



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR
LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO
POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN
CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

Frank Robinson Morales Hernández

Asesorado por M.A. Ing. Jeancarlos René García Duarte

Guatemala, julio de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR
LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO
POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN
CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANK ROBINSON MORALES HERNÁNDEZ
ASESORADO POR M.A. ING. JEANCARLOS RENÉ GARCÍA DUARTE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO

GUATEMALA, JULIO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Tiul Valenzuela
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 10 de diciembre de 2023.



Frank Robinson Morales Hernández



EEFPI-PP-0973-2024

Guatemala, 4 de mayo de 2024

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Mtro. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Sistemas Integrados de Gestión - Gestión ambiental**, presentado por el estudiante **Frank Robinson Morales Herandez** carné número **201503767**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestion Industrial.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

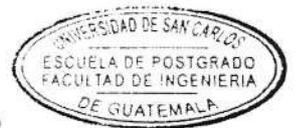
"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Lic. Jeancarlo René García Duarte
Colegiado: 2268

Mtro. Jeancarlo René García Duarte
Asesor(a)

Mtro. Hugo Humberto Rivera Perez
Coordinador(a) de Maestría

Mtra. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0973-2024

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Frank Robinson Morales Hernandez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Mtro. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, mayo de 2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE SENSORES PARA INDICAR LOS NIVELES DE NUTRIENTES EN EL SUELO DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO POR EL EFECTO INVERNADERO EN LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, EN UN CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **Frank Robinson Morales Hernández** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, julio de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 296 CUI: 2871214880101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Porque Él lo es todo, sin Él nada es posible, Él ha engrandecido su misericordia, su amor sobre mí para concluir la carrera, Alabado y exaltado sea su nombre por todos los siglos.

Mis padres

José María Morales e Irlanda Lucrecia Hernández, por su amor y apoyo que siempre tuve de parte de ellos, así como el gran esfuerzo que realizaron para que yo pudiera concluir esta etapa de mi vida.

Mis hermanos

Zully Saraí y Sergio Emanuel Morales, por el apoyo y consejos que siempre recibí de parte de ellos, que me ayudaron a perseverar en la carrera.

Amigo

Carlos Antonio de la Cruz, por su amistad, apoyo y consejos que recibí a través de toda la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrir sus puertas y darme la oportunidad de realizarme como un profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de poder desarrollar mis habilidades y destrezas en las áreas científicas de mi interés.
Asesor	Ingeniero Jeancarlos René García Duarte, por su apoyo, consejos y por darme la oportunidad de realizar este trabajo de graduación.
Novia	Por su apoyo en todo el proceso de formación profesional.
Amigos	Julio Ayapán, Ronald Álvarez y Max Rodríguez.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3.1. Contexto general	11
3.2. Descripción del problema	12
3.3. Formulación del problema	13
3.3.1. Pregunta central	13
3.3.2. Preguntas auxiliares	13
3.4. Delimitación del problema	14
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17
6. ALCANCES	19
7. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	21

8.	MARCO TEÓRICO	23
8.1.	Sensores para indicar los niveles de nutrientes	23
8.2.	Nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo	24
8.2.1.	Nitrógeno.....	24
8.2.2.	Fósforo	25
8.2.3.	Potasio	26
8.3.	Efecto invernadero	27
8.4.	Aplicación de fertilizantes.....	29
8.4.1.	Condiciones básicas para uso de fertilizantes líquidos.....	29
8.5.	Impacto de los nutrientes en la salud del suelo y de los cultivos	30
8.5.1.	Características de un suelo sano	31
8.6.	Tecnologías para la aplicación de fertilizantes.....	32
8.6.1.	Pulverizadores.....	32
8.6.2.	Aplicaciones programadas	33
8.6.3.	Inoculación de microbios	34
8.7.	Consideraciones ambientales climáticas en Guatemala	35
8.8.	Agricultura sostenible	36
8.9.	Adopción de tecnologías agrícolas	37
8.10.	Evaluación de impacto socioeconómico y ambiental	37
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	39
10.	METODOLOGÍA	43
10.1.	Características del estudio	43
10.2.	Unidades de análisis	44
10.3.	Variables	44

10.4.	Fases de estudio	46
11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	49
12.	CRONOGRAMA.....	53
13.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	55
	REFERENCIAS	59
	APÉNDICES	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Esquema de solución.....	21
Figura 2.	Plan de trabajo.....	53

TABLAS

Tabla 1.	Variables en estudio	45
Tabla 2.	Recursos necesarios para la investigación.....	55
Tabla 3.	Costo de sensores y sistemas de cómputo - Sensor NPK.....	56
Tabla 4.	Costo del trabajo.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
@	Arroba
Q	Quetzal (moneda de Guatemala)

GLOSARIO

Cultivo	Es la acción o actividad de labor en tierra para el crecimiento de un producto agrícola, la multiplicación de un microorganismo en un medio óptimo.
CIC	Comisión de Intercambio Catiónico (CIC), es una disposición de la salud del suelo o la fertilidad de este.
Eficiencia	Capacidad de obtener o lograr resultados en un mínimo tiempo para conseguir los resultados deseados.
Fertilizante	Consiste en brindar a las plantas nutrientes de fácil acceso provenientes de un fertilizante elaborado con químicos, vertidos directamente desde el suelo o el agua durante el riego.
Implementación	Acción o comienzo de una idea programada, ya sea de un plan o de un diseño específico de una planificación definida para obtener los objetivos.
Innovación	Un concepto de nuevas ideas de servicios y productos, con la intención de ser utilizados para incrementar, modificar o transformar la

productividad.

Minerales

Es un componente sólido-inorgánico de origen natural que tiene una estructura química definida para liberar nutrientes que se requieren en los cultivos.

Nitrógeno

Es un elemento esencial en agricultura, considerado como un macronutriente para todo ser vivo. Está presente en la mayoría de las combinaciones orgánicas de los vegetales.

Nutrientes

Son esenciales para las plantas, elementos que estas requieren para un adecuado crecimiento.

Optimizar

Es el proceso de construir una estrategia, modelo o sistema para realizarlo tan eficaz y eficientemente como sea posible.

Parcela

Se define como una parte de suelo delimitada físicamente derivada de otra más grande ya labrada.

Pellets

Es el combustible utilizado en calderas y estufas de biomasa, elaborado en pequeños cilindros de material vegetal triturado y procesado.

Sensores

Ayudan a controlar, medir y planificar de una manera óptima el uso del riego, fertilizantes, entre

otros. Detectan problemas que, en ocasiones, salen a la luz cuando ya es demasiado tarde.

Sostenibilidad

Desarrollo que satisface las necesidades del presente, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

Tecnología

Tiene como finalidad aumentar el rendimiento del trabajo y de la tierra, ayudando de manera precisa las labores agrícolas, como la siembra y el cultivo, mejorando la eficiencia y reduciendo el desecho.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna enfrenta el desafío de optimizar la producción de cultivos de manera sostenible, eficiente y respetuosa con el medio ambiente. En este contexto, el diseño de investigación y la aplicación de sensores para indicar las sustancias nutritivas en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio son aspectos cruciales para aumentar la gestión de la fertilización en la agricultura. Esta investigación se centra específicamente en aplicar fertilizantes en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, el cual se encuentra en la ciudad de Guatemala, donde las condiciones climáticas y del suelo presentan desafíos únicos.

Implementar un sistema de sensores para monitorear los niveles de nutrientes en el suelo es esencial para obtener una aplicación precisa de fertilizantes, lo que no solo maximiza la eficacia en el uso de recursos, también minimiza los efectos desfavorables en el entorno. Este proyecto de investigación busca integrar tecnologías avanzadas de sensores en el manejo de cultivos, específicamente enfocándose en el nitrógeno, fósforo y potasio, que son elementos esenciales para el crecimiento saludable de las plantas.

Por medio de la aplicación de sensores, se desea obtener datos en tiempo actual sobre los niveles de nutrientes en el suelo, permitiendo ajustes precisos en la aplicación de fertilizantes. Esto no solo contribuirá a la optimización de la producción de cultivos, sino que también reducirá la contaminación del suelo y del agua asociada con la aplicación excesiva de fertilizantes.

Este estudio está enfocado en la interacción entre las diversas escalas de nutrientes en el suelo, como se detalla en cada uno de los capítulos, específicamente de nitrógeno, fósforo y potasio, y el efecto invernadero en la aplicación de fertilizantes. El efecto invernadero, con su influencia en las condiciones climáticas locales, plantea desafíos particulares en la gestión de nutrientes en la agricultura. La variabilidad climática asociada con el efecto invernadero puede alterar la absorción y disponibilidad de estos nutrientes en el suelo, impactando en forma directa la expansión y progreso de los cultivos.

El índice de la propuesta se compone de varios elementos. Inicia con la exposición del problema, donde se presentan las preguntas clave a abordar. Los objetivos de la investigación marcan el rumbo de esta. El resumen del marco metodológico proporciona una visión general de la aproximación adoptada. Los antecedentes sitúan el contexto en el que se desarrolla la investigación.

