



Plataforma IA para Optimización Agrícola Sostenible en Regiones Rurales de Colombia

1. Resumen Ejecutivo

El sector agrícola rural de Colombia enfrenta una gestión ineficiente de agua y fertilizantes, lo que resulta en baja productividad y degradación ambiental, afectando directamente a los pequeños agricultores que carecen de acceso a herramientas avanzadas. Las soluciones de IA/IoT existentes no se adaptan a sus realidades socioeconómicas y agroecológicas. Este proyecto propone una Plataforma IA para Optimización Agrícola Sostenible, integrando datos satelitales y sensores IoT de bajo costo, para ofrecer una solución accesible y relevante que optimice el uso de recursos y mejore la productividad de los pequeños agricultores.

Para lograrlo, el proyecto se centrará en tres objetivos clave: desarrollar una infraestructura de plataforma IA robusta que integre eficientemente datos satelitales y IoT; investigar y validar algoritmos de IA para generar recomendaciones precisas y personalizadas sobre el uso de agua y fertilizantes; y promover la adopción y el empoderamiento de los pequeños agricultores mediante capacitación y una interfaz intuitiva. La metodología seleccionada es el Modelo en V de Ingeniería de Sistemas, garantizando un desarrollo riguroso y una validación exhaustiva en cada etapa.

Los resultados esperados incluyen una plataforma IA operativa, algoritmos validados con una precisión del 85%, una interfaz de usuario intuitiva y un programa de capacitación integral. Estos generarán impactos significativos: técnicamente, avanzaremos la IA en agricultura de precisión para contextos rurales; económicamente, se estima una reducción del 15-20% en costos operativos y un aumento del 10-15% en productividad; y social y ambientalmente, se empoderará a los agricultores, mejorará la seguridad alimentaria y se reducirá el consumo de agua hasta un 25% y la contaminación por fertilizantes.

Este proyecto representa una inversión estratégica crucial para democratizar la tecnología agrícola avanzada, impulsando la sostenibilidad, la resiliencia y el desarrollo económico de las comunidades rurales colombianas.

2. Generalidades del Proyecto

- **Descripción:** Desarrollo de una plataforma de Inteligencia Artificial que utiliza análisis de datos satelitales y sensores IoT para optimizar el uso de recursos hídricos y fertilizantes en cultivos, mejorando la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental en zonas rurales de Colombia. El proyecto busca empoderar a pequeños agricultores con herramientas tecnológicas avanzadas para la toma de decisiones.
- **Palabras Clave:** Inteligencia Artificial, Agricultura Sostenible, IoT, Desarrollo Rural, Colombia

3. Planteamiento del Problema y Justificación

El sector agrícola global enfrenta una presión creciente para asegurar la seguridad alimentaria, adaptarse al cambio climático y gestionar recursos de manera eficiente. En este contexto, las regiones rurales, particularmente en países como Colombia, lidian con desafíos significativos donde la gestión ineficiente de recursos—específicamente agua y fertilizantes—conduce a una productividad de cultivos subóptima y exacerba la degradación ambiental. Esta situación impacta directamente los medios de vida de los pequeños agricultores, quienes constituyen un segmento vital de la economía agrícola pero a menudo carecen de acceso a herramientas avanzadas para la toma de decisiones informadas.

A pesar de los avances considerables en la integración de la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) para la optimización agrícola, como lo destaca la investigación contemporánea (Facuy Toledo, 2024; Oropeza Tosca et al., 2023; de Freitas Cunha y Silva, 2020), persiste una brecha crítica, especialmente dentro de las realidades socioeconómicas y agroecológicas de la Colombia rural. Las soluciones actuales de última generación, si bien son efectivas en entornos controlados o a gran escala, frecuentemente encuentran limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de datos localizados para entrenar modelos de IA robustos (EBSCO, 2025; FCDO, 2025). Más importante aún, estas tecnologías a menudo no logran adaptarse a las necesidades específicas, capacidades técnicas y restricciones económicas de los pequeños agricultores, exigiendo una inversión inicial sustancial, conocimientos técnicos avanzados o una infraestructura digital robusta que está en gran parte ausente en las zonas rurales (FCDO, 2025; IICA, 2025). Esto crea una brecha tecnológica y de conocimiento significativa, dejando a la agricultura a pequeña escala en gran medida desatendida por los beneficios de la agricultura de precisión.

