



Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Aplicando el Internet de las Cosas para la
Implementación de un Modelo de
Evapotranspiración en Cultivos Bajo Condiciones
Protegidas**

presentada por
Ing. Irvin David Velásquez Mora

Como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Directora de tesis
Dra. Alicia Martínez Rebollar

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2024

Contenido

Pág.

Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	IV
Resumen	V
Abstract	VIII
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Marco teórico</i>	2
1.2.1 <i>Evapotranspiración</i>	2
1.2.2 <i>Invernaderos</i>	2
1.2.3 <i>Tipos de riego en México</i>	3
1.2.4 <i>Internet de las cosas (IoT)</i>	4
1.2.5 <i>Microcontrolador ESP32</i>	4
1.2.6 <i>Tecnología WiFi</i>	4
1.2.7 <i>Monitoreo y obtención de datos en la nube</i>	5
1.2.8 <i>Agricultura de precisión</i>	5
1.2.9 <i>Automatización de invernaderos</i>	5
1.3 <i>Estado del arte</i>	6
1.4 <i>Objetivo general</i>	16
1.5 <i>Objetivos específicos</i>	16
1.6 <i>Estructura de Tesis</i>	17
Capítulo 2: Modelo Matemático de Evapotranspiración	18
2.1 <i>Modelo para calcular la evapotranspiración</i>	19
2.2 <i>Evapotranspiración</i>	19
2.3 <i>Métodos para calcular la evapotranspiración</i>	20
2.4 <i>Modelo matemático utilizado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) del cultivo</i>	20
2.5 <i>Factores que afectan la evapotranspiración</i>	26
2.6 <i>Método convencional: Penman-Monteith</i>	26
Capítulo 3: Implementación del Modelo de Evapotranspiración	27
3.1 <i>Metodología de solución para la implementación del modelo de evapotranspiración</i>	28
3.2 <i>Fase 1. Diseño y construcción del invernadero con malla sombra</i>	29
3.2.1 <i>Establecimiento de la estructura del invernadero</i>	29
3.2.2 <i>Selección del cultivo y de los componentes del invernadero</i>	29
3.2.3 <i>Construcción del invernadero</i>	31

3.3 Fase 2. Instalación del sistema eléctrico y electrónico en el invernadero.....	32
3.3.1 Abastecimiento del sistema de corriente eléctrica.....	32
3.3.2 Integración de sensores y configuración de conexión.....	33
3.4 Fase 3. Obtención de datos y software de implementación.....	33
3.4.1 Obtención de variables en tiempo real.....	33
3.4.2 Programación del software para la implementación del modelo.....	34
Codificación de la implementación.....	35
3.4.3 Puesta en marcha del modelo matemático (ETo).....	38
3.5 Fase 4. Implementación del modelo matemático.....	39
3.5.1 Verificación de datos de entrada.....	39
3.5.2 Requerimientos del sistema.....	40
3.5.3 Implementación del modelo de evapotranspiración.....	41
Capítulo 4: Resultados y Análisis.....	44
4.1 Implementación del modelo de evapotranspiración.....	45
4.2 Análisis de medición y desempeño de los sensores utilizados.....	45
4.3 Análisis de validación de datos sensados con datos de referencia.....	47
4.4 Análisis de las variables utilizadas en el modelo de Eto.....	48
4.5 Análisis de evapotranspiración del cultivo con la evapotranspiración de referencia.....	49
4.6 Análisis de la evapotranspiración del cultivo y temperatura máxima y mínima del mes de enero y febrero.....	51
4.7 Análisis de la evapotranspiración con el crecimiento del cultivo.....	52
4.8 Análisis del modelo implementado con modelos basados en el estado del arte.....	53
4.9 Implementación del modelo de ETo.....	55
4.10 Análisis de la implementación del cultivo de referencia y cultivo experimental.....	56
4.11 Estudio de campo sobre el consumo de agua en hortalizas en Morelos.....	58
Capítulo 5: Conclusiones.....	59
5.1 Conclusiones.....	60
5.2 Logros obtenidos.....	62
Artículos publicados.....	62
Ponencias.....	62
5.2 Trabajos futuros.....	62
Referencias.....	64
Anexos.....	70

Lista de Figuras

Figura 1. Principales características y eficiencias de los tipos de riego en México.	3
Figura 2. Microcontrolador ESP32 [28].	4
Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o) bajo condiciones estándar.	20
Figura 4. Presión de vapor a saturación (kPa).	22
Figura 5. Declinación solar (Radianes).	23
Figura 6. Presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie terrestre (kPa).	23
Figura 7. Evapotranspiración (ET).	24
Figura 8. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o).	24
Figura 9. Evapotranspiración del cultivo (ET _c).	25
Figura 10. Gráfica del factor (K _c) respecto al cultivo de cosecha.	25
Figura 11. Metodología de solución.	28
Figura 12. Dimensiones del invernadero.	29
Figura 13. Sensores utilizados (DHT-22, FC-28).	30
Figura 14. Microcontrolador utilizado (ESP32).	30
Figura 16. Materiales utilizados en el invernadero para intemperie.	31
Figura 15. Malla sombra utilizada en el invernadero.	31
Figura 17. Armado del invernadero.	31
Figura 18. Instalación de sistema eléctrico y electrónico.	32
Figura 19. Topología y distribución de los sensores.	32
Figura 20. Conexión de sensores y microcontrolador con servidor piloto.	33
Figura 21. Obtención de variables en tiempo real del invernadero.	33
Figura 22. Implementación del modelo para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo.	34
Figura 23. Permiso para acceso a red WiFi.	35
Figura 24. Variables declaradas del sistema para el invernadero.	36
Figura 25. Protocolo de conexión a la red e inicialización de las variables.	36
Figura 26. Comunicación del servidor al microcontrolador ESP 32.	36
Figura 27. Código de visualización de datos mínimos y máximos del sistema del sensado.	37
Figura 28. Monitoreo de las variables meteorológicas dentro del invernadero inteligente.	37
Figura 29. Conexión entre el sistema del invernadero y el servidor para el procesamiento del invernadero inteligente.	38
Figura 30. Sistema de riego del invernadero.	38
Figura 31. Puesta en marcha del invernadero inteligente.	39
Figura 32. Diagrama de flujo para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo.	41
Figura 33. Comportamiento de la humedad relativa en la interfaz del servidor web con toma de lectura en tiempo real (fecha de captura 18/11/2023).	42
Figura 34. Comportamiento de la humedad relativa en la interfaz del servidor web con toma de lectura en tiempo real (fecha de captura 18/11/2023).	42
Figura 35. Interfaz del servidor web para obtener los valores máximos y mínimos de las variables requeridas del invernadero (fecha de captura (18/11/2023).	43
Figura 36. Interfaz del servidor web para calcular la evapotranspiración del cultivo de calabacitas utilizando todas las variables antes evaluadas (fecha de captura 18/11/2023).	43
Figura 37. Interfaz del servidor web para el registro de las variables monitoreadas para ser almacenada en la base de datos (fecha de captura 18/11/2023).	43
Figura 38. Humedad y temperatura estimada y de referencia.	46
Figura 39. Parámetros ambientales para el modelo de ET _o	49
Figura 40. Evapotranspiración diaria del mes de diciembre.	50

<i>Figura 41. Evapotranspiración del cultivo y temperatura máxima y mínima del mes de enero y febrero.</i>	52
<i>Figura 42. Evapotranspiración de las calabacitas considerando el crecimiento.</i>	53
<i>Figura 43. Comparativo de evapotranspiración.</i>	54
<i>Figura 44. Monitoreo remoto del invernadero mediante internet de las cosas(IoT).</i>	56
<i>Figura 45. Consumo de agua en invernaderos en diferentes localidades del estado de Morelos.</i>	58

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Ventajas y desventajas de los invernaderos.</i>	2
<i>Tabla 2. Comparativo del estado del arte.</i>	14
<i>Tabla 3. Nomenclatura y descripción utilizadas en ecuación 2 (es).</i>	21
<i>Tabla 4. Nomenclatura y descripción utilizadas en ecuación 3 (ds).</i>	22
<i>Tabla 5. Registro de datos (09/09/2023).</i>	39
<i>Tabla 6. Valores de error absoluto y relativo.</i>	40
<i>Tabla 7. Requerimientos del sistema.</i>	40
<i>Tabla 8. Diferencia de medición entre el sensor de referencia y el sensor considerado.</i>	48
<i>Tabla 9. Mínimos, máximo y promedio de las variables consideradas en el modelo de ETo (T_{max}, T_{min}, HR_{max} y HR_{min}).</i>	49
<i>Tabla 10. ETc min, max y promedio del mes de diciembre, enero y febrero.</i>	51
<i>Tabla 11. Comparativo de ETc en mm considerando diferentes modelos.</i>	55

Cuernavaca, mor., **19/junio/2024**

OFICIO No. SAC/192/2024

Asunto: Autorización de impresión de tesis

IRVIN DAVID VELÁZQUEZ MORA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado “**Aplicando el internet de las cosas para la implementación de un modelo de evapotranspiración en cultivos bajo condiciones protegidas**”, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

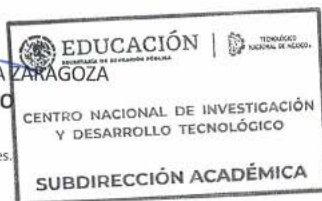
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”


CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C.c.p. Depto. de Servicios Escolares.
Expediente



ESJ

CMAZ/lmz



Cuernavaca, Mor., 06/junio/2024

OFICIO No. DIM/022/2024

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFCIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Irvin David Velásquez Mora con número de control M22CE078, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "**Aplicando el Internet de las cosas para la implementación de un Modelo de evapotranspiración en cultivos bajo condiciones protegidas**" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dra. Alicia Martínez Rebolgar
Director de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Revisor 1

Dr. Arturo Ernesto Mares Gardea
Codirector de tesis

Dr. Hugo Estrada Esquivel
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
Iniciales AMR/mrsr

Resumen

La agricultura industrial en nuestro país enfrenta desafíos significativos debido a los cambios climáticos radicales que experimentamos diariamente. Estos desafíos incluyen la seguridad alimentaria, las pérdidas de cosechas, las plagas, las inundaciones y la deshidratación de los cultivos. México, con su amplia biodiversidad y condiciones climáticas favorables, es uno de los principales productores agrícolas en América Latina, destacándose como líder en la producción de hortalizas y ocupando el segundo lugar en cultivos de frutas. Dada la importancia estratégica de la agricultura y la necesidad de abordar estos desafíos, se requiere una solución científica y tecnológica para recuperar y aumentar las producciones agrícolas.

En muchos casos, la incertidumbre sobre las necesidades hídricas de los cultivos conduce a un uso excesivo o insuficiente de agua, lo que afecta negativamente su desarrollo. Por lo tanto, es crucial calcular con precisión la cantidad de agua requerida por los cultivos mediante sistemas de riego eficientes y una planificación adecuada de los recursos hídricos, especialmente en regiones áridas donde el agua es escasa.

Esta investigación se centra en invernaderos tipo malla sombra en la región de Cuernavaca, Morelos, México, caracterizada por su vulnerabilidad a la variabilidad climática y la escasez de agua. En este contexto, este trabajo de investigación propone la implementación de un modelo matemático para calcular la evapotranspiración de referencia en invernaderos tipo malla sombra, utilizando el Internet de las cosas (IoT) a través de un sistema de control de riego basado en el microcontrolador ESP32. Este sistema permite la obtención y procesamiento de datos en tiempo real a través de un servidor web, utilizando lenguajes de programación como PHP, HTML, C y SQL.

A través del análisis comparativo, el modelo ETc-PG demuestra un ahorro de agua, logrando hasta 124 l/m^2 durante un período de 3 meses en comparación con el modelo de Hargreaves y Samani, y 208 l/m^2 en comparación con los métodos convencionales. Estos hallazgos subrayan el potencial del modelo ETc-PG para mejorar la eficiencia del riego y conservar los recursos hídricos, ofreciendo así una herramienta valiosa para la gestión agrícola sostenible en regiones áridas.

Abstract

The industrial agriculture sector in Mexico faces significant challenges due to the radical climate changes experienced on a daily basis. These challenges include food security, crop losses, pests, floods, and crop dehydration. Mexico, with its abundant biodiversity and favorable climatic conditions, stands as one of the leading agricultural producers in Latin America, excelling in vegetable production and ranking second in fruit cultivation. Given the strategic importance of agriculture and the need to address these challenges, a scientific and technological solution is required to recover and increase agricultural production.

In many cases, uncertainty about the water needs of crops leads to excessive or insufficient water use, negatively affecting their development. Therefore, accurately calculating the amount of water required by crops through efficient irrigation systems and proper planning of water resources is crucial, especially in arid regions where water is scarce.

This research focuses on shade net greenhouses in the region of Cuernavaca, Morelos, Mexico, characterized by their vulnerability to climatic variability and water scarcity. In this context, this research proposes the implementation of a mathematical model to calculate reference evapotranspiration in shade net greenhouses, using the Internet of Things (IoT) through an irrigation control system based on the ESP32 microcontroller. This system allows for real-time data acquisition and processing through a web server, using programming languages such as PHP, HTML, C, and SQL.

Through comparative analysis, the ETc-PG model demonstrates water savings, achieving up to 124 l/m^2 over a period of 3 months compared to the Hargreaves and Samani model, and 208 l/m^2 compared to conventional methods. These findings underscore the potential of the ETc-PG model to improve irrigation efficiency and conserve water resources, thus offering a valuable tool for sustainable agricultural management in arid regions.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

En México, la agricultura proporciona empleo al 13% de la población y el 73% del territorio mexicano está dedicado a este sector gracias a las condiciones climáticas que permite tener una gran variedad de cultivos, siendo uno de los principales líderes de América Latina [1][2]. El principal cultivo es la hortaliza, lo que permite que México sea uno de los principales productores y exportadores de este producto [3]. Por otra parte, la agricultura representa el 76% del consumo hídrico del país y el cuidado de los cultivos se vuelve complicado en grandes dimensiones, provocando pérdidas económicas [4].

