extensa.

(Grotenfelt, 2021)

Ventajas del Modelo Ágil

Las metodologías ágiles presentan diversas ventajas, entre ellas:

- Alta flexibilidad frente a cambios.
- Mayor alineación con las necesidades del cliente.
- Entregas frecuentes de valor.
- Mitigación temprana de riesgos mediante iteraciones cortas.
- Mejora en la calidad del software gracias a prácticas continuas de prueba.
- Mayor colaboración y comunicación dentro del equipo.
- Transparencia en el estado del proyecto.
- Reducción de sobrecarga documental.

(Hossain, 2023)

Desventajas del Modelo Ágil

No obstante, el modelo ágil también presenta limitaciones:

- Menor predictibilidad en tiempos y costos.
- Complejidad en proyectos de gran escala.
- Requiere equipos con experiencia en prácticas ágiles.
- Posible aumento del alcance (scope creep) si no se gestiona adecuadamente.

- Dificultad para realizar estimaciones precisas al inicio del proyecto.
- Dependencia de la participación constante del cliente.
- Posibles desafíos en documentación formal para entornos regulados.

(Hossain, 2023)

Métricas Ágiles

Las métricas permiten inspeccionar el progreso y detectar oportunidades de mejora. En entornos ágiles, la medición del desempeño se orienta tanto al avance del producto como a la eficiencia del flujo de trabajo.

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.

(Polk, 2011)

Modelo de Prototipado (Prototyping Model)

El Modelo de Prototipado es un enfoque de desarrollo de software que se centra en la creación rápida de un modelo funcional o prototipo con el objetivo de recopilar retroalimentación temprana de los usuarios y refinar los requisitos antes de desarrollar el producto final. Este modelo se basa en la mejora iterativa del prototipo a partir de la interacción con los usuarios hasta alcanzar la funcionalidad y el diseño deseados (Hossain, 2023).

El objetivo principal del modelo es garantizar que el software final se alinee estrechamente con las necesidades y expectativas de los usuarios. Resulta especialmente útil cuando los requisitos

son poco claros, están sujetos a cambios o cuando se requiere una validación temprana por parte de los interesados. Además, favorece una mejor comunicación entre los stakeholders y el equipo de desarrollo, contribuyendo a la construcción de un producto más exitoso y orientado al usuario (Hossain, 2023).

Características del Modelo de Prototipado

El modelo de prototipado se distingue por las siguientes características:

- **Desarrollo Iterativo:** Se basa en ciclos repetitivos de creación de prototipos, recopilación de retroalimentación y refinamiento continuo. Cada iteración permite mejorar progresivamente el sistema hasta ajustarlo a los requisitos esperados (Hossain, 2023).
- **Desarrollo Rápido de Prototipos:** Se enfatiza la construcción rápida de modelos funcionales o maquetas, generalmente centradas en aspectos específicos de la interfaz o funcionalidad.
- **Enfoque Centrado en el Usuario:** Los usuarios participan activamente evaluando el prototipo y proporcionando retroalimentación, asegurando que el producto final refleje sus expectativas (Hossain, 2023).
- **Flexibilidad en los Requisitos:** Es adecuado para entornos donde los requisitos evolucionan, permitiendo modificaciones continuas a partir de la retroalimentación obtenida.
- **Mejora de la Comunicación:** La representación visual e interactiva del sistema facilita la comprensión entre desarrolladores y stakeholders, reduciendo ambigüedades y malentendidos (Hossain, 2023).

Ventajas del Modelo de Prototipado

Entre las principales ventajas del Modelo de Prototipado se encuentran:

- **Desarrollo Centrado en el Usuario:** Incrementa la probabilidad de satisfacción del usuario al involucrarlo activamente en el proceso (Hossain, 2023).

- **Clarificación de Requisitos:** Permite identificar y resolver ambigüedades tempranamente, generando especificaciones más precisas.
- **Reducción de Riesgos y Errores Costosos:** La detección temprana de fallos de diseño o usabilidad disminuye retrabajos posteriores (Hossain, 2023).
- **Aceleración del Desarrollo:** Las iteraciones rápidas posibilitan ajustes ágiles y avances simultáneos en diferentes componentes.
- **Mejora en la Comunicación:** El prototipo actúa como herramienta tangible de interacción entre los actores del proyecto (Hossain, 2023).