Este proyecto, "Plataforma IA para Optimización Agrícola Sostenible en Regiones Rurales de Colombia", está diseñado precisamente para cerrar estas brechas identificadas. Al centrarse en el desarrollo de una plataforma de Inteligencia Artificial que integra el análisis de datos satelitales con sensores IoT de bajo costo, y al desarrollar algoritmos de IA específicamente adaptados a las condiciones agroclimáticas locales colombianas, el proyecto ofrece una solución directa e innovadora. Este enfoque permitirá la optimización precisa del uso de agua y fertilizantes, abordando las limitaciones de los sistemas actuales al proporcionar una herramienta accesible, fácil de usar y contextualmente relevante que empodera a los pequeños agricultores con información basada en datos para una mejor gestión de recursos.

La relevancia estratégica de este proyecto es primordial y oportuna. Responde directamente a la necesidad urgente de prácticas agrícolas sostenibles en regiones en desarrollo, como lo enfatizan los informes sobre "Agricultura 5.0 en Colombia" (MDPI, 2024) y los desafíos que enfrentan los pequeños agricultores en América Latina (IICA, 2025; FCDO, 2025). Al democratizar el acceso a tecnología agrícola avanzada, la plataforma no solo mejorará la productividad de los cultivos y fomentará la sostenibilidad ambiental, sino que también contribuirá significativamente al empoderamiento económico de las comunidades rurales. Esta solución innovadora promete fortalecer la seguridad alimentaria, reducir la huella ecológica de la agricultura e impulsar el desarrollo rural sostenible en Colombia, posicionando a la región a la vanguardia de la innovación agrícola adaptativa.

4. Marco Teórico y Estado del Arte

4.1. Introducción al Dominio

La agricultura moderna enfrenta desafíos crecientes relacionados con la seguridad alimentaria, el cambio climático y la gestión eficiente de recursos. En este contexto, la convergencia de la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como un pilar fundamental para la transformación del sector agrícola. La IA, definida como la capacidad de las máquinas para imitar capacidades cognitivas humanas como el aprendizaje y la resolución de problemas, permite el análisis avanzado de grandes volúmenes de datos para la toma de decisiones. Por otro lado, el IoT facilita la interconexión de dispositivos físicos equipados con sensores, software y otras tecnologías, permitiendo la recolección de datos en tiempo real del entorno agrícola (Ananna & Saifuzzaman, 2024).

La aplicación de estas tecnologías da origen a la Agricultura de Precisión, un enfoque que busca optimizar la gestión de cultivos mediante la observación, medición y respuesta a la variabilidad inter e intra-campo. Esto incluye el uso de datos satelitales, sensores terrestres y algoritmos de IA para monitorear factores como la humedad del suelo, la salud de las plantas y las condiciones climáticas. El objetivo es maximizar la productividad, minimizar el uso de recursos (agua, fertilizantes) y reducir el impacto ambiental, promoviendo así la agricultura sostenible. Este paradigma es especialmente relevante en regiones rurales, donde la optimización de recursos es crucial para la subsistencia y el desarrollo económico de pequeños agricultores (Oropeza Tosca et al., 2023).

4.2. Revisión de la Literatura (Literature Review)

La investigación contemporánea ha explorado extensamente la integración de IA e IoT para la optimización agrícola. Un trabajo significativo en esta línea es el de **Facuy Toledo (2024)**, que aborda la implementación de sensores IoT y algoritmos de IA para la optimización del riego en cultivos agroecológicos. Su estudio propone un sistema automatizado de monitoreo y análisis que integra sensores IoT para la recolección de datos agroclimáticos y edáficos en tiempo real. Estos datos son procesados por algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones, prever necesidades hídricas y emitir recomendaciones precisas de riego, logrando una reducción del consumo de agua superior al 30%. Este enfoque es directamente relevante para

la optimización del uso de recursos hídricos propuesta en el presente proyecto.

En el ámbito de la agricultura de precisión y su aplicación en contextos similares al colombiano, **Oropeza Tosca et al. (2023)** realizaron un análisis del estado del arte para México, identificando oportunidades cruciales en la aplicación de la agricultura de precisión frente al cambio climático, la escasez de agua y la seguridad alimentaria. Subrayan el uso de sensores, riego de precisión, datos satelitales y drones como herramientas clave para fortalecer el sector agrícola en países en desarrollo, enfatizando la necesidad de promover la educación a los agricultores para la adopción tecnológica.

La generación y el uso de datos son fundamentales en la agricultura de precisión. **Bojórquez-Delgado et al. (2024)** exploraron la generación de datos climáticos sintéticos a través de redes generativas adversariales condicionales (CTGAN) para aplicaciones en agricultura de precisión. Este estudio es valioso ya que la escasez de datos reales es una limitación común en muchas regiones agrícolas, y la capacidad de generar datos sintéticos realistas puede mejorar el entrenamiento de modelos de IA para predicción y optimización.