En los últimos años, investigaciones científicas y tecnológicas se han propuesto minimizar el consumo de los recursos sin comprometer la producción. Recientemente, diversos investigadores han utilizado los modelos de evapotranspiración para calcular la cantidad de agua necesaria para los cultivos, lo que permite planificar los recursos hídricos, especialmente en condiciones áridas y utilizando una variedad de sensores [5]- [12]. El monitoreo en tiempo real y un modelo para calcular la evapotranspiración puede ayudar a la dinámica cambiante del contenido de humedad del suelo para la gestión eficaz del riego y los cultivos [13] [14]. Los modelos de evapotranspiración han demostrado que permiten calcular la cantidad de agua que necesitan los cultivos. Sin embargo, la implementación de estos modelos aún es escasa [15].

En climas cálidos subhúmedos, la implementación de los modelos de evapotranspiración puede ayudar a cuantificar la cantidad necesaria de agua en un cultivo, más aún, la automatización de invernaderos o sistemas de riego pueden reducir el consumo hídrico y optimizar los tiempos de riego, al mismo tiempo de incrementar y mejorar la producción. Por consiguiente, el objetivo del trabajo de investigación se implementa un modelo matemático para calcular la evapotranspiración de referencia en un invernadero tipo malla sombra aplicando el internet de las cosas (IoT) a través de un sistema de control de riego utilizando un microcontrolador ESP32, considerando la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento mediante un servidor web.

1.2 Marco teórico

Este apartado aborda los conceptos fundamentales para comprender la investigación, incluyendo las tecnologías empleadas, herramientas, métodos y conceptos. Así como los softwares especializados y dispositivos de medición, como sensores o componentes electrónicos.

1.2.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso fundamental en el ciclo hidrológico y en el funcionamiento de los sistemas naturales y agrícolas. La evapotranspiración se refiere a la pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia la atmósfera, que ocurre a través de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas.

1.2.2 Invernaderos

Un invernadero aprovecha el efecto producido por la radiación solar: al atravesar un material translúcido o de vidrio, los elementos que se encuentran dentro se calientan. Estos elementos emiten radiación infrarroja con una longitud de onda mayor que la del sol, lo que impide que esta radiación pueda salir fácilmente a través de la cubierta, generando así un calentamiento interno [16]. Los invernaderos con cubierta de malla, también conocidos como malla sombra se componen de estructuras simples. Entre los diferentes tipos de invernaderos (como el tipo túnel o túnel de polietileno, tipo capilla o de techo a dos aguas, y tipo parral), algunas de las ventajas y desventajas de los invernaderos con cubierta de malla se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los invernaderos.

Ventajas	Desventajas
1. Económico	1. Requiere mantenimiento más frecuente
2. Protege al cultivo de los rayos solares directos	2. Menor durabilidad en comparación con materiales más sólidos
3. Protección del cultivo ante las inclemencias del tiempo	3. Susceptibilidad a daños por viento o nieve
4. Protección de animales	4. Limitada protección contra plagas pequeñas como ácaros
5. Adaptabilidad al terreno	5. Mayor dificultad para controlar la humedad relativa en climas húmedos

1.2.3 Tipos de riego en México

Este apartado presenta los principales tipos de riego en México. La Figura 1 muestra las principales características y eficiencias de los tipos de riego en México.



Figura 1. Principales características y eficiencias de los tipos de riego en México.

Las tecnologías utilizadas en este trabajo de investigación se presentan a continuación.

1.2.4 Internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas (IoT) es un término propuesto por Kevin Ashton, quien logró implementar un sistema de sensores universales para conectar el mundo físico al mundo digital [24]. El IoT permite que cualquier objeto/cosa mediante el uso de sensores y red de datos pueda conectarse con algún dispositivo, logrando el monitoreo y control en tiempo real [25][26].

1.2.5 Microcontrolador ESP32

El Microcontrolador ESP32 es una placa de desarrollo basada en un chip (ESP32-D0WDQ6). El ESP32 cuenta con 38 entradas y salidas [27] y cuenta con entradas analógicas, digitales y una serie de periféricos. Además, trabaja con un cristal 40 Mhz y es compatible con la mayoría de las tarjetas de desarrollo de Arduino para aplicación de cualquier tipo de tecnología utilizando el internet de las cosas (IoT), como se muestra en la Figura 2.

1.2.6 Tecnología WiFi

La tecnología WiFi es una comunicación inalámbrica que es llevada a cabo sin el uso de cables o alguna otra conexión física y permite crear una red entre los distintos dispositivos para poder compartir todos sus recursos. La conexión de red WiFi es una tecnología que permite la conectividad de dispositivos como lo son: cámaras, impresoras, sensores y dispositivos que puedan interconectarse sin necesidad de utilizar algún tipo de cable [28].



Figura 2. Microcontrolador ESP32 [28].

1.2.7 Monitoreo y obtención de datos en la nube

El monitoreo y la obtención de datos en la nube abastecen áreas críticas en el panorama actual de la tecnología de la información. En el contexto de la nube, se refiere al proceso de supervisar y recopilar datos de diversas fuentes, que pueden incluir dispositivos conectados, servicios en la nube y sistemas distribuidos. Este enfoque permite a las organizaciones recopilar datos en tiempo real, analizar tendencias y patrones, y tomar decisiones informadas basadas en información actualizada. Miller y Smith (2020) destacan la importancia de la monitorización en la nube para optimizar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas en entornos distribuidos.

1.2.8 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un enfoque innovador en el sector agrícola que utiliza tecnologías avanzadas, como sistemas de información geográfica, teledetección, posicionamiento global (GPS), sensores y análisis de datos, para optimizar la gestión de los recursos agrícolas de manera más eficiente y sostenible.

En la agricultura de precisión, se recopilan y analizan datos detallados sobre las condiciones del suelo, el clima, el crecimiento de los cultivos y otros factores relevantes a nivel de campo o incluso a nivel de planta. Estos datos se utilizan para tomar decisiones informadas en tiempo real sobre la aplicación de insumos agrícolas, como fertilizantes, agua y pesticidas, con el objetivo de maximizar el rendimiento de los cultivos, reducir los costos de producción y minimizar los impactos ambientales.

1.2.9 Automatización de invernaderos

La automatización de invernaderos es un enfoque tecnológico que utiliza sistemas automatizados y controlados por computadora para gestionar y optimizar el ambiente interno de los invernaderos. Estos sistemas están diseñados para monitorear y controlar variables como la temperatura, la humedad, la luz, la ventilación y el riego de manera precisa y eficiente, con el objetivo de crear condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Los sistemas de automatización de invernaderos suelen incluir una variedad de componentes, como sensores para medir diferentes parámetros ambientales, actuadores para controlar dispositivos como sistemas de calefacción, ventiladores y sistemas de riego, y un sistema de control centralizado que recopila y procesa datos en tiempo real y toma decisiones basadas en algoritmos predefinidos o aprendizaje automático.

1.3 Estado del arte

La evapotranspiración en cultivos bajo condiciones protegidas y al aire libre depende de múltiples variables climáticas y la interacción entre ellas [29]. Por otro lado, el sector agrícola es muy importante debido a los altos ingresos que México genera con las industrias agrícolas y las exportaciones a otros países. Existen un gran número de propuestas para un modelo de evapotranspiración utilizando internet de la cosa (IoT). Así como también diferentes módulos para la obtención de datos en la nube con la finalidad de monitorearlos a través de diferentes microcontroladores, módulos WiFi y tecnología remota. A continuación, se describen algunas de las propuestas donde se destaca el uso de internet de las cosas (IoT) para el sector agrícola utilizando diversos sensores y microcontroladores.

1) Invernadero inteligente y agricultura

Descripción de la investigación: [30] diseñaron una línea de base para la implementación de un invernadero inteligente de tipo piramidal, utilizando técnicas relacionadas con la Agricultura de Precisión (AP).

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo en general, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Obtención de datos mediante un servidor y sistema remoto.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensores remotos basados en internet de las cosas (IoT).

Tipo de microcontrolador: ESP32

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores aplicaron técnicas relacionadas con la Agricultura de Precisión (AP), partiendo de conceptos relacionados con internet de las cosas (IoT).

Conclusiones: los autores concluyen que utilizando invernaderos inteligentes, mejoran el uso del recurso hídrico y obtención de los datos.

2) Invernadero inteligente y sostenible

Descripción de la investigación: en [31] los autores construyeron un modelo conceptual de un invernadero inteligente y sostenible, el cual funciona con energía solar fotovoltaica y utiliza aguas residuales tratadas.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo en general, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Monitoreo de forma remota y sistema solar fotovoltaico integrado.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del modelo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor de humedad de suelo (capacitivo), sensor de humedad relativa (DTH11) y temperatura y sensor de intensidad de luz.

Tipo de microcontrolador: ESP32 y software (LabVIEW)

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron simulación con el software LabVIEW, donde se monitorea de forma remota a través de microcontroladores.

Conclusiones: los autores concluyen que los invernaderos inteligentes y sostenibles contribuirán en gran medida a la seguridad alimentaria en los países del Golfo. Ampliado a invernaderos comerciales, el análisis económico mostró una inversión atractiva con un retorno de la inversión del 340% y un período de pago de 5 años.

3) Revolucionando el cultivo de albahaca sagrada con un sistema hidropónico habilitado por inteligencia artificial

Descripción de la investigación: en [32] los autores diseñaron e implementaron un sistema hidropónico basado en internet de las cosas (IoT) para plantas exóticas y medicinales.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para las plantas exóticas y medicinales, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Control inalámbrico basado en internet de las cosas (IoT), y sistema remoto.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del monitoreo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor RGB, pH, temperatura y turbidez.

Tipo de microcontrolador: Microcontrolador ESP32WROOM con WiFi y bluetooth incorporado.

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron un modelo de regresión logística basada en datos de sensores para clasificar los parámetros estacionales, como la dispensación de nutrientes, el flujo de agua y la luz a fin de lograr un crecimiento óptimo de las plantas. Además, el microcontrolador ESP32 cuenta con plataformas de creación de electrónica de código abierto de fácil acceso y de bajo costo y ayuda a registrar de manera confiable los sistemas de riego en cultivos.

4) Sistema de inferencia difusa de Tsukamoto basado en Internet de las cosas (IoT) para el control de la temperatura y la humedad ambiente

Descripción de la investigación: en [33] los autores realizaron un estudio aplicando el concepto de internet de las cosas (IoT) en un ambiente controlado con ventilador, y el monitoreo de la humedad y temperatura ambiente.

Enfoque utilizado en la investigación: en el enfoque de esta investigación los autores utilizaron una aplicación móvil de modo que la habitación se pueda controlar de forma remota mediante un teléfono inteligente, donde el sistema cuenta con lo siguiente.

- Control y recopilación de datos de una habitación remota

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensores de temperatura, humedad (DHT22) e infrarrojo pasivo (PIR).

Tipo de microcontrolador: Microcontrolador ESP32 equipado con un módulo WiFi.

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron como método un modelo matemático considerando las variables de temperatura y humedad, a través de una aplicación móvil.

Conclusión: la temperatura es la adecuada para el cuarto habitacional, considerando la plataforma de internet de las cosas (IoT) utilizada para el monitoreo mediante el uso de diferentes sensores y una aplicación móvil.

5) Predicción de la evapotranspiración de referencia utilizando redes neuronales artificiales

Descripción de la investigación: [34] los autores calcularon la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizando la ecuación de Penman-Montieth, a fin de desarrollar modelos de redes neuronales artificiales (RNA) que permitan calcular la (ET_o) en regiones con información climatológica limitada.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo a campo abierto, donde el sistema cuenta con lo siguiente.

- Recopilación de datos del cultivo

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del modelo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa.

Tipo de microcontrolador: ESP32

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron modelos de redes neuronales con las variables de radiación solar, temperatura máxima y mínima (T_{\max} , T_{\min}), humedad relativa máxima y mínima (HR_{\max} , HR_{\min}) y velocidad del viento. Dando como salida la variable de ET_o calculada.

Conclusión: de acuerdo al análisis de investigación, los autores reportaron que los invernaderos inteligentes representan una evolución significativa en la agricultura utilizando los modelos matemáticos para calcular la evapotranspiración con redes neuronales.

6) Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) cv Álvara promedio en invernadero

Descripción de la investigación: en [35] los autores desarrollaron una metodología para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) para el cultivo de cebolla *Allium cepa*, las variables consideradas son T_{\max} , T_{\min} , T_{media} y radiación solar en la parte superior de la atmósfera.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*), donde el sistema cuenta con lo siguiente.

- Recopilación de datos, control remoto, automatizado de las condiciones ambientales.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del modelo que se menciona en la investigación, según el autor fueron los siguientes:

- Sensores de radiación solar, temperatura, velocidad del viento.

Tipo de microcontrolador: ESP32

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron modelos de redes neuronales las variables de radiación solar, temperatura máxima y mínima (T_{max} , T_{min}), humedad relativa máxima y mínima (HR_{max} , HR_{min}) y velocidad del viento, dando como salida la variable de (ET_o) calculada.

Conclusión: los invernaderos inteligentes representan una evolución significativa en la agricultura hacia un enfoque más tecnológico, eficiente y sostenible.

7) Sistema utilizando internet de las cosas (IoT) basado en un microcontrolador ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0

Descripción de la investigación: en [36] los autores desarrollaron un sistema utilizando el internet de las cosas (IoT) para monitorear y controlar parámetros inherentes a los cultivos bajo invernadero.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para un invernadero de lechuga, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Muestra de lecturas de la base de datos, control de encendido y apagado de los actuadores de forma manual.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensores de humedad y temperatura (DHT22), sensor de humedad del suelo (HW-080)

Tipo de microcontrolador: ESP32 donde se conecta a la red WiFi con protocolo ESP-Now (protocolo de comunicación entre varios dispositivos).

