



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

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES
LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO
DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**

Héctor Armando Arévalo Moreno

Asesorado por el MSc. Ing. Daniel Armando García Olivarez

Guatemala, enero 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES
LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO
DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HÉCTOR ARMANDO ARÉVALO MORENO
ASESORADO POR EL MSC. ING. DANIEL ARMANDO GARCÍA OLIVAREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ENERO 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES
LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO
DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 21 de octubre de 2023.



Héctor Armando Arévalo Moreno



EEPFI-PP-1786-2023
Guatemala, 21 de octubre de 2023

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

Estimado Mtro. Rivera

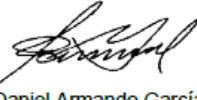
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Telecomunicaciones - Telecomunicaciones**, presentado por el estudiante **Héctor Armando Arévalo Moreno** camé número **8617125**, 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 Ingeniería Para La Industria Con Especialidad En Telecomunicaciones.

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.

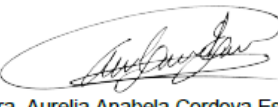
Atentamente,


"Id y Enseñad a Todos"


Daniel Armando García Olivarez
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 19,907
Mtro. Daniel Armando García Olivarez
Asesor(a)


Mtro. Mario Renato Escobedo Martínez
Coordinador(a) de Maestría




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





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EEP-EIME-1602-2023

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 DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario **Héctor Armando Arévalo Moreno**, 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, octubre de 2023

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 DE UN PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO DE UNA PARCELA AGRÍCOLA**, presentado por: **Hector Armando Arevalo Moreno** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Firmado electrónicamente por: José Francisco
Gómez Rivera
Motivo: Orden de impresión
Fecha: 28/01/2024 11:16:07
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, enero 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: 50 CUI: 2582365230101

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, Cámaras: 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	Quien todo lo puede
Mi madre	Bernarda quien ha sido mi motor y que este logro sea una muestra más de mi eterno agradecimiento por su esfuerzo, su apoyo incondicional, su dedicación, su paciencia y sus consejos.
Mi hija	Nathalie Sofía, quien ha sido mi principal motivación para alcanzar esta meta y a quien le agradezco toda su comprensión y paciencia.
Mis hermanos	Aura, Verónica, Celso, Nora, Marbel, Reyna y Silvia, por ser siempre incondicionales con su ayuda, sus consejos y enseñanzas y por su motivación e insistencia para alcanzar las metas.
Mi esposa	Alejandra, por su comprensión, paciencia y apoyo.
Mi suegra	Karen, por sus palabras de aliento.
Mis cuñados	Vinicio y Pablo, por su apoyo y consejos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>Alma Máter</i> la cual me ha brindado la gran oportunidad y los conocimientos para poder desarrollarme como profesional.
La Escuela de Estudios de Post Grado	Por su valioso aporte para poder lograr uno de mis objetivos.
Mi asesor	Ingeniero Daniel Olivares, por su valiosa orientación y aporte en el desarrollo del trabajo de graduación.
Mis catedráticos	Que desinteresadamente han compartido sus conocimientos y experiencia que sentaron una sólida base para el desarrollo de mi carrera, de mi vida laboral y del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	7
3.3. Formulación del problema	8
3.3.1. Pregunta central	8
3.3.2. Preguntas auxiliares	8
3.4. Delimitación del problema	9
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
6.1. Necesidades para cubrir	15
6.1.1. Monitoreo del suelo	15

6.1.2.	Control remoto del riego	15
6.1.3.	Comunicación de datos	16
6.1.4.	Eficiencia hídrica	16
6.1.5.	Ahorro energético	16
6.1.6.	Integración con IoT y LoRaWAN	16
6.2.	Esquemas de solución	17
6.2.1.	Sensores de suelo y microcontroladores.....	17
6.2.2.	Gateway LoRaWAN	17
6.2.3.	Plataforma de control remoto	17
6.2.4.	Ciberseguridad	18
6.2.4.1.	Capa de aplicación.....	18
6.2.4.2.	Capa de protección de red LAN/WAN y acceso a internet	18
6.2.4.3.	Capa de protección con contraseñas ...	19
6.2.5.	Algoritmos de decisión	21
6.2.6.	Actuadores de riego automatizado.....	21
6.2.7.	Ahorro energético.....	21
6.2.7.1.	Optimización de la demanda	22
6.2.7.2.	Apagado selectivo de bombas	22
6.2.7.3.	Reducción de pérdidas por fricción	22
6.2.8.	Capacitación y soporte	23
6.2.9.	Evaluación y ajuste	23
7.	MARCO TEÓRICO	25
7.1.	La eficiencia en el riego agrícola.....	26
7.2.	Modernización del riego agrícola	26
7.3.	Tecnologías emergentes en el riego agrícola	27
7.4.	Internet de las Cosas (IoT).....	28
7.5.	Tecnologías inalámbricas.....	30

7.6.	Sensores	31
7.7.	Redes IoT para la eficiencia agrícola	32
7.8.	Interfaz gráfica.....	35
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	37
9.	METODOLOGIA.....	39
9.1.	Enfoque de la investigación.....	39
9.2.	Diseño de la investigación	39
9.3.	Alcance.....	40
9.3.1.	Alcance exploratorio	40
9.3.2.	Alcance descriptivo.....	42
9.3.3.	Alcance correlacional.....	42
9.4.	Características del estudio	43
9.4.1.	El estudio es sistemático	43
9.4.2.	Método científico.....	43
9.4.3.	Trabajo documental y de campo.....	43
9.4.4.	Técnicas e instrumentos	44
9.4.5.	El estudio es objetivo.....	44
9.4.6.	Métodos generales	44
9.5.	Unidades de análisis	45
9.6.	Variables.....	46
9.6.1.	Variables dependientes e independientes	46
9.7.	Fases del diseño de la investigación	48
9.7.1.	Fase 1: Preparación y diseño	48
9.7.1.1.	Revisión documental	48
9.7.1.2.	Diseño del prototipo.....	48
9.7.2.	Fase 2: Implementación del prototipo.....	49
9.7.2.1.	Instalación de sensores y dispositivos.	49

	9.7.2.2.	Configuración del sistema	49
9.7.3.		Fase 3: Recopilación de datos	50
	9.7.3.1.	Mediciones de eficiencia hídrica.....	50
	9.7.3.2.	Registro de consumo energético.....	50
9.7.4.		Fase 4: Evaluación y análisis	50
	9.7.4.1.	Encuestas y entrevistas.....	51
	9.7.4.2.	Análisis de datos	51
9.7.5.		Fase 5: Interpretación de resultados y conclusiones	51
	9.7.5.1.	Análisis cualitativo	51
	9.7.5.2.	Comparación y conclusiones.....	52
9.7.6.		Fase 6: Informe y comunicación de resultados	52
	9.7.6.1.	Elaboración de informe	52
	9.7.6.2.	Comunicación y divulgación	52
10.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	53
10.1.		Recolección de Datos vía software y hardware	53
	10.1.1.	Análisis de sensores	53
	10.1.2.	Análisis de consumo energético.....	54
	10.1.3.	Análisis de datos en tiempo real.....	54
	10.1.4.	Pruebas comparativas.....	54
10.2.		Técnicas de análisis estadístico:	54
	10.2.1.	Análisis de series temporales.....	55
	10.2.2.	Prueba t o la Prueba de Chi-cuadrado	55
	10.2.3.	Análisis de correlación:	55
	10.2.4.	Modelos de predicción	55
	10.2.5.	Análisis de Costo-Beneficio.....	56
11.		CRONOGRAMA	57

12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	59
12.1.	Factibilidad técnica	60
12.2.	Factibilidad legal y regulatoria	62
12.3.	Factibilidad financiera	63
12.4.	Impacto social.....	65
12.5.	Impacto ambiental	65
12.6.	Sostenibilidad	65
	REFERENCIAS	67
	APÉNDICES	71
	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Esquema de Solución de Telecomunicaciones LoRaWAN.....	2
Figura 2.	Esquema de la Solución integrando Ciberseguridad	20
Figura 3.	Software R Para Análisis Estadístico.....	23
Figura 4.	IoT en el Sector Agrícola	29
Figura 5.	Riego Inteligente con Tecnología LoRaWAN.....	34

TABLAS

Tabla 1.	VARIABLES EN ESTUDIO	47
Tabla 2.	Aspectos de factibilidad Técnica.....	61
Tabla 3.	Estimación de costos y ahorros esperados	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
API	<i>Application Programming Interface</i>
dBm	decibel milliwatts
GB	Giga Byte
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ICM	Industrial Comercial y Médica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
Km	Kilómetro
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area</i>
MHz	Mega Hertz
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
mW	milliwatts
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SIT	Superintendencia de Telecomunicaciones
TNAF	Tabla Nacional de Atribución de Frecuencias
VPN	<i>Virtual Private Network</i>

GLOSARIO

Actuadores	Componentes electrónicos o mecánicos que realizan acciones físicas, como abrir o cerrar válvulas de riego en respuesta a comandos del sistema de la interfaz gráfica GUI.
Ahorro Energético:	El ahorro energético implica la reducción del consumo de energía en un sistema o proceso. En este contexto, se busca reducir la energía utilizada en el riego agrícola tanto eléctrica como de combustibles fósiles para hacerlo más sostenible.
Análisis de datos	La recopilación y el procesamiento de datos agrícolas para obtener información valiosa que ayude en la toma de decisiones relacionadas con el riego y la gestión de cultivos.
Controlador de riego	Un dispositivo que gestiona y controla la aplicación de agua en el riego agrícola según los datos recopilados por los sensores y las condiciones predefinidas.
Eficiencia energética	La eficiencia energética se refiere a la optimización en el uso de la energía, en este contexto, se busca reducir el consumo de energía en el sistema de riego.

Eficiencia Hídrica	La eficiencia hídrica se refiere a la capacidad de utilizar el agua de manera óptima y reducir el desperdicio en aplicaciones como el riego agrícola, garantizando que se utilice la cantidad adecuada de agua en el momento adecuado.
Firewall	Sistema de seguridad informática que se utiliza para controlar el tráfico de red, evitar intrusiones y proteger de posibles ataques malintencionados.
Gateway LoRaWAN	Un Gateway LoRaWAN es un dispositivo que actúa como un punto de acceso para conectar los dispositivos de la red LoRaWAN instalados en el campo con la red IoT para visualización de datos.
IoT	(Internet de las cosas) El Internet de las cosas es un concepto que se refiere a la interconexión de dispositivos físicos (sensores, actuadores, máquinas) a través de internet, permitiendo la recopilación y transmisión de datos para su análisis y control.
LoRaWAN	(Long Range Wide Area Network) es un protocolo de red para comunicación inalámbrica de largo alcance LoRa diseñado específicamente para la transmisión de datos de dispositivos IoT con bajo consumo de energía.
Modbus	Es un protocolo de comunicación utilizado en sistemas de automatización industrial y control de procesos.

Monitorización remota	La capacidad de supervisar y controlar el sistema de riego y los dispositivos IoT desde una ubicación remota a través de una conexión de red.
Parcela agrícola	Una parcela agrícola es un terreno destinado a la producción de cultivos agrícolas. En este contexto, se busca mejorar la gestión del riego en una parcela específica.
Protocolo MQTT	(Message Queuing Telemetry Transport) Es un protocolo de comunicación ligero y eficiente diseñado para la transmisión de mensajes entre dispositivos en redes de Internet de las cosas (IoT).
Red de sensores	La red de sensores se refiere al conjunto de sensores desplegados en la parcela agrícola que recopilan datos relevantes sobre el suelo, el clima y las condiciones ambientales.
Riego Inteligente	Se refiere a la aplicación de tecnologías IoT para automatizar y controlar el riego agrícola de manera eficiente, utilizando datos en tiempo real y sensores para tomar decisiones informadas sobre cuándo y cuánta agua aplicar.
Sensores de humedad	Dispositivos que miden la humedad presente en el suelo. Estos sensores son fundamentales para determinar cuándo es necesario regar y cuánta agua se necesita.