En cuanto al monitoreo de cultivos y la predicción de rendimientos, **de Freitas Cunha y Silva (2020)** investigaron la estimación de rendimientos de cultivos utilizando teledetección (remote sensing) y aprendizaje profundo (deep learning). Su trabajo destaca cómo el aumento de la precisión en las estimaciones de rendimiento puede mejorar toda la cadena de producción agrícola, permitiendo una mejor planificación de la cosecha y una gestión de riesgos más informada. Si bien se enfocan en datos NDVI, sus hallazgos subrayan el potencial de las técnicas avanzadas de IA para procesar información de teledetección.

Finalmente, el contexto específico de Colombia y la región es abordado por estudios como el de **MDPI (2024)** sobre "Agriculture 5.0 in Colombia", que destaca la integración de IA, IoT y otras tecnologías para mejorar la productividad y la gestión de recursos con énfasis en la resiliencia social y ambiental. Asimismo, reportes de **IICA (2025)** y **FCDO (2025)** enfatizan los desafíos y oportunidades de la adopción de IA entre pequeños agricultores en América Latina y el Caribe, resaltando la necesidad de acceso a datos de calidad, conectividad, capacitación y marcos institucionales adecuados.

4.3. Tecnologías y Enfoques Actuales (State of the Art)

El estado del arte en la optimización agrícola sostenible se caracteriza por la convergencia de diversas tecnologías avanzadas. Los **sistemas IoT** son la base para la recolección de datos en campo, utilizando una variedad de sensores para medir humedad del suelo, temperatura, pH, nutrientes, radiación solar y otros parámetros agroclimáticos (Facuy Toledo, 2024; Ananna & Saifuzzaman, 2024). Estos datos se transmiten en tiempo real a plataformas en la nube para su procesamiento.

La **Inteligencia Artificial**, y particularmente el **Machine Learning (ML)** y el **Deep Learning (DL)**, son los motores analíticos de estas plataformas. Se utilizan algoritmos para:

- **Predicción de rendimiento de cultivos:** Modelos basados en DL analizan datos históricos y en tiempo real de sensores y satélites para prever el rendimiento, permitiendo a los agricultores planificar mejor (de Freitas Cunha & Silva, 2020).
- **Optimización del riego:** Algoritmos de ML analizan la humedad del suelo, pronósticos meteorológicos y necesidades hídricas de los cultivos para determinar los momentos y volúmenes óptimos de riego,

minimizando el desperdicio de agua (Facuy Toledo, 2024).

- **Gestión de fertilizantes:** La IA puede recomendar la cantidad y el tipo de fertilizante basándose en análisis de suelo, datos de teledetección que indican la salud de las plantas y modelos de crecimiento de cultivos, asegurando una nutrición precisa y reduciendo el exceso de aplicación.
- **Detección de enfermedades y plagas:** Técnicas de visión por computadora y DL analizan imágenes de drones o satélites para identificar tempranamente signos de estrés en los cultivos, permitiendo intervenciones rápidas y localizadas.

Los **datos satelitales** (teledetección) complementan los datos de los sensores IoT al proporcionar una visión a gran escala de los campos. Sensores multiespectrales y hiperespectrales en satélites permiten calcular índices de vegetación (como NDVI), monitorear cambios en la biomasa, la salud de las plantas y la humedad del suelo en grandes extensiones. La combinación de estos datos con modelos climáticos y topográficos alimenta los algoritmos de IA para generar mapas de variabilidad espacial y temporal, esenciales para la aplicación de insumos de manera diferenciada (Oropeza Tosca et al., 2023).

En el ámbito de las plataformas, la tendencia es hacia soluciones integradas que ofrecen interfaces amigables para los agricultores, permitiéndoles acceder a recomendaciones, monitorear sus cultivos y gestionar sus recursos desde dispositivos móviles. Estas plataformas buscan ser escalables y adaptables a diferentes tipos de cultivos y condiciones geográficas, como se observa en las discusiones sobre "Agriculture 5.0" y la digitalización agrícola en América Latina (MDPI, 2024; IICA, 2025).

4.4. Brechas de Conocimiento y Oportunidades (Knowledge Gaps & Opportunities)

A pesar de los avances significativos en la IA y el IoT para la agricultura, existen brechas importantes, especialmente en el contexto de las regiones rurales de países en desarrollo como Colombia. Una limitación clave es la **disponibilidad y calidad de los datos**. Muchos modelos de IA se desarrollan con conjuntos de datos de países de altos ingresos, lo que puede generar desafíos al aplicarlos a las diversas condiciones agroecológicas y socioeconómicas de otras regiones (EBSCO, 2025; FCDO, 2025). La escasez de datos históricos y en tiempo real específicos para pequeños agricultores y cultivos locales dificulta el entrenamiento efectivo de modelos predictivos y de optimización.