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores utilizaron como método los estudios y características de los cultivos en invernaderos y las condiciones idóneas para su

desarrollo. Se establecieron las especificaciones técnicas del producto a desarrollar y sus restricciones.

Conclusión: el sistema trabaja sin ningún tipo de problema con el protocolo aplicado y la red de distribución. Con lo anterior se puede demostrar que el sistema y la metodología aplicada correctamente, puede desarrollar un buen monitoreo aplicando el internet de las cosas (IoT).

8) Sistema de información de riego para equipos presurizados

Descripción de la investigación: en este trabajo de investigación [37] los autores desarrollaron un sistema de información de riego, el cual está compuesto por dos prototipos de monitoreo de variables en tiempo real: estación climática (clima) y estación edáfica (suelo) y un software web de análisis de datos agroclimáticos con fines de programación de riego.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo de hortalizas, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Informa al agricultor cuándo, dónde y cuánto se necesita regar (Programaciones de riego)
- Los datos climáticos (telemetría) y registro de datos se visualizan

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor de clima, sensor de suelo y sensor de riego

Tipo de microcontrolador: softwares: Plataforma RITEC – Módulo Clima 1.01. y microcontrolador ESP32.

Método utilizado en el trabajo de investigación: el método propuesto es por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el cual consiste en reponer la humedad agotada del suelo manteniendo en campo húmedo a un nivel de capacidad, permitiendo de este modo lograr un normal desarrollo vegetativo del cultivo.

Conclusiones: las principales características del sistema de información de riego están compuestas por dos sensores remotos autónomos del tipo estación climática y estación edáfica con un software de riego. Se aloja en un servidor de la empresa de Riegos y Tecnología, esto puede ser realizado por el usuario, donde se puede observar y monitorear los datos obtenidos del invernadero.

9) Máquina de Aprendizaje Estableciendo Predicción de Referencia y Evapotranspiración (ET_o) Usando internet de las cosas (IoT)

Descripción de la investigación: en [38] los autores diseñaron una máquina de aprendizaje donde se requiere acercarse a la tasa ET_o para superar la complejidad asociada con estándar ET_o. Para eso se captura la temperatura y humedad del cultivo utilizando el internet de las cosas (IoT). La temperatura y humedad son datos necesarios para los modelos, lo cual se necesitan pruebas, y validación de la propuesta de solución.

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo a campo abierto, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- El sistema envía los datos desde la base hasta el servidor
- Proporciona una excelente solución para transferir datos desde el campo a la estación, utilizando Internet y el sistema es portátil

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor (DHT-22)

Tipo de microcontrolador: Node MCU Gateway (SP8255)

Método utilizado en el trabajo de investigación: el método utilizado propuesto es por Penman-Monteith recomendado por la FAO para la determinación de la tasa de ET_o. Inicialmente, el método de ET_o de Penman-Monteith se utiliza para determinar la ET_o a partir de las condiciones prevalecientes.

Conclusiones: los autores concluyen que los componentes que se utilizaron son de bajo costo y además es muy sencilla la forma de calcular las necesidades de los cultivos.

10) Control de riego en cultivos de ahuyama en Sincelejo, Sucre (Colombia) gestionados a través del internet de las cosas (IoT)

Descripción de la investigación: [39] los autores desarrollaron un sistema de riego automático para cultivos de ahuyama en el departamento de Sucre, Colombia. El sistema diseñado se compone de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) sintonizado y un sistema de adquisición de datos conectado a la nube mediante herramientas del internet de las cosas (IoT).

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo de ahuyama, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Controla el cultivo, sistema remoto, gestión de información histórica, lecturas en tiempo real, evaluación de requerimiento hídrico del cultivo, conexión a la nube y almacén de datos.

Sensores utilizados en el sistema: los sensores utilizados para las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor de posición, sensor de humedad, sensor (RT1).

Tipo de microcontrolador: Intel Galileo® Gen 2, a través de la plataforma libre pensar hablar (*ThinkSpeak*).

Método utilizado en el trabajo de investigación: los autores aplicaron como método, una aplicación de control proporcional, integral y derivativo básico orientado a controlar los niveles de error presentado al momento de medir los requerimientos hídricos mediante el modelo de Penman-Monteith.

Conclusiones: el proyecto funciona en tiempo real y almacenando directamente la información en la nube, a través de la plataforma libre Pensar hablar (*ThinkSpeak*).

11) Prototipo de sistema de riego agrícola autónomo basado en Arduino e internet de las cosas (IoT) a escala de laboratorio, alimentado por un sistema fotovoltaico

Descripción de la investigación: en [40] los autores diseñaron, elaboraron e implementaron, un sistema de riego empleando hardware y software libre, redes de sensores alámbricos e inalámbricas (redes de sensores), actuadores, dispositivos de comunicación inalámbrica y herramientas (TIC's).

Enfoque utilizado en la investigación: el enfoque de esta investigación fue para el cultivo a campo abierto, donde el sistema cuenta con lo siguiente:

- Sistema inalámbrico, sistema global para las comunicaciones móviles, sistema autónomo de riego.

Sensores utilizados en el sistema

Los sensores utilizados para realizar las pruebas del prototipo que se menciona en la investigación, según los autores fueron los siguientes:

- Sensor de humedad del suelo (YL-69)

Tipo de microcontrolador: Arduino (mega) y una tarjeta (SIM900).

Método utilizado en el trabajo de investigación: el método utilizado fue propuesto por la FAO el cual consiste en la cantidad de agua que absorbe un sistema con la cantidad de agua que drena.

Conclusiones: el sistema solo basta con tener dos sensores de humedad, lo que hace que el sistema sea muy económico y cuenta con los parámetros para evaluar el método (FAO).

Comparación de las investigaciones analizadas del estado del arte

Para concluir, en la elaboración del Estado del Arte se realizó un comparativo de los sensores, microcontroladores y el enfoque que se ha estudiado en la literatura mostrado en la **Tabla 2**, conformado por los criterios: título, autor, año, sensores utilizados en la investigación, enfoque y tipo de microcontrolador.

Tabla 2. Comparativo del estado del arte.

Título/Referencia	Año	Sensores utilizados	Enfoque	Microcontrolador
Prototipo de sistema de riego agrícola autónomo basado en Arduino e internet de las cosas (IoT) a escala de laboratorio, alimentado por un sistema fotovoltaico [40]	2019	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad (YL-69) 	Campo abierto	Arduino mega Módulo (SIM900)
Control de riego en cultivos de ahuyama en Sincelejo, Sucre (Colombia) gestionados a través del internet de las cosas (IoT) [39]	2020	<ul style="list-style-type: none"> • Posición (2900ET) • Humedad (DHT21) • Temperatura (RT1) 	Para cultivos de ahuyama	Intel Galileo Gen 2
Sistema utilizando internet de las cosas (IoT) basado en esp32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0 [36]	2022	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura y humedad (DHT-22) • Humedad del suelo (HW-080) 	Cultivo de lechuga	ESP32 donde se conecta a la red wifi con protocolo ESP-Now (protocolo de comunicación entre varios dispositivos).
Sistema de información de riego para equipos presurizados [37]	2022	<ul style="list-style-type: none"> • Pluviómetro • Humedad y temperatura (DTH-11) 	Hortalizas	ESP32
Máquina de Aprendizaje Estableciendo Predicción de Referencia y Evapotranspiración (ETo) Usando internet de las cosas (IoT) [38]	2022	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad y humedad (DHT-22) 	Maceta a campo abierto	(Node MCU Gateway (SP8255))
Propuesta: Aplicando Modelo predictivo basado en internet de las cosas (IoT) para calcular evapotranspiración dentro de un invernadero con cubierta de malla [41]	2022	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura y humedad relativa (DTH-11) • Humedad del suelo (FC-28) 	Invernadero con cubierta de malla sombra	Arduino Mega (2560)

Invernadero inteligente y agricultura [30]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Remotos (No menciona matrícula)	Campo abierto	ESP32
Invernadero inteligente y sostenibles [31]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad de suelo (capacitivo) • Humedad relativa (DTH11) • Intensidad de luz 	Aguas residuales	Esp32 y Software (LabVIEW)
Revolucionando el cultivo de albahaca sagrada con un sistema hidropónico habilitado por IA [32]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor • RGB • PH, • Temperatura • turbidez 	plantas exóticas y medicinales	ESP32WROOM con WiFi
Sistema de inferencia difusa de Tsukamoto basado en Internet de las cosas (IoT) para el control de la temperatura y la humedad ambiente [33]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad relativa • Temperatura (DTH22) • Infrarrojos 	Controlador de ventilador	ESP32 equipado con módulo WiFi
Predicción de la evapotranspiración de referencia utilizando redes neuronales artificiales [34]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad del viento • Radiación solar • Temperatura • Humedad relativa (No menciona matrícula)	Campo abierto	ESP32
Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (<i>Allium cepa</i>) cv Álvara promedio en invernadero [35]	2023	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad del viento • Radiación solar • Temperatura (No menciona matrícula)	Cultivo de cebolla	ESP32

En los últimos años, investigaciones científicas y tecnológicas se han propuesto minimizar el consumo de los recursos sin comprometer la producción de productos. Recientemente, diversos investigadores han utilizado los modelos de evapotranspiración para calcular la cantidad de agua necesaria para los cultivos, lo que permite planificar los recursos hídricos, especialmente en condiciones áridas [41]-[48]. La mayoría de las investigaciones realizadas, aplican el modelo para evaluar la evapotranspiración a campo abierto.

Menos de la mitad de estas investigaciones son aplicadas en invernaderos [49]- [52]. Por otra parte, el internet de las cosas (IoT) tiene una amplia gama de aplicaciones dentro del sector Agrícola. Además, se demuestra que calcular el índice (ETo) es una tarea complicada que requiere de muchas variables para poder determinarlo [53]. Las nuevas tecnologías y soluciones, están enfocadas al ámbito agrícola para proporcionar alternativas óptimas para el procesamiento y recopilación de información, con la finalidad de mejorar la productividad y

el mismo tiempo el alarmante cambio climático, además de la creciente crisis del agua que exigen nuevas metodologías.

El monitoreo y la gestión del riego utilizando modelos para calcular la evapotranspiración tiene un impacto importante en la gestión de recursos hídricos para regadíos de cultivos a escala regional [48]. Los invernaderos inteligentes presentan una producción 14% mayor y un ahorro de más del 40% de agua con respecto a los invernaderos tradicionales [54]. Arduino es una plataforma de creación electrónica de código abierto de fácil acceso y de bajo costo por lo cual impacta mínimamente en el costo del sistema y ayuda a registrar de manera confiable los sistemas de riego de cultivos [55]. El internet de las cosas (IoT) mejora la precisión del riego en el monitoreo de diferentes sensores y una estación meteorológica [56]. Por lo anterior, en el siguiente apartado se proponen los siguientes objetivos generales, específicos y los alcances de este trabajo de investigación.

1.4 Objetivo general

Implementar un modelo matemático para calcular la evapotranspiración de referencia en un invernadero tipo malla sombra aplicando el internet de las cosas (IoT) a través de un sistema de control de riego utilizando un microcontrolador ESP32, considerando la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento mediante un servidor web.

1.5 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un invernadero para la implementación de un modelo de evapotranspiración utilizando malla sombra y una estructura metálica.
- Diseñar y poner en marcha el sistema eléctrico y electrónico del invernadero para el monitoreo remoto de las variables climáticas mediante el microcontrolador.
- Implementar un modelo de evapotranspiración considerando las variables requeridas y obtenidas del invernadero para determinar la cantidad de agua necesaria del cultivo, con programación utilizando un microcontrolador ESP32.
- Diseñar e implementar la interfaz para el monitoreo y control de los datos del invernadero en la nube utilizando un servidor web.

1.6 Estructura de Tesis

El trabajo de investigación presenta cinco capítulos, la introducción/ motivación, marco teórico, estado del arte y los objetivos. En el Capítulo 2 se describe el modelo matemático para calcular la evapotranspiración de referencia, dentro del invernadero y el caso de estudio. En el Capítulo 3 se presenta la implementación del modelo matemático para calcular la evapotranspiración y la metodología de solución. En el Capítulo 4 se muestran los resultados y análisis. Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2: Modelo Matemático de Evapotranspiración

2.1 Modelo para calcular la evapotranspiración

El trabajo de investigación propuesto por Ruíz Ortega *et al.*, [57], estudiante de doctorado con el tema de tesis (**Modelo predictivo basado en Internet de las cosas para estimar evapotranspiración dentro de un invernadero con cubierta de malla**) tiene como objetivo desarrollar un modelo para calcular la evapotranspiración dentro de un invernadero con cubierta de malla. La investigación utiliza el paradigma del internet de las cosas (IoT) para la percepción, transmisión, almacenamiento y análisis de datos en la nube, utilizando datos horarios, aplicando técnicas de redes neuronales artificiales y el Método de Penman-Monteith como método de referencia, donde tiene como objetivos específicos:

- Desarrollar un sistema de monitoreo de las variables climáticas de interés (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar).
- Generar un conjunto de datos de las variables de interés del sistema de monitoreo.
- Desarrollar un modelo predictivo para estimar la evapotranspiración.
- Desarrollar un caso de estudio para la evaluación del modelo propuesto.

Enfoque de la investigación: el enfoque de esta investigación fue utilizado y evaluado para un cultivo de hortalizas.

Metodología de solución: el método propuesto fue aplicar técnicas de redes neuronales artificiales y el Método de FAO 56 Penman– Monteith como método de referencia.

Conclusiones de la investigación: de acuerdo al análisis de investigación, cuenta con un sistema muy compacto, donde con dos sensores de humedad y temperatura, el sistema es muy económico y cuenta con los parámetros para evaluar el método de Penman-Monteith.

A continuación se hablará de la evapotranspiración y del modelo para calcular la evapotranspiración del cultivo.