Sostenibilidad agrícola La sostenibilidad agrícola se refiere a prácticas y tecnologías que permiten la producción de alimentos de manera ambientalmente sostenible y eficiente.

Telemetría La telemetría implica la recopilación y transmisión de datos a distancia, en este caso, datos relacionados con el riego y las condiciones del suelo.

Virtual Private Network Conexión que se utiliza para el acceso a información en redes privadas desde ubicaciones externas

1. INTRODUCCIÓN

El presente diseño de la investigación tiene como objetivo mostrar como las tecnologías modernas del IoT y de las telecomunicaciones inalámbricas LoRaWAN, se combinan para diseñar un prototipo funcional de un sistema que pueda controlar de manera remota la operación del riego agrícola cuyo aporte principal será hacer un uso eficiente del agua de riego en una parcela agrícola. El riego acertado y oportuno también logra un ahorro en el consumo energético reduciendo los costos operativos, lo que mejora la producción agrícola.

En el capítulo dos se hace un análisis de trabajos previos de sistemas similares analizando las experiencias de otros autores. Del capítulo tres al capítulo seis se definen la problemática que motiva a realizar esta investigación, la justificación para considerar la implementación del prototipo que resolverá esta problemática y que objetivos se alcanzarán.

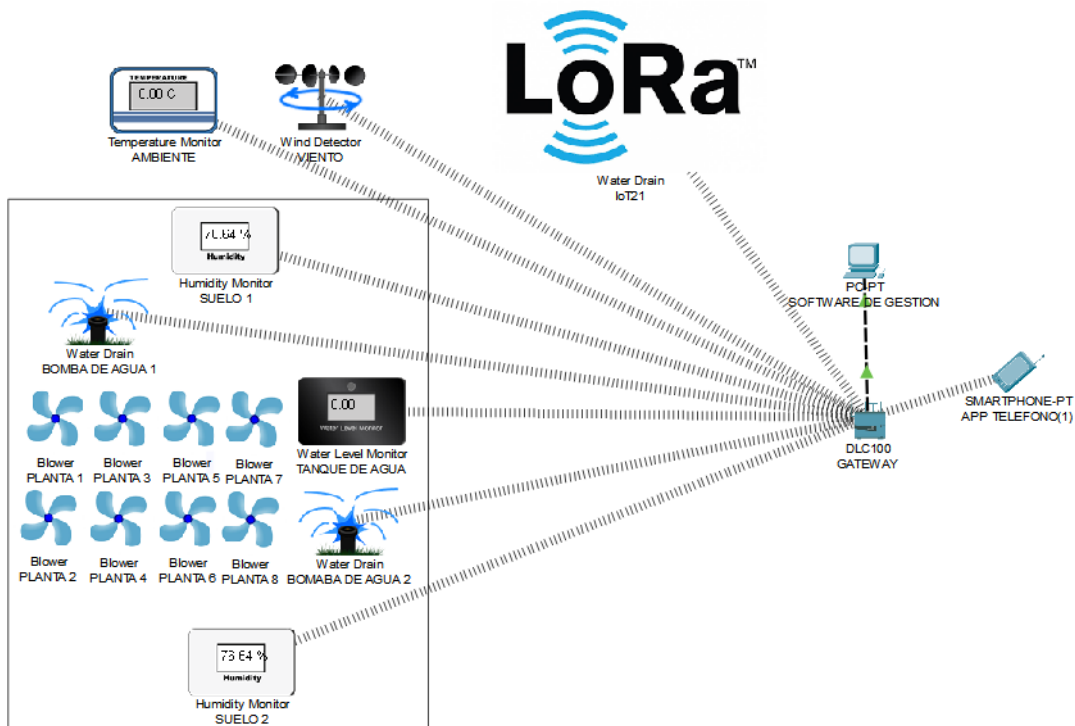
El capítulo siete define una propuesta de esquema de solución por lo que se hace necesario ir al capítulo ocho para adentrarse en la teoría que servirá de base para definir en el capítulo diez la metodología a seguir para realizar esta investigación

El diseño de la investigación será del tipo experimental con un enfoque cuantitativo y un alcance exploratorio en su etapa de puesta a punto, los datos que se almacenen brindan la posibilidad de hacer un alcance descriptivo y uno correlacional. En el capítulo once se presentan las técnicas de análisis que se emplearán para el tratamiento de dichos datos para finalmente hacer un análisis

de factibilidad sobre escenarios económicos, ambientales y legales que muestran que si es viable implementar este prototipo.

La ilustración de la figura 1 muestra como un prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN es usado para hacer que el sistema de riego sea más eficiente en el uso del agua y contribuir al ahorro energético.

Figura 1.
Esquema de Solución de Telecomunicaciones LoRaWAN



Nota. Esquema de solución para control remoto del riego usando Telecomunicaciones LoRaWAN.
Elaboración propia, realizado con Cisco PacketTracer.

2. ANTECEDENTES

Desde hace unos años el auge de la tecnología de telecomunicaciones LoRaWAN ha abierto muchas posibilidades por su largo alcance, bajo consumo de energía y sobre todo por el uso de frecuencias libres de pago asignadas para proyectos industriales y científicos en variedad de aplicaciones entre las cuales la agricultura no podía dejar de ser considerada. Debido a estas prestaciones, han surgido muchos proyectos y trabajos de investigación cuya temática se ha basado en cómo darle un mejor uso al agua del riego para los diferentes tipos de cultivos. El objetivo común es el de optimizar los recursos para mejorar la productividad.

Los antecedentes que se muestran a continuación fueron investigados con la finalidad de ver el aporte de la tecnología LoRaWAN en el campo agrícola:

En su trabajo sobre un sistema que se implementó para un cultivo de banano Belepú (2022), muestra la propuesta de una arquitectura de IoT "Internet of Things" para recolectar y transmitir datos climáticos y del suelo, especialmente diseñada para abordar los desafíos energéticos y de comunicación en zonas de muy difícil acceso, se presenta como un avance significativo. Las conclusiones de este trabajo subrayan que el IoT y sus aplicaciones son adaptables para los procesos agrícolas y también hace referencia al desarrollo de una interfaz web para control y almacenamiento de datos.

Gutierrez-Lopera et al. (2021), en su artículo publicado en la revista UIS Ingenierías, muestran de una forma muy interesante y con valiosa información gráfica la manera de construir un sistema de monitoreo para la recopilación de datos agroambientales en un cultivo de tomates con el uso de tecnología LoRaWAN, y la presentación en una interfaz de visualización gráfica en la cual se pueden analizar los datos, lo cual facilitó el tomar las acciones de control necesarias.

Es importante tomar las consideraciones necesarias para evaluar la factibilidad de implementar una solución en el área rural, sin embargo, la solución propuesta en esta investigación también aplica muy bien a áreas urbanas

Según la publicación científica de Chanchí-Golondrino et al. (2022), en la cual se desarrolla la implementación de un sistema inalámbrico de supervisión que se basa en IoT para la agricultura urbana. Los investigadores se centraron en la monitorización de variables ambientales clave, como temperatura, humedad y niveles de luz, en un entorno de agricultura urbana. El sistema incluyó varios tipos de sensores inalámbricos de bajo consumo que recopilaban datos en tiempo real y los transmitieron a través de una red LoRaWAN a una plataforma de análisis en la nube. Los resultados de este estudio indicaron que la implementación de este sistema IoT tenía el potencial de mejorar significativamente la eficiencia de los cultivos accediendo a datos en tiempo real a través de una interfaz gráfica para facilitar a los agricultores el tomar decisiones acertadas y oportunas, contribuyendo a la vez a un cultivo más saludable y sostenible en un entorno urbano.

Al revisar la literatura se encuentran distintas opciones para escoger plataformas IoT, incluso existen algunas de forma gratuita con software de uso libre, la interfaz gráfica también se puede obtener o desarrollar sobre proveedores en la nube lo cual las hace accesibles también en dispositivos móviles permitiendo el monitoreo desde cualquier sitio.

Un ejemplo de una aplicación de interacción gráfica se describe en la investigación científica de Arregocés-Guerra et al. (2023), en la cual se describe cómo la implementación de tecnologías 4.0 en la agricultura ha sido un tema de creciente interés en todo el mundo, donde la agricultura juega un papel crucial en la economía y el sustento de la población, la adopción de herramientas de "agricultura inteligente" ha enfrentado desafíos significativos. Según indican los autores investigaron que aproximadamente dos tercios de la de producción agropecuaria en Colombia es operadas por pequeños agricultores. Sin embargo, solo un muy pequeño porcentaje de ellos cuenta con acceso a Internet, lo cual significa que aún hay una brecha digital por superar para que ellos puedan beneficiarse de esta tecnología. La investigación se centró en el uso de una plataforma de IoT de acceso libre y tecnologías de telecomunicaciones LoRa y LoRaWAN para implementar un sistema de monitoreo en dos invernaderos de producción de hortalizas. La plataforma IoT permitió a los agricultores visualizar lecturas en tiempo real de variables críticas, como la temperatura y la humedad relativa del aire.

El aporte de este estudio mostró que muy pocos agricultores tienen acceso a la tecnología necesaria para modernizar sus cultivos. También mostró que es posible conectar los campos agrícolas a través de nodos de Internet, para poder visualizar el estado de la temperatura y humedad, lo cual aumenta la competitividad del agricultor y demuestra la importancia de que este tipo de

tecnología este accesible para los pequeños agricultores y que no es exclusividad de empresas agrícolas grandes.

También se necesita ver como un sistema de telecomunicaciones LoRaWAN no solo tiene que cumplir su objetivo funcional, sino que también tiene que garantizar la calidad tanto en duración como en la obtención precisa de la información. Estos conceptos fueron analizados en el siguiente trabajo de Ojo-González & Bonilla-Morales (2021), El rápido avance de la tecnología en el campo del Internet de las cosas (IoT) ha llevado a la creación de sistemas que pueden recolectar y procesar datos de manera autónoma, lo que ha transformado significativamente diversos dominios de aplicación, como la ciudad, el hogar, la agricultura y las fábricas inteligentes. Sin embargo, para garantizar la calidad y eficiencia de estos sistemas, es esencial identificar y comprender los requerimientos no funcionales asociados a cada dominio. En este sentido, la revolución del IoT radica en su capacidad para conectar una amplia variedad de sensores y dispositivos, permitiendo que estos intercambien información y tomen decisiones sin la intervención humana. Esto ha impulsado la necesidad de definir requerimientos específicos para estos sistemas, no solo en términos de funcionalidad, sino también en relación con la calidad del servicio. En conclusión, este estudio ofrece una visión integral de los requerimientos no funcionales esenciales en sistemas basados en IoT, contribuyendo a la comprensión de cómo estos requisitos pueden variar según el dominio de aplicación.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el ámbito de la agricultura, el riego es una práctica fundamental para asegurar el crecimiento y la productividad de los cultivos, por lo cual, el riego agrícola ineficiente conlleva el uso excesivo o escasez de agua en los cultivos, ocasionando un desperdicio de recursos lo cual representa un desafío significativo para mejorar la productividad en la industria agrícola.

3.1. Contexto general

La falta de precisión en los métodos de riego tradicionales que se realizan de forma manual, están basados en horarios preestablecidos o estimaciones empíricas, lo que conduce a un suministro insuficiente o excesivo de agua, lo que afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos, el medio ambiente y la productividad.

3.2. Descripción del problema

Debido a que el riego tradicional no tiene información periódica y confiable de las condiciones específicas de humedad del suelo, ni las variaciones climáticas estacionales, sin conocer estas variables los agricultores enfrentan un gran desafío para tener una gestión más eficiente del sistema de irrigación. El reto de los agricultores es encontrar la manera de obtener datos de forma remota y de manera de dichas variables de una forma que sean actualizadas periódicamente y de forma automática para poder tener mejores elementos de juicio para ajustar los sistemas de bombeo de agua acorde a las necesidades específicas de irrigación.