Desventajas del Modelo de Prototipado

A pesar de sus beneficios, el modelo presenta ciertas limitaciones:

- **Escalabilidad Limitada:** Puede resultar difícil de gestionar en proyectos grandes y complejos (Hossain, 2023).
- **Costos Potencialmente Elevados:** La construcción de múltiples prototipos y ciclos iterativos puede incrementar los recursos necesarios.
- **Funcionalidades Incompletas:** Los prototipos pueden no reflejar completamente la complejidad del sistema final.
- **Riesgo de Retrasos:** Las iteraciones sucesivas pueden extender el cronograma si no se controlan adecuadamente.
- **Posible Mala Interpretación:** Algunos usuarios pueden confundir el prototipo con el producto final, generando expectativas irreales (Hossain, 2023).

En conjunto, el Modelo de Prototipado constituye un enfoque iterativo, flexible y altamente centrado en el usuario, adecuado para contextos donde la definición inicial de requisitos es incierta y donde la validación temprana resulta crítica para el éxito del proyecto (Hossain, 2023).

6.2. Marco Conceptual

6.2.1. Agricultura 4.0

Integración de tecnologías emergentes (IoT, analítica de datos, automatización e inteligencia artificial) en sistemas productivos agrícolas para optimizar procedimientos, incrementar la productividad y fortalecer la sostenibilidad. En Colombia, este proceso implica no solo una transformación técnica, sino también cambios en la organización productiva, la formación de capital humano y la gobernanza del conocimiento agrícola (Shafi et al., 2019).

6.2.2. Brecha digital rural

Desigualdad en el acceso a tecnologías digitales entre agricultores tecnificados y pequeños productores tradicionales, manifestada no solo en infraestructura, sino también en alfabetización digital, acceso a plataformas inteligentes y capacidad de inversión en innovación tecnológica (Alvarez et al., 2022; Quiroz, 2023).

6.2.3. Agricultura de Precisión

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. Constituye un fundamento metodológico de la Agricultura 4.0 (Quiroz, 2023).

6.2.4. Internet de las Cosas (IoT) en agricultura

Componente clave de la Agricultura de Precisión que integra sensores ambientales, redes de comunicación de baja potencia y plataformas de visualización y análisis de datos, permitiendo transformar procesos tradicionales en sistemas de control inteligente (Chen et al., 2019; Flórez Martínez et al., 2021).

6.2.5. Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)

Categoría de tecnologías de comunicación inalámbrica diseñadas para resolver el compromiso entre bajo consumo de energía y largo alcance en conectividad IoT. Sus objetivos de diseño incluyen largo rango de transmisión, eficiencia energética, escalabilidad, bajo costo, calidad de servicio y gestión de interferencias (Chen et al., 2018; Diane et al., 2025).

6.2.6. Topologías de red LPWAN

Estructuras de conexión en redes LPWAN: la topología en estrella conecta todos los nodos a un gateway central, ofreciendo simplicidad y eficiencia energética pero con un punto único de fallo; la topología en malla permite rutas alternativas mediante nodos enrutadores, aumentando la redundancia pero con mayor latencia y consumo energético (Chilamkurthy et al., 2022).

6.2.7. Arquitectura LPWAN

Estructura funcional compuesta por dispositivos finales (nodos sensores), gateways, núcleo de red y servidores de aplicación. Puede ser básica (estrella), híbrida con tecnologías externas, multi-LPWAN (múltiples tecnologías coexistiendo) o cognitiva (con capacidades de inteligencia artificial para optimización dinámica) (Chilamkurthy et al., 2022).

6.2.8. Tecnologías LPWAN

Clasificadas según el espectro: en banda con licencia (3GPP) como LTE-M, NB-IoT y EC-GSM-IoT, que ofrecen alta confiabilidad y cobertura con costos de suscripción; en banda sin licencia (ISM) como SigFox, LoRaWAN, RPMA, Telensa, Weightless, DASH7 y NB-Fi, que permiten redes privadas con menor costo pero sujetas a interferencias y restricciones de duty cycle (Chilamkurthy et al., 2022).