2.2 Evapotranspiración

El concepto de evapotranspiración se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, ni de los factores del suelo, ni de las prácticas de manejo [58]. Los únicos factores que afectan la evapotranspiración son los

parámetros meteorológicos. Por lo tanto, la evapotranspiración es también un parámetro meteorológico que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. Desde este punto de vista, el método FAO 56 Penman- Monteith se recomienda como el único método para determinar la evapotranspiración con parámetros meteorológicos [58], como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) bajo condiciones estándar.

2.3 Métodos para calcular la evapotranspiración

Existen varios tipos de modelos para calcular la evapotranspiración:

- Modelos empíricos: basados en relaciones estadísticas, como el método de Thornthwaite.
- Modelos basados en balances de energía: como el modelo de Penman-Monteith, que considera múltiples variables climáticas.
- Modelos de cultivos: consideran las características específicas del cultivo. Modelos basados en imágenes satelitales: Utilizan datos satelitales para calcular la evapotranspiración. La eficacia varía según la precisión y la disponibilidad de datos.

Los modelos basados en balances de energía suelen ser más precisos pero requieren más datos, mientras que los empíricos son más simples pero pueden ser menos precisos.

2.4 Modelo matemático utilizado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET₀) del cultivo

El modelo matemático calcula la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET₀) mediante ecuaciones que involucran variables climáticas y astronómicas. Estas ecuaciones incluyen la determinación de la presión de vapor a saturación (e_s) a partir de las temperaturas mínima y máxima del aire, el cálculo de la declinación solar (δ_s) basado en el día juliano, y la estimación de la presión de vapor actual (e_a) considerando la humedad relativa. Finalmente, la ET₀ se obtiene combinando estas variables en una expresión que integra

términos trigonométricos e hiperbólicos. Este modelo proporciona una herramienta precisa para la gestión del riego y calcula la cantidad de agua que se pierde debido a la evaporación y transpiración en condiciones climáticas específicas.

A continuación se presenta el modelo para calcular la Evapotranspiración de referencia. La ecuación para calcular la evapotranspiración de referencia diaria, se muestra en la Ecuación 1:

$$ET_0 = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Ec.2}}}{es} + 4 \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Ec.3}}}{ds} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Ec.4}}}{\cos(ea)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Ec.5 operación}}}{\cos(es)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Variable de ajuste}}}{0.408} \tag{1}$$

$$ET_0 = es + 4 ds + \cos(ea) + \cos(es) + 0.408$$

La Ecuación 2 (es) calcula la presión de vapor a saturación (*kPa*). La presión de saturación es la presión de un sistema cuando el sólido o líquido se hallan en equilibrio con su vapor como se muestra en la Figura 4.

$$es = \frac{(e^{\circ}T_{min} + e^{\circ}T_{max})}{2} \tag{2}$$

donde:

- $e^{\circ}T_{min}$ = Presión a vapor a temperatura mínima (*kPa*)
- $e^{\circ}T_{max}$ = Presión a vapor a temperatura máxima (*kPa*)
- $e^{\circ} T_{min}$ = $0.6108 \cdot \text{EXP}((17.27 \cdot T_{min}) / (T_{min} + 237.3))$ ($^{\circ}\text{C}$)
- $e^{\circ} T_{max}$ = $0.6108 \cdot \text{EXP}((17.27 \cdot T_{max}) / (T_{max} + 237.3))$ ($^{\circ}\text{C}$)

En la **Tabla 3** muestra los términos y descripciones utilizados en el modelo para calcular la evapotranspiración de referencia siguiendo la literatura [57]:

Tabla 3. Nomenclatura y descripción utilizadas en ecuación 2 (es).

<i>Evapotranspiración de referencia diaria (ET₀)</i>	
Nomenclatura	Descripción
<i>es</i>	Presión de vapor de saturación
0.6108	Constante de ajuste
237.3	Es una constante para asegurar que la ecuación proporciona resultados precisos (como la presión de vapor).
EXP	función exponencial.
17.27	Está relacionado con la temperatura, son parámetros que ajustan la curva exponencial para la presión de vapor en función de la temperatura.

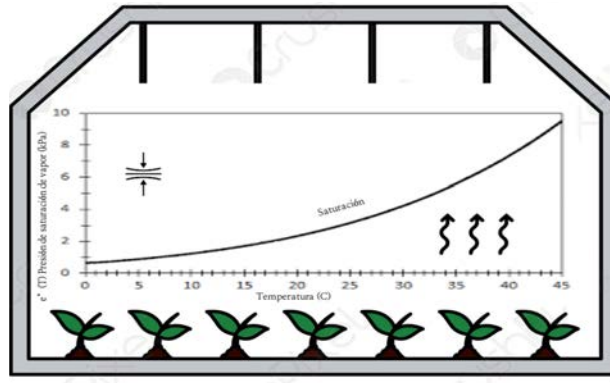


Figura 4. Presión de vapor a saturación (kPa).

$$ET_0 = es + 4 ds + \cos(ea) + \cos(es) + 0.408$$

La Ecuación 3 ($4 ds$) calcula la declinación solar (radianes). La declinación solar es el ángulo que forma la línea sol-tierra como se muestra en la Figura 5. Para determinar $4(ds)$ es necesario resolver la siguiente Ecuación 3.

$$ds=0.409*SEN (((2*pi *J) /365) -1.39) \tag{3}$$

Donde: J = Día Juliano

La Tabla 4 presenta los términos y descripciones utilizados en el modelo para calcular la evapotranspiración de referencia siguiendo [57]:

Tabla 4. Nomenclatura y descripción utilizadas en ecuación 3 (ds).

Evapotranspiración de referencia diaria (ET_0)	
Nomenclatura	Descripción
$4(ds)$	Calcula la declinación solar (radianes).
0.409	Coefficiente empírico que ajusta la amplitud de la declinación solar.
SEN	La función seno, se utiliza para calcular el valor de la declinación solar basada en el ángulo.
365	Días del año.
J	Día juliano, es un sistema de numeración de días utilizado en astronomía y otras ciencias. Este sistema asigna un número secuencial a cada día a partir de una fecha de referencia específica.
-1.39	Ajuste empírico en radianes para que el valor calculado de la declinación solar corresponda correctamente a las posiciones reales del sol a lo largo del año.

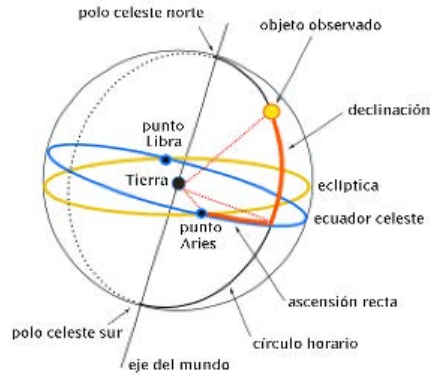


Figura 5. Declinación solar (Radianes).

$$ET_0 = es + 4 ds + \cos(ea) + \cos(es) + 0.408$$

La Ecuación 4 (*ea*) calcula la presión del vapor actual (*kPa*). La presión del valor actual es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire que forma la atmósfera sobre la superficie terrestre, ver Figura 5. Para determinar $\cos(ea)$ es necesario resolver la Ecuación 4.

$$ea = ((\frac{e^{oT_{min}} * HR_{max}}{100}) + (\frac{e^{oT_{max}} * HR_{min}}{100}))/2 \tag{4}$$

donde:

HR_{max} = Humedad máxima (%)

HR_{min} = Humedad mínima (%)

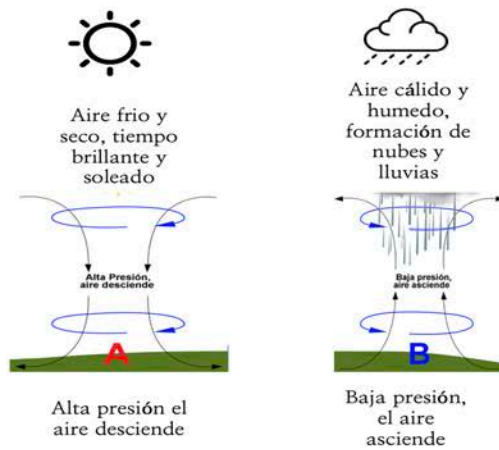


Figura 6. Presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie terrestre (*kPa*).

$$ET_0 = es + 4 ds + \cos(ea) + \cos(es) + 0.408$$

La Ecuación 5. La operación $\cos(es)$ calcula la presión de vapor a saturación (*kPa*). La presión de saturación es la presión de un sistema cuando el sólido o líquido se hallan en equilibrio con su vapor. Para determinar $\cos(es)$ es necesario resolver la Ecuación 5:

$$e_s = \frac{e^{\circ}T_{min} + e^{\circ}T_{max}}{2} \tag{5}$$

donde:

$e^{\circ}T_{min}$ = Presión a vapor a temperatura mínima (kPa)

$e^{\circ}T_{max}$ = Presión a vapor a temperatura máxima (kPa)

$e^{\circ}T_{min}$ = $0.6108 \cdot \text{EXP}((17.27 \cdot T_{min}) / (T_{min} + 237.3))$ (°C)

$e^{\circ}T_{max}$ = $0.6108 \cdot \text{EXP}((17.27 \cdot T_{max}) / (T_{max} + 237.3))$ (°C)

Fórmulas para calcular la evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. La cual se expresa en milímetros por unidad de tiempo como se muestra en la Figura 7.

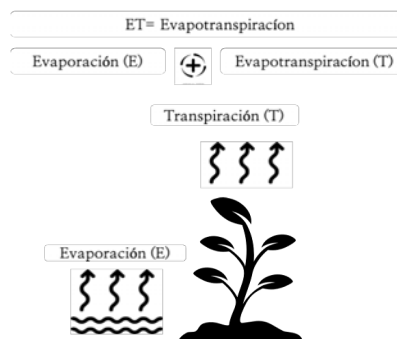


Figura 7. Evapotranspiración (ET).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) es el dato de partida para el diseño de los sistemas de riego, como se muestra en la Figura 8.

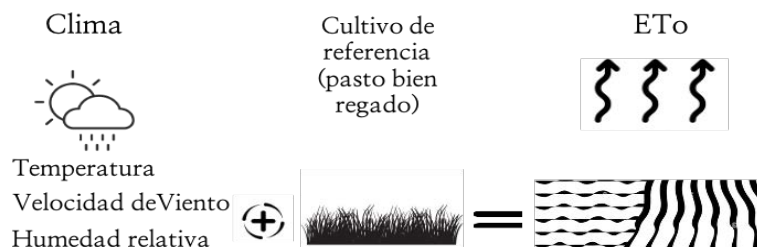
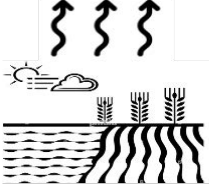


Figura 8. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).


La evapotranspiración del cultivo (ETc) es producto de ETo por una constante (Kc) que está en relación al cultivo (en mL), la cual se determina con la Ecuación 6 y se muestra en la Figura 9 el resultado. Observar Anexo 1 para obtener el Kc del cultivo [59].

$$ET_c = ET_0 * kc \tag{6}$$

ET₀



Factor (K_c)
Cultivo bien
regado
agronómicas
óptimas



ET_c

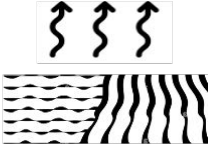


Figura 9. Evapotranspiración del cultivo (ET_c).

donde: (K_c) representa el uso adecuado que permite a los agricultores calcular de manera precisa la cantidad de agua que sus cultivos necesitan en cada etapa de crecimiento.

En la Figura 10 se muestra una representación gráfica del valor de la constante K_c para diferentes cultivos. La relación que existe entre ET₀ con la cantidad del riego se puede observar en el Anexo 2.



Figura 10. Gráfica del factor (K_c) respecto al cultivo de cosecha.

La demanda neta (D_n) es la evapotranspiración del cultivo en un área y se determina con la Ecuación 7.

$$Dn = ET_c * A \tag{7}$$

donde:

DN: Demanda neta (L/m²/día)

ET_c: Evapotranspiración del cultivo (ml/día)

A: área (m²)

2.5 Factores que afectan la evapotranspiración

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La evapotranspiración del cultivo representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar [60].

2.6 Método convencional: Penman-Monteith

El método Penman-Monteith combina principios de la física y la meteorología para calcular la evapotranspiración. La ecuación de Penman-Monteith considera varios factores, incluyendo la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento [60]. La ecuación de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia (ET₀) se expresa como se muestra en la Ecuación 8:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

donde:

- ET₀ = Evapotranspiración de referencia (*mm/día*)
- R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (*MJ/m²/día*)
- G = Flujo de calor en el suelo (*MJ/m²/día*)
- T = Temperatura del aire a 2 metros de altura (*°C*)
- u₂ = Velocidad del viento a 2 metros de altura (*m/s*)
- e_s = Presión de vapor de saturación (*kPa*)
- e_a = Presión de vapor actual (*kPa*)
- Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (*kPa/°C*)
- γ = Constante psicrométrica (*kPa/°C*)

Capítulo 3: Implementación del Modelo de Evapotranspiración

3.1 Metodología de solución para la implementación del modelo de evapotranspiración

La representación gráfica de la metodología de solución se observa en la Figura 11, donde cada etapa cuenta con una serie de actividades que se deben realizar para cumplir el objetivo planteado del trabajo de investigación.