3.3. Formulación del problema

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una solución tecnológicamente innovadora que aborde de manera efectiva como se pueden obtener de forma remota y automática las condiciones del suelo y las condiciones climáticas para poder controlar remotamente y de manera oportuna el sistema de irrigación. El siguiente trabajo de graduación propone una solución de telecomunicaciones inalámbricas dentro de una red LoRaWAN que integre la información de los sensores de campo y la distribuya a una plataforma en la que se visualice y se controle el comportamiento de las variables buscando hacer más eficiente la operación del sistema de riego agrícola, superando los problemas y limitaciones de los sistemas manuales y metodologías tradicionales que aún se encuentran en uso.

3.3.1. Pregunta central

¿Cómo implementar un prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN que mejore la eficiencia hídrica y contribuya con el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola?

3.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es el impacto del prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN en la eficiencia hídrica y el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola?
- ¿Cuáles son los beneficios económicos y ambientales que se producirán con la mejora de la eficiencia hídrica y la contribución al ahorro energético

de la implementación del prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN en el riego de una parcela agrícola?

- ¿Qué componentes son los más adecuados para desarrollar el prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN para mejorar la eficiencia hídrica y el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola?

3.4. Delimitación del problema

El ámbito del desarrollo del prototipo abarca una parcela agrícola, la cual no tiene un área delimitada fija, sin embargo, las siguientes definiciones pueden dar una mejor idea de lo que es una parcela, según el siguiente texto:

Debemos saber que el término parcela no hace referencia a una porción de tierra de extensiones delimitadas universalmente. Sino que, cuando utilizamos este concepto, estamos haciendo referencia a una extensión de terreno en general, sin entrar a valorar su extensión, en lo que a su longitud se refiere. (Coll, 2021, párr. 4)

La parcela agrícola es aquella extensión de tierra destinada a la explotación agrícola. Es decir, aquella extensión de territorio en la que se cultiva un determinado producto agrícola, o varios de ellos. Esta extensión de tierra puede ser de propiedad privada o, por el contrario, de propiedad pública. (Coll, 2021, párr. 7).

4. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este prototipo busca la modernización de los sistemas de riego tradicionales transformando hacia la era digital las prácticas tradicionales de operación manual que aún están vigentes. La digitalización también permitirá una gestión más precisa y eficiente del riego, adaptada a las condiciones específicas del suelo, tomando en cuenta las condiciones climáticas y las necesidades hídricas de los cultivos.

Debido a los desafíos que enfrenta el sector agrícola en relación con el consumo de agua y energía entre los cuales se pueden mencionar la escasez de recursos hídricos, los altos costos energéticos, el desplazamiento del personal y la necesidad de incrementar la eficiencia en la producción agrícola son problemáticas que justifican el uso de soluciones de última tecnología que sean innovadoras y sostenibles y que puedan impulsar la modernización y competitividad en este sector.

La nueva tecnología de redes LoRaWAN que transmiten datos a larga distancia con un consumo mínimo de energía, la hace especialmente adecuada ya que sus dispositivos de reducido tamaño utilizan baterías portátiles, que por su bajo consumo permite su operación por varios años sin necesidad de recambio de la batería, esta característica evita tener que invertir en redes de tendido eléctrico o en paneles solares y además brinda la posibilidad de adquirir datos y enviar comandos de control de manera remota y automatizada, sin la necesidad de desplazamientos constantes de personal al lugar de riego.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Implementar un prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN que mejore la eficiencia hídrica y contribuya con el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola.

5.2. Específicos

- Establecer el impacto de la implementación del prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN en la eficiencia hídrica y el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola.
- Determinar los beneficios económicos y ambientales obtenidos de la eficiencia hídrica y el ahorro energético con la implementación del prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN en el riego de una parcela agrícola.
- Seleccionar los componentes adecuados para la implementación del prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN, que mejore la eficiencia hídrica y contribuya con el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El prototipo por implementar cubrirá las siguientes necesidades que se han identificado para hacer eficiente un sistema de riego que sea capaz de supervisar de manera remota las condiciones de campo y también sea capaz de realizar operaciones de control remoto sobre las bombas de agua.

6.1. Necesidades para cubrir

En la era de la agricultura moderna, la maximización de la eficiencia y la sostenibilidad se ha vuelto imperativa. En este contexto, abordamos un conjunto de requisitos fundamentales para potenciar la productividad agrícola y optimizar el manejo de recursos, desde el monitoreo preciso del suelo hasta la integración de tecnologías emergentes como IoT y LoRaWAN, cada elemento de estas necesidades desencadena una revolución en la forma en que entendemos y gestionamos la agricultura.

6.1.1. Monitoreo del suelo

Es necesario conocer constantemente las condiciones del suelo, como la humedad y la temperatura, para determinar cuándo es necesario regar y en qué cantidad.

6.1.2. Control remoto del riego

Se requiere una operación mediante electroválvulas a manera de activar y desactivar de forma remota las bombas que dosificarán el riego hacia los

surtidores según el sistema de riego elegido, los datos recopilados y los parámetros establecidos.

6.1.3. Comunicación de datos

Se requiere una infraestructura de comunicación inalámbrica para transmitir datos entre los sensores LoRa instalados en el campo y el sistema central de control.

6.1.4. Eficiencia hídrica

La solución debe asegurar que el riego se realice solo cuando sea necesario para evitar el desperdicio de agua.

6.1.5. Ahorro energético

El sistema debe ser eficiente en términos de consumo energético mediante el accionamiento preciso de las electroválvulas y el uso de baterías portátiles para mantener operativos los sensores, la comunicación inalámbrica y el sistema de control.

6.1.6. Integración con IoT y LoRaWAN

Se necesita un diseño que permita la interconexión e integración de los sensores LoRa en un Gateway LoRaWAN que actúa como centralizador y luego envía la información colectada en un protocolo diferente hacia la interfaz de visualización y control a través de una red de IoT para una cobertura inalámbrica de largo alcance.

6.2. Esquemas de solución

Para abordar las necesidades mencionadas y lograr un sistema de control remoto del riego eficiente en términos hídricos y energéticos mediante la integración de IoT y la red de sensores LoRaWAN, se propone un esquema que considera las siguientes etapas:

6.2.1. Sensores de suelo y microcontroladores

Implementar sensores de humedad y temperatura del suelo en la parcela agrícola. Estos sensores estarán conectados a microcontroladores que recopilan los datos y los envían a través de la red LoRaWAN.

6.2.2. Gateway LoRaWAN

Colocar un Gateway LoRaWAN en el centro de control para recopilar los datos de los sensores LoRa instalados en la parcela y transmitirlos a través de Internet de las cosas a un servidor central.

6.2.3. Plataforma de control remoto

Desarrollar una plataforma de software física o en la nube que reciba y almacene los datos de los sensores. Esta plataforma permitirá a los agricultores monitorear el estado del suelo y poder tomar decisiones para controlar el riego de una manera precisa de manera remota a través de una interfaz web o una aplicación móvil.

6.2.4. Ciberseguridad

La tecnología (IoT) ha abierto la puerta a una cantidad significativa de información y datos, lo que hace que la seguridad sea una de las preocupaciones clave en la implementación de este prototipo.

Se utilizará un enfoque de seguridad en capas para garantizar una implementación segura y de protección de los datos. Cada capa se diseña para abordar un grupo específico de amenazas

6.2.4.1. Capa de aplicación

Se trata de proteger el sistema operativo, el software de toma de datos y el software de análisis con actualizaciones periódicas de parches de seguridad y el uso de soluciones de software antivirus y firewall en conjunto con el bloqueo de puertos USB para detectar y evitar programas malignos, troyanos y códigos que secuestran la información.

6.2.4.2. Capa de protección de red LAN/WAN y acceso a internet

Firewall para proteger contra intrusiones no autorizadas, ataques de denegación de servicio y poder realizar conexiones seguras VPN con administradores y usuarios externos.

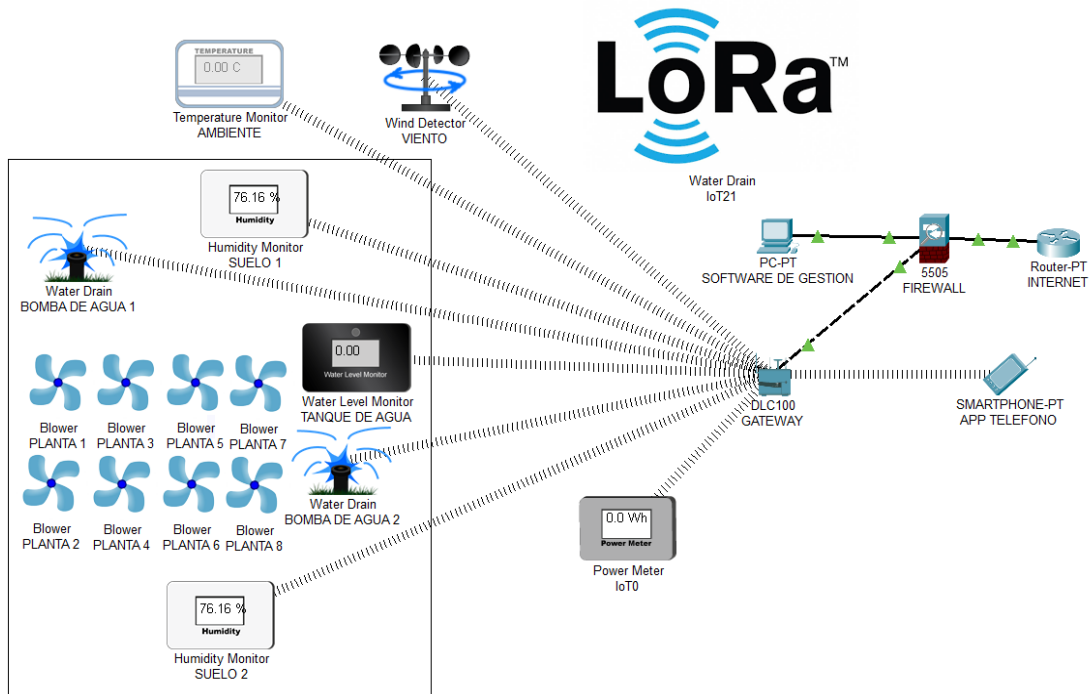
6.2.4.3. Capa de protección con contraseñas

Se asignarán contraseñas de acuerdo con el Rol que ocupa cada usuario del sistema, los cuales se pueden asignar como:

- visor: invitado que no puede ejecutar ninguna acción
- operador: usuario con acceso limitado sin derecho a editar
- administrador: usuario con acceso completo

La ventaja de la tecnología LoRaWAN es que ya es una solución de telecomunicaciones que usa la encriptación de un extremo a otro para poder proteger la información transmitida a través de la red, además el Gateway LoRaWAN cuenta con un firewall integrado en el cual se pueden definir las políticas de seguridad propias de la red LoRaWAN en las cuales se le deniega acceso a cualquier cliente que no sea el ordenador principal por lo que la ciberseguridad estará enfocada en definir las capas de seguridad para el computador que contiene la plataforma IoT y su entorno que conectan con el mundo exterior a través del internet.

Figura 2.
Esquema de la Solución integrando Ciberseguridad



Nota. Esquema de solución para control remoto del riego usando telecomunicaciones LoRaWAN incluyendo un esquema de ciberseguridad. Elaboración propia, realizado con Cisco PacketTracer.

6.2.5. Algoritmos de decisión

Implementar algoritmos que analicen los datos recolectados de los sensores para la toma de decisiones sobre cuándo es el mejor momento para activar las electroválvulas que controlan las bombas del riego. Estos algoritmos consideran factores como la humedad del suelo, la temperatura y las previsiones climáticas.

6.2.6. Actuadores de riego automatizado

Introducir sistemas de electroválvulas que de manera remota reciban las instrucciones desde la plataforma de control y activen o desactiven las bombas del riego.