6.2.9. Sensórica agrícola

Dispositivos que convierten señales físicas (humedad, temperatura, composición química, etc.) en datos digitales. Se clasifican en sensores químicos, ópticos, electromecánicos, acústicos y térmicos, y su selección debe considerar bajo consumo, precisión y durabilidad para aplicaciones IoT en agricultura (Alahmad et al., 2023).

6.2.10. Variables agronómicas

Parámetros medibles que definen el estado del cultivo y el entorno. Incluyen variables edáficas (humedad, nutrientes, pH, temperatura, conductividad eléctrica), ambientales (temperatura y humedad del aire, precipitación, viento, radiación solar) y del cultivo (salud vegetal, estrés, enfermedades, estado fenológico y rendimiento) (Alahmad et al., 2023; Pyingkodi et al., 2022).

6.2.11. Simulación de redes LPWAN

Herramientas computacionales para evaluar el rendimiento de redes a gran escala, como LoRaSim, LoRaWANSim, FAD y Simu-LoRa. Permiten medir métricas como Packet Delivery Ratio (PDR), consumo de energía, latencia y escalabilidad, facilitando el diseño y optimización de despliegues IoT (Almuhaya et al., 2022).

6.2.12. Inteligencia Artificial Generativa

Clase de sistemas de IA basados en modelos de aprendizaje profundo (especialmente Large Language Models) capaces de producir nuevo contenido (texto, código, representaciones simbólicas) mediante razonamiento contextual y generación probabilística, aunque con limitaciones como sesgos y falta de garantía factual (Feuerriegel et al., 2024).

6.2.13. Agente de Inteligencia Artificial

Entidad computacional autónoma que percibe su entorno, razona orientada a objetivos, interactúa con otros agentes o humanos, y aprende y se adapta. En agentes basados en LLM, el modelo de lenguaje actúa como núcleo cognitivo, complementado con memoria y capacidades de acción (He et al., 2025).

6.2.14. Sistema Multiagente

Marco computacional compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan (cooperan, se coordinan y se especializan) para resolver problemas complejos. En sistemas basados en LLM, incluye una plataforma de orquestación y agentes especializados que dividen tareas y combinan resultados (He et al., 2025).

6.2.15. Gobernanza de Agentes de IA

Conjunto de mecanismos técnicos, organizacionales, legales y sociales destinados a asegurar que los agentes autónomos operen de forma segura, transparente y alineada con objetivos humanos. Incluye categorías como alineación, control, visibilidad, seguridad y robustez, e integración social (Kraprayoon et al., 2025).

6.2.16. Metodologías ágiles

Conjunto de prácticas y marcos de trabajo caracterizados por el desarrollo iterativo e incremental, la colaboración constante, la adaptabilidad al cambio y la entrega continua de valor al cliente. Promueven equipos autoorganizados y transparencia en el progreso (Hossain, 2023).

6.2.17. Kanban

Marco ágil centrado en la visualización del flujo de trabajo mediante un tablero con columnas que representan etapas del proceso, la limitación del trabajo en progreso (WIP) y la gestión

continua basada en la capacidad disponible, mejorando la eficiencia del flujo y permitiendo entregas sostenibles (Grotenfelt, 2021; Hossain, 2023).

6.2.18. Modelo de Prototipado

Enfoque de desarrollo de software que consiste en la creación rápida de modelos funcionales o maquetas (prototipos) para recopilar retroalimentación temprana de los usuarios y refinar requisitos de forma iterativa. Es especialmente útil cuando los requisitos son inciertos o cambiantes, y favorece la comunicación con los stakeholders (Hossain, 2023).

Capítulo 7

Metodología

El desarrollo del proyecto se fundamenta en una metodología ágil basada en Kanban, combinada con un modelo de prototipado iterativo. Este enfoque permite gestionar el flujo de trabajo de manera continua, facilitar entregas incrementales y adaptar el sistema de acuerdo con la retroalimentación obtenida durante el proceso de desarrollo.