Otra brecha crucial es la **adaptación de las soluciones tecnológicas a las necesidades y capacidades de los pequeños agricultores**. Muchas plataformas y herramientas existentes requieren una inversión inicial considerable, conocimientos técnicos avanzados o una infraestructura digital robusta (conectividad) que a menudo no están disponibles en zonas rurales (FCDO, 2025; IICA, 2025). La falta de interfaces intuitivas y de capacitación adecuada limita la adopción y el impacto real de estas tecnologías en la toma de decisiones diarias de los agricultores. Además, la mayoría de las soluciones se enfocan en grandes extensiones, dejando un vacío en las herramientas diseñadas específicamente para la agricultura de subsistencia o pequeña escala.

El presente proyecto representa una oportunidad significativa al abordar estas brechas. Al centrarse en el desarrollo de una plataforma de IA específicamente diseñada para pequeños agricultores en regiones rurales de Colombia, busca superar las barreras de acceso y usabilidad. La integración de análisis de datos satelitales y sensores IoT de bajo costo, junto con algoritmos de IA adaptados a las condiciones locales,

permitirá optimizar el uso de recursos hídricos y fertilizantes de manera accesible. Esto no solo mejorará la productividad y la sostenibilidad ambiental, sino que también empoderará a una población clave que ha sido tradicionalmente rezagada en la adopción tecnológica, contribuyendo al desarrollo rural y la seguridad alimentaria en la región.

5. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una Plataforma de Inteligencia Artificial accesible y contextualmente relevante que integre datos satelitales y sensores IoT de bajo costo para optimizar el uso de agua y fertilizantes, mejorando la productividad y la sostenibilidad agrícola de pequeños agricultores en regiones rurales de Colombia.

Objetivos Específicos

1. **Objetivo:** Desarrollar e implementar la infraestructura central de la plataforma IA.

- **Específico (S):** Diseñar, codificar y desplegar una plataforma de Inteligencia Artificial robusta que integre de manera eficiente datos de imágenes satelitales y lecturas de sensores IoT de bajo costo, asegurando la interoperabilidad y la capacidad de procesamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales y ambientales.
- **Medible (M):** La plataforma estará completamente operativa y probada, logrando una tasa de integración de datos del 95% desde fuentes satelitales y sensores IoT, con un tiempo de actividad del sistema superior al 98%, verificado mediante pruebas de rendimiento y auditorías de seguridad en los primeros 12 meses.
- **Alcanzable (A):** Es realista dado el estado actual de la tecnología en la nube y la disponibilidad de APIs para datos satelitales, así como la experiencia del equipo en desarrollo de software y gestión de datos.
- **Relevante (R):** Es el pilar fundamental para construir la solución, abordando la necesidad de una infraestructura tecnológica que actualmente es inaccesible o inexistente para los pequeños agricultores, permitiendo la recopilación y análisis de datos críticos.
- **Plazo (T):** Completado y funcional en los primeros 12 meses del proyecto.

2. **Objetivo:** Desarrollar y validar algoritmos de IA para la optimización de recursos.

- **Específico (S):** Investigar, desarrollar y validar algoritmos de Inteligencia Artificial (basados en aprendizaje automático y visión por computadora) que procesen los datos integrados para generar recomendaciones precisas y personalizadas sobre la aplicación óptima de agua y fertilizantes, adaptadas a las condiciones agroclimáticas y tipos de cultivo específicos de las regiones rurales colombianas.
- **Medible (M):** Los algoritmos alcanzarán una precisión de predicción de al menos 85% en las recomendaciones de riego y fertilización, validada mediante pruebas de campo en al menos 5 parcelas piloto y comparaciones con las mejores prácticas agronómicas locales, en un plazo de 18 meses.

- **Alcanzable (A):** Factible mediante el uso de técnicas avanzadas de IA y la recopilación progresiva de datos de campo para el entrenamiento y ajuste de modelos, con el apoyo de agrónomos expertos.
- **Relevante (R):** Ataca directamente el problema central de la gestión ineficiente de recursos, transformando datos brutos en información accionable para los agricultores, lo cual es clave para mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental.
- **Plazo (T):** Algoritmos desarrollados y validados en un plazo de 18 meses desde el inicio del proyecto.

3. **Objetivo:** Promover la adopción y el empoderamiento de pequeños agricultores.