6.2.7. Ahorro energético

Usar sensores y microcontroladores que operen con bajo consumo de energía, lo que prolongará la vida útil de las baterías y reducirá la necesidad de reemplazos frecuentes. Recolectar información precisa para definir el momento adecuado y el tiempo necesario en el que deben operar las electroválvulas. Que controlan el sistema de bombeo.

El uso de un sistema de control remoto en la gestión del riego ofrece una serie de ventajas notables, siendo el ahorro energético una de las más destacadas. Este enfoque tecnológico y avanzado permite una administración eficiente de las bombas de agua, lo que se traduce en un menor consumo de energía eléctrica y en la prolongación de la vida útil de los sistemas de riego agrícolas.

6.2.7.1. Optimización de la demanda

Uno de los aspectos fundamentales en el ahorro energético radica en la capacidad del sistema de control remoto para evaluar la demanda de agua en tiempo real. Al monitorear las condiciones del suelo y el clima, el sistema puede ajustar automáticamente el flujo de agua y el funcionamiento de las bombas. Esto evita el bombeo excesivo o insuficiente, lo que ahorra energía y agua de manera significativa.

6.2.7.2. Apagado selectivo de bombas

Los sistemas de telecomunicaciones LoRaWAN puede identificar cuáles de las bombas son necesarias en un momento dado. En lugar de mantener todas las bombas en funcionamiento continuo, solo se activan las que son esenciales para satisfacer la demanda actual. Las demás permanecen apagadas, lo que reduce significativamente el consumo energético.

6.2.7.3. Reducción de pérdidas por fricción

Estos sistemas también minimizan las pérdidas de energía debidas a la fricción en las tuberías y las válvulas. Al ajustar con precisión los caudales de agua, se evitan los flujos a alta velocidad que aumentan la fricción y, por lo tanto, la demanda energética.

6.2.8. Capacitación y soporte

Brindar capacitación a los agricultores sobre cómo utilizar y mantener el sistema de control remoto del riego. Proporcionar soporte técnico para resolver problemas y realizar actualizaciones.

6.2.9. Evaluación y ajuste

Realizar un seguimiento continuo del rendimiento del sistema, recopilando datos sobre el consumo de agua, el ahorro energético y la salud y productividad de los cultivos. Ajustar los algoritmos y la configuración según sea necesario para optimizar los resultados.

Para la interpretación de los datos y el análisis estadístico se implementará un código con el Software “R” y su editor RStudio

Figura 3.

Software R Para Análisis Estadístico



Nota. Logo del software R Foundation for Statistical Computing. (<https://www.r-project.org/>). Consultado el 08 de agosto de 2023. De dominio público.

7. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se investigarán teorías y conceptos asociados a la gestión eficiente del agua y el ahorro energético en la agricultura, ya que debido a que cada vez las restricciones medioambientales son más estrictas, se hace necesaria una operación más eficiente que no solo reduzca el desperdicio de agua si no que a su vez logre una mejora la producción agrícola. A medida que se investiga como la tecnología ha ido avanzando, y como estos conceptos y teorías establecen una oportunidad diferente cuyo objetivo es cambiar el enfoque de como se ha estado abordado el riego en las parcelas agrícolas, pasando de sistemas manuales a soluciones automatizadas que con la integración de nuevos dispositivos inalámbricos de telecomunicaciones están ofreciendo varias ventajas, entre las cuales destaca la posibilidad de poder ser monitoreados remotamente de forma continua y de la misma forma también ser operados de manera remota.

El presente marco teórico se adentra en como de manera práctica un sistema de riego controlado manualmente puede aprovechar el avance de la tecnología para desarrollar e implementar un prototipo de sistema de telecomunicaciones LoRaWAN que ayude a mejorar la eficiencia en el riego de una parcela agrícola por medio del monitoreo y control a distancia.

Se busca establecer una metodología que haga posible una sinergia entre las tecnologías de IoT y LoRaWAN cuyo objetivo sea el digitalizar el sistema de riego agrícola, lo cual representa una solución innovadora para una agricultura más eficiente, sostenible y adaptable a las condiciones cambiantes del entorno.

7.1. La eficiencia en el riego agrícola

La eficiencia agrícola en el riego es un tema de importancia crítica en la agricultura moderna. Con la creciente presión sobre el manejo consciente del agua y de aumentar y mejorar la producción, la gestión eficiente del agua en la agricultura se ha convertido en una prioridad esencial, según Fuentes (2023), “en medio de una crisis climática y de escasez de agua que afecta a la mayoría de los países, el uso eficiente de los recursos se convertirá en el estándar de las industrias.” (párr. 3)

En este contexto, es importante conocer y evaluar las tecnologías, modernas que contribuyan a mejorar la gestión del riego para hacer más eficiente la producción agrícola.

7.2. Modernización del riego agrícola

La mecanización de los sistemas de riego ha contribuido para mejorar la agricultura. Desde los métodos de riego primitivos hasta las soluciones tecnológicas avanzadas, el riego ha desempeñado un rol fundamental en la productividad agrícola, destacando los hitos clave que han llevado a los enfoques modernos y la integración de tecnologías emergentes. La aplicación de innovaciones tecnológicas ha permitido que el riego agrícola sea cada vez más eficiente. El uso de tecnologías de telecomunicaciones para el control remoto de las bombas de riego y para la adquisición de datos de los sensores del clima y de la humedad del suelo combinados con una plataforma de visualización y procesamiento de datos, permiten una gestión más precisa de los recursos hídricos.

Según Cornejo-Velázquez et al. (2019), “Desde la perspectiva operacional, el despliegue de los sistemas IoT en los campos agrícolas se basa en nodos IoT, gateways de comunicación, almacenamiento IoT Cloud y herramientas computacionales para el análisis y visualización de resultados”.

Para este trabajo también se deben considerar las regulaciones locales que pueden dar un indicio de la viabilidad de digitalizar el sistema de riego.

Según describe en una publicación de las Naciones Unidas Sotomayor et al. (2021), Digitalizar la agricultura enfrenta numerosos desafíos, incluyendo la necesidad de financiamiento, infraestructura y conectividad, habilidades digitales y regulación en telecomunicaciones.

7.3. Tecnologías emergentes en el riego agrícola

El riego agrícola, que en su forma más básica implica la aplicación de agua a los cultivos como la práctica más fundamental en la agricultura y que durante muchos siglos ha sido la forma tradicional de hacerlo. Sin embargo, la evolución de las tecnologías emergentes ha llevado esta práctica ancestral a un nivel completamente nuevo. En la era moderna, el riego agrícola ya no se limita a un acto simple y manual; se ha transformado en un campo altamente sofisticado y tecnológico que aprovecha al máximo los avances de la ciencia y la ingeniería.

Esta investigación contempla el uso de tecnología IoT combinada con las telecomunicaciones como una herramienta importante en la obtención y tratamiento de la información de campo. Se destaca que es una tecnología bastante económica e innovadora, actualmente pocos agricultores en nuestro medio tienen el acceso a datos confiables que les puedan permitir una forma eficiente para controlar el uso adecuado del agua. En resumen, las tecnologías

emergentes en el riego agrícola están permitiendo un riego más preciso y eficiente, reduciendo el desperdicio de agua, mejorando la calidad de los cultivos y aumentando la rentabilidad de los agricultores.

Es importante considerar la digitalización en el sector agrícola principalmente con los sistemas de riego, ya que el riego manual se ha caracterizado por ser ineficiente.

Según Naciones Unidas “Los proyectos que requieren de labor humana para el bombeo de agua, con la finalidad exclusiva de riego, deben ser evaluados muy cuidadosamente antes de ser implementados. Estos proyectos suelen tener una vida muy corta y no ser exitosos.” (Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, [FAO], 2008, p. 88)

7.4. Internet de las Cosas (IoT)

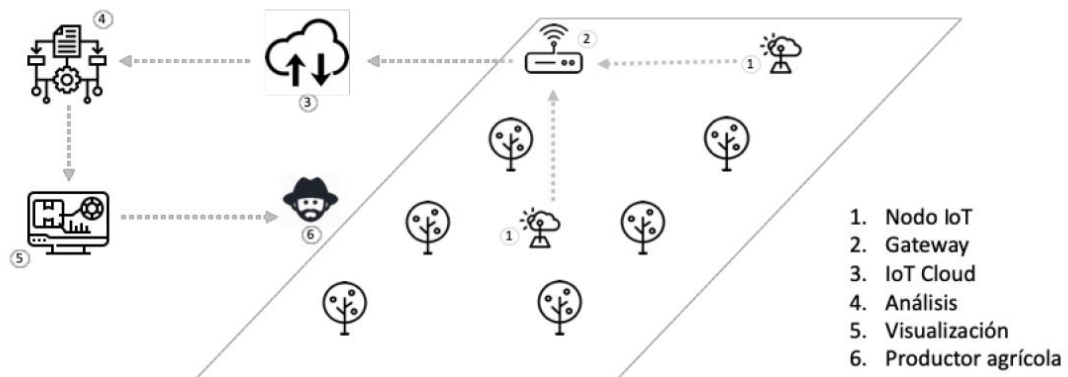
Desde que el internet empezó a contar con velocidades más altas y desde que se pudo trasladar a este servicio a los dispositivos móviles todo nuestro entorno físico comenzó a trasladarse al ámbito digital de manera que prácticamente desde cualquier lugar podemos acceder remotamente a nuestros enseres y accesorios. Es decir, nuestros dispositivos de uso cotidiano ahora tienen la posibilidad de poder enviarnos el estado en que se encuentran y también podemos controlarlos desde nuestra computadora o desde nuestro dispositivo móvil.

En el contexto agrícola, IoT ha demostrado ser una solución viable para la digitalización del riego, su arquitectura de cuatro capas hace que la combinación de dispositivos, enlaces de telecomunicaciones, integración de datos y

aplicaciones para el tratamiento de dichos datos logran en conjunto contar con un sistema más eficiente para el usuario final.

Para una mejor comprensión, en la figura 4 se muestra cómo se estructura una red de servicios basada en IoT.

Figura 4.
IoT en el Sector Agrícola



Nota. Descripción gráfica del uso de IoT en el Sector Agrícola. Obtenido de Cornejo-Velázquez Publicación Semestral Pádi No. 13 (2019) p. 62–67. *Internet de las Cosas (IoT) para el Sector Agrícola.* (<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/download/4403/6486/>). Consultado el 15 de agosto del 2023. De dominio público.

Para comprender como se estructura una red IoT se tiene la siguiente definición de Ma (2011), "La arquitectura de sistemas de IoT se puede dividir en cuatro capas: capa de detección de objetos, la capa de intercambio de datos, capa de integración de la información, y la capa de servicios de aplicaciones" (p. 920).

La ventaja principal del IoT y que ha llevado a que actualmente millones de dispositivos se encuentren conectados a nivel mundial es su capa de detección puesto que tiene la característica de reducir la capacidad que necesitan entregar los sensores primarios.

7.5. Tecnologías inalámbricas

Se depende de las telecomunicaciones inalámbricas para el desarrollo de este prototipo ya que se busca que acceder a equipos remotos con la menor intervención de los agricultores. Muchas de las tecnologías existentes como Wifi y Bluetooth no cuentan con suficiente alcance. Otras tecnologías como la de la red celular tiene un requerimiento de energía bastante alto. La tecnología celular también tiene la desventaja de ser una opción de pago con un desperdicio enorme de recursos. Una de estas tecnologías revolucionarias que ofrece un largo alcance y un bajo consumo energético es la "Tecnología LoRa (Long Range)" y su correspondiente protocolo de red LoRaWAN (Long Range Wide Area Network).

La tecnología LoRa ha desencadenado una transformación trascendental que hace posible la integración de dispositivos y sensores de una forma autónoma resolviendo el problema de las distancias muy largas y casi sin dependencia energética ya que normalmente usan una pila recargable que puede durar de 3 a 5 años en servicio. Estas características han impulsado una nueva

forma de utilizar (IoT) ya que las posibilidades solo están limitadas por la imaginación humana según lo describe la página web del desarrollador de esta tecnología Semtech Corporation (s/f), *“LoRa devices have revolutionized the Internet of Things (IoT) by enabling data communication over a long range while using very little power.”* [Los dispositivos LoRa han revolucionado el internet de las cosas (IoT) permitiendo la comunicación de datos sobre largas distancias mientras se usa muy poca potencia].