La selección de Kanban se justifica por el tamaño reducido del equipo de trabajo y la necesidad de mantener un control flexible y visual de las actividades, sin la imposición de roles rígidos. Por su parte, el modelo de prototipado permite construir versiones funcionales del sistema desde etapas tempranas, favoreciendo la validación progresiva de los requisitos y la mejora continua del producto.

7.1. Planificación inicial

La fase de planificación se desarrolla previo al inicio del ciclo de vida del software y tiene como propósito establecer las bases generales del proyecto. En esta etapa se definen:

- El alcance inicial del sistema.
- Los objetivos del proyecto.

- Los requisitos funcionales y no funcionales.
- Los actores involucrados.
- Los lineamientos metodológicos y técnicos.

Los resultados de esta fase alimentan el tablero Kanban y sirven como referencia durante el desarrollo, permitiendo ajustes cuando el proyecto lo requiera.

7.2. Gestión del Proyecto mediante Kanban

El proyecto se gestiona mediante un tablero Kanban, en el cual las actividades se organizan en función de su estado de avance. Cada tarea representa una unidad de trabajo que puede corresponder a análisis, diseño, desarrollo, pruebas o ajustes derivados del prototipado.

El uso de Kanban permite:

- Visualizar el progreso del proyecto.
- Priorizar actividades de manera dinámica.
- Facilitar entregas parciales y funcionales.
- Controlar el flujo de trabajo durante todo el desarrollo.

7.3. Ciclo de Vida del Desarrollo con Prototipado

El ciclo de vida del sistema se desarrolla de manera iterativa a través de prototipos, siguiendo las fases que se describen a continuación:

7.3.1. Análisis

En esta fase se recopilan y analizan los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema. Se documentan las necesidades del usuario, se refinan y detallan las historias de usuario definidas

en la planificación inicial. comprender interacciones complejas.

7.3.2. Diseño

Se realiza el diseño general del sistema, incluyendo la estructura de sus componentes y la propuesta de interfaz de usuario. Esta fase busca definir cómo interactúan los elementos del sistema y cómo será la experiencia del usuario.

7.3.3. Implementación

Corresponde a la construcción del prototipo mediante el desarrollo del código necesario para materializar las funcionalidades definidas. Cada implementación da lugar a una versión funcional del sistema.

7.3.4. Pruebas

Se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento del prototipo, identificar errores y validar que las funcionalidades desarrolladas cumplan con los requerimientos establecidos.

7.3.5. Validación y Retroalimentación

El prototipo es evaluado con el fin de identificar oportunidades de mejora. La retroalimentación obtenida se traduce en nuevas tareas o ajustes que ingresan nuevamente al tablero Kanban, dando inicio a una nueva iteración. La retroalimentación y puntos clave obtenidos en la reunión con el usuario final se plasmarán en un acta con un formato claro y preciso.

Resumen del ciclo: Este ciclo se repite tantas veces como sea necesario hasta obtener un prototipo final que cumpla con los objetivos del proyecto.

7.4. Despliegue y Mantenimiento

Las actividades de despliegue y mantenimiento se consideran posteriores al ciclo de desarrollo. El sistema podrá ser desplegado de manera incremental, permitiendo la publicación de versiones funcionales sin afectar su estabilidad. Posteriormente, se realizarán tareas de mantenimiento correctivo y evolutivo según sea necesario.

Capítulo 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 model de inteligencia artificial generativa capaces de usar datos históricos, documentación relevante y herramientas (tools), 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 (fase 7.3). 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 documentación en actas estructuradas del feedback del usuario final, 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 bases de conocimiento 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.

8.2.6. Uso de planes gratuitos y APIs con acceso limitado

El desarrollo y despliegue del sistema se realizará utilizando planes gratuitos de servicios externos, tales como APIs de inteligencia artificial y plataformas de despliegue, lo que puede imponer restricciones en rendimiento, escalabilidad y disponibilidad debido a las limitaciones presupuestales.