El capítulo 1 proporciona antecedentes y estudios previos relacionados con la aplicación de tecnologías agrícolas, como sensores para el monitoreo de nutrientes en el suelo. En el capítulo 2 se presenta una revisión teórica sobre diferentes aspectos relacionados con la agricultura y el uso de tecnología en la aplicación de fertilizantes. En el capítulo 3 se describen las características del estudio, incluyendo la localización, infraestructura y alcance de este. Se detallan las variables a estudiar.

En el capítulo 4 se realiza un análisis de los costos y aspectos financieros relacionados con la aplicación de tecnologías agrícolas y el uso de fertilizantes. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo de la investigación, y en el capítulo 6 se discuten y analizan los

resultados obtenidos en relación con la literatura revisada, los objetivos de la investigación y su relevancia para la agricultura en Guatemala.

Finalmente, se culmina presentando las conclusiones, recomendaciones, referencias, y apéndices pertinentes.

2. ANTECEDENTES

Con la finalidad de abordar el problema planteado es necesario recurrir al apoyo de estudios previamente elaborados, para que el enfoque metodológico y los resultados obtenidos de los mismos contribuyan a la presente investigación.

- Nacionales

Maldonado (2022) realizó un estudio con el tema *Diseño de investigación para el diseño e implementación de una red para monitoreo y control automatizado para el análisis de pH, nitrógeno, fósforo y potasio en suelo agrícola de la finca la Moraleja*, investigación que tuvo como objetivo automatizar:

El proceso de riego de plantas ornamentales por medio de una red de monitoreo de minerales y calidad del suelo con una red de telecomunicaciones para la mejora del crecimiento y producción de la finca. La metodología que utilizó fue de enfoque mixto. (Maldonado, 2022, p. 2)

Concluyó:

Se colocó un sensor de detección de nutrientes y humedad del suelo NPK por sus siglas nitrógeno, fósforo y potasio en un área donde se siembran plantas ornamentales para comprobar el cambio de los niveles

durante su crecimiento y un sensor de medición de calidad de agua para validar los sólidos que se encuentren en el suelo. (Maldonado, 2022, p. 2)

Pablo (2020) llevó a cabo un estudio llamado *Diseño de investigación de un sistema electrónico mediante el uso de tecnologías de IoT para el monitoreo remoto de pH en agua de solución de nutrientes en un sistema de cultivo hidropónico, con el objetivo de mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos.*

Para lograrlo, se propuso un sistema de monitoreo realizado remotamente que utilizaba las tecnologías de malla digital de las cosas como medio para el envío, almacenamiento y posterior visualización de los niveles de pH en el agua de solución nutritiva en un sistema hidropónico de técnica de película nutritiva NFT. Para el desarrollo, se evaluaron y aplicaron las mejores prácticas agrícolas como parte de un sistema que asegura la calidad que permitió garantizar la salud e inocuidad en los cultivos cosechados.

López (2020) realizó un estudio llamado *Análisis de cambio y uso de suelos al noroeste de la ciudad de Guatemala, empleando imágenes satelitales frente a la vulnerabilidad de deslizamientos en laderas.* El trabajo expuso los lineamientos para la obtención y procesamiento de imágenes satelitales, a partir del uso de los sensores remotos Landsat 7 y 8. Permitted obtener información precisa por medio de los cambios a los cuales se sometió la superficie terrestre por el avance de los procesos antrópicos.

Con base en los resultados analizados en el laboratorio de las muestras obtenidas en taludes pudo asegurarse que el suelo era una arena limosa color gris de cementación fuerte, con un ángulo de fricción interna de 24.75° y una

cohesión de 41.19 Ton/m². Pero por su formación geológica, fue susceptible a erosión si no se implantaban obras de ingeniería para su protección.

Palencia (2019) elaboró un estudio con el tema *Implementación de sistema de riego inteligente automatizado como dispositivo de control para el uso eficiente del agua en plantas ornamentales del vivero municipal de San Cristóbal Acasaguastlán*, investigación que se basó en implementar un sistema mediante riego inteligente automatizado que controle la utilización del agua en el cultivo ornamental del vivero. Utilizó la metodología científica con un diseño de estudio experimental.

Concluyó que los programas de sistema de riego inteligente son muy eficientes en el ahorro y control del agua necesaria para la hidratación de las plantas. Se pudo observar que en un riego normal se desperdicia gran cantidad de agua y muchas veces las plantas no la aprovechan porque no están siendo regadas directamente, mientras que con el sistema por goteo la planta se beneficia, porque la gota de agua está siendo suministrada directamente a la raíz.

Duque (2019) elaboró un estudio con el tema *Evaluación del efecto de cuatro niveles de un programa de nutrición sobre el desarrollo, rendimiento y diagnóstico sobre el manejo de la fertilización para el cultivo de banano, en un suelo molisol, perteneciente a la finca Tolimán*, investigación que tuvo como objetivo principal conocer el proceso de nutrición del banano.

Los resultados determinaron que, según los encargados de nutrición de la finca, una mezcla de diferentes fertilizantes cumple con los requerimientos del cultivo y mantiene un equilibrio de los elementos en el suelo conforme pasa el tiempo.

- Internacionales

Milo (2023) se planteó la investigación titulada *Desarrollo y evaluación de pellets a base de materia orgánica para la liberación controlada de fósforo y su aplicación en la agricultura*. El propósito principal del estudio consistió en crear *pellets* mediante la combinación de materia orgánica, como la pollinaza, con componentes inorgánicos, incluyendo fosfato de amonio (MAP), con el fin de evaluar su eficacia como fertilizante de liberación lenta de fósforo en un cultivo de jitomate de la variedad Florada en un entorno de invernadero.

El análisis del contenido de nutrientes en la savia de las plantas de jitomate indicó la necesidad de aplicar al menos dos dosis de *pellets* organominerales a lo largo de todo el periodo vegetativo y de floración. Esto se plantea como una medida para asegurar niveles adecuados de nutrientes, tanto para el crecimiento de las plantas como para el desarrollo de los frutos.

Guilcaso (2023) levó a cabo un estudio titulado *Sistema de monitoreo de variables químicas con tecnología LOT de los suelos agrícolas para la cosecha de productos en Agro Pujilí*. Indagó “acerca de los parámetros macronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas en el suelo y necesarios para los cultivos de diferentes tipos de sembríos tales como: verduras, hortalizas, frutos, rosas, entre otros” (Guilcaso, 2023, p. 10).

Entre los parámetros que se midieron estuvieron: “nitrógeno, fósforo y potasio, el sistema consta de un nodo de sonorización para la medición de las variables químicas del suelo mediante el sensor NPK” (Guilcaso, 2023, p. 10). Además:

La propagación de la señal, gracias a la tecnología utilizada, no presentó problemas de transmisión de datos, ya que la frecuencia de 915 MHz que empleaba la tecnología LoRa permitía grandes distancias a una velocidad de transmisión de datos de hasta 50 Kbps, suficiente para la información que manejaba el sistema. (Guilcaso, 2023, p. 11)

García (2019) describe que cada uno de los elementos nutritivos desempeña un papel específico en la nutrición vegetal. El oxígeno, el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el fósforo y el azufre son constituyentes fundamentales de los tejidos vegetales y participan en las reacciones bioquímicas básicas del metabolismo. El fósforo, como componente esencial del ATP (adenosín trifosfato), está vinculado a los procesos de intercambio de energía.

En relación con los cationes, como el calcio, el potasio y el magnesio, regulan los potenciales osmóticos, la permeabilidad de las membranas celulares y la conductividad eléctrica de los jugos vegetales. Por su parte, los micronutrientes actúan como catalizadores en numerosas reacciones del metabolismo vegetal.

Cevallos (2020) realizó un estudio con el tema *Monitoreo y análisis de las hojas de las plantas de jitomate a partir de un sistema de visión, un algoritmo supervisado y un sistema de control semiautomático*, investigación que tuvo como objetivo desarrollar un sistema de visión artificial para el monitoreo y control semiautomático a través de un algoritmo de aprendizaje supervisado para predecir el tipo de nutriente faltante en una planta de jitomate mediante la inspección de sus hojas.

Concluyó que se monitorearon las hojas del jitomate por medio de un sistema de visión artificial y se analizaron las imágenes capturadas por un algoritmo supervisado con 86 % de exactitud, y se obtuvieron resultados por medio de un sistema de control semiautomático, logrando una exactitud del 70 %, con el fin de reducir el uso de recursos (nutrientes).

Hernández (2019) elaboró un estudio con el tema *Determinación de propiedades de suelos agrícolas a partir de mediciones eléctricas realizadas en campo y en laboratorio*. La investigación tuvo como objetivo la determinación del contenido de finos, porosidad, CIC y K en suelos agrícolas, realizando mediciones eléctricas en campo y en laboratorio.

Los resultados que obtuvo “fueron los mapas de contenido de finos indican en general un alto índice de retención de humedad, lo que se refleja en los bajos valores de K” (Hernández, 2019, p. 21), mientras que los mapas de CIC muestran en general un bajo índice de fertilidad de los suelos en las tres parcelas, sobresaliendo la parcela A como la que presenta menores valores de CIC, distante de las parcelas B y C, siendo la C la de mayor rango de CIC.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

La necesidad es diseñar una investigación que aplique un sistema de sensores para monitorear los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio, en un Centro Internacional de Agricultura Tropical, especialmente en el contexto del efecto invernadero durante la aplicación de fertilizantes.