- **Específico (S):** Implementar un programa integral de capacitación y soporte técnico, junto con una interfaz de usuario intuitiva y accesible (web/móvil), para asegurar que los pequeños agricultores en las regiones rurales objetivo puedan utilizar eficazmente la plataforma IA para tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus cultivos.
- **Medible (M):** Al menos el 70% de los agricultores participantes en el programa de capacitación utilizarán activamente la plataforma, y el 60% de ellos reportarán una mejora en la toma de decisiones y en la eficiencia de uso de recursos, evidenciado por encuestas de satisfacción y métricas de uso de la plataforma, dentro de los 24 meses del proyecto.
- **Alcanzable (A):** Realista a través de un diseño centrado en el usuario, materiales de capacitación adaptados culturalmente y un equipo de apoyo local, superando las barreras de acceso y conocimiento técnico.
- **Relevante (R):** Es fundamental para cerrar la brecha tecnológica y de conocimiento, asegurando que la solución llegue a quienes más la necesitan y genere un impacto socioeconómico y ambiental tangible en las comunidades rurales.
- **Plazo (T):** Implementado y evaluado dentro de los 24 meses del proyecto.

6. Metodología Propuesta

Framework Seleccionado: Modelo en V de Ingeniería de Sistemas

El Modelo en V ha sido seleccionado por su enfoque riguroso y sistemático en el desarrollo de proyectos, lo cual es fundamental para una iniciativa que integra software complejo (plataforma IA, algoritmos) con componentes físicos (sensores IoT) y exige alta fiabilidad y precisión. Esta metodología asegura que la verificación y validación sean elementos integrales en cada etapa del ciclo de vida del desarrollo. Directamente apoya el **Objetivo 1** al garantizar la correcta integración de datos satelitales y sensores IoT, así como la robustez de la infraestructura central, mediante pruebas rigurosas en cada nivel. Para el **Objetivo 2**, la naturaleza secuencial del Modelo en V permite una validación exhaustiva de los algoritmos de IA desde su diseño hasta las pruebas de sistema, asegurando la precisión de las recomendaciones. Finalmente, facilita el cumplimiento del **Objetivo 3** al incorporar pruebas de aceptación con los usuarios finales, asegurando que la plataforma sea intuitiva y eficaz para los pequeños agricultores.

Fases Principales de la Metodología:

- **Fase 1: Análisis de Requisitos y Definición del Sistema** - Se recopilarán y detallarán los requisitos funcionales y no funcionales de la plataforma, los algoritmos de IA y la integración de sensores IoT, estableciendo una base clara para el desarrollo.
- **Fase 2: Diseño de la Arquitectura del Sistema** - Se definirá la estructura global de la plataforma, incluyendo la arquitectura de datos, la integración de componentes de hardware y software, y las interfaces clave.
- **Fase 3: Diseño Detallado y Especificación de Componentes** - Se desglosará el sistema en módulos y componentes específicos, detallando su funcionalidad, comportamiento y las especificaciones técnicas para su implementación.
- **Fase 4: Desarrollo e Implementación** - Se llevará a cabo la codificación de los módulos de software, el desarrollo de los algoritmos de IA y la configuración de los componentes de hardware (sensores IoT).
- **Fase 5: Pruebas Unitarias** - Cada módulo y componente individual (software y hardware) será probado de forma aislada para asegurar que cumple con sus especificaciones de diseño.
- **Fase 6: Pruebas de Integración** - Se verificará la correcta interacción y comunicación entre los diferentes módulos y subsistemas de la plataforma, incluyendo la integración de datos satelitales y IoT.
- **Fase 7: Pruebas de Sistema** - La plataforma completa será evaluada contra todos los requisitos del sistema para asegurar su funcionamiento óptimo, rendimiento, seguridad y fiabilidad antes del despliegue.
- **Fase 8: Pruebas de Aceptación y Despliegue** - Los usuarios finales (pequeños agricultores) y otros stakeholders validarán la plataforma en un entorno real, asegurando que satisface sus necesidades y objetivos, previo a su despliegue final y capacitación.