Esta tecnología transmite datos en frecuencias de uso libre a grandes distancias que no se contemplan en las tecnologías inalámbricas tradicionales. Esta ventaja lo convierte en un aliado indiscutible en la expansión del IoT.

Por otro lado, "LoRaWAN" tiene la posibilidad de habilitar una red de área amplia que actúa como Gateway entre los sensores de campo y la aplicación IoT.

7.6. Sensores

Los sensores por utilizar para este prototipo deben permitir la obtención de datos precisos acerca de las variables agrícolas. Con esta información se tendrán elementos para coordinar el control de los actuadores para la dosificación del agua. Ambos tipos de dispositivos tendrán una interfaz LoRa, estos dispositivos también se conocen como nodos según la definición:

Estos dispositivos son el elemento más bajo de una red LoRaWAN. Estos suelen ser sensores o actuadores. Debido a las limitaciones de transporte de datos de la tecnología LoRa estos suelen leer únicamente una o dos variables, como pueden ser la presencia de agua, la temperatura o la humedad. Son los nodos los que generan los paquetes de datos, con la

información que nos interesa transportar hasta las aplicaciones finales, donde se le dará uso. (Rodríguez, 2021, p. 18)

7.7. Redes IoT para la eficiencia agrícola

Se ha recalcado que la eficiencia agrícola es la base de esta investigación y de cómo el desarrollo una red IoT lo convierte en una herramienta sumamente útil para lograr este objetivo.

La “agricultura de precisión” es un término que se viene mencionando más frecuentemente en los últimos años y precisamente este trabajo se basa en la aplicación de tecnología avanzada para optimizar el uso de los recursos agrícolas.

Partiendo de esta base, se define que las redes IoT son cruciales para lograr el objetivo principal, al permitir la recopilación de datos en tiempo real desde los sensores instalados en campo y mostrándole esta información continua al agricultor para que en base a esta información pueda tomar decisiones que le ayuden a mejorar la gestión de sus cultivos.

Según indica la página web de Minkafab “Para Internet de la Cosas (IOT en inglés) la comunicación es un eslabón de suma importancia. Cada tipo de comunicación existente actualmente tiene su área de aplicación y en algunos casos, varios tipos se pueden complementar.” (MINKAFAB, s/f, párr. 2)

La conectividad IoT ha encontrado en las redes LoRaWAN componentes que se han vuelto esenciales en la agricultura moderna, según explica (Rodríguez, 2021), “el hecho de que LoRaWAN tenga la posibilidad de no estar ligado a operadoras, es probablemente la característica más diferencial. Esto

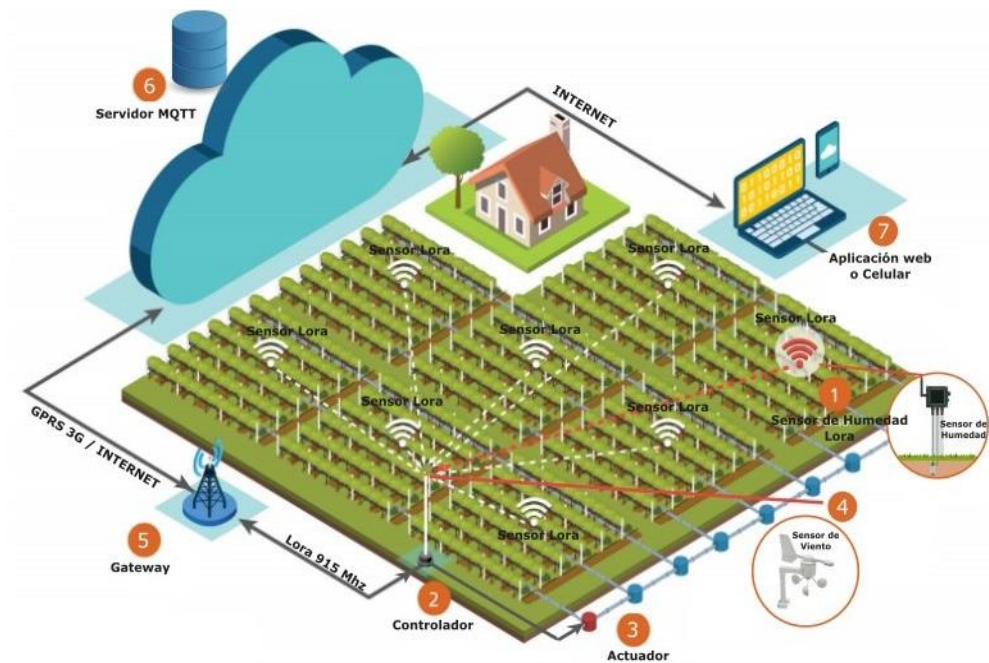
supone una gran libertad a la hora de desarrollar e implementar una red a gusto del consumidor.” (p. 26)

LoRaWAN es un protocolo de red que controla la comunicación remota con todos los sensores LoRa, los cuales proporcionan los datos de la humedad del suelo, la temperatura, la cantidad de agua y las condiciones del clima. Los concentradores LoRaWAN también hacen la conversión de estos datos hacia protocolos de comunicación de uso común como ModBus o MQTT.

Se busca poder implementar un sistema en donde la conectividad IoT y las redes LoRaWAN sean de ayuda para modernizar el sistema de riego, lo cual conduzca a mejorar la productividad, siendo capaz de contribuir a reducir los costos de operación.

En la figura 5 podemos observar un diagrama que muestra cómo se pueden integrar los diferentes componentes para implementar un sistema de telecomunicaciones LoRaWAN para la gestión eficiente del riego agrícola.

Figura 5.
Riego Inteligente con Tecnología LoRaWAN.



Nota. Descripción gráfica de un sistema de riego inteligente IoT apoyado por un Controlador de Software, Servidor de Datos, Sensores inalámbricos LoRa, estación meteorológica LoRa, Gateway LoRaWAN como concentrador inalámbrico, electroválvulas como actuadores para las bombas. Obtenido de [minkafab \(2023\)](https://minkafab.com/riego_inteligente_iiot/). *Riego Inteligente*.

(https://minkafab.com/riego_inteligente_iiot/). Consultado el 08 de agosto de 2023. De dominio público.

7.8. Interfaz gráfica

La implementación del prototipo aparte de recolectar los datos de campo debe contar con una interfaz que le permita al usuario final tener información gráfica de esos datos tanto para poder almacenarlos como también para poder ejecutar acciones para dosificar el agua del riego.

Por lo cual se contempla que el prototipo cuente con una interfaz gráfica de usuario (GUI) que facilite esta tarea al proporcionar una representación visual de los datos de los sensores y permitir un control del sistema de riego, además de poder almacenar estos datos recibidos para que puedan ser usados en análisis estadísticos y de tendencias.

En este contexto, se hace necesario evaluar los sistemas de adquisición de datos y de control supervisado conocidos como SCADA por sus siglas en inglés, existen varias plataformas de IoT que permiten visualización de los datos en la nube o bien soluciones privadas de software libre de bajo coste o gratuitas que ofrecen muchos fabricantes tomando el cuidado de cumplir con algunos requisitos por lo cual, “una plataforma IoT es un concepto muy amplio. Puede tratarse de simples plataformas que sirven para almacenar datos y ofrecen interfaces estándares al usuario, hasta sistemas más completos que permiten el uso de herramientas para hacer predicciones, analíticas”, (Martínez, 2017, p. 6)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

La presente propuesta de contenidos está cuidadosamente estructurada para proporcionar una comprensión integral del diseño de la investigación que se llevará a cabo en el marco del proyecto para desarrollar un prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN con el fin de mejorar el riego agrícola.

Comenzamos con una introducción que contextualiza la relevancia y la necesidad crítica de abordar los desafíos actuales en la gestión del riego en la agricultura. A continuación, se aborda la formulación del problema, donde se identifican y articulan claramente los obstáculos y deficiencias en los sistemas de riego agrícola existentes. Las preguntas de investigación y los objetivos del proyecto se delinearán con precisión para orientar nuestra indagación y acción.

La metodología describe la estrategia de investigación y los pasos prácticos que se seguirán para llevar a cabo el diseño y desarrollo del prototipo. Los resultados presentan los hallazgos obtenidos durante la ejecución del proyecto, respaldados por datos y análisis detallados. Las conclusiones sintetizan las contribuciones clave del estudio, mientras que las recomendaciones ofrecen orientación para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas del prototipo.

Esta estructura organizada asegura una progresión lógica y clara, facilitando la comprensión integral y la valoración de cada fase crucial en el diseño de la investigación para el prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN destinado a mejorar la eficiencia del riego agrícola.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La eficiencia en el riego agrícola

2.2. Modernización del riego agrícola

2.3. Tecnologías emergentes en el riego agrícola

2.4. Internet de las Cosas (IoT)

2.5. Tecnologías inalámbricas

2.6. Sensores

2.7. Redes IoT para la eficiencia agrícola

2.8. Interfaz Gráfica

3. RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Enfoque de la investigación

De acuerdo con la problemática del uso ineficiente del agua, esta investigación implementará una solución práctica bajo el planteamiento metodológico del enfoque mixto, ya que se adapta perfectamente al objetivo de esta investigación.

El enfoque es mixto puesto que el prototipo permitirá la recolección y tratamiento de datos de campo para que estos sean sujetos de análisis y puedan ser tomados como referencia para realizar mediciones y pruebas por lo que será predominantemente cuantitativo ya que permitirá tomar acciones de control acertadas y oportunas cuyo aporte será optimizar la eficiencia hídrica y el ahorro energético. Sin embargo, el enfoque cualitativo también será importante para entender cómo los agricultores interactuarán con el sistema y para conocer su percepción acerca de la funcionalidad del prototipo y su consideración de integrarlo en sus demás cultivos.

9.2. Diseño de la investigación

Diseño se refiere al “plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea” (Hernández et al., 2003, p.158). El objeto de esta investigación será implementar un prototipo que logrará la eficiencia hídrica y el ahorro energético en un sistema de riego en una parcela agrícola por lo que el plan a seguir contemplará el empleo de un diseño experimental aplicado de manera longitudinal ya que se buscará establecer mediciones periódicas de los

datos de campo necesarios para determinar cómo las variables independientes ejercerán control para modificar las variables dependientes estableciendo tendencias con lo cual se evaluará causalidad y también se podrá establecer una relación de causa y efecto entre la implementación del prototipo y los cambios que esté sistema tendrá sobre la eficiencia del riego.

Además, el diseño experimental permitirá manipular conscientemente las condiciones y factores que afectan las variables y permitirá determinar en un determinado período de tiempo si los cambios observados son realmente el resultado del prototipo y no de otros factores.

9.3. Alcance

En este capítulo se sientan las bases para una comprensión profunda y sistemática de cómo nuestro estudio abordará la problemática específica para hacer eficiente el riego agrícola, logrando que sea un proceso integral y marcando un camino claro hacia la implementación exitosa del prototipo. También delineamos el alcance de nuestra investigación, estructurándolo en tres tipos de alcance los cuales abarcan múltiples dimensiones.

9.3.1. Alcance exploratorio

El alcance exploratorio es el más adecuado para esta investigación ya que contemplará la implementación de un prototipo con la nueva tecnología de telecomunicaciones LoRaWAN como una solución innovadora que reemplazará a los métodos tradicionales de controlar el riego agrícola. Los pequeños agricultores de Guatemala tienen poco acceso a la tecnología y muchas veces tienen la idea de que esta tecnología solo está al alcance de los grandes productores, por lo que el aporte de esta investigación será la de ser pionera en

llevar tecnología de muy bajo costo para digitalizar las parcelas de los pequeños agricultores con el propósito de obtener información precisa y de cómo este prototipo hará más eficiente el riego agrícola. La información obtenida será documentada para evaluar su aplicación y escalabilidad a áreas más extensas de cultivo.