La agricultura tropical enfrenta desafíos principalmente relacionados con las gestiones de fertilizantes, donde los niveles de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio pueden tener un impacto significativo en la eficacia de los cultivos. La implementación de sensores en invernaderos para medir nutrientes busca proporcionar datos precisos y en tiempo real sobre sus concentraciones en el suelo.

El problema se basa en que, en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, podría existir una falta de información detallada sobre los niveles de estos nutrientes durante la aplicación de fertilizantes en el contexto del efecto invernadero. Esta ausencia de información podría estar afectando la toma de decisiones y la eficiencia del uso de fertilizantes, lo que a su vez podría impactar en la productividad y sostenibilidad agrícola.

La investigación propuesta busca abordar estos desafíos al diseñar un sistema que utilice sensores para medir y monitorear los grados de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio, durante la ejecución de fertilizantes

en un entorno de invernadero. El objetivo es proporcionar datos precisos que permitan una gestión más efectiva de estos elementos, contribuyendo así a mejorar la productividad y sostenibilidad en el ámbito de la agricultura tropical.

3.2. Descripción del problema

En el Centro Internacional de Agricultura Tropical en la actualidad no se tiene un sistema de sensores para que los agricultores del área puedan medir los niveles en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio, en cuanto al efecto invernadero que ocasiona la aplicación de nutrientes y fertilizantes a los diferentes productos a cultivar.

La falta de sensores adecuados afecta directamente la capacidad de los agricultores para ajustar y optimizar los procesos de aplicación de fertilizantes. Al no contar con información precisa sobre los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo se generan incertidumbres en cuanto a la cantidad indicada de fertilizantes a aplicar, lo cual resulta en un uso ineficiente de estos insumos y, en última instancia, afecta en forma considerable la productividad agrícola.

Además, la carencia de un sistema de sensores limita la capacidad del Centro Internacional de Agricultura Tropical para brindar asesoramiento técnico basado en datos empíricos a los agricultores. La falta de información en tiempo real sobre los niveles de nutrientes en el suelo dificulta el diseño de tácticas de fertilización adaptadas a las diversas necesidades de cada tipo de cultivo y a las condiciones cambiantes del entorno.

La implementación de sensores para la monitorización de nutrientes no solo optimizaría la eficiencia agrícola, sino que también contribuiría a la

sostenibilidad ambiental, reduciendo costos, minimizando la contaminación y fomentando prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

3.3. Formulación del problema

Es importante implementar sensores para la monitorización de nutrientes con el propósito de mejorar la eficiencia agrícola y promover la sostenibilidad ambiental. La falta de este sistema impide una gestión precisa de los recursos agrícolas, resultando en la sobreaplicación de fertilizantes y generando costos innecesarios, además de contribuir a la contaminación del suelo y el agua.

La implementación de sensores se da como una solución potencial para ajustar prácticas agrícolas en tiempo real, evitando la sobreaplicación de fertilizantes, reduciendo costos y minimizando la contaminación, promoviendo así prácticas sostenibles y sustentables con el entorno.

3.3.1. Pregunta central

¿Cómo implementar sensores para medir y monitorear los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio durante la aplicación de fertilizantes en un Centro Internacional de Agricultura Tropical, especialmente en el contexto del efecto invernadero?

3.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuáles son las tecnologías de sensores más adecuadas para medir los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio durante la aplicación de fertilizantes en un entorno de invernadero?

- ¿Cuál sería la ubicación estratégica de los sensores dentro del Centro Internacional de Agricultura Tropical para garantizar una medición precisa de los nutrientes en diferentes áreas de cultivo?
- ¿Cuáles serían los parámetros claves que se medirían además de nitrógeno, fósforo y potasio para obtener una comprensión integral de la salud del suelo y de los cultivos en la integración de la informática al incorporar programación en dispositivos electrónicos que se fundamentan en hardware libre y componentes eléctricos, buscando eficiencia en la operación resultante?
- ¿Cómo se involucraría a los agricultores y al personal del centro en el proceso de investigación, y cómo se comunicarían los resultados para promover la adopción efectiva de prácticas más sostenibles?

3.4. Delimitación del problema

La delimitación del problema se centra en la necesidad de ejecutar un sistema de sensores para la monitorización de nutrientes, con el fin específico de mejorar la eficiencia agrícola y fomentar la sostenibilidad ambiental. La falta de este sistema limita la gestión precisa de los recursos agrícolas, con consecuencias como la sobreaplicación de fertilizantes y costos innecesarios, además de contribuir a la contaminación del suelo y el agua.

La implementación de sensores se propone como una solución para ajustar prácticas agrícolas en tiempo real, evitando la sobreaplicación de fertilizantes, reduciendo costos y minimizando la contaminación, en línea con prácticas sostenibles en el ámbito.

4. JUSTIFICACIÓN

La optimización es la eficacia en el uso de recursos, esto es esencial en la agricultura moderna, pues la aplicación precisa de fertilizantes basada en datos en tiempo actual sobre los niveles de nutrientes permite una gestión más eficiente y económica de los recursos, minimizando el desperdicio y reduciendo los costos asociados con la fertilización.

La ausencia de datos en tiempo real sobre los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio impide una gestión precisa de la fertilización. Esta carencia puede conducir a la sobreaplicación de fertilizantes, resultando en un uso ineficiente de recursos y generando impactos ambientales adversos, como la contaminación del agua y del suelo. La falta de una gestión adecuada de la fertilización también puede afectar negativamente la productividad agrícola, comprometiendo la seguridad alimentaria y limitando el potencial económico de la agricultura.

La aplicación excesiva de fertilizantes puede tener impactos negativos significativos en el medio ambiente, como la contaminación del agua y del suelo. Al utilizar sensores para ajustar la aplicación de fertilizantes según las necesidades reales del suelo, se puede reducir la contaminación y promover prácticas agrícolas más sostenibles.

La gestión precisa de la fertilización, respaldada por datos exactos sobre los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio, tiene el potencial de mejorar significativamente la productividad agrícola. Este aumento en la eficiencia

puede tener impactos positivos tanto en la seguridad alimentaria como en la economía local.

La investigación propuesta no solo aborda problemas específicos relacionados con la fertilización en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, sino que también tiene el potencial de generar conocimientos transferibles y aplicables en una variedad de contextos agrícolas, promoviendo así la innovación y la sostenibilidad en la producción de alimentos.

La implementación de sensores para la monitorización de nutrientes representa una innovación tecnológica en el ámbito agrícola. Es por ello por lo que se realiza la investigación y aplicación de sensores para indicar los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio por el efecto invernadero en la aplicación de fertilizantes.

Este estudio tiene como finalidad contribuir al avance de prácticas agrícolas modernas, integrando tecnologías emergentes para enfrentar los desafíos contemporáneos en la producción de alimentos.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Implementar sensores para medir, indicar y monitorear los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio durante la aplicación de fertilizantes por el efecto invernadero en un Centro Internacional de Agricultura Tropical.

5.2. Específicos

1. Determinar las tecnologías de sensores más adecuadas para medir los niveles de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo, para la aplicación de fertilizantes en un entorno invernadero.
2. Establecer la ubicación estratégica de los sensores dentro del Centro Internacional de Agricultura Tropical, para garantizar una medición precisa de nutrientes en diferentes áreas de cultivo.
3. Identificar los parámetros clave que se medirán, además del nitrógeno, fósforo y potasio, para obtener una comprensión integral de la salud del suelo y de los cultivos.
4. Organizar a los agricultores y al personal del centro en el proceso de investigación, para promover la adopción efectiva de prácticas más sostenibles.

6. ALCANCES

Desde la perspectiva de investigación, este estudio adoptará un enfoque cuantitativo. Esto se debe a que se busca medir los niveles de nutrientes en el suelo, como nitrógeno, fósforo y potasio, mediante el uso de sensores. Al mismo tiempo, se abordará un aspecto cualitativo al intentar comprender las prácticas de fertilización y sus impactos en la agricultura sostenible.

El alcance de la investigación se define como exploratorio-descriptivo, ya que su objetivo es identificar y describir las condiciones actuales de los nutrientes en el suelo y cómo estas condiciones influyen en la aplicación de fertilizantes en el contexto del invernadero.

Desde la perspectiva técnica, el objetivo es asegurar la aplicación de sensores para indicar los niveles de nutrientes en el suelo, mediante el efecto invernadero en la aplicación de fertilizantes.

La utilización de análisis de datos de sensores y toma de registros agronómicos, como las entrevistas de campo, aseguran la adecuación de los procesos y también que se han llevado a cabo de manera correcta. Asimismo, estas herramientas resultan fundamentales para respaldar el diseño de investigación orientado a la implementación de sensores.

El Centro Internacional de Agricultura Tropical, ubicado en la ciudad de Guatemala, se verá beneficiado gracias a la aplicación de sensores, los cuales ayudarán a indicar los niveles de nutrientes que serán necesarios para medir el nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo.

7. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La investigación tiene como objetivo principal implementar la aplicación de sensores para monitorear las etapas de nutrientes en la tierra, específicamente nitrógeno, fósforo y potasio, en un Centro Internacional de Agricultura Tropical, el cual se encuentra en la ciudad de Guatemala. El propósito es mejorar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes en los cultivos, optimizando el uso de recursos y reduciendo los impactos negativos asociados.

Figura 1.

Esquema de solución



Nota. Plan de trabajo. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word y SmartArt 2024.

La excesiva utilización de fertilizantes puede ocasionar consecuencias adversas considerables para el medio ambiente, tales como la contaminación

tanto del agua como del suelo. Al emplear sensores para adaptar la aplicación de fertilizantes de acuerdo con las demandas reales del suelo, es posible mitigar la contaminación y fomentar prácticas agrícolas que sean más respetuosas con la sostenibilidad ambiental.

El propósito fundamental es mejorar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes en los cultivos, lo que resultará en una optimización del uso de recursos. Esta iniciativa busca reducir los impactos negativos asociados a la aplicación excesiva de fertilizantes, como la contaminación del agua y del suelo. Al emplear tecnologías de sensores para adaptar la aplicación de fertilizantes de acuerdo con las necesidades reales del suelo, se pretende mitigar la contaminación ambiental y fomentar prácticas agrícolas más sostenibles.

Se estima que cada etapa del proceso en el esquema de solución presentado tomará un aproximado de un mes, dentro de este, se contará con la recopilación de datos, la interpretación y el desarrollo de la propuesta de capacitación. Dicho proceso se realizará en el 2024.

8. MARCO TEÓRICO

8.1. Sensores para indicar los niveles de nutrientes

Sobre los sensores para indicar los niveles de nutrientes, JACTO (2023) explica que conforme la magnitud que la población global aumenta, también crecen las demandas de alimentos. Como consecuencia, los agricultores deben optimizar el uso del espacio para el cultivo de manera más eficiente que nunca. En este contexto, los sensores para la agricultura de precisión se vuelven cada vez más comunes y, por supuesto, indispensables.

Delgado (2023) indica que los sensores de suelo para agricultura suministran información de manera rápida y consistente acerca del suelo, proporcionando a los agricultores una herramienta para optimizar la aplicación de fertilizantes, pesticidas y otros recursos. Estos dispositivos posibilitan diversas funciones, como la determinación de niveles de humedad y otros nutrientes esenciales para los cultivos, lo que resulta en diversos beneficios para la agricultura. Esto les permite personalizar su producción, logrando mejores resultados a largo plazo y, al mismo tiempo, reduciendo los costos asociados al mantenimiento agrícola.

Según Agricolus (2020), los sensores para la agricultura han rellenado el camino para la digitalización de las explotaciones agrícolas. De hecho, detectan información crucial que facilita la evaluación del estado de salud de los cultivos, a través de análisis y comparaciones, y ofrecen la oportunidad de planificar intervenciones específicas.

8.2. Nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo

Gámez (2019) resalta que los componentes fundamentales e indispensables presentes en la tierra se denominan nutrientes del suelo. Estos son cruciales para la vida y la supervivencia, existiendo en cantidades necesarias para el sustento de la vida. Cuando estas cantidades esenciales se ven comprometidas, la calidad del suelo comienza a decaer.

Los organismos requieren una variedad de elementos químicos, como el carbono, oxígeno, hidrógeno, azufre, nitrógeno y fósforo, entre otros, para llevar a cabo sus funciones vitales. Estos elementos son esenciales para la síntesis de biomoléculas orgánicas.

Los elementos esenciales necesarios para el desarrollo saludable se dividen en tres categorías: primarios, secundarios y micronutrientes. Los nutrientes primarios, que incluyen nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), son requeridos en cantidades significativas. Mientras tanto, los nutrientes clasificados como secundarios, como calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), son necesarios en cantidades menores, aunque siguen siendo de importancia. Estos dos conjuntos constituyen los macronutrientes presentes en el suelo (Gámez, 2019).

8.2.1. Nitrógeno

Según Gámez (2019):

El nitrógeno es el más importante para las plantas, con él producen las proteínas que forman la clorofila y pueden transformar los alimentos de las plantas, este se absorbe a través de las raíces, pero la planta no lo

usa de manera inmediata, sino que sigue un proceso para transformarlo y aprovecharlo. Cuando hay una falta de este las plantas comienzan a perder su color verde y se van poniendo amarillas”.

También puede provenir de los relámpagos y de las lluvias. Pero este no solo es indispensable que se obtenga, ya que también hay formas en que se pierde este nutriente y esto puede ser por el aire, la quema de materia orgánica y el agua. (párr. 19-21)

El origen del nitrógeno en el suelo se vincula principalmente a la materia orgánica, como estiércol y desechos vegetales, así como al aire, aunque este último es menos aprovechado por la planta, excepto en el caso de las leguminosas. Se destaca la contribución de fertilizantes químicos, como el abono nitrogenado con amonio o yeso agrícola.

8.2.2. Fósforo

Para Gámez (2019):

El fósforo (P) en menos abundancia en las plantas que el nitrógeno y el potasio, si las plantas no tienen la cantidad necesaria del mismo estas tendrán problemas de crecimiento, división celular, elongación radical y desarrollo de semillas y frutos, además de una madurez temprana.

De tener déficit de este elemento se nota en las plantas a través de las hojas más viejas que comienzan a cambiar de color a un azul verdoso o rojizo. Una corrección temprana de este elemento permitirá una fertilización de la siembra. (párr. 23-24)

En cuanto a la importancia del fósforo (P) para las plantas, a pesar de ser menos abundante que el nitrógeno y el potasio, su presencia es esencial para el crecimiento adecuado, la división celular, la elongación radical y el desarrollo de semillas y frutos, así como para alcanzar la madurez temprana.

8.2.3. Potasio

Respecto del potasio, de acuerdo con Gámez (2019):

El potasio (K) es el segundo mineral que más existe en el planeta después del nitrógeno, este puede procesar más de 60 enzimas, a través de la fotosíntesis y en el movimiento de productos o fotosintatos hacia los organismos de almacenamiento que son las semillas, permite la economía del agua y permite la resistencia a las plagas, enfermedades y estrés de las plantas. Cuando hay déficit de este elemento las plantas presentan clorosis a lo largo del borde de la hoja y las hojas más viejas se queman. (párr. 25)

Las señales visibles de un déficit de potasio en las plantas son la clorosis en el transcurso del borde de las hojas y el quemado de las hojas más antiguas.

Esta información proporciona una comprensión clara de la importancia del potasio en el desarrollo y la salud de las plantas, así como las consecuencias visibles cuando hay una falta de este elemento.

8.3. Efecto invernadero

El efecto invernadero es definido por Connors (2021):

Algunos gases de nuestra atmósfera (como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso) actúan como una manta aislante para la Tierra, calentándola y dificultando la liberación de calor al espacio exterior. Es similar a cuando una manta alrededor de tu cuerpo lo calienta y ayuda a conservar ese calor, o cuando las paredes de un invernadero ayudan a mantener el aire interior más cálido que el que lo rodea.

Estas acciones se han sumado al efecto invernadero, provocando el calentamiento global. El exceso de energía es absorbido por diferentes partes de la Tierra (Gráfico B): 91% es absorbido por los océanos, 5% es absorbido por la tierra, 3 % es absorbido por el hielo. Sólo el 1% del calor extra es absorbido por la atmósfera. Este calentamiento ha provocado cambios en muchos aspectos del clima. (p. 6)

La importancia del efecto invernadero se debe a que es un proceso natural que hace que la Tierra sea habitable para los humanos al mantener una

temperatura adecuada. Connors (2021) también señala la participación humana, especialmente desde el siglo XIX, como un factor significativo en el incremento de gases de efecto invernadero debido a actividades como la quema de combustibles fósiles, ganadería, deforestación y agricultura.

El efecto invernadero es para Guerra (2021):

El efecto invernadero es un proceso natural que siempre ha ocurrido en la atmósfera terrestre. Los gases presentes en la troposfera capturan el calor proveniente del Sol, lo atrapan y no lo dejan salir del planeta. La razón por la cual el calentamiento global se ha intensificado se explica por el aumento en las concentraciones de uno de los principales gases de efecto invernadero: el CO₂.

Con respecto a este efecto, dentro de un invernadero podemos emular las condiciones que ocurren a escala planetaria. Por ejemplo, el techo del invernadero (vidrio o plástico) cumple la función de los gases en la atmósfera que atrapan el calor; aunque permiten el paso de la luz solar visible, también absorben parte de la radiación infrarroja, lo que hace que se retenga algo de calor. (p. 50)

El aumento de las concentraciones de CO₂ es un factor que intensifica el calentamiento global y conecta el proceso natural del efecto invernadero con las actividades humanas, señalando un desequilibrio que puede tener consecuencias significativas.

8.4. Aplicación de fertilizantes

Pérez (2020) hace mención de que la utilización de fertilizantes líquidos se extiende a todos los cultivos que emplean sistemas de riego tecnificado, especialmente aquellos que utilizan métodos de riego localizado de alta frecuencia. Las restricciones en la aplicación de fertilizantes se determinan según el tipo de cultivo, siendo recomendable emplear un fertilizante que cumpla con las especificaciones indicadas en las fichas técnicas correspondientes a cada tipo de cultivo.

8.4.1. Condiciones básicas para uso de fertilizantes líquidos

Según Pérez (2020):

La aplicación de fertilizantes líquidos resulta un método de gran importancia en cultivos regados mediante sistemas de riego localizado (goteo), aunque también se usa, en menor medida, en sistemas de riego por aspersion (equipos pivote y cobertura total). La diferencia principal entre estos sistemas es que en el riego localizado no se moja toda la superficie, mientras que esto sí sucede en riego por aspersion.

El objetivo principal de la fertiirrigación es el aprovechamiento del flujo de agua del sistema de riego para transportar los elementos nutritivos que necesita la planta hasta el lugar donde se desarrollan las raíces, con lo cual se optimiza el uso del agua, los nutrientes y la

energía, y se reducen las contaminaciones si se maneja adecuadamente.

(p. 23)

El principal objetivo de la fertirrigación, según se describe, es aprovechar el flujo de agua en el sistema de riego para transportar los nutrientes esenciales para las plantas hasta las raíces. Este enfoque tiene múltiples beneficios, incluyendo la optimización del uso del agua, nutrientes y energía, así como la reducción de contaminantes si se gestiona de manera adecuada.

8.5. Impacto de los nutrientes en la salud del suelo y de los cultivos

En cuanto al impacto de los nutrientes en la salud del suelo y de los cultivos, Anzueto (2023) menciona que es un desafío constante asegurar la sostenibilidad de la humanidad en el planeta y la tierra juega un papel crucial en este empeño. Para lograr abastecer la demanda de alimentos de la población mundial es esencial incrementar la productividad en los sistemas agrícolas. Un componente indispensable para alcanzar este propósito es el potencial de los suelos para respaldar el desarrollo y productividad de cultivos.

Además, Anzueto (2023) señala que la vitalidad del suelo es dinámica y puede verse mejorada o deteriorada por prácticas agrícolas. Un suelo saludable desempeña funciones esenciales para la producción agrícola, como: facilitar la infiltración de agua y almacenar aire y agua; retener y reciclar nutrientes, y suprimir enfermedades y malezas. Es económicamente beneficioso para los agricultores, preservar y mejorar la salud de la tierra es esencial, ya que esto disminuye el riesgo de obtener bajos rendimientos vinculados a problemas tales como la compactación del suelo, precipitaciones intensas, sequías y la proliferación de enfermedades.

8.5.1. Características de un suelo sano

Las características del suelo sano se desarrollan de la siguiente manera, según Anzueto (2023):

- Estructura friable que permita intercambio de aire y agua
- Suficiente profundidad.
- Alta población de organismos benéficos.
- Disponibilidad de nutrientes.
- Baja población de patógenos y plagas.
- Buen drenaje.
- Baja presión de malezas.
- Libre de sustancias tóxicas para el cultivo.
- Resistencia a degradación (erosión, exceso de precipitación pluvial, sequía extrema, compactación por maquinaria, etcétera).
- Resiliencia (rápida recuperación de eventos adversos). (párr. 9)

El conjunto de características mencionadas, que incluyen una estructura de suelo que facilita el intercambio de agua y el aire, suficiente profundidad, una alta población de organismos beneficiosos, disponibilidad de nutrientes, baja presencia de patógenos y plagas, buen drenaje, baja presión de malezas, ausencia de sustancias que son tóxicas para los cultivos, resistencia a la degradación y capacidad de recuperación rápida frente a eventos adversos, delinea los atributos esenciales de la tierra saludable y productiva.

8.6. Tecnologías para la aplicación de fertilizantes

Para JACTO (2023), desde el inicio de la agricultura los fertilizantes han sido un componente esencial, llegando a ser considerados indispensables para esta actividad. No obstante, tanto su utilización como los medios para su aplicación han experimentado notables transformaciones en los últimos años. En la actualidad, se han desarrollado diversas prácticas y maquinarias que mejoran la eficiencia en su aplicación, y a continuación se presentan algunas de ellas.

8.6.1. Pulverizadores

Se trata de herramientas valiosas tanto para proteger cultivos como para aplicar agroinsumos que impulsen la productividad y el desarrollo saludable. En general, los pulverizadores se caracterizan por disminuir los índices de deriva e incrementar la profundidad de las aplicaciones. Según JACTO (2023):

Hoy, los grandes fabricantes y proveedores de soluciones para agronegocios cuentan con diferentes tipos de pulverizadores en su operación como:

- Pulverizador barras acoplado
- Pulverizador barras arrastre
- Pulverizador cañón acoplado
- Pulverizador turbo acoplado2
- Pulverizadores mochilas

Cada una de estas máquinas atienden necesidades específicas de diferentes tipos de cultivos, pero cuentan con un denominador común: permiten la reducción de costos y la eficacia operativa. (párr. 85-88)

Son importantes los pulverizadores como herramientas valiosas tanto para la protección de cultivos como para la aplicación de agroinsumos que fomentan la productividad y el desarrollo saludable de las plantas. Se enfatiza que, en términos generales, los pulverizadores tienen la característica de reducir los índices de deriva y aumentar la profundidad de las aplicaciones, lo que contribuye a una aplicación más precisa y eficiente.

8.6.2. Aplicaciones programadas

De acuerdo con JACTO (2023):

Con esto nos referimos a las aplicaciones de fertilizantes guiadas por sistemas de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés). Este mecanismo permite incrementar la precisión de las aplicaciones y, además, automatizar el trabajo, ya que los dispositivos GPS orientan a maquinarias y equipos dentro del cultivo.

Además, permiten el levantamiento de mapas topográficos y facilitan el muestreo de los suelos. A su vez, las soluciones de la agricultura de precisión, que también podríamos llamar agricultura

inteligente, son muy útiles para recolectar información sobre las aplicaciones y los resultados de estas. (párr. 89-90)

Además de su función principal, estos sistemas posibilitan la creación de mapas topográficos y simplifican el muestreo de suelos. Son útiles las soluciones de la agricultura de precisión, también conocida como agricultura inteligente. Esta tecnología no solo mejora la eficiencia en la colocación de fertilizantes, también proporciona una valiosa fuente de datos para la evaluación y elección estratégica en la administración agrícola.

8.6.3. Inoculación de microbios

Según JACTO (2023):

Esta práctica de la agricultura moderna se lleva a cabo para incrementar la capacidad de absorción de agua y nutrientes de los suelos y los cultivos. Eso sí, inocular microorganismos como parte de los trabajos de fertilización requiere estudio y análisis previo, ya que de lo contrario puede ser contraproducente.

Lo ideal es encontrar un equilibrio entre los microorganismos beneficiosos y los patógenos, lo que permite desinfectar el suelo e incrementar su calidad. (párr. 91-92)

Es importante realizar estudios y análisis previos al proceso de inoculación, ya que, de lo contrario, podría haber efectos contraproducentes. Es

necesario también encontrar un equilibrio adecuado entre los microorganismos beneficiosos y los patógenos, lo que no solo desinfecta el suelo, sino que también mejora su calidad.

8.7. Consideraciones ambientales climáticas en Guatemala

Para Rosales (2019):

El cambio climático es el mayor desafío de nuestro tiempo, es un problema tangible que está causando considerables pérdidas humanas y económicas. Guatemala es uno de los países más vulnerables ante los efectos del cambio climático, por lo que es necesario contar con información sistematizada sobre el clima y conocer las medidas que actualmente se están adoptando en los distintos sectores.

El Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático (SGCCC) fue creado en 2014 para revisar, generar y proporcionar información científica relacionada al componente climático a los tomadores de decisiones políticas del país en temas relacionados al clima, a la vulnerabilidad, adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático. El SGCCC está conformado por más de 20 instituciones gubernamentales y no gubernamentales, entre las que se encuentran instituciones académicas, centros de investigación y entidades de gobierno, y busca apoyar la coordinación interinstitucional e

integración de aspectos científicos en el marco operativo del Consejo Nacional de Cambio Climático (CNCC,2021, p. 37)

Es urgente considerar el cambio climático como el principal desafío actual, con impactos palpables que causan pérdidas significativas en términos humanos y económicos. Guatemala, identificado como uno de los países más vulnerables a estos efectos, reconoce lo importante que es contar con información estructurada sobre el clima y entender las medidas adoptadas en diversos sectores.

8.8. Agricultura sostenible

Kogut (2020) señala que la agricultura debe garantizar, de manera sostenible, el suministro de alimentos y materiales textiles para las actuales y futuras generaciones, es crucial mantener precios accesibles para los consumidores, garantizar la viabilidad económica del sector agrario y, al mismo tiempo, preservar la salud del medio ambiente y la disponibilidad de recursos naturales.