8.3. Productos y Resultados de Investigación

A continuación se presentan los tres productos principales que resultarán del proyecto de investigación.

Producto	Descripción	Cantidad
Documento final de investigación (Trabajo de grado)	Informe que consolida todo el proceso investigativo: marco teórico, metodología, resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro. Constituye el requisito para optar al título de Ingeniero de Sistemas.	1
Informe final de investigación	Documento técnico que detalla los resultados, análisis y conclusiones del proyecto, con énfasis en los aportes metodológicos y técnicos.	1
Aplicación web	Plataforma funcional para el análisis y simulación visual de arquitecturas de redes LPWAN con agentes de IA generativa, orientada a la toma de decisiones en agricultura de precisión.	1
Póster científico	Material gráfico de divulgación que sintetiza los objetivos, metodología, resultados y conclusiones del proyecto para eventos académicos.	1
Evento científico con componente de apropiación	Participación en congresos o jornadas académicas para socializar los resultados y promover la apropiación social del conocimiento.	1

Cuadro 8.1: Productos y resultados de investigación esperados. Elaboración propia.

Capítulo 9

Presupuesto

Los siguientes valores se representan en pesos colombianos (COP) para el año 2026.

Personal	Horas/Semaman	Valor Hora	Valor Mes	Valor Semestre
Estudiante Investigador 1	20	\$12.400	\$1.000.000	\$6.000.000
Estudiante Investigador 2	20	\$12.500	\$1.000.000	\$6.000.000
Codirector (MsC)	4	\$100.000	\$1.600.000	\$9.600.000
Director (PhD)	4	\$500.000	\$8.000.000	\$48.000.000
TOTAL RRHH				\$69.600.000

Cuadro 9.1: Presupuesto detallado de Recursos Humanos. Elaboración propia.

Elemento (Grupo LIDER)	Valor Unidad	Cantidad	Valor Semestre
Uso de computadores	\$200.000	2	\$2.400.000
Servicio de conectividad	\$125.000	2	\$1.500.000
TOTAL FÍSICO			\$3.900.000

Cuadro 9.2: Presupuesto de Recursos Físicos e Infraestructura. Elaboración propia.

Recurso Digital	Costo (COP)
Servicios de cómputo en la nube	\$0
Servicios de almacenamiento en la nube	\$0
API de LLM (Modelos de Lenguaje)	\$0
Servicio de almacenamiento de contenido estático	\$0
TOTAL SOFTWARE	\$0

Cuadro 9.3: Recursos de Software y Servicios Cloud bajo modalidad de capa gratuita. Elaboración propia.

Rubro	Valor Total
Recurso Humano	\$69.600.000
Recurso Físico	\$3.900.000
Software y Cloud	\$0
TOTAL PROYECTO	\$73.500.000

Cuadro 9.4: Consolidado general del presupuesto del proyecto. Elaboración propia.

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.
- 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., Cenkeramaddi, 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>

- 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.
- Feuerriegel, S., Hartmann, J., Janiesch, C., & Zschech, P. (2024). Generative ai. *Business & Information Systems Engineering*, 66(1), 111-126.
- 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.
- He, J., Treude, C., & Lo, D. (2025). LLM-Based Multi-Agent Systems for Software Engineering: Literature Review, Vision, and the Road Ahead. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 34(5), 1-30.
- Hossain, M. I. (2023). Software development life cycle (SDLC) methodologies for information systems project management. *International Journal for Multidisciplinary Research*.
- Kraprayoon, J., Williams, Z., & Fayyaz, R. (2025). Ai agent governance: A field guide. *arXiv preprint arXiv:2505.21808*.
- Polk, R. (2011). Agile and Kanban in coordination. *2011 agile conference*, 263-268.
- Pyingkodi, M., Thenmozhi, K., Nanthini, K., Karthikeyan, M., Palarimath, S., Erajavignesh, V., & Kumar, G. B. A. (2022). Sensor based smart agriculture with IoT technologies: a review. *2022 international conference on computer communication and informatics (ICCCI)*, 1-7.
- Quiroz, A. D. T. (2023). Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores. *Informador técnico*, 87(2), 195-211.
- 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.