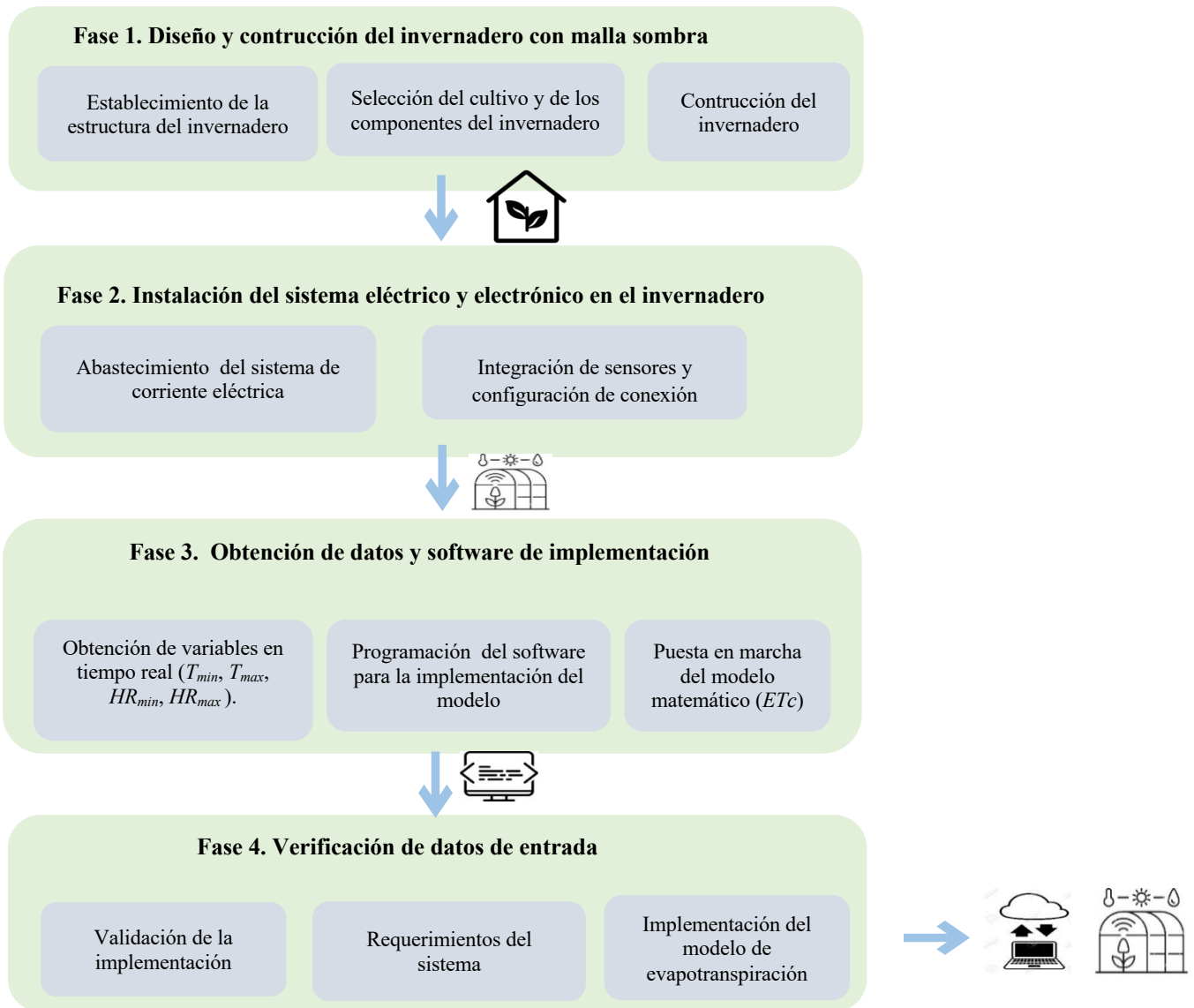


Figura 11. Metodología de solución.

3.2 Fase 1. Diseño y construcción del invernadero con malla sombra

3.2.1 Establecimiento de la estructura del invernadero

El establecimiento de la estructura del invernadero para el cultivo de calabacitas se realizó mediante un software de diseño, donde se muestra una mejor visualización del diseño y dimensiones de la estructura. El invernadero tiene las dimensiones de 1.70 x 3.30 m de lado x 1.70 m de altura, aproximadamente, se realizó en 3D para poder observar a detalle cómo se visualiza desde otro punto de vista agregando la malla sombra, como se muestra en la Figura 12.

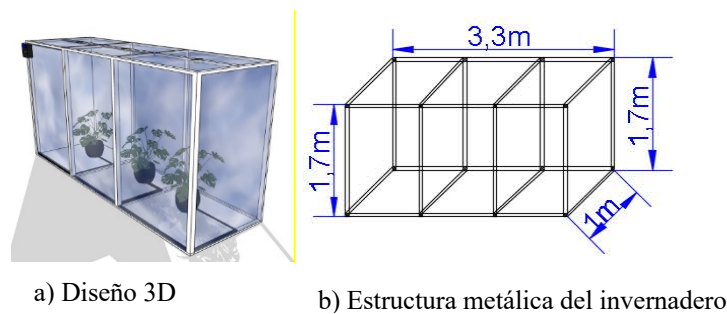


Figura 12. Dimensiones del invernadero.

3.2.2 Selección del cultivo y de los componentes del invernadero

Selección del cultivo

En México, la agricultura proporciona empleo al 13% de la población y el 73% del territorio mexicano está dedicado a este sector gracias a las condiciones climáticas que permite tener una gran variedad de cultivos, siendo uno de los principales líderes de América Latina [1][2]. El principal cultivo es la hortaliza, lo que permite que México sea uno de los principales productores y exportadores de este producto [3]. Este trabajo de investigación utiliza como experimentación la calabacita debido a que sus tiempos de siembra son cortos (2 – 3 meses) y a causa del impacto que tiene en México.

Selección de los componentes del invernadero

La selección de los componentes para el invernadero de calabacitas, se llevó a cabo tomando en cuenta la necesidad del proyecto mediante expertos en cultivos de hortalizas y búsqueda en la literatura.

La selección de los sensores de humedad relativa y temperatura (DHT-11, DHT-22) y humedad de suelo (SEN-HS-CAP) según la literatura [23]-[33] son económicos, además, demuestran ser los más utilizados para el desarrollo de proyectos en la agricultura utilizando internet de las cosas (IoT), dando como resultado buen funcionamiento en los invernaderos de diversos cultivos (café, hoja de mostaza, lechuga). En la Figura 13 se muestran los sensores utilizados, en el Anexo 3 se presentan las características de los sensores.

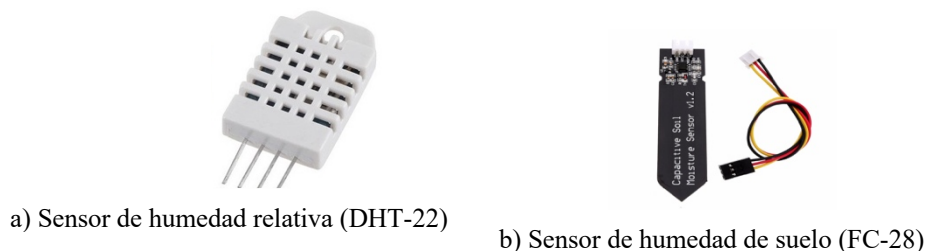


Figura 13. Sensores utilizados (DHT-22, FC-28).

La búsqueda del microcontrolador para la agricultura más utilizado según la literatura [23]-[30] aplicando internet de las cosas (IoT) son: ESP255, Arduino Mega y Raspberry Pi 3. El microcontrolador (ESP32) utiliza un procesador (dual core Xtensa® LX6 de 32 bits) como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Microcontrolador utilizado (ESP32).

La búsqueda de malla sombra para el invernadero, se seleccionó con la ayuda de asesorías impartidas por el Centro cultural Palmira expertos en cultivos de hortalizas, utilizando un 80% de sombra para el cultivo de hortalizas. La malla es resistente a los cambios climáticos, evita la plaga y protege el cultivo de cualquier tipo de viento, se utilizó para la ciudad de Cuernavaca Morelos. Las características de la malla se muestran en la Figura 14.

Malla sombra



Datos técnicos de la malla sombra			
Ancho y largo	Porcentaje de sombra	Grosor	Aplicación
5 x 5 m.	80 %	0.2 mm.	Uso rudo y domestico

La búsqueda de los materiales para la instalación del invernadero, se seleccionaron resistentes a cambios climáticos, agua, humedad y radiación solar. Los materiales utilizados fueron: cajas registro de plástico de 5x5x4 cm para ocultar las conexiones y bornes necesarios, manguera poliflex de uso rudo de ½” para la alimentación del cultivo, cinchos de 15 cm para sujetar todos los componentes colocados y canaleta de ½” para poder ocultar todo conductor que queda a intemperie dentro del invernadero, como se muestra en la Figura 15.



Figura 16. Malla sombra utilizada en el invernadero.

3.2.3 Construcción del invernadero

El armado del invernadero para el cultivo de calabacitas utilizando malla sombra. El armado del invernadero se dividió en las siguientes tres fases como se muestra en la Figura 17.

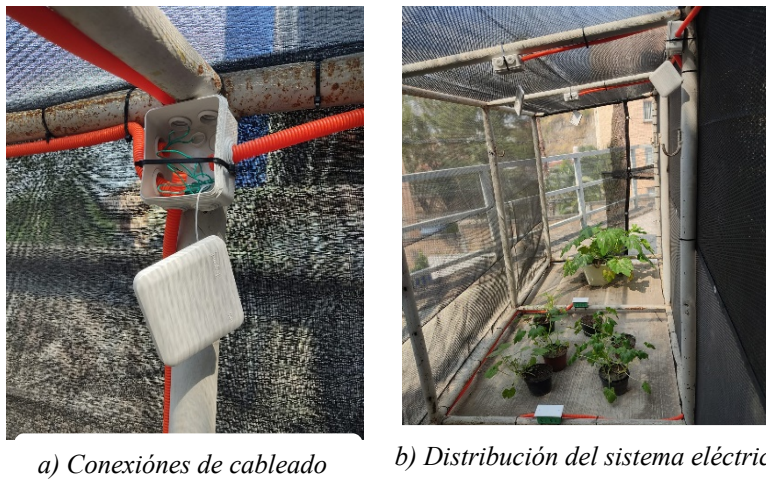


Figura 17. Armado del invernadero

3.3 Fase 2. Instalación del sistema eléctrico y electrónico en el invernadero

3.3.1 Abastecimiento del sistema de corriente eléctrica

El sistema de alimentación para la instalación eléctrica y electrónica del invernadero para el cultivo de calabacitas, se tomó de la red eléctrica más cercana con un voltaje de 110 -127 V mediante canaleta y tubo Poliflex para intemperie. Cable dúplex calibre 16 se utilizó y se realizó la instalación del sistema electrónico como se muestra en la Figura 18.

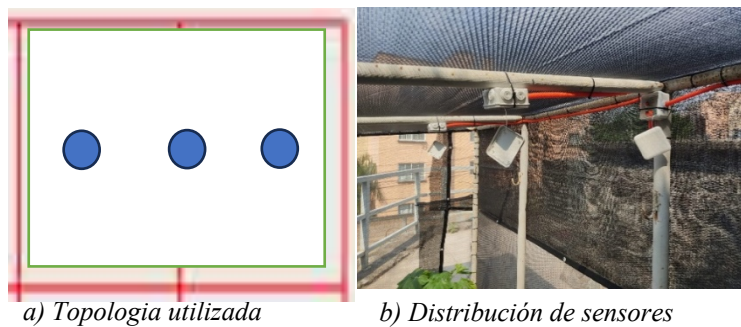


a) Conexiones de cableado b) Distribución del sistema eléctrico

Figura 18. Instalación de sistema eléctrico y electrónico.

Topología y distribución de sensores

La topología y distribución de sensores consideró un estudio de la literatura, de acuerdo a los autores [61], mencionan que una de las mejores topologías es colocando de forma simétrica la distribución de los nodos de sensores como se muestra en la Figura 19. En el Anexo 4 se muestra la topología y distribución de los sensores de manera detallada.



a) Topología utilizada b) Distribución de sensores

Figura 19. Topología y distribución de los sensores.

3.3.2 Integración de sensores y configuración de conexión

La integración de los sensores y configuración de conexión se realizó tomando en cuenta el tipo de actuadores que se requerían para el microcontrolador (ESP32), aplicado la topología seleccionada para sensar los parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa, humedad del suelo) del invernadero mediante la comunicación de un servidor web piloto, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Conexión de sensores y microcontrolador con servidor piloto

3.4 Fase 3. Obtención de datos y software de implementación.

3.4.1 Obtención de variables en tiempo real

El análisis y obtención de las variables en tiempo real, se realizó una vez que se obtuvieron todos los requerimientos necesarios y realizando la conexión de sensores y actuadores al microprocesador (ESP32), aplicado la topología anteriormente seleccionada y el módulo WiFi para sensar los parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa, humedad del suelo) del invernadero mediante la comunicación de un servidor web, como se muestra en la Figura 21.

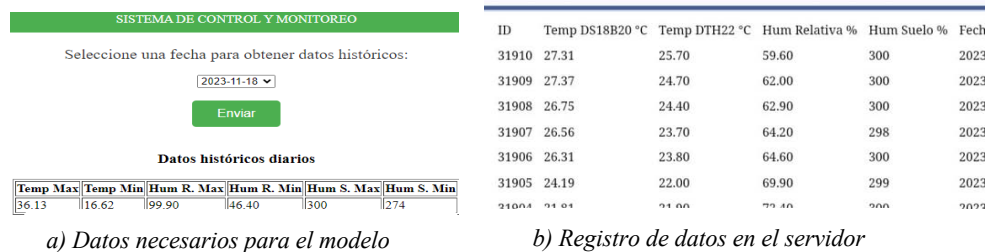


Figura 21. Obtención de variables en tiempo real del invernadero.

3.4.2 Programación del software para la implementación del modelo

La implementación del modelo matemático para calcular la evapotranspiración, se llevó a cabo utilizando un servidor gratuito (Hosting) donde se utilizó como base de datos y gestor de datos recolectados. La Implementación del modelo para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo se muestra en la Figura 22. El hosting contiene carpetas públicas donde manda un link para visar en tiempo real y el estado de la carpeta. El código del modelo matemático para evaluar la evapotranspiración del cultivo, se programó en la carpeta pública donde el usuario puede observar mediante códigos (HTML, CSS, C) y protocolos de comunicación (HTTP) la obtención de los datos en tiempo real. En el siguiente diagrama de flujo se representa la implementación del modelo. La interfaz y funciones del servidor web se muestran de forma detallada en el Anexo 5.

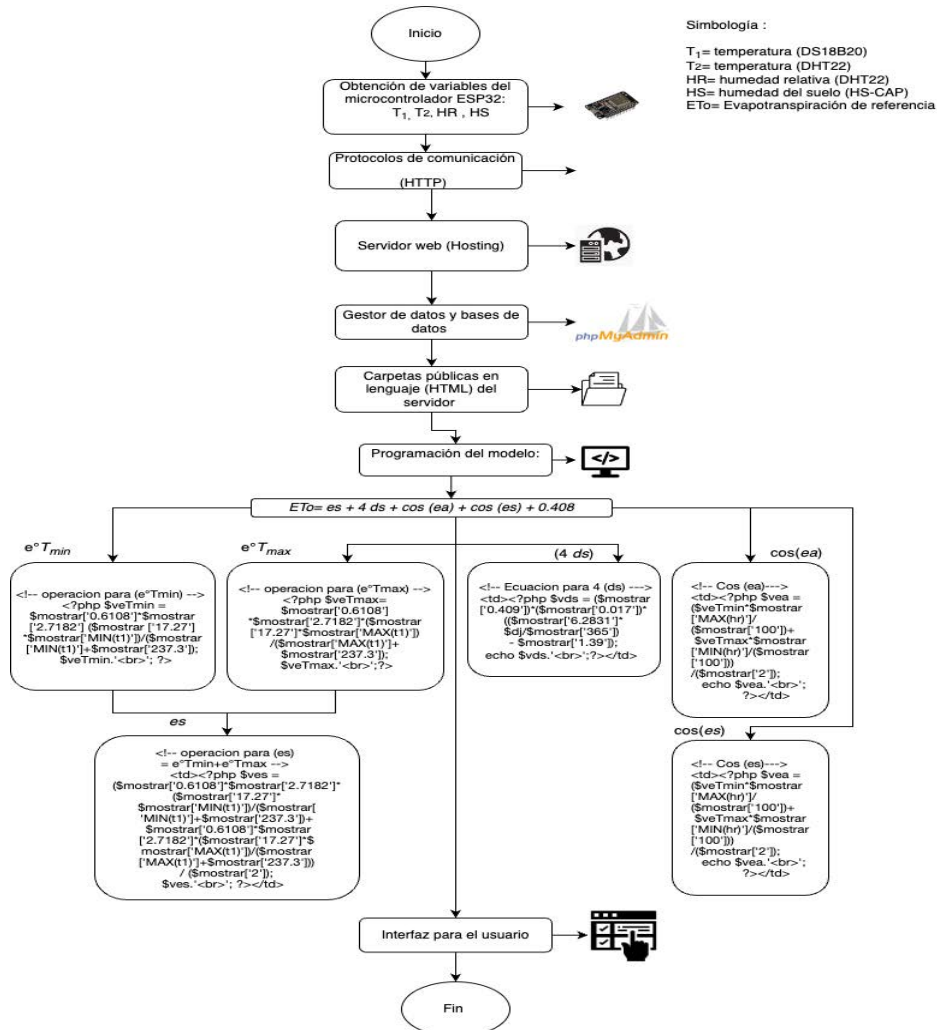


Figura 22. Implementación del modelo para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo.

Interfaz para usuario

El desarrollo de la interfaz para el usuario, facilita la interacción entre los códigos que se encuentran en el servidor y el sistema de gestión de datos. La interfaz para el usuario, se realizó para poder mostrar, administrar y obtener los datos necesarios para evaluar el modelo y calcular la evapotranspiración del cultivo.

Codificación de la implementación

La programación del modelo a implementar se llevó a cabo considerando los datos necesarios del modelo para poder ser representados en una interfaz y visualizar las variables del sensado del invernadero. Los lenguajes de programación utilizados fueron de alto y bajo nivel (HTML, PHP, CSS, C) así como también los protocolos de comunicación del sistema. El código del sistema trabaja de manera cifrada, esto quiere decir que nadie podrá tener acceso al servidor sin una contraseña, y los datos sensados se registran al servidor de forma automática. Se realizó la parte de la programación en el servidor con lenguaje PHP y HTML para poder visualizar mejor los datos y de forma ordenada para recibir las lecturas enviadas por el microcontrolador. El tiempo que fue asignado para mandar los datos de los sensores al servidor fueron cada 3 minutos, esto puede variar según el tipo de sensores o tiempo de respuesta.

La programación del microcontrolador incluye la contraseña de la red como así mismo el SSD de mismo WiFi, como se muestra en la Figura 23.

```
const char* ssid      = "Cenidet";  
              "RedCenidet";  
const char* password = "12345678"
```

Figura 23. Permiso para acceso a red WiFi.

La programación del microcontrolador incluye la página donde se realizó el control y monitoreo del sistema de riego, así mismo ingresar las claves para acceder al servidor web que se desarrolló. Las variables registradas como entradas se incluyeron de forma que también pueda tener la conexión segura el mismo microcontrolador como se muestra en la Figura 24.


```

//Las variables que se tienen
//declaradas, son:
String t1 = "t1"; // Temperatura
//DS18B20
String t2 = "t2"; // Temperatura
//DS18B20
String hr = "hr"; // Sensor de PH

```

Figura 24. Variables declaradas del sistema para el invernadero

La programación de los sensores que fueron integrados al invernadero, fueron inicializados en el código del microcontrolador para poder mandar las lecturas sensadas por el sistema. La conexión realizada de forma remota, tiene como prioridad mandar la lectura en tiempo y forma de cada sensor que esté conectado a la misma red, por ello en caso de existir algún error que se tenga con la conexión el sistema manda un aviso mediante monitor serial del microcontrolador como se muestra en la Figura 25.

```

WiFi.begin(ssid, password);
Serial.println("Conectando");
while(WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}

```

Figura 25. Protocolo de conexión a la red e inicialización de las variables.

El servidor fue configurado con los mismos datos y contraseñas que el microcontrolador para la obtención de los datos de cada sensor instalado mediante el código html, php y css como se muestra en la Figura 26.

```

<?php function fsalida($cad2){
    $tres=substr($cad2, 0, 4);
    $dos=substr($cad2, 5, 2);
    $uno=substr($cad2, 8, 2);
    $cad;      $username = "Nombre de la base de
datos";
    // Reemplazar password
    $password = "xxxxxxxxx";
    $port='1234';
    $conn = new mysqli($servername,
$username,$password, $dbname);
    $conexion=mysqli_connect($servername,
$username,$password, $dbname);
}

```

Figura 26. Comunicación del servidor al microcontrolador ESP 32.

La base de datos de los sensores de monitoreo del invernadero inteligente se registró de manera constante por valores sensado, se programó un identificador para poder consultar u ordenar esos datos obtenidos como son: valores máximos y mínimos de cada sensor integrado en la base de datos como se muestra en la Figura 27.

```

-----<table align="center">-----
-----<div style="text-align:center;">-----
-----<h3> Datos históricos diarios </h3>-----
-----<table border="1" style="margin: 0 auto;">-----
-----<th>Temp Max</th>-----
-----<th>Temp Min</th>-----
-----<th>Hum R. Max</th>-----
-----<th>Hum R. Min</th>-----
-----<th>Hum S. Max</th>-----
-----<th>Hum S. Min</th>-----
<td><?php echo $mostrar['MIN(Temp)'] ?></td>
<td><?php echo $mostrar['MAX(hr1)'] ?></td>
    
```

Figura 27. Código de visualización de datos mínimos y máximos del sistema del sensado.

Las variables meteorológicas se midieron dentro del invernadero con los sensores previamente seleccionados y ajustados dentro del mismo para realizar ciclos de lectura. El funcionamiento fue verificado en la nube con el protocolo de comunicación de cada variable monitoreada, de esta forma sabremos qué tan precisos son los sensores, y si existe algún tipo de problema en la obtención de datos, como se muestra en Figura 28.

SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO

Seleccione una fecha para obtener datos históricos:

Enviar

Datos históricos diarios

Temp Max	Temp Min	Hum R. Max	Hum R. Min	Hum S. Max	Hum S. Min
36.13	16.62	99.90	46.40	300	274

Figura 28. Monitoreo de las variables meteorológicas dentro del invernadero inteligente.

La conexión entre el sistema del invernadero y la plataforma en la nube, se realizó y consideró la integración de diferentes protocolos de comunicación. El monitoreo de la humedad y la temperatura se realiza a través de un servidor central conectado a internet de las cosas (IoT). La red WiFi recopila datos en tiempo real permitiendo un control preciso de riego. La

información obtenida se analiza para determinar las necesidades exactas de agua en cada planta, optimizando así el uso de recursos hídricos y garantizando un riego eficiente y personalizado para cada tipo de cultivo, como se muestra en la Figura 29.

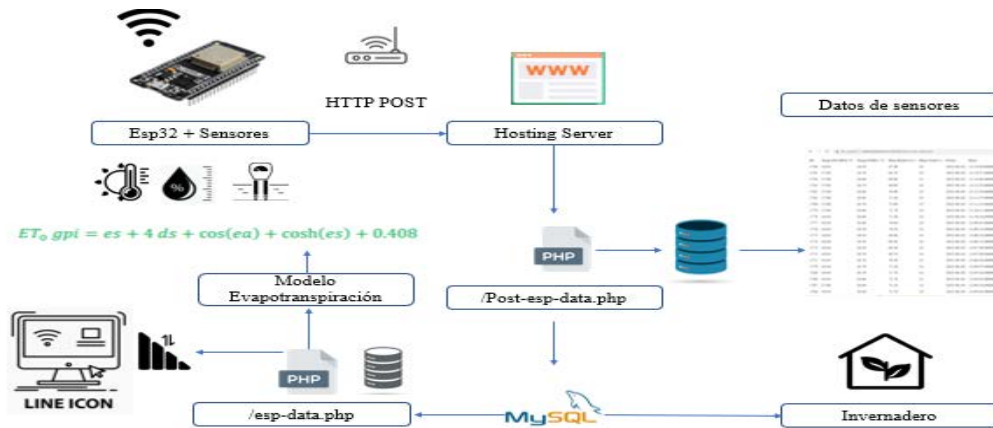


Figura 29. Conexión entre el sistema del invernadero y el servidor para el procesamiento del invernadero inteligente.

Una vez obteniendo todo el sistema sólido en el servidor, se realizó la implementación del sistema de riego del modelo matemático para calcular la evapotranspiración, en la Figura 30 se muestra el proceso del sistema de riego. Una vez calculado ET_c se obtienen los mililitros precisos para el riego de calabacitas en un día específico. Para el riego se consideró un sensor de caudal YS-201, el cual se programó en un microcontrolador ESP32.



Figura 30. Sistema de riego del invernadero.

3.4.3 Puesta en marcha del modelo matemático (ET_o)

La puesta en marcha del invernadero implicó desarrollar todas las fases y actividades antes mencionadas, tomando en cuenta la configuración de los diferentes sistemas para el control de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, y riego. Además, implicó la integración de tecnologías como sensores y sistemas de gestión, para optimizar el cultivo de plantas en un entorno controlado como se muestra la Figura 31.



Figura 31. Puesta en marcha del invernadero inteligente.

3.5 Fase 4. Implementación del modelo matemático

3.5.1 Verificación de datos de entrada.

La verificación de datos de entrada se llevó a cabo mediante un comparativo de los valores de referencia obtenidos con un sensor marca (Goove) y los estimados en el presente trabajo como se muestra en la Tabla 5. La recopilación de datos se llevó por un determinado tiempo (24 horas) dentro del invernadero. Los datos evaluados fueron: temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima. Las variables máximas y mínimas de temperatura y humedad son críticas para poder evaluar el modelo matemático para calcular la evapotranspiración dentro del invernadero. El registro de datos se realizó el día 09/09/2023 con pasos de una hora. Los datos recolectados de todo el día muestran una coherencia a simple vista.

Tabla 5. Registro de datos (09/09/2023).

Hora	Temperatura de referencia °C	Temperatura estimada °C	Humedad Relativa de referencia %	Humedad Relativa estimada %
00:00	19.80	20.19	91.20	93.40
1:00	19.10	20.60	91.00	95.40
2:00	19.10	19.31	92.20	99.90
3:00	19.00	18.75	93.10	99.90
4:00	19.10	19.00	92.50	99.90
5:00	18.90	18.62	93.70	99.90
6:00	18.70	18.88	93.90	99.90
7:00	18.80	18.00	94.40	99.90
08:35	19.70	19.75	94.60	95.50
09:00	20.01	20.00	92.3	99.80
10:00	24.10	25.50	78.60	77.70
11:00	28.50	32.00	63.60	65.00
12:00	30.50	32.00	56.30	56.10
13:00	31.90	32.19	52.80	55.80
14:00	32.50	33.31	48.70	52.00
15:00	32.90	32.88	46.90	47.3
16:00	31.90	31.50	48.30	55.70
17:00	30.10	32.25	52.10	54.20
18:00	27.60	27.10	52.20	63.40
19:00	24.70	24.10	64.20	77.10
20:00	23.80	23.75	73.80	85.10
21:00	23.50	23.75	66.00	75.00
22:00	21.70	21.20	80.40	94.50
23:00	21.30	21.19	83.00	95.80

Con lo anterior, el error de medida se evaluó para conocer la diferencia que existe entre un valor estimado y el valor de referencia. Para calcular los errores (absoluto y relativo) fue necesario realizar las siguientes operaciones:

Error absoluto = EA = Valor de referencia – Valor estimado

Error relativo = EA/Valor de referencia

El error absoluto y el error relativo de las variables que necesita el modelo para calcular la evapotranspiración dentro del invernadero se muestra en la Tabla 6. Observar las características de los sensores utilizados Anexo 3.

Tabla 6. Valores de error absoluto y relativo.

Real / estimado	T _{max} °C	T _{min} °C	HR _{max} %	HR _{min} %
Real	32.9	18.7	94.6	46.9
estimado	32.88	18.88	95.50	47.3
Error absoluto	0.02	0.18	0.9	0.4
Error relativo	0.060	0.96	0.95	0.85

Nota: durante el análisis de 24 horas, el error absoluto y el error relativo fueron menores a 1°C y 1%, respectivamente. Por lo que, el sistema de sensado se encuentra dentro de un rango aceptable y se considera que los sensores están sensando de manera adecuada.

3.5.2 Requerimientos del sistema

El análisis y obtención de variables en tiempo real, se realizó para calcular la evapotranspiración mediante los requerimientos, donde se muestran tres partes importantes (desarrollador, requisitos funcionales y requisitos no funcionales). En la parte del desarrollador se colocaron todos los puntos que se tienen que analizar antes de empezar con el sistema. En los requisitos funcionales se colocaron todas las funciones que el sistema permite realizar y en los requisitos no funcionales se colocaron todas cualidades y características del sistema. En la Tabla 7 se muestran los requerimientos del sistema.

Tabla 7. Requerimientos del sistema.

Análisis desarrollados	Requerimientos funcionales	Requerimientos no funcionales
✓ Análisis de protocolos de comunicación	✓ El sistema permite regar el cultivo de forma precisa por día	✓ Operabilidad
✓ Base de datos de las variables del sensado	✓ El sistema permite calcular la evapotranspiración de referencia diaria	✓ Velocidad de repuesta (0.3 s)
✓ Capacidades y almacenamiento del servidor	✓ El usuario puede cambiar las variables para el tipo del cultivo	✓ Capacidad de almacenamiento para más de 50,000 datos
✓ Análisis de tipos de variables	✓ El usuario puede observar el comportamiento de las variables de sensado del invernadero	
✓ Tipos de variables	✓ El sistema acciona el riego cuando el usuario lo requiera	
✓ Calibración y ajustes del sistema de riego		
✓ Condiciones meteorológicas		
✓ Sistema de riego		

La representación visual de los pasos o procesos del sistema para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo, se realizó a través de un diagrama de flujo para mostrar de manera clara y concisa la secuencia de acciones que se deben seguir para alcanzar un objetivo específico. De esta manera ayudó a comunicar los procesos más claros como se observa en la Figura 32.

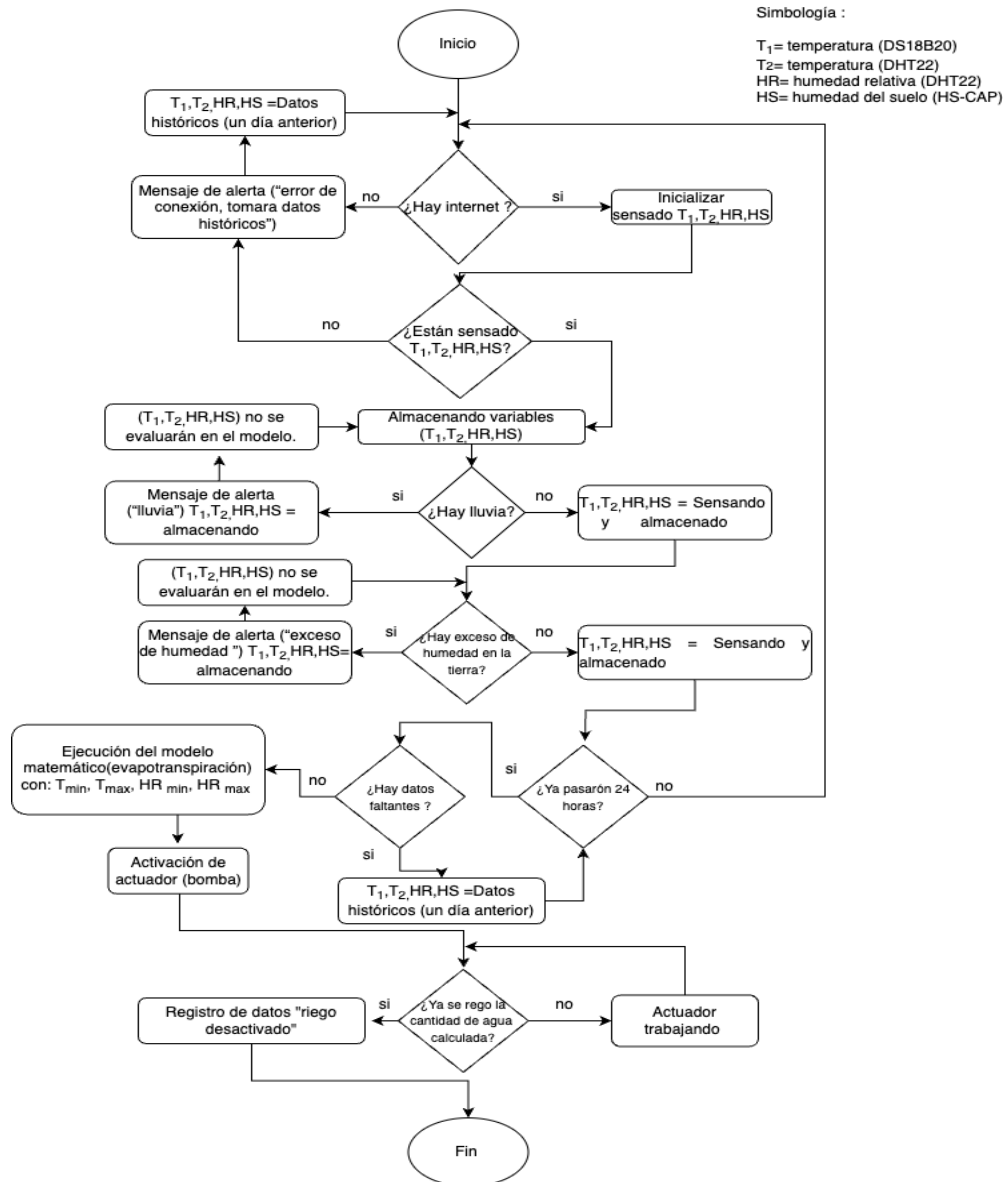


Figura 32. Diagrama de flujo para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo.

3.5.3 Implementación del modelo de evapotranspiración

La implementación proporciona una visión general de los datos clave y las implicaciones sobre el modelo matemático para calcular la evapotranspiración en invernaderos de

hortalizas. Los resultados de análisis evaluados se graficaron a partir de los datos almacenados de una base sólida. La interfaz del servidor web monitorea, evalúa y registra los datos históricos de las variables (temperatura, humedad relativa, y humedad del suelo) en tiempo real con toma de lectura de cada hora (fecha de captura 18/11/2023), observar Figura 33 a 37.

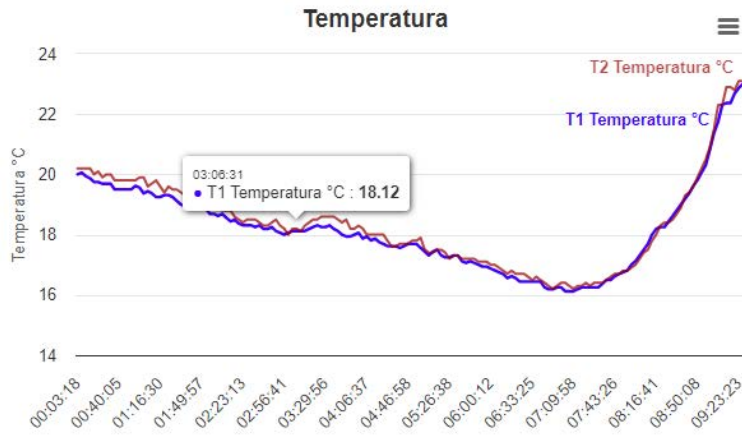


Figura 33. Comportamiento de la humedad relativa en la interfaz del servidor web con toma de lectura en tiempo real (fecha de captura 18/11/2023).

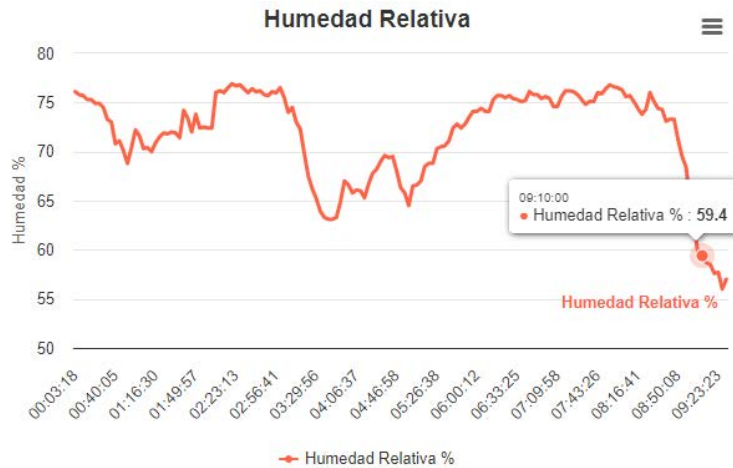


Figura 34. Comportamiento de la humedad relativa en la interfaz del servidor web con toma de lectura en tiempo real (fecha de captura 18/11/2023).

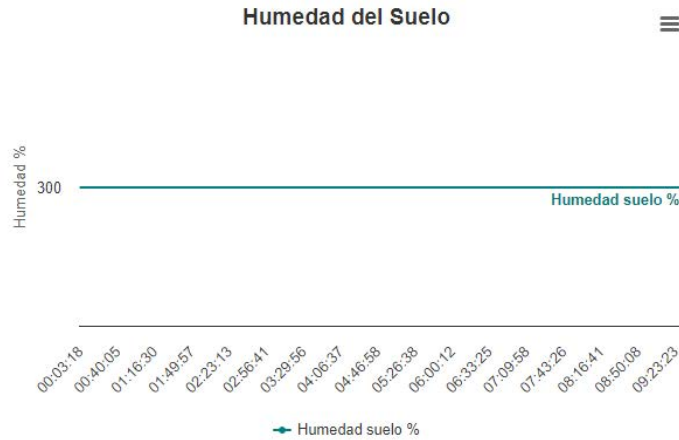


Figura 35. Interfaz del servidor web para obtener los valores máximos y mínimos de las variables requeridas del invernadero (fecha de captura (18/11/2023)).

Resumen de datos

Temp Max	Temp Min	Hum R. Max	Hum R. Min	Hum S. Max	Hum S. Min	Caudal mL
-127.00	-127.00	24.30	18.70	161	147	0.00

Notificaciones del invernadero

Figura 36. Interfaz del servidor web para calcular la evapotranspiración del cultivo de calabacitas utilizando todas las variables antes evaluadas (fecha de captura 18/11/2023).

Guardar dj

Modelo matemático

ET_0 gpl diario	es	4(ds)	cos(ea)	=	ET_0	(kc)	(ml de agua)
programación genética	0	0.030550750506301	0.98...	=	0.53020300202521	95	50.369285192395

Figura 37. Interfaz del servidor web para el registro de las variables monitoreadas para ser almacenada en la base de datos (fecha de captura 18/11/2023).

Capítulo 4: Resultados y Análisis

4.1 Implementación del modelo de evapotranspiración

Este capítulo presenta los resultados y análisis de la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) para la implementación de un modelo de evapotranspiración considerado cultivos de calabacitas en un invernadero tipo malla sombra, a través de un sistema de control de riego, tomando como caso de estudio la ciudad de Cuernavaca Morelos.

Los resultados y análisis realizados fueron los siguientes:

- Análisis de medición y desempeño de los sensores utilizados
- Análisis de validación de datos sensado con datos de referencia
- Análisis de las variables utilizadas en el modelo de *ET_o*
- Análisis de evapotranspiración del cultivo con la evapotranspiración de referencia
- Análisis de la evapotranspiración con el crecimiento del cultivo
- Análisis del modelo implementado con modelos basados en el estado del arte
- Implementación del modelo de *ET_o*
- Análisis de la implementación del cultivo de referencia y cultivo experimental
- Estudio de campo sobre el consumo de agua en hortalizas en Morelos

A continuación se presentan los resultados de los análisis antes mencionados.

4.2 Análisis de medición y desempeño de los sensores utilizados

Datos del análisis:

-Fecha de monitoreo: 09/09/2023

-Tiempo de monitoreo: 24 horas

-Hora de inicio: 12:00 *am*

-Hora final: 12:00 *am*

-Sensores utilizados: Sensor de temperatura *DS18B20* y sensor de humedad relativa *DTH22*

-Sensores de referencia: Sensor de temperatura y humedad relativa (Goovee)

Procedimiento:

El análisis y medición del desempeño de los sensores se evaluó con un comparativo de temperatura y humedad relativa a largo de un día completo, tomando en cuenta el sensor de referencia y de los sensores *DS18B20* y *DTH22*, para el día 09/09/2023. Con el fin de

visualizar el comportamiento de los datos y su correcto funcionamiento, verificando su coherencia y desempeño, tomando en cuenta el sensor seleccionado para el estudio y un sensor de referencia. El registro de datos comenzó a las 12:00 *am* con un registro de almacenamiento en la red. Los datos se almacenaron en una base de datos, con estos datos se realizó un comparativo y se visualizó de manera gráfica, véase la Figura 38.