Para cumplir con este alcance se seguirá la siguiente metodología

- Se realizarán visitas al sitio del cultivo para realizar entrevistas al agricultor para obtener datos de cómo él está operando su sistema de riego de forma manual. Se obtendrá información del nivel adecuado de humedad del suelo que necesita el cultivo, también datos del consumo de agua, el consumo de electricidad y el consumo de combustibles.
- Se preguntará al agricultor cual es la percepción que tiene acerca de un sistema automatizado del riego que será controlado de manera remota por medio de tecnología de telecomunicaciones inalámbrica.
- Se tomarán referencias documentadas de las necesidades hídricas del tipo de cultivo las cuales servirán de base para seleccionar los mejores componentes para el diseño del prototipo con el objetivo de que ofrezcan una solución innovadora y eficiente.
- La información obtenida será documentada para evaluar si el prototipo puede ser escalable a áreas más extensas de cultivo.

Los beneficios del alcance exploratorio es que a medida que el prototipo esté operando, se obtendrá información fresca y periódica que quedará documentada para que cuando se cuente con una muestra significativa, esta información permita que la investigación pueda dar un giro y se emplee el alcance a descriptivo y correlacional, según se menciona a continuación:

9.3.2. Alcance descriptivo

Al ser una investigación pionera, será necesario recolectar la información de los datos de la eficiencia hídrica y el ahorro energético que se irán obteniendo periódicamente con el uso del prototipo, el cual se estará realimentando con los datos de campo para ir dosificando el riego de manera que este mantendrá un nivel adecuado de la humedad del suelo. Esta información servirá de base para ir estableciendo el comportamiento del prototipo y de allí se podrá estimar su funcionalidad a futuro en un determinado plazo de tiempo. En este contexto a medida que se vaya desarrollando la etapa cuantitativa, con los datos obtenidos se tendrá suficiente información con la cual se formulará una hipótesis en la cual se podrá pronosticar la funcionalidad del prototipo para poder realizar un alcance descriptivo.

9.3.3. Alcance correlacional

La documentación y almacenaje de los datos que se obtendrán durante el alcance exploratorio pueden analizarse realizando un estudio correlacional que establecerá si la relación entre la manipulación del sistema de riego (variable independiente) mantiene un nivel adecuado de la humedad del suelo (variable dependiente), dentro de los parámetros adecuados para el tipo de cultivo. También se pueden correlacionar con el comportamiento del clima.

Se podrán medir los diferentes grados de correlación del prototipo con cada una de las variables. En este caso se puede establecer un alcance correlacional, sin embargo, en este alcance no se busca establecer una relación causal y al ser este un diseño experimental, es poco posible que en con este tipo de alcance se llegue a formular una hipótesis.

9.4. Características del estudio

El diseño e implementación del prototipo es un proceso estructurado y se distingue por una serie de características fundamentales que definen el estudio.

9.4.1. El estudio es sistemático

La investigación se llevará a cabo de manera sistemática con un enfoque estructurado y ordenado para lograr los objetivos del estudio. Esto implica la definición clara de los objetivos, la selección adecuada de los fenómenos a considerar en este estudio, la preparación de un plan de trabajo y el seguimiento continuo para asegurar su cumplimiento.

9.4.2. Método científico

La investigación seguirá los principios del método científico, lo que implicará la formulación de preguntas de investigación, la hipótesis planteada (cuando se llegue a la fase del alcance descriptivo), la recolección de datos, el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. El uso del método científico asegurará que los resultados del estudio sean confiables y consistentes.

9.4.3. Trabajo documental y de campo

El estudio combinará el trabajo de campo y documentación para obtener y almacenar la información que posteriormente será usada para optimizar el prototipo. El trabajo en campo implicará visitas al lugar específico donde se llevará a cabo la implementación del prototipo y se obtendrá información sobre el uso de los recursos que se desean optimizar los cuales son el objetivo de esta

investigación. Por otra parte, el trabajo documental implica la revisión de la literatura científica y técnica relacionada con el tema.

9.4.4. Técnicas e instrumentos

El uso de tecnologías IoT y de telecomunicaciones LoRaWAN será esencial para el desarrollo y la implementación del prototipo, ya que son los sensores LoRa los que realimentan con datos al prototipo. Además, se utilizará una plataforma IoT con software para la recolección y almacenamiento de los datos que estarán disponibles para un software que realice análisis estadísticos para evaluar si un determinado tiempo, el prototipo ha logrado el objetivo de hacer más eficiente el uso del agua y de disminuir el consumo de electricidad y de combustibles en el riego agrícola de una parcela.

9.4.5. El estudio es objetivo

El estudio se llevará a cabo de manera objetiva y sin sesgos, con el objetivo de obtener resultados consistentes y confiables. Para lograr esto, se realizará un análisis crítico de la información recolectada para asegurar que no haya errores que puedan influir en los resultados.

9.4.6. Métodos generales

El trabajo de investigación utilizará una variedad de metodologías generales para lograr sus objetivos, incluyendo el uso de datos y análisis de datos estadísticos, técnicas de programación e ingeniería, y la investigación bibliográfica. Además, se gestionarán y evaluarán proyectos de desarrollo tecnológico que permitan la implementación del prototipo.

9.5. Unidades de análisis

La unidad de análisis clave es la parcela agrícola en la cual se implementará el prototipo, ya que es en la parcela en donde se hace necesario que el prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN para el control del riego mantenga en todo momento las condiciones óptimas de humedad del suelo y haga más eficiente el consumo de agua y disminuya el consumo energético.

- Los sensores inalámbricos, proporcionarán datos cuantitativos del nivel de la humedad del suelo y de la temperatura ambiente en el entorno de la parcela agrícola.
- Los agricultores también representarán unidades de análisis solo que están serán tratadas como cualitativas, ya que sus percepciones, opiniones y experiencias son importantes para diseñar y también para evaluar la funcionalidad del prototipo.
- Los datos históricos serán importantes unidades de análisis para recopilar valiosa información de las necesidades actuales de la parcela y también serán usados para comparar los resultados antes y después de la implementación.
- Datos que calcularán la eficiencia hídrica y el ahorro energético, relacionados con el volumen de agua utilizado, el consumo de energía eléctrica, el consumo de combustibles fósiles y las horas/hombre empleadas en la gestión del riego.
- Datos que brindarán la estacionalidad del clima y las condiciones climáticas de la región entre los que se mencionan la lluvia, sequías, inundaciones, heladas y olas de calor.
- Datos documentales sobre estudios previos que se usarán para conocer las necesidades hídricas específicas para cada cultivo.

9.6. Variables

Es esencial comprender y definir las variables que serán objeto de este trabajo de investigación. Estas variables, clasificadas como Dependientes e Independientes, constituyen los elementos cruciales que permiten evaluar el impacto y la eficacia de la implementación de esta tecnología innovadora en el riego de una parcela agrícola.

9.6.1. Variables dependientes e independientes

Las variables dependientes expresan la consecuencia o el efecto de acciones o fenómenos que son determinados por las variables independientes.

Se muestran también las variables cualitativas que se muestran como una contribución para la verificación funcional del prototipo

En la tabla 1 se muestran las variables que forman parte de este estudio

Tabla 1.*Variables en estudio*

Variables	Definición Teórica	Definición Operativa
Calidad de la mensajería de datos.	Variable independiente Cuantitativa Tienen efecto sobre las otras variables dependientes.	Cumplir con los indicativos de calidad, reducir errores y pérdidas de recursos utilizando información fiel Pueden ser manipuladas.
Frecuencia de Mantenimiento del prototipo	Variable independiente cualitativa que influyen en el desempeño a largo plazo del prototipo	Mantenimiento orientado a los activos del sistema (sensores, equipos de telecomunicaciones, electroválvulas, para garantizar la vida útil del prototipo y su correcto funcionamiento en el tiempo.
Clima / Humedad del Suelo	Variables Independientes y dependientes Cuantitativas esencial para determinar el grado de saturación de agua en el suelo.	Ambas influyen en el nivel de humedad del suelo que se mide en términos de porcentaje de humedad es crucial para determinar cuándo es necesario realizar el riego y en qué cantidad
Ahorros de recursos: <ul style="list-style-type: none"> • Económico • Energía • Agua 	Variable Dependiente Cuantitativa determina la funcionalidad del prototipo	Representan: El ahorro de agua por año, el ahorro en el consumo de electricidad y el consumo de combustibles al año y el aumento de la productividad por año
Percepción y Experiencias de los agricultores con el uso del prototipo	Variables cualitativas y subjetivas referente a las opiniones, creencias de los agricultores	Capturan cómo los agricultores perciben la utilidad, eficacia, facilidad de uso y beneficios del prototipo, así como cualquier impacto en la gestión de sus cultivos y recursos.

Nota: Variables a considerar en el trabajo de Investigación de un Prototipo de Sistema de Telecomunicaciones LoRaWAN del Riego Agrícola. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word

9.7. Fases del diseño de la investigación

En este capítulo, exploraremos las distintas fases que guiarán nuestro enfoque metodológico, desde la concepción del proyecto hasta la comunicación de resultados, asegurando una ejecución efectiva y una interpretación significativa de los resultados obtenidos.

9.7.1. Fase 1: Preparación y diseño

Esta fase inicial, se enfoca en la planificación detallada del estudio. Esto incluirá la identificación de objetivos, la revisión de la literatura existente, y la definición precisa de variables y métodos de investigación.

9.7.1.1. Revisión documental

Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura y publicaciones existentes sobre tecnologías inalámbricas para sistemas de control remoto integradas en el Internet de las Cosas IoT, también se buscarán publicaciones que muestren los datos obtenidos sobre el impacto en la eficiencia hídrica y el ahorro energético cuando se gestiona el riego agrícola, además de buscar los casos de éxito en experiencias previas de implementación de tecnologías similares.

9.7.1.2. Diseño del prototipo

Se diseñará el prototipo del sistema de control remoto del riego, considerando los dispositivos IoT existentes en el mercado, la cantidad a utilizar de sensores de tecnología LoRa e integradores LoRaWAN de acuerdo con el

área a considerar, el uso de un software de gestión de uso libre (o de licencia gratuita si aplica), así como la infraestructura necesaria para su implementación.

9.7.2. Fase 2: Implementación del prototipo

Esta fase involucra la adquisición e instalación de los sensores y el software de gestión, la configuración de hardware y software, y la integración efectiva de la tecnología en el sistema de riego de la parcela agrícola.

9.7.2.1. Instalación de sensores y dispositivos

Se instalarán sensores inalámbricos de humedad del suelo en un área de terreno delimitada que servirá de muestra para luego del análisis de los resultados, considerar un área más extensa. También se considera la instalación de un concentrador de dispositivos LoRa y una estación meteorológica para obtener datos del clima. En el espacio asignado para el equipo de control se instalará un computador con el software de gestión.

9.7.2.2. Configuración del sistema

Se configurará el sistema de control remoto interconectado los diferentes sensores LoRa en una red LoRaWAN a través de un Gateway integrador para obtener los datos de humedad del suelo y condiciones climáticas para convertirlos a una interfaz gráfica GUI cuyo fin es monitorear y controlar el riego en tiempo real, ejerciendo acciones de control utilizando los datos recopilados por los sensores.

9.7.3. Fase 3: Recopilación de datos

La fase de recopilación de datos es esencial para evaluar el rendimiento del prototipo en condiciones reales. Se llevará a cabo una observación continua y la recolección de datos, registrando información relevante sobre la eficiencia hídrica y el consumo energético.

9.7.3.1. Mediciones de eficiencia hídrica

Se medirá la cantidad de agua utilizada después de la implementación del prototipo para comparar con los registros o estimaciones de uso del agua que tenga el agricultor.

9.7.3.2. Registro de consumo energético

Se registrarán los datos de consumo de energía eléctrica mensual y datos de uso de combustibles fósiles utilizados en el proceso de riego después de la implementación del prototipo y se compararán con los registros y estimaciones que tenga el agricultor.