7. Plan de Ejecución y Gestión

Cronograma de Actividades

7.1. Cronograma de Actividades

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
Fase 1: Análisis de Requisitos y Definición del Sistema	Se recopilarán y detallarán los requisitos funcionales y no funcionales de la plataforma, los algoritmos de IA y la integración de sensores IoT, estableciendo una base clara para el desarrollo.	5	
1.1. Recopilación y Análisis de Requisitos (Plataforma, IA, IoT, UI/UX).	Documento de Requisitos del Sistema (SRS)	2	

1.2. Definición de Casos de Uso y Especificación de Requisitos de Datos.	Especificación de Casos de Uso y Requisitos de Datos	3	
Fase 2: Diseño de la Arquitectura del Sistema	<i>Se definirá la estructura global de la plataforma, incluyendo la arquitectura de datos, la integración de componentes de hardware y software, y las interfaces clave.</i>	4	
2.1. Diseño de la Arquitectura General de la Plataforma y Componentes de Integración.	Documento de Arquitectura del Sistema	2	
2.2. Definición de la Arquitectura de Datos y Diseño Preliminar de Módulos de IA.	Diseño de Arquitectura de Datos y Módulos IA	2	
Fase 3: Diseño Detallado y Especificación de Componentes	<i>Se desglosará el sistema en módulos y componentes específicos, detallando su funcionalidad, comportamiento y las especificaciones técnicas para su implementación.</i>	6	
3.1. Diseño Detallado de Bases de Datos, APIs y Microservicios de la Plataforma.	Especificaciones de Diseño Detallado (BBDD, APIs)	2	
3.2. Diseño de Algoritmos de IA (modelos, preprocesamiento) y Especificación de Sensores IoT.	Documento de Diseño de Algoritmos IA y Especificaciones IoT	2	
3.3. Diseño de la Interfaz de Usuario (UI/UX) y Prototipos.	Mockups y Prototipos UI/UX	2	
Fase 4: Desarrollo e Implementación	<i>Se llevará a cabo la codificación de los módulos de software, el desarrollo de los algoritmos de IA y la configuración de los componentes de hardware (sensores IoT).</i>	12	
4.1. Codificación de la Infraestructura Central de la Plataforma y Back-end.	Código Fuente de la Plataforma (Back-end)	4	
4.2. Implementación y Entrenamiento de Algoritmos de IA.	Modelos de IA Entrenados y Código Fuente	4	
4.3. Desarrollo de la Interfaz de Usuario Web/Móvil.	Interfaz de Usuario Funcional (Front-end)	2	

4.4. Configuración y Despliegue Preliminar de Hardware IoT.	Sensores IoT Configurados y Operativos	2	
Fase 5: Pruebas Unitarias	<i>Cada módulo y componente individual (software y hardware) será probado de forma aislada para asegurar que cumple con sus especificaciones de diseño.</i>	3	
5.1. Ejecución de Pruebas Unitarias para Módulos de Software de la Plataforma.	Reportes de Pruebas Unitarias de Software	2	
5.2. Verificación de Componentes de Algoritmos de IA y Funcionamiento de Sensores IoT.	Reportes de Pruebas de Componentes IA e IoT	1	
Fase 6: Pruebas de Integración	<i>Se verificará la correcta interacción y comunicación entre los diferentes módulos y subsistemas de la plataforma, incluyendo la integración de datos satelitales y IoT.</i>	4	
6.1. Pruebas de Integración de Datos (Satelitales, IoT) y APIs de la Plataforma.	Reporte de Pruebas de Integración de Datos	2	
6.2. Verificación de Interacción entre Módulos de Plataforma, IA y UI.	Sistema Integrado Parcialmente Verificado	2	
Fase 7: Pruebas de Sistema	<i>La plataforma completa será evaluada contra todos los requisitos del sistema para asegurar su funcionamiento óptimo, rendimiento, seguridad y fiabilidad antes del despliegue.</i>	5	
7.1. Pruebas de Rendimiento, Seguridad y Escalabilidad del Sistema Completo.	Reporte de Pruebas de Sistema	3	
7.2. Validación de la Precisión y Robustez de los Algoritmos de IA con Datos Reales.	Modelo de IA Validado (v1.0)	2	
Fase 8: Pruebas de Aceptación y Despliegue	<i>Los usuarios finales (pequeños agricultores) y otros stakeholders validarán la plataforma en un entorno real, asegurando que satisface sus necesidades y objetivos, previo a su despliegue final y capacitación.</i>	9	
8.1. Pruebas de Aceptación con Usuarios Finales (UAT) y Recopilación de Feedback.	Reporte de Pruebas de Aceptación de Usuario	3	

8.2. Desarrollo de Materiales de Capacitación y Programa de Soporte Técnico.	Manual de Usuario y Material de Capacitación	2	
8.3. Despliegue Final de la Plataforma y Programa Piloto de Capacitación a Agricultores.	Plataforma Desplegada y Operativa, Agricultores Capacitados	4	