La agricultura sostenible se define como un sistema de producción agraria que conserva los recursos, respeta el medio ambiente y resulta económicamente rentable. Este enfoque surge de la necesidad de desarrollar alternativas agrícolas que se ajusten mejor a las demandas de la sociedad actual, la cual busca métodos de producción más sostenibles y menos perjudiciales para el entorno, además de ser social y económicamente apropiado.

8.9. Adopción de tecnologías agrícolas

Sergieieva (2023) asevera que la evolución de la agricultura moderna se manifiesta en diversas direcciones simultáneas, pero su objetivo primordial radica en la aplicación de nuevas tecnologías al sector agrícola para incrementar la productividad de los cultivos mediante una planificación más eficaz y una gestión más inteligente.

Las características inherentes a la tecnología agrícola fomentan métodos de cultivo eficientes y sostenibles, proporcionando a los agricultores las herramientas necesarias para prosperar en la actualidad. Prácticas comprobadas, como la rotación de cultivos, y otras aplicaciones fuera del ámbito agrícola, como la vigilancia de la productividad de los campos mediante imágenes satelitales y programas informáticos especializados, constituyen elementos esenciales de la tecnología agrícola que busca garantizar la viabilidad de esta actividad.

8.10. Evaluación de impacto socioeconómico y ambiental

Existen tres categorías de preocupaciones ambientales vinculadas al desarrollo agrícola según Impactos Ambientales (2022):

Despeje o recuperación de tierras: cuando se incorporan por primera vez nuevas tierras a la producción agrícola, se generan impactos iniciales significativos, algunos de los cuales son irreversibles. Se pierden recursos naturales valiosos, como bosques primarios, pantanos y tierras húmedas; los suelos experimentan erosión; la productividad de las tierras disminuye; desaparecen especies.

Sustentabilidad: Para evaluar la sustentabilidad es necesario considerar los costos económicos, sociales y ambientales asociados con la continuación a largo plazo del proyecto agrícola. Se plantean preguntas clave, como la aceptabilidad de estos costos y si el proyecto puede mantenerse a lo largo del tiempo en función de los productos obtenidos. (párr. 1-3)

La primera se refiere al impacto derivado del despeje o la recuperación de nuevas tierras para proyectos agrícolas. La segunda aborda los efectos de la intensificación de la producción en tierras agrícolas ya existentes. La tercera se relaciona con la sustentabilidad de los proyectos agrícolas.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.2 Antecedentes (estudios previos)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sensores para indicar los niveles de nutrientes

2.2. Nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo

2.2.1. Nitrógeno

2.2.2. Fósforo

2.2.3. Potasio

2.3. Efecto invernadero

2.4. Aplicación de fertilizantes

2.4.1. Condiciones básicas para uso de fertilizantes líquidos

2.5. Impacto de nutrientes en la salud del suelo y de los cultivos

2.5.1. Características de un suelo sano

2.6. Tecnologías para la aplicación de fertilizantes

2.6.1. Pulverizadores

- 2.6.2. Aplicaciones programadas
 - 2.6.3. Inoculación de microbios
 - 2.7. Consideraciones ambientales climáticas en Guatemala
 - 2.8. Agricultura sostenible
 - 2.9. Adopción de tecnologías agrícolas
 - 2.10. Evaluación de impacto socioeconómico y ambiental
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Localización
 - 3.1.2. Infraestructura
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.2. Variables
 - 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1: Revisión de literatura
 - 3.3.2. Fase 2: Gestión o recolección de la información
 - 3.3.3. Fase 3: Análisis de la información
 - 3.3.4. Fase 4: Interpretación de la información
- 4. ANÁLISIS DE COSTOS / ANÁLISIS FINANCIERO
- 5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN
- 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
APÉNDICES
ANEXOS

10. METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque metodológico mixto, combinando elementos cuantitativos y cualitativos. Con base en esto se pretende medir los grados de nutrientes en la tierra (nitrógeno, fósforo y potasio) haciendo uso de sensores, lo cual constituye el aspecto cuantitativo. Por otro lado, se busca comprender las prácticas de fertilización y sus efectos en la agricultura sostenible, abarcando así el aspecto cualitativo. El alcance es de tipo exploratorio-descriptivo, ya que se pretende identificar y describir las condiciones actuales de los nutrientes en el suelo y cómo estas condiciones afectan la aplicación de fertilizantes en el entorno del invernadero.

10.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto para la línea de investigación de gestión ambiental es mixto, ya que permite no solo recolectar y analizar datos numéricos precisos sobre los nutrientes del suelo y la efectividad de las prácticas de fertilización, sino también entender las complejidades humanas y contextuales detrás de estas prácticas.

El alcance incluye una fase exploratoria y una descriptiva. La primera fase se enfoca en identificar y comprender las diversas variables e influencias en el estudio del suelo agrícola, permitiendo descubrir patrones, problemas y oportunidades sin estar limitados por hipótesis preconcebidas. La segunda fase describe las condiciones actuales de los nutrientes del suelo y cómo estas varían en diferentes entornos del invernadero. Además, evalúa las prácticas de fertilización actuales y el impacto en la calidad de la tierra y la eficiencia de los

cultivos, con el propósito de proporcionar una visión detallada y precisa de los elementos estudiados y sus interrelaciones.

El diseño es no experimental y transversal, porque se observarán y medirán las variables de interés (niveles de nutrientes) en su estado natural sin manipular, en un momento específico en el tiempo.

10.2. Unidades de análisis

Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical de la ciudad de Guatemala, específicamente en áreas destinadas al cultivo bajo invernadero.

- 2 diferentes áreas de cultivo dentro del centro, cada una con distintas características de suelo y tratamientos de fertilizantes.
- Se adoptará un muestreo aleatorio estratificado para garantizar que las 2 áreas de cultivo seleccionadas sean representadas adecuadamente.
- 2 grupos de agricultores para las entrevistas.

10.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación, declarando para cada una de estas su definición técnica, definición operativa, indicador y técnica de recolección.

Tabla 1.*Variables en estudio*

Variable	Definición técnica	Definición operativa	Indicador	Técnica de recolección
Niveles de Nutrientes (N, P, K)	Concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo.	Medición mediante sensores.	<ul style="list-style-type: none"> • ppm de N, P, K en muestras de suelo. • Nivel de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo. • Centro del proceso de investigación. 	Uso de sensores en el campo.
Medición de nutrientes	Utilidad y eficacia de los sensores para la agricultura.	Medición mediante sensores.	<ul style="list-style-type: none"> • Grado de aceptación y percepción de utilidad. • Áreas de cultivo • Comprensión integral. 	Uso de sensores en el campo.
Comprensión integral de suelo y cultivos	Analizar la organización y disposición de las partículas del suelo.	Medición mediante sensores.	<ul style="list-style-type: none"> • Grado de aceptación y percepción de utilidad. • Parámetros de medición. • Centro del proceso de investigación. 	Uso de sensores en el campo.
Prácticas sostenibles	Gestión responsable de los recursos, reducción de residuos, optimización de la eficiencia y promoción de sistemas que perduren a largo plazo.	Respuestas obtenidas	<ul style="list-style-type: none"> • Organización e investigación efectiva. • Organización de agricultores. • Centro del proceso de investigación. 	Entrevistas.

Continuación de la tabla 1.

Variable	Definición técnica	Definición operativa	Indicador	Técnica de recolección
Eficiencia del fertilizantes	Cantidad de fertilizante aplicado y la absorción de nutrientes.	Niveles de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción en la cantidad de fertilizante. • Centro del proceso de investigación. • Monitoreo de los niveles de nutrientes. • Aplicación de fertilizantes. 	Análisis de datos de sensores y registros agronómicos.

Nota. Tabla de variables en estudio, donde se conceptualiza y se mencionan los indicadores para la medición de estas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

10.4. Fases de estudio

Las fases de estudio se detallan a continuación:

- Fase 1: revisión de literatura

Se hace uso de una semana para esta fase. Se toman los días uno y dos para revisar la literatura en aspectos como:

- Exploración de estudios previos sobre el uso de sensores en agricultura.
- Evaluación y revisión de especificaciones técnicas de los sensores a utilizar.
- Evaluación de valores estándares de nutrientes establecidos por el Centro Internacional de Agricultura Tropical de la ciudad de Guatemala.

- Evaluación de prácticas de manejo de fertilizantes.

En los días tres y cuatro se determinan los valores y niveles de nutrientes y fertilizantes que son utilizados en el Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Para finalizar esta fase en los días cinco y seis se concluye con toda la información necesaria, así como la realización de consulta con el asesor.

- Fase 2: gestión o recolección de la información

Fase de instalación de sensores y medición de niveles de nutrientes en las 2 áreas seleccionadas del Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Realización de entrevistas y encuestas para recoger percepciones sobre la tecnología de sensores y prácticas agrícolas sostenibles.

- Fase 3: análisis de la información

Luego de recabar la información relevante, se inicia el proceso de organización para estructurar de manera efectiva los datos obtenidos. Este paso es fundamental para garantizar una comprensión clara y sistemática de la información recopilada. Además, se lleva a cabo un análisis estadístico de los datos recogidos mediante los sensores empleados, permitiendo así extraer patrones y tendencias significativas. Simultáneamente, se profundiza en el contenido de las respuestas obtenidas durante entrevistas y encuestas, explorando de manera detallada las percepciones y opiniones de los participantes.

Este enfoque integral asegura una interpretación exacta y exhaustiva de la información, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y la realización de conclusiones fundamentadas.

- Fase 4: interpretación de información

Una vez completado el análisis de toda la información es importante interpretar los resultados en el contexto de los propósitos de la investigación y las preguntas planteadas.

Se consideran los hallazgos cualitativos para ofrecer una comprensión completa sobre la eficacia de los sensores en la monitorización de nutrientes y el impacto en la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.

De manera conjunta, esta etapa interpretativa no solo amplía la comprensión de los resultados. Las pruebas derivadas de una interpretación sólida y reflexiva se presentan como recursos valiosos para la toma de decisiones acertadas y la identificación de áreas particulares que podrían mejorar mediante estrategias efectivas en ambas áreas.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La investigación, de naturaleza no experimental, implicará un análisis de datos utilizando estadísticas descriptivas. Este enfoque se adecuará al tipo de variables involucradas y requerirá la recolección de información para su posterior análisis. La interpretación se basará en representaciones gráficas y tabulaciones, con el objetivo de examinar las relaciones actuales entre cada variable.

Se presentan los datos e informes importantes para realizar el análisis de datos e información.

- Evaluación de las conexiones o interacciones entre los distintos niveles de nutrientes en el suelo y otros factores, como las condiciones climáticas o las prácticas de aplicación de fertilizantes.
- Tablas de datos e información para la elaboración de los gráficos.
- Gráficas de barra descriptivas para resumir y presentar de manera clara los niveles de nutrientes en el suelo.
- La herramienta estadística por utilizar será la de análisis de correlación entre variables.

Se empleará Microsoft Excel para administrar la información mencionada, abordando la tabulación, manipulación y creación de gráficos de datos.

Para obtener los resultados deseados es necesario seguir los siguientes pasos:

- Recopilación de datos

Se obtendrán datos relacionados con los niveles de nutrientes en la tierra, condiciones climáticas y prácticas de aplicación de fertilizantes. Es importante asegurarse de contar con una base de datos completa y precisa que incluya todas las variables de estudio.

- Organización de datos

Organizar los datos en columnas separadas para cada variable. Cada columna debe etiquetarse claramente para facilitar la comprensión.

- Tabulación de datos

Crear tablas de resumen que presenten de manera clara la información relevante. Para un análisis más detallado, se debe utilizar tablas en Microsoft Excel, las cuales permitirán examinar diversos aspectos de los datos.

- Gráficos descriptivos

Elaborar gráficos de barras descriptivos para visualizar de manera efectiva los niveles de nutrientes en el suelo y sus variaciones. Para una mayor comprensión, se incluirán etiquetas y leyendas en los gráficos, facilitando así la interpretación de la información presentada.

- Informe de resultados

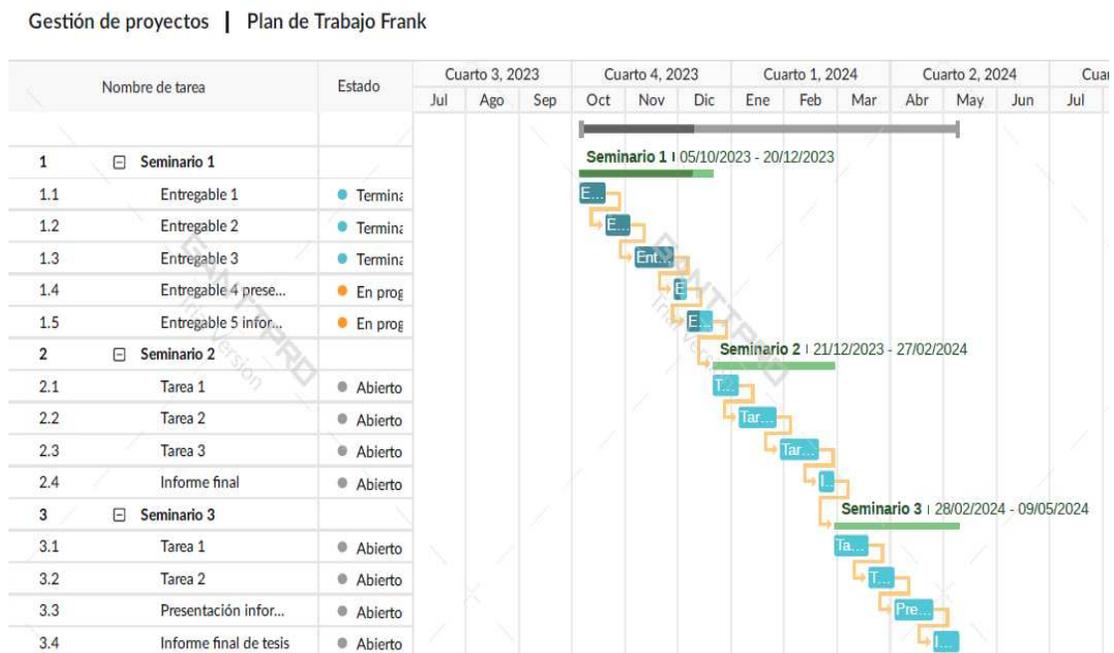
Recopilar todos los pasos realizados, así como los resultados, para llevar a cabo el diseño de investigación sobre la aplicación de sensores, para indicar los rangos de nutrientes en la tierra, incluyendo nitrógeno, fósforo y potasio, por el efecto invernadero en la aplicación de fertilizantes.

12. CRONOGRAMA

En la figura 2 se describe el plan de trabajo propuesto en cuanto al desarrollo y elaboración del informe de graduación de seminario 1, seminario 2 y seminario 3, de las fechas de septiembre del 2023 a diciembre del 2024.

Figura 2.

Plan de trabajo



Nota. Árbol de problemas. Elaboración propia, realizado con GanttProject.

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La realización de este estudio se efectuará empleando los fondos personales del estudiante. En virtud de ser una investigación descriptiva, se tomarán en cuenta los recursos siguientes:

Tabla 2.

Recursos necesarios para la investigación

	Recurso	Unidad	Costo
	HUMANO		
1	Asesor	1	Q. 600.00
	Otros	1	Q. 100.00
	FÍSICO		
2	Libreta	1	Q. 35.00
	Lapiceros	3	Q. 6.00
	Impresiones de las entrevistas	30	Q. 60.00
	Teléfono celular	1	Q. 2,000.00
	FINANCIERO		
	Gasolina	1	Q. 200.00
3	Otros	1	Q. 40.00
	Recolección de muestras	15	Q. 2,000.00
	Total		Q. 5,041.00

Nota. Detalle del presupuesto para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Costo de sensores y sistemas de cómputo - Sensor NPK

Tabla 3.

Costo de sensores y sistemas de cómputo - Sensor NPK

Cantidad	Artículo	Precio en unidad	Cantidad total
2	Sensor NPK	Q 800.00	Q 1,600.00
2	Raspberry PI 4 modelo B	Q 700.00	Q 1,400.00
8	Sensor ultrasónico HC-SR04	Q 30.00	Q 240.00
4	Módulo de humedad de suelo XH-M214 CON RELÉ DE 12V	Q 70.00	Q 270.00
4	Módulo de sensor de humedad y temperatura DHT11	Q 30.00	Q 120.00
4	Sensor de monóxido de carbono MQ-7	Q 40.00	Q 160.00
	Total		Q 3,790.00

Nota. Detalle del presupuesto para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Costo del trabajo

Tabla 4.

Costo del trabajo

Cantidad	Actividad	Costo total
30 horas	Armado y ensamblado de sensores	Q 1,050.00
10 horas	Calibración de sensores	Q 350.00
25 horas	Programación	Q 750.00
9 raciones	Alimentación	Q 270.00
1h	Armado y ensamblado de sensores	Q 35.00
1h	Programación de placas de desarrollo	Q 35.00
1 ración de comida	Alimentación	Q 30.00
Total		Q 2,520.00

Nota. Detalle del presupuesto para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Los costos asociados con la investigación son considerados factibles, ya que no se requiere ningún elemento que esté fuera de alcance. Además, se ha obtenido la aprobación de los permisos requeridos para llevar a cabo la investigación.

REFERENCIAS

Agricolus. (2020). *Sensores para la agricultura*. Agricolus.

Anzuetto, F. (2023). *Salud del suelo*. Disagro.

Cevallos, C. (2020). *Monitoreo y análisis de las hojas de las plantas de jitomate a partir de un sistema de visión, un algoritmo supervisado y un sistema de control semiautomático*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Connors, S. (2021). *Cambio climático*. McGraw-Hill.

Delgado, S. (2023). *Sensores de suelo para agricultura: utilidades prácticas*. Prismab.

Duque, A. (2019). *Evaluación del efecto de cuatro niveles de un programa de nutrición sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de banano en un suelo Molisol, perteneciente a la finca Tolimán, Escuintla*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Gámez, H. (2019). *Mi sistema solar. Nutrientes del suelo: ¿qué son?, importancia, su pérdida y más*. Océano.

García, E. (2019). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Gobierno de España.

Guerra, F. (2021). Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero, ¿cuál es cuál? *Revista Ciencia*, 72(2), 48-55.

Guilcaso, J. (2023). *Sistema de monitoreo de variables químicas con tecnología LOT de los suelos agrícolas para la cosecha de productos en Agro Pujilí*. [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato, Perú]. Repositorio institucional.

Hernández, J. (2019). *Determinación de propiedades de suelos agrícolas a partir de mediciones eléctricas realizadas en campo y en laboratorio*. Limusa.

Impactos ambientales. (9 de noviembre de 2022). En *Wikilibros*. https://es.wikibooks.org/wiki/Impactos_ambientales

JACTO. (2023). *Sensores para agricultura*. JACTO.

Kogut, P. (2020). *La agricultura sostenible: un nuevo concepto de cultivo*. EOS Data Analytics.

López, J. (2020). *Análisis de cambio y uso de suelos al noroeste de la ciudad de Guatemala, empleando imágenes satelitales frente a la vulnerabilidad de deslizamientos en laderas*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Maldonado, R. (2022). *Diseño de investigación para el diseño e implementación de una red para monitoreo y control automatizado para el análisis de PH nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo agrícola de la finca Moraleja*.

[Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].
Repositorio institucional.

Milo, P. (2023). *Obtención y evaluación de pellets basados en materia orgánica para la liberación de fósforo y su aprovechamiento en la agricultura*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Tulancingo de Bravo, México].
Repositorio institucional.

Pablo, J. (2020). *Diseño de investigación de un sistema electrónico mediante el uso de tecnologías de LOT para el monitoreo remoto de pH en agua de solución de nutrientes en un sistema de cultivo hidropónico, para mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].
Repositorio institucional.

Palencia, A. (2019). *Implementación de sistema de riego inteligente automatizado como dispositivo de control para el uso eficiente del agua en plantas ornamentales del vivero municipal de San Cristóbal Acasagatlán*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala].
Repositorio institucional.

Pérez, L. (2020). *Diseño del proceso de elaboración de fertilizantes líquido químico para cultivo agroindustrial intensivo de la uva en la zona de Piura*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Piura, Perú].
Repositorio institucional.

Rosales, M. (2019). Cambio climático: ¿cómo nos afecta y qué estamos haciendo en Guatemala? *Revista Yu´am*, 3(6), 37-45.

Sergieieva, K. (2023). *Tecnología agrícola: evolución, retos y su impacto*.
Scribd.

APÉNDICES

Apéndice 1.

Entrevista

Entrevista

Del estudio de campo sobre los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio por el efecto invernadero en la aplicación de fertilizantes, en un Centro Internacional de Agricultura Tropical en la ciudad de Guatemala a 2 grupos de agricultores.

1. ¿Cómo es el método actual con el que se miden los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio por el efecto de invernadero?
2. ¿Planifican la toma de muestras para conocer los niveles de nutrientes?
3. ¿Cuál es el proceso de la aplicación de fertilizantes?
4. ¿Planifican la aplicación de fertilizantes?
5. ¿Cuáles son las cantidades de fertilizante que aplican, según el área de cultivo?

Datos a analizar:

- 2 diferentes áreas de cultivo dentro del centro, cada una con distintas características de suelo y tratamientos de fertilizantes.

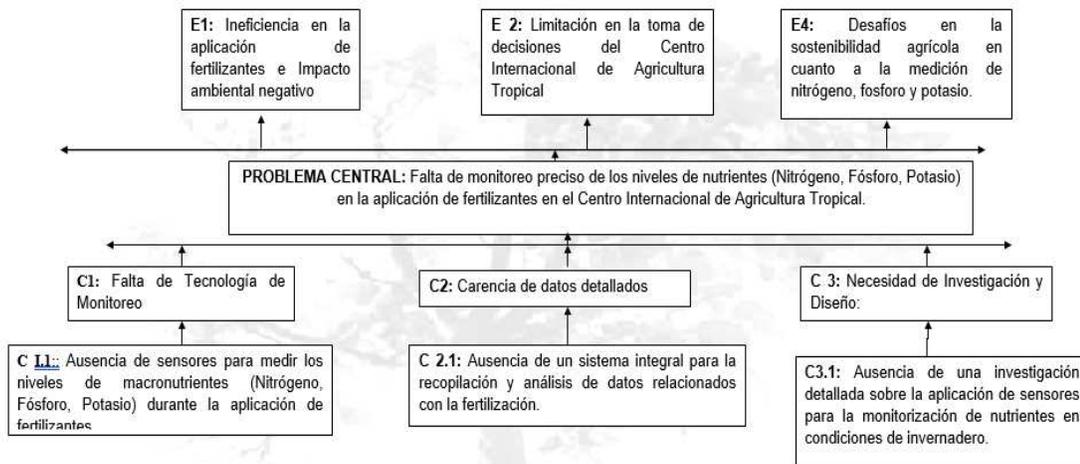
Continuación apéndice 1.

- Muestreo aleatorio estratificado para garantizar que las 2 áreas de cultivo seleccionadas sean representadas adecuadamente.
- Toma de datos de nitrógeno, fósforo y potasio.
- Toma de 10 y 20 submuestras.
- Concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo.
- Gestión responsable de los recursos.
- Cantidad de fertilizante aplicado y la absorción de nutrientes.
- Grado de aceptación y percepción de utilidad.
- Organización e investigación efectiva.
- Reducción en la cantidad de fertilizante.

Nota. Datos para entrevista. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 2.

Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 3.

Matriz de coherencia

Problema General	La necesidad de implementar sensores para la monitorización de nutrientes con el objetivo de mejorar la eficiencia agrícola y promover la sostenibilidad ambiental. La falta de este sistema impide una gestión precisa de los recursos agrícolas, resultando en la sobreaplicación de fertilizantes y generando costos innecesarios, además de contribuir a la contaminación del suelo y el agua.			
Preguntas de investigación	Objetivo	Variables	Indicadores	Temario
¿Cuáles son las tecnologías de sensores más adecuadas para medir los niveles de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo durante la aplicación de fertilizantes en un entorno de invernadero?	Determinar las tecnologías de sensores más adecuadas para medir los niveles de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio para la aplicación de fertilizantes en un entorno invernadero.	Y= Niveles de concentración de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio. X= Respuesta química a la presencia de los niveles de nutrientes en el suelo de nitrógeno, fósforo y potasio.	Detección precisa de la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo. Efectividad en la detección específica de cada nutriente nitrógeno, fósforo y potasio.	1. Sensores para indicar los niveles de nutrientes. 2. Nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo. 3. Efecto invernadero.
¿Cuál sería la ubicación estratégica de los sensores dentro del Centro Internacional de Agricultura Tropical para garantizar una medición precisa de los nutrientes en diferentes áreas de cultivo?	Establecer la ubicación estratégica de los sensores dentro del Centro Internacional de Agricultura para garantizar una medición precisa de nutrientes.	Y= profundidad del suelo en que se montan los sensores. X= condiciones meteorológicas.	Determinar la profundidad óptima para obtener mediciones representativas de diferentes áreas del cultivo. Evaluar el impacto de	1. Aplicación de fertilizantes. 2. Impacto de los nutrientes en la salud del suelo y de los cultivos.

Continuación del apéndice 3.

Preguntas de investigación	Objetivo	Variables	Indicadores	Temario
	en diferentes áreas de cultivo.		las condiciones climáticas en la dispersión de nutrientes.	
¿Cuáles serían los parámetros clave que se medirían además de nitrógeno, fósforo y potasio para obtener una comprensión integral de la salud del suelo y de los cultivos en la integración de la informática al incorporar programación en dispositivos electrónicos que se fundamentan en hardware libre y componentes eléctricos, buscando eficiencia en la operación resultante?	Identificar los parámetros clave que se medirán además del nitrógeno, fósforo y potasio para obtener una comprensión integral de la salud del suelo y de los cultivos.	Y= niveles de acidez o alcalinidad y contenido de materia orgánica del suelo. X= presencia de contaminantes contenidos en el agua del suelo.	Evaluación de la salud del suelo y su capacidad para respaldar el crecimiento de los cultivos. Impacto en la salud del suelo y seguridad alimentaria.	1. Tecnologías para la aplicación de fertilizantes. 2. Consideraciones ambientales climáticas en Guatemala.
¿Cómo se involucraría a los agricultores y al personal del centro en el proceso de investigación, y cómo se comunicarían los resultados para promover la adopción efectiva de prácticas más sostenibles?	Organizar a los agricultores y al personal del centro en el proceso de investigación para promover la adopción efectiva de prácticas más sostenibles.	Y= nivel de participación de agricultores y personal del centro. X= desarrollo de habilidades prácticas para implementar prácticas sostenibles.	Participación en reuniones, sesiones o capacitaciones sobre prácticas sostenibles.	1. Agricultura sostenible. 2. Adopción de tecnologías agrícolas. 3. Evaluación de impacto socioeconómico y ambiental.

Nota. Matriz de coherencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