9.7.4. Fase 4: Evaluación y análisis

Con los datos en mano, procederemos a la fase de evaluación y análisis, donde se aplicarán técnicas estadísticas y herramientas analíticas para comprender el impacto del prototipo en el rendimiento del sistema de riego.

9.7.4.1. Encuestas y entrevistas

Se realizarán encuestas y entrevistas a los agricultores para conocer sus percepciones y experiencias con el uso del prototipo para el control remoto del riego, las cuales podría aportar información para el ajuste o una sintonía fina del sistema.

9.7.4.2. Análisis de datos

Los datos recopilados y almacenados en la plataforma IoT, estarán a la disposición para que utilizando hojas de cálculo y software con módulos y técnicas estadísticas se evalúe la eficiencia hídrica y el ahorro energético con la implementación del prototipo.

9.7.5. Fase 5: Interpretación de resultados y conclusiones

La interpretación de resultados y conclusiones constituye una fase crucial donde se extraerán las perspectivas significativas. Se analizará la eficacia del prototipo LoRaWAN en términos de eficiencia hídrica y ahorro energético, proporcionando respuestas a las preguntas de investigación planteadas.

9.7.5.1. Análisis cualitativo

Las opiniones y experiencias de los agricultores se analizarán cualitativamente para comprender mejor cómo el prototipo del sistema de telecomunicaciones LoRaWAN está afectando sus prácticas y percepciones.

9.7.5.2. Comparación y conclusiones

Se compararán los resultados de las mediciones y encuestas para determinar el impacto del prototipo en términos de eficiencia hídrica y ahorro energético.

9.7.6. Fase 6: Informe y comunicación de resultados

Finalmente, se cerrará el ciclo con la fase de informe y comunicación de resultados. La documentación detallada de hallazgos, conclusiones, y recomendaciones será presentada, de manera que el aporte de las telecomunicaciones aplicadas pueda contribuir a su uso para el riego de cualquier otro tipo de cultivos.

9.7.6.1. Elaboración de informe

Se elaborará un informe detallado que presente los resultados y el impacto en el sistema de riego de la implementación del prototipo, incluyendo el análisis estadístico de los datos recolectados, las percepciones de los involucrados y de las conclusiones obtenidas.

9.7.6.2. Comunicación y divulgación

Los resultados del estudio serán comunicados al propietario de la parcela, a los asesores del trabajo de investigación, a las autoridades de la escuela de posgrado de la USAC y otros interesados a través de informes, presentaciones y posiblemente eventos de divulgación.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para para abordar de una manera integral el impacto que el prototipo del sistema de control remoto del riego tendrá, se realizará una combinación de técnicas de medición basadas en la recolección de datos vía el software de gestión y de hardware vía instrumentos de medición cuya información será retroalimentada a funciones estadísticas que efectúen análisis que puedan determinar las condiciones del desempeño del prototipo y evaluar sus mejoras.

10.1. Recolección de Datos vía software y hardware

La recolección de datos se erige como un componente crítico en la metodología y las herramientas empleadas para la adquisición de datos ya que se busca fusionar los aspectos fundamentales tanto del software como del hardware a manera de obtener una mejor comprensión y ajuste de los parámetros a considerar para un refinamiento del sistema que logre la eficiencia.

10.1.1. Análisis de sensores

Se evalúa la precisión y confiabilidad de los sensores utilizados para medir datos como la humedad del suelo y la temperatura Comparando contra un medidor digital de precisión su capacidad para proporcionar mediciones consistentes y precisas.

10.1.2. Análisis de consumo energético

Se utiliza un medidor de facturación clase 0.2 % para medir el consumo de energía del sistema de bombeo mediante un perfil de carga con tomas de lecturas diarias a razón de cuatro veces por hora, para tener datos que sean fáciles de comparar y determinar si el prototipo del sistema de riego ha optimizado el consumo energético.

10.1.3. Análisis de datos en tiempo real

La Plataforma IoT contará con un software de gestión que realizará un registro periódico de datos en tiempo real que serán exportados a hojas electrónicas para que estén disponibles para ser analizados estadísticamente a manera de poder crear algoritmos de control más eficientes.

10.1.4. Pruebas comparativas

Se realizarán pruebas comparativas entre diferentes configuraciones de hardware y software para determinar cuál configuración hace más eficiente al prototipo en términos de lograr el ahorro en el consumo energético y de mejorar la eficiencia hídrica.

10.2. Técnicas de análisis estadístico:

En la culminación de la investigación sobre el prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN y su impacto en la eficiencia hídrica y ahorro energético en el riego agrícola, la riqueza del análisis estadístico se presenta como un instrumento fundamental. Este capítulo explora diversas técnicas

estadísticas para extraer conclusiones sólidas y significativas, que permiten comprobar la funcionalidad del prototipo.

10.2.1. Análisis de series temporales

Esta técnica permite identificar patrones, tendencias y estacionalidades de los datos obtenidos de la lectura periódica de sensores del nivel de humedad y de la temperatura. Con estos datos se contempla poder pronosticar el uso futuro de agua y energía en función de las condiciones ambientales y del comportamiento histórico.

10.2.2. Prueba t o la Prueba de Chi-cuadrado

Con esta técnica se contempla poder hacer una evaluación estadística de las diferencias observadas antes y después de la implementación del prototipo del sistema de control remoto del riego.

10.2.3. Análisis de correlación:

El uso de esta técnica permite establecer correlaciones entre como el uso del prototipo influye sobre la humedad del suelo, y si el prototipo está logrando el objetivo de disminuir el consumo de agua y ahorrar en el consumo de energía.

10.2.4. Modelos de predicción

El uso de modelos de predicción, como sistemas de apoyo de información meteorológica y ahora con las nuevas redes neuronales que están disponibles para este tipo de información, sirven de soporte para ayudar a planificar el

consumo de agua a futuro y la demanda de energía en función de las condiciones ambientales y las configuraciones del sistema.

10.2.5. Análisis de Costo-Beneficio

Se estima hacer un análisis periódico de la relación costo-beneficio obtenido con la de la implementación del sistema de telecomunicaciones LoRaWAN para optimizar el sistema de riego y. para evaluar el ahorro obtenido y obtener el tiempo que tomará el retorno de la inversión.

El uso de herramientas de software tales como RStudio que cuenta con distintos módulos estadísticos puede obtener información de los datos almacenados en hojas electrónicas y con estos datos puede crear funciones de correlación, promedios, y distribuciones las cuales permiten un análisis estadístico del tipo gráfico.

11. CRONOGRAMA

El cronograma de ejecución del proyecto contempla una duración de 4 meses a partir de que ya se cuenten con los componentes electrónicos y de software para su implementación.

Maestría en Artes para la Industria de las Telecomunicaciones, Héctor Armando Arévalo Moreno																		
PROTOTIPO DE TELECOMUNICACIONES LORAWAN PARA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y EL AHORRO ENERGÉTICO EN EL RIEGO DE UNA PARCELA AGRÍCOLA																		
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																		
Fecha Actual:												REALIZADO	NO REALIZADO					
2023/09/29		septiembre 23										✓	✗					
No.	Actividad	Responsable	Ejecutado	Fecha de Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	✓	✗
1	Preparación y Diseño	Héctor Arévalo																
	Revisión Documental	Héctor Arévalo	<input checked="" type="checkbox"/>	30/09/2023	✓													
	Diseño del Prototipo	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	31/01/2024	✗													
2	Implementación del Prototipo	Héctor Arévalo																
	Instalación de Sensores y Dispositivos	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	30/04/2024					✗									
	Configuración del Sistema	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	30/04/2024					✗									
3	Recopilación de Datos	Héctor Arévalo																
	Mediciones de Eficiencia Hídrica	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	31/05/2024											✗			
	Registro del Consumo Energético	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	31/05/2024											✗			
4	Evaluación y Análisis	Héctor Arévalo																
	Encuestas y Entrevistas	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	15/06/2024												✗		
	Análisis de Datos	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	15/06/2024												✗		
5	Interpretación de Resultados	Héctor Arévalo																
	Análisis Cualitativo	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	30/06/2024													✗	
	Comparación y Conclusiones	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	30/06/2024													✗	
6	Informe y Resultados	Héctor Arévalo																
	Elaboración de Informe	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	15/07/2024													✗	
	Comunicación y Divulgación	Héctor Arévalo	<input type="checkbox"/>	15/07/2024													✗	

Nota. Cronograma para la implementación del Prototipo de Telecomunicaciones LoRaWAN para la eficiencia hídrica y el ahorro energético en el riego de una parcela agrícola. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Este capítulo se centra en la evaluación de la factibilidad técnica del desarrollo de un Prototipo de Telecomunicaciones LoRaWAN se explorarán los aspectos técnicos clave que respaldan la viabilidad de un sistema de este tipo aplicado a la agricultura, principalmente enfocado en los pequeños agricultores, incluyendo la infraestructura requerida, el diseño del prototipo, la capacidad de manejar datos agrícolas críticos, y la interoperabilidad con otras tecnologías existentes. Además, se analizarán las ventajas y desventajas técnicas y económicas de su implementación en este contexto, así como los posibles obstáculos y limitaciones legales y regulatorias que podrían surgir durante el proceso de desarrollo.

La investigación que aquí se presenta busca proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas en la implementación de este tipo de sistema en el manejo del proceso agrícola.

A través de un análisis detallado de la factibilidad técnica, económica y regulatoria se espera sentar las bases para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos que contribuyan significativamente a que esta tecnología cada vez más esté al alcance de los pequeños agricultores para que por medio de la agricultura de precisión obtengan mayor productividad para que mejoren su calidad de vida y la de las comunidades rurales.

12.1. Factibilidad técnica

La factibilidad técnica implica una evaluación exhaustiva de si es posible llevar a cabo el proyecto desde una perspectiva tecnológica y regulatoria. Ya que se hace necesario saber si se cuentan con los conocimientos, las herramientas, los recursos y las capacidades técnicas necesarias para hacer que el proyecto se materialice de manera exitosa. Además, implica evaluar si la tecnología inalámbrica propuesta es adecuada y no cuenta con restricciones que puedan impedir alcanzar los objetivos establecidos. La siguiente tabla muestra una evaluación de diferentes aspectos a considerar

Tabla 2.*Aspectos de factibilidad técnica*

Aspecto de Factibilidad Técnica	Descripción	SI/NO	Evaluación
Experiencia Técnica	Se cuenta con soporte técnico de los proveedores, capacitación del proveedor, conocimiento de los equipos y experiencia Previa en redes LoRaWAN.	SI	ES VIABLE
Acceso a Recursos	Se cuenta con software de gestión de uso libre o de muy bajo costo y los equipos son de fácil adquisición a precios asequibles. En la parcela en la que se implementará el prototipo se dispone de conectividad a internet con las consideraciones de ciberseguridad en capas para evitar que cualquier intrusión no autorizada genere errores que alteren la información y los ajustes ocasionando un uso ineficiente el agua.	SI	ES VIABLE
Personal Técnico	Se requieren 2 técnicos encargados de Instalar Montar y poner en servicio el sistema	SI	ES VIABLE
Personal de Supervisión	Se requiere una conexión VPN para acceso remoto del personal encargado de monitorear la calidad de los datos, el funcionamiento y operación del prototipo	SI	ES VIABLE
Equipos de Pruebas	Se cuenta con acceso a multímetros, analizadores de espectro, medidores de señal,	SI	ES VIABLE
Mantenimiento	Se requiere una revisión mensual del estado de los sensores y revisión general del equipo.	SI	ES VIABLE

Nota: Aspectos de factibilidad técnica a considerar en el trabajo de Investigación de un Prototipo de Telecomunicaciones LoRaWAN para la eficiencia y ahorro energético en el Riego Agrícola. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

12.2. Factibilidad legal y regulatoria

Para el continente americano, la alianza LoRaWAN ha establecido que el uso de las comunicaciones inalámbricas de los dispositivos LoRa y LoRaWAN que serán utilizados en este prototipo, se encuentran ajustados en la frecuencia de 915 MHz para lo cual es necesario consultar el marco regulatorio de Guatemala para evaluar los requisitos necesarios para poder utilizar equipos de telecomunicaciones en dicha frecuencia. Es importante que el prototipo sea ajustado para que su potencia de transmisión se sintonizada para que opere dentro del marco regulatorio establecido por la Superintendencia de Telecomunicaciones para evitar que el prototipo genere interferencias que conlleven sanciones económicas y legales por el uso indebido del espectro electromagnético.

La frecuencia de 915 MHz se ha convertido en un recurso crítico en el espectro electromagnético, especialmente en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas fijas en usos científicos, médicos e industriales. Los tres aspectos son aspectos que se han integrado a las tecnologías IoT. De acuerdo con los convenios internacionales, en Guatemala esta frecuencia también está destinada a las mismas aplicaciones sin embargo se debe respetar una restricción que se relaciona con la máxima potencia de transmisión permitida.

De acuerdo con las regulaciones de la Tabla Nacional de Atribución de Frecuencias -TNAF- (Pies de Página aplicables) indica:

Se reconoce la operación de sistemas y/o dispositivos designados para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM). Estos sistemas y/o dispositivos realizan su operación en una base de No Interferencia /

No Protección respecto a las autorizaciones hechas a estaciones a las cuales los rangos de frecuencia citados están atribuidos. La potencia máxima efectiva radiada de transmisión que se utilice en estas bandas de frecuencia por tales dispositivos no excederá de 250 mW (23.98 dBm). (Superintendencia de Telecomunicaciones, 2020, p.4)

En este marco regulatorio, los dispositivos LoRa y el Gateway LoRaWAN investigados operan en rangos de potencia menores a los regulados, por lo que, en el marco legal y regulatorio, el proyecto es viable.

12.3. Factibilidad financiera

Este desarrollo tiene como objetivo implementar un sistema de bajo costo que sea accesible para los pequeños agricultores y que a la vez sea innovador para que de manera remota y mediante la utilización de tecnologías avanzadas, como IoT y una red de telecomunicaciones LoRaWAN, se logre el objetivo de tener un mejor control en el uso racional del agua lo cual es factor clave para lograr un ahorro en el gasto de recursos energéticos y la disminución de costos operativos.

En la tabla 3 se muestran valores estimados de la implementación de un sistema de telecomunicaciones LoRaWAN para el manejo controlado del riego.

Tabla 3.*Estimación de costos y ahorros esperados*

Aspecto Financiero	Descripción	Valor Estimado
Costos de Desarrollo	Costo inicial del desarrollo del sistema, que incluye la adquisición y montaje del hardware y software, así como el pago al personal técnico.	\$3,880.00
Ciberseguridad	Costo de un Firewall y su programación para el enlace VPN y un año de uso de Software antivirus.	\$700.00
Costos Operativos	Costos operativos mensuales, que incluyen mantenimiento y monitoreo del sistema para garantizar que el suministro de agua sea suficiente y de calidad.	\$200.00
Ahorro de Costos en energía y recursos	Beneficios esperados derivados de la implementación del sistema, incluyendo ahorro en costos de riego, el ahorro de energía y el aumento en la producción agrícola.	\$6,000 por año
Retorno de Inversión (ROI)	Cálculo del tiempo estimado para recuperar la inversión inicial y alcanzar la rentabilidad.	11 meses
Análisis de Riesgos	Evaluación de los riesgos financieros potenciales asociados con el proyecto, con estrategias de mitigación y gestión.	El riesgo financiero asociado es con el otorgamiento de crédito al agricultor

Nota: Aspectos de factibilidad financiera a considerar en el trabajo de Investigación de un Prototipo de Telecomunicaciones LoRaWAN para el Control del Riego Agrícola. Elaboración Propia, realizado con Microsoft Word.

Es posible que el agricultor muestre escepticismo sobre la funcionalidad del prototipo. Los resultados que se obtengan en base al análisis de los datos recopilados que muestren los ahorros obtenidos, ayudarán a convencer al pequeño agricultor de la ventaja que obtendrán con su implementación.

12.4. Impacto social

El desarrollo e implementación del sistema se realizará en un área privada de una finca la cual cuenta con sus propios recursos de captación y distribución de agua, por lo que desde el punto de vista social no se considera que afecte a ninguna comunidad o población. Es Viable

12.5. Impacto ambiental

La mejora en la eficiencia del riego y el uso adecuado del agua obtendrá los siguientes beneficios ambientales:

- Evitar el Desperdicio de agua.
- Ahorro en el consumo de energía eléctrica por la operación eficiente del sistema de bombeo.
- Reducción de costos de combustibles fósiles al evitar desplazamiento del personal hacia el sitio del cultivo.
- Baja emisión de CO₂ al ambiente.

12.6. Sostenibilidad

El sistema considera ser sostenible en el tiempo ya que es capaz de adaptarse a condiciones climáticas cambiantes y puede ser mejorado continuamente centralizando la atención en el sistema de toma de datos, el alcance del protocolo de telecomunicaciones, en la ciberseguridad y en el uso consciente del agua para el riego.

REFERENCIAS

- Arregocés-Guerra, P., Restrepo-Arias, J. F., Usme Martínez, M., Montoya-Yepes, J. P., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853
- Belepú, C. (2022). *Propuesta de una plataforma de agricultura inteligente basada en IoT para el monitoreo de las condiciones climáticas del cultivo de banano* [Universidad de Piura].
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/6143/DOC_ING_AUT_2207.pdf?sequence=2
- Chanchí-Golondrino, G.-E., Ospina-Alarcón, M.-A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(2), 257–271.
<https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- Coll, F. (2021, febrero 1). *Parcela*.
<https://economipedia.com/definiciones/parcela.html>.
<https://economipedia.com/definiciones/parcela.html>
- Cornejo-Velázquez, E., Romero-Trejo, H., Acevedo-Sandoval, O. A., & Toriz-Palacios, A. (2019). Aplicación del Internet de las Cosas en el Sector Agrícola. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 7(13), 62–67. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.4403>

Fuentes, D. (2023, junio 7). *seis-aplicaciones-de-iot-para-una-agricultura-inteligente*.

<https://blog.zembia.cl/seis-aplicaciones-de-iot-para-una-agricultura-inteligente/>

Gutierrez-Lopera, J. E., Toloza-Rangel, J. A., Soto-Vergel, Á. J., López-Bustamante, O. A., & Guevara-Ibarra, D. (2021). Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 163–180.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021014>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación* (3ra ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores.

Ma, H.-D. (2011). Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges. *Journal of Computer Science and Technology*, 26(6), 919–924.

<https://doi.org/10.1007/s11390-011-1189-5>

Martínez, R. (2017). *Comparativa y estudio de plataformas IoT* [Escola Universitaria Politécnica de Mataró].

<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/113622>

MINKAFAB. (s/f). *Tecnología Lora & LoraWan*. Recuperado el 22 de septiembre de 2023, de <https://minkafab.com/tecnologia-lora-lorawan/>

- Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. (2008). *EL DESARROLLO DEL MICRORRIEGO EN AMÉRICA CENTRAL, VIII. LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES*. <https://www.fao.org/3/aj470s/aj470s07.pdf>
- Ojo-Gonzalez, K., & Bonilla-Morales, B. (2021). Requerimientos no funcionales para sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT): Una revisión. *I+D Tecnológico*, 17(2), 30–40. <https://doi.org/10.33412/idt.v17.2.3303>
- Rodríguez, D. (2021). *Red privada LoRaWan para el ámbito de aplicaciones en la Industria 4.0* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/359214>
- Semtech Corporation. (s/f). *lora-applications*. Recuperado el 22 de septiembre de 2023, de <https://www.semtech.com/lora/lora-applications>
- Sotomayor, O., Ramírez, E., & Martínez, H. (2021). *Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina* (Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/65)). <https://hdl.handle.net/11362/46965>
- Superintendencia de Telecomunicaciones. (2020). *TABLA NACIONAL DE ATRIBUCION DE FRECUENCIAS RADIOELÉCTRICAS (Pies de Página)* (4). <https://sit.gob.gt/gerencia-de-frecuencias/frecuencias/tabla-nacional-de-atribucion-de-frecuencias/>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Cotización de equipos para el prototipo de telecomunicaciones LoRaWAN para un sistema de riego.

Pos	Cant	Descripción	Sub-Total	Total
1	1	LoRaWAN Gateway	USD750.00	USD750.00
2	1	LoRaWAN Sensor de Temperatura y Humedad	USD90.00	USD90.00
3	3	LoRaWAN Medidor de humedad del suelo y conductividad eléctrica	USD380.00	USD1,140.00
4	1	LoRaWAN Sensor de Luz	USD100.00	USD100.00
5	2	Controlador de Válvula Solenoide	USD300.00	USD600.00
6	12	Suscripción a aplicación de monitoreo y control en la nube y en aplicación celular	INCLUIDO	USD0.00
7	1	Computador de Escritorio DELL Intel Core i3 Memoria RAM 8GB Disco Duro SSD 1TB Monitor de 27"	USD800.00	USD800.00
8	1	Firewall	USD650.00	USD650.00
9	1	Antivirus (suscripción anual)	USD50.00	USD50.00
10	1	Instalación y Puesta en Servicio incluyendo materiales gastos de transporte y logística	USD1200.00	USD1,200.00
GRAN TOTAL				USD 5,380.00

Nota: Presupuesto para adquisición de equipos e instalación a considerar en el trabajo de Investigación de un Prototipo de Telecomunicaciones LoRaWAN para el Control del Riego Agrícola. Elaboración Propia, realizado con Microsoft Word.

ANEXOS

Anexo 1.

Atribución de frecuencias a los servicios de Radiocomunicaciones

ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS A LOS SERVICIOS DE RADIOCOMUNICACIONES				
890 - 1240 MHz				
UIT / RR Región 2		ATRIBUCIÓN NACIONAL	LGT	PIES DE PÁGINA APLICABLES
890 - 902 FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 5.318 5.325	5.317A	890 - 902 FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	Reg	RR 5.317A GTM-18
902 - 928 FIJO Aficionados MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 5.150 5.325 5.326	5.317A	902 - 928 FIJO MÓVIL TERRESTRE Radiolocalización	Reg	RR 5.150/5.325A GTM-6 / GTM-14 / GTM-18 / GTM-47
928 - 942 FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización 5.325	5.317A	928-942 FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	Reg	RR 5.317A GTM-18
942 - 960 FIJO MÓVIL 5.328AA	5.317A	942-960 FIJO MÓVIL	Reg	RR 5.317A GTM-18
960 - 1 164 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA MÓVIL AERONÁUTICO (R) 5.328AA	5.328 5.327A	960 - 1 164 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA MÓVIL AERONÁUTICO (R)	Reg	RR 5.327A / 5.328 / 5.328AA GTM-15
1 164 - 1 215 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio - Tierra)(espacio - espacio) 5.328A	5.328 5.328B	1 164 - 1 215 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio - Tierra)(espacio - espacio)	Reg	RR 5.328 / 5.328A / 5.328B GTM-15
1 215 - 1 240 EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN POR SATELITE (espacio - Tierra)(espacio - espacio) INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo) 5.330 5.331 5.332	5.328B 5.329 5.329A	1 215 - 1 240 EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN POR SATELITE (espacio - Tierra)(espacio - espacio) INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo)	Reg	RR 5.328B / 5.329 / 5.329A / 5.332 GTM-18

Nota. Tabla nacional de atribución de frecuencias a los servicios de Radiocomunicaciones, obtenido de la Superintendencia de Telecomunicaciones -SIT- (2023),

3. *Tabla Nacional Atribución Frecuencias (Cuadro) p.34.* (<https://sit.gob.gt/gerencia-de-frecuencias/frecuencias/tabla-nacional-de-atribucion-de-frecuencias/>). Consultado el 08 de agosto del 2023. De dominio público.