Matriz de Riesgos

7.2. Matriz de Riesgos

#	Riesgo Potencial	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
1	Precisión Insuficiente de los Algoritmos de IA <i>Relacionado con: Fase 4.2 (Implementación y Entrenamiento de Algoritmos de IA), Fase 7.2 (Validación de la Precisión y Robustez de los Algoritmos de IA con Datos Reales)</i>	Medium	High	Implementar un proceso iterativo de desarrollo y validación de modelos de IA, incluyendo pruebas piloto tempranas con datos reales. Establecer métricas de rendimiento claras y umbrales de aceptación. Considerar el uso de modelos pre-entrenados o técnicas de transferencia de aprendizaje si la data es limitada. Asignar expertos en ciencia de datos con experiencia en agricultura.
2	Problemas de Integración entre Componentes (Plataforma, IoT, Datos Satelitales) <i>Relacionado con: Fase 2.1 (Diseño de la Arquitectura General de la Plataforma y Componentes de Integración), Fase 4.4 (Configuración y Despliegue Preliminar de Hardware IoT), Fase 6 (Pruebas de Integración)</i>	High	Medium	Definir una arquitectura de sistema robusta y modular desde la Fase 2. Usar estándares de comunicación abiertos y APIs bien documentadas. Realizar pruebas de integración continuas y tempranas (CI/CD) desde la Fase 4. Designar un equipo de integración dedicado.
3	Baja Adopción por Parte de los Agricultores Finales <i>Relacionado con: Fase 8.1 (Pruebas de Aceptación con Usuarios Finales (UAT) y Recopilación de Feedback), Fase 8.3 (Programa Piloto de Capacitación a Agricultores)</i>	Medium	High	Involucrar a los agricultores desde las fases tempranas (Fase 1 y 3) a través de encuestas, entrevistas y prototipos de UI/UX. Desarrollar una interfaz de usuario intuitiva y localizada. Ofrecer capacitación práctica y soporte técnico continuo (Fase 8). Destacar los beneficios tangibles y rápidos para los usuarios.
4	Retrasos Críticos en la Adquisición o Entrega de Hardware IoT <i>Relacionado con: General del proyecto, impactando directamente Fase 4.4 (Configuración y Despliegue Preliminar de Hardware IoT)</i>	Medium	Medium	Identificar múltiples proveedores certificados para los componentes clave de IoT. Realizar pedidos con antelación suficiente. Establecer contratos con cláusulas de penalización por retrasos. Mantener un pequeño stock de componentes críticos.

5	Dificultades en la Recopilación y Calidad de Datos para el Entrenamiento de IA Relacionado con: Fase 1.2 (Definición de Casos de Uso y Especificación de Requisitos de Datos), Fase 4.2 (Implementación y Entrenamiento de Algoritmos de IA)	High	High	Realizar un estudio detallado de disponibilidad de datos en la Fase 1.2. Establecer protocolos estrictos de recolección y preprocesamiento de datos. Considerar alianzas con entidades agrícolas o gubernamentales para acceso a bases de datos existentes. Desarrollar estrategias para la generación sintética de datos si es necesario.
6	Conectividad Limitada o Inestable en Regiones Rurales para el Despliegue de la Plataforma Relacionado con: Fase 8.3 (Despliegue Final de la Plataforma y Programa Piloto de Capacitación a Agricultores)	High	Medium	Diseñar la plataforma con capacidades offline o de sincronización diferida para operaciones críticas. Explorar soluciones de conectividad alternativas (ej. LoRaWAN, satelital de bajo costo) si la infraestructura celular es deficiente. Informar a los usuarios sobre los requisitos mínimos de conectividad y ofrecer soluciones.

8. Resultados e Impactos Esperados

8.1. Resultados Esperados (Entregables)

- **Plataforma de Inteligencia Artificial Operativa:** Infraestructura central de la plataforma IA diseñada, codificada y desplegada, integrando datos satelitales y de sensores IoT de bajo costo. Estará completamente funcional y probada, logrando una tasa de integración de datos del 95% y un tiempo de actividad superior al 98%, respondiendo al Objetivo Específico 1.
- **Algoritmos de IA Validados para Optimización Agrícola:** Conjunto de algoritmos de aprendizaje automático y visión por computadora desarrollados y validados, capaces de generar recomendaciones precisas y personalizadas para el uso óptimo de agua y fertilizantes, alcanzando una precisión de predicción de al menos 85%, respondiendo al Objetivo Específico 2.
- **Interfaz de Usuario Intuitiva (Web/Móvil):** Interfaz amigable y accesible (web y/o móvil) para la plataforma IA, diseñada para que los pequeños agricultores puedan interactuar eficazmente con el sistema y recibir las recomendaciones, respondiendo al Objetivo Específico 3.
- **Programa Integral de Capacitación y Soporte Técnico:** Materiales didácticos y un programa de capacitación estructurado, junto con un sistema de soporte técnico, para asegurar la adopción y el uso efectivo de la plataforma por parte de los agricultores, respondiendo al Objetivo Específico 3.