Resultados:

El comparativo de temperatura y humedad a lo largo de un día, tomando en cuenta el sensor de referencia y de los sensores utilizados del día 09/09/2023 se muestra en la Figura 38. Las líneas grises representan la humedad relativa, el marcador de cuadro representa la humedad relativa *HR* estimada y el triángulo la *HR* de referencia. Las líneas negras representan la temperatura de referencia y la estimada, la línea punteada es la estimada y la continua la de referencia. Es de observar que, la temperatura de las 12:00 *pm* a las 10:00 *am* es constante y se mantiene por debajo de los 21°C en ambos sensores, mientras que, la humedad relativa *HR* se encuentra por encima del 30%, siendo el sensor estimado hasta 8% mayor que el de referencias. A partir de las 11:00 *am*, la humedad comienza a disminuir, cayendo hasta un 12%, y la temperatura comienza a aumentar hasta en 7°C. el punto máximo que alcanza la temperatura es aproximadamente a las 3:00 *pm*, mientras que la humedad relativa *HR* disminuye a partir de las 4:00 *pm*. La humedad comienza a aumentar nuevamente a lo largo del día a partir de las 7:00 *pm* horas, mientras que la humedad relativa *HR* disminuye aproximadamente a las 6:00 *pm*. Es de observar que, las mediciones de temperatura y de humedad se comportan de manera coherente con las condiciones climáticas. La temperatura aumenta conforme la radiación solar aumenta, y por ende la humedad relativa *HR* disminuye.

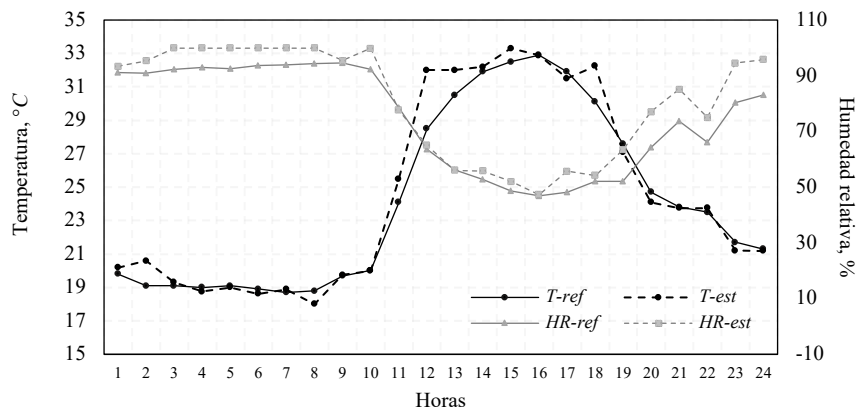


Figura 38. Humedad y temperatura estimada y de referencia.

4.3 Análisis de validación de datos sensados con datos de referencia

Datos de análisis:

- Fecha de monitoreo: 09/09/2023 con muestreos de una hora.
- Tiempo de monitoreo: 24 horas
- Sensores utilizados: Sensor de temperatura *DS18B20* y sensor de humedad relativa *DTH22*
- Sensores de referencia: Sensor de temperatura y humedad relativa (Goovee)
- Valores a obtener: T_{min} , T_{max} , HR_{min} , HR_{max} , promedio, diferencia y error

Procedimiento:

En la validación se realizó una diferencia de mediciones utilizando un sensor de referencia y el sensor *DS18B20* para temperatura y humedad relativa, con datos recolectados durante el día 09/09/2023 con muestreos de una hora. Esto con el fin de validar los resultados y visualizar la diferencia del sensor de referencia y el sensor utilizado para el estudio. La validación de datos de temperatura y humedad relativa se realizó con la diferencia mínima, máxima y promedio de T y HR que presentaba el sensor de referencia y el sensor propuesto para este estudio.

Resultados:

La diferencia de mediciones utilizando un sensor de referencia y el sensor *DS18B20* para temperatura y humedad relativa se presenta en la Tabla 8. La diferencia para temperatura se presenta en $^{\circ}C$ y el error en porcentaje. Para la temperatura hay una diferencia mínima de $0^{\circ}C$, una máxima de $3.5^{\circ}C$ con un error del 12.3% y un promedio de $0.7^{\circ}C$ con un error de 2.6%. Con lo anterior, podemos observar que, la diferencia de mediciones entre los sensores de temperatura es menor al 10%, lo que indica que, nos encontramos en un intervalo considerable y aceptable. Para la humedad relativa HR , la diferencia mínima es de 0.2%, la diferencia máxima de 14.1% y una diferencia promedio del 6%, con un error del 8.3%, con esto, podemos observar que los sensores se encuentran por debajo de 10% de error, lo que indica que las mediciones de humedad relativa HR se encuentran dentro de un intervalo aceptable y considerable.

Con lo anterior, las mediciones de temperatura y humedad se consideran coherentes de acuerdo a la medición de referencia, así como en su comportamiento, ya que, al aumentar la temperatura en horario solar, la humedad relativa HR disminuye.

Tabla 8. Diferencia de medición entre el sensor de referencia y el sensor considerado.

Sensores	Temperatura		Humedad Relativa	
	Diferencia °C	Error %	Diferencia %	Error %
Min	0.0	0.0%	0.2	0.4%
Max	3.5	12.3%	14.1	21.5%
Promedio	0.7	2.6%	6.0	8.3%

4.4 Análisis de las variables utilizadas en el modelo de Eto

Datos de análisis:

- Día juliano de inicio: 336 – 364 día
- Tiempo de monitoreo: Mes de diciembre
- Variables ambientales: T_{min} , T_{max} , HR_{min} , HR_{max}

Procedimiento:

Las variables utilizadas en el modelo donde de ET_o se analizaron a lo largo de un mes. Esto con el fin de visualizar el comportamiento de la humedad relativa y de la temperatura del invernadero. Con los datos recolectados de T y HR a lo largo del mes de diciembre se graficaron sus puntos máximos y mínimos. En la Figura 39 se presenta los parámetros ambientales para el modelado de ET_o , las líneas negras representan la humedad relativa HR_{max} y HR_{min} . Las líneas rojas representan la temperatura ambiente T_{a-max} y T_{a-min} .

Resultados:

La HR_{min} se encuentra alrededor de 32% y la máxima por encima del 60%. La T_{min} se encuentra en el intervalo de 14°C y 18°C, la T_{max} alrededor de 32°C. El modelo de ET_o que se utiliza para la implementación de la evapotranspiración utiliza como parámetros ambientales la temperatura y humedad relativa T_{a-max} , T_{a-min} , HR_{max} y HR_{min} , por lo cual, la medición de estos parámetros es importante.

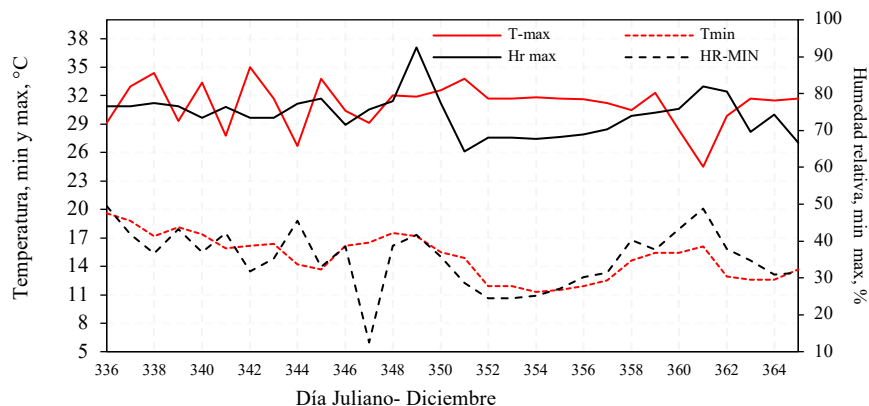


Figura 39. Parámetros ambientales para el modelo de ETo.

El comparativo de mínimos, máximos y promedio de las variables consideradas en el modelo de ETo (temperatura T_{max} , T_{min} , y humedad relativa HR_{max} y HR_{min}) para el mes de diciembre se presentan en la Tabla 9. En donde podemos observar que, dentro de las T_{max} , la temperatura mínima fue de 24.5 y la máxima de 35°C, con un promedio de 31°C, mientras que para la T_{min} la mínima fue de 11°C y la máxima de 19.6°C con un promedio de 15°C. Para la humedad relativa HR_{max} presenta mínimas de 64.3 y máximas de 92% con un promedio de 74%. Para HR_{min} presenta mínimas de 12.5% y máximas de 49.5% con promedios de 35%. Es de observar que, en el mes de diciembre para Cuernavaca Morelos, la temperatura máxima no rebasa los 35°C y la mínima no baja de 11°C, mientras que la humedad relativa HR, la máxima alcanza 74% y la mínima llega a ser hasta de 12.5%. con esto, podemos concluir que las mediciones son coherentes, ya que, la ciudad de Cuernavaca Morelos presenta un clima cálido subhúmedo dentro de su clasificación según INEGI, y este tipo de climas presenta medias de 22°C y la humedad ronda alrededor del 60 al 99%.

Tabla 9. Mínimos, máximo y promedio de las variables consideradas en el modelo de ETo (T_{max} , T_{min} , HR_{max} y HR_{min}).

Unidades	°C		%	
Variables	T_{max}	T_{min}	HR_{max}	HR_{min}
Min	24.5	11.3	64.3	12.5
Max	35.0	19.6	92.5	49.5
Promedio	31.1	15.0	74.3	35.3

4.5 Análisis de evapotranspiración del cultivo con la evapotranspiración de referencia

Datos de análisis:

- Día juliano de inicio: 336 – 365 día
- Tiempo de monitoreo: Mes de diciembre
- Variables evaluadas: Evapotranspiración de referencia *Eto*, del cultivo *Etc*, *datos mínimos*, *datos máximos* y cantidad de agua diaria

Procedimiento:

El análisis de evapotranspiración de referencia y el análisis del cultivo se realizó para el mes de diciembre, como se presenta gráficamente en la Figura 40. La evapotranspiración de referencia se presenta con línea roja y la evapotranspiración del cultivo en línea azul. Con el fin de visualizar el comportamiento y la diferencia que presenta la *ETo* de referencia y la *ET* del cultivo.

Resultados:

Es de observar que, para el mes de diciembre, la evapotranspiración se encuentra por debajo de los 2 *mm* diarios. La *ETo* máxima es de 1.72 *mm d⁻¹*, y la mínima de 0.36 *mm d⁻¹*. Es importante mencionar que, para el cálculo de la *ETo* se utilizan variables ambientales diarias. Por lo cual, la evapotranspiración del modelo utilizado para este estudio depende de la humedad relativa y de la temperatura, así como del día juliano. Para el mes de diciembre al ser temporada de invierno, las temperaturas disminuyen, lo que tiene coherencia con el cálculo de la *ETo*.

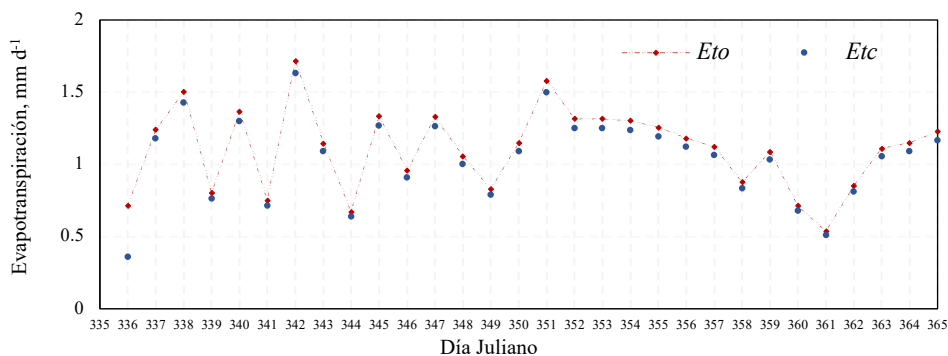


Figura 40. Evapotranspiración diaria del mes de diciembre.

La evapotranspiración del cultivo *Etc* mínima, máxima y promedio diario del mes de diciembre, enero y febrero se presenta en la Tabla 10. La evapotranspiración del cultivo *Etc* mínima fue de 0.27, 0.44 y 1.23 *mm*, la máxima de 0.86, 1.59 y 2.27 *mm* y la promedio de 0.58, 0.89 y 1.73 *mm* para el mes de diciembre, enero y febrero, respectivamente. Es de

observar que, para el mes de diciembre donde las temperaturas son más bajas, presentan evapotranspiración del cultivo ETc más bajas, caso contrario en enero y principalmente febrero en donde las temperaturas comienzan a ser de hasta $34^{\circ}C$. La diferencia de agua del mes de diciembre al mes de enero es de 0.31 l/m^2 y del mes de diciembre a febrero de 0.96 l/m^2 . Con esto podemos observar que utilizar modelos de evapotranspiración del cultivo ETc diaria puede ayudar a generar ahorros de hasta 1 l de agua diario. La temperatura mínima y máxima son factores clave en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ETc . Es importante contar con modelos de ETc , ya que, permiten saber la cantidad precisa de agua que necesita un cultivo dependiendo las condiciones climáticas del día en específico y generar ahorro de agua.

Tabla 10. ETc min, max y promedio del mes de diciembre, enero y febrero.

<i>ETc mm</i>			
Mes	Diciembre	Enero	Febrero
<i>Min</i>	0.27	0.44	1.23
<i>Max</i>	0.86	1.59	2.27
<i>Promedio</i>	0.58	0.89	1.73

4.6 Análisis de la evapotranspiración del cultivo y temperatura máxima y mínima del mes de enero y febrero.

Datos de análisis:

- Tiempo de monitoreo: Enero - febrero
- Variables evaluadas: Evapotranspiración ETc , datos mínimos, datos máximos y cantidad de agua diaria

Procedimiento:

La evapotranspiración del cultivo y la relación que tiene con la T_{max} y la T_{min} considerando los meses de enero y febrero se presenta en la Figura 41. El análisis se realiza para visualizar la relación que tiene la evapotranspiración del cultivo ETc con la temperatura máxima y mínima de ese momento. Para visualizar el comportamiento se realizó una gráfica en donde se graficó la T_{max} , T_{min} y evapotranspiración del cultivo ETc de cada día a lo largo de dos meses.

Resultados:

La evapotranspiración del cultivo ET_c tiene una gran relación con la temperatura, ya que es una variable fundamental en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ET_c . A medida que aumenta o disminuye la temperatura, también aumenta o disminuye la evapotranspiración del cultivo ET_c . Por lo anterior, podemos concluir que tener una medición adecuada de