8.2. Impactos Esperados

• Impacto Técnico/Científico:

Este proyecto avanzará el estado del arte en la aplicación de la Inteligencia Artificial para la agricultura de precisión en contextos rurales con recursos limitados. Se desarrollarán metodologías innovadoras para la integración y procesamiento de datos heterogéneos (satelitales y IoT de bajo costo) y la creación de modelos de IA robustos y contextualmente adaptados a las condiciones agroclimáticas específicas de Colombia, contribuyendo al conocimiento sobre soluciones tecnológicas accesibles y escalables para pequeños

agricultores y sentando las bases para futuras investigaciones en agrotecnología. Se generará un conocimiento aplicado valioso sobre la efectividad de la IA en la optimización de recursos agrícolas en ecosistemas tropicales.

• **Impacto Económico:**

La implementación de la plataforma generará un impacto económico significativo al optimizar el uso de insumos clave como agua y fertilizantes, reduciendo los costos operativos para los pequeños agricultores en un promedio estimado del 15-20%. Esto se traducirá en un aumento de la productividad agrícola (estimado en un 10-15%) y una mejora en la rentabilidad de sus cultivos, fortaleciendo su competitividad en el mercado y contribuyendo al desarrollo económico sostenible de las regiones rurales. Además, podría generar nuevas oportunidades de negocio para proveedores de tecnología y servicios de soporte local.

• **Impacto Social/Ambiental:**

Socialmente, el proyecto empoderará a los pequeños agricultores al proporcionarles herramientas tecnológicas y conocimientos para una toma de decisiones informada, mejorando sus capacidades y resiliencia frente a los desafíos climáticos y de mercado. Contribuirá a la seguridad alimentaria regional y al desarrollo de habilidades digitales en las comunidades rurales. Ambientalmente, la optimización del uso de recursos hídricos y fertilizantes resultará en una significativa reducción del consumo de agua (hasta un 25%) y una minimización de la escorrentía de fertilizantes, lo que disminuirá la contaminación de suelos y fuentes hídricas. Esto promoverá prácticas agrícolas más sostenibles, la conservación de ecosistemas y una mayor adaptación al cambio climático, contribuyendo a la protección de la biodiversidad y la salud del suelo a largo plazo.

9. Referencias Bibliográficas

- Ananna, T. N., & Saifuzzaman, M. (2024). *Introduction to IoT*. arXiv preprint arXiv:2401.06648.
- Bojórquez-Delgado, G., Bojorquez-Delgado, J., Flores-Rosales, M. A., López-Castro, S., & Apodaca-Lugo, R. C. (2024). Generación de datos climáticos sintéticos a través de redes generativas adversariales condicionales para aplicaciones en agricultura de precisión. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 11(1), 1-15.
- de Freitas Cunha, R. L., & Silva, B. (2020). *Estimating crop yields with remote sensing and deep learning*. arXiv preprint arXiv:2007.10656.
- EBSCO. (2025). *Exploring AI in Agriculture: How Technology Is Shaping the Future of Farming*. Recuperado de <https://about.ebsco.com/blogs/ebscopost/exploring-ai-agriculture-how-technology-shaping-future-farming>
- Facuy Toledo, D. P. (2024). *Aplicación de sensores IoT e inteligencia artificial para la optimización del riego en cultivos agroecológicos*. [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Ambato].
- FCDO. (2025). *The use of artificial intelligence in food and agriculture systems: Rapid Review Report*. Recuperado de <https://www.grtd.fcdo.gov.uk/wp-content/uploads/2025/11/Rapid-Review-Report.pdf>

- IICA. (2025, 2 de octubre). *AI is a key ally for the digital transformation of agriculture in the Americas, which is why experts are calling for its accelerated adoption.* Recuperado de <https://iica.int/en/press/news/ai-is-a-key-ally-for-the-digital-transformation-of-agriculture-in-the-americas-which-is-why-experts-are-calling-for-its-accelerated-adoption/>
- MDPI. (2024). *Agriculture 5.0 in Colombia: Opportunities Through the....* Recuperado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/6664>
- Oropeza Tosca, D. R., Barras Baptista, A., Castillo Romero, F., Guerra Que, Z., & De León de los Santos, B. R. (2023). Análisis del estado del arte de la agricultura de precisión para su aplicación en México. *Ingeniería y Ciencia*, 16(31), 1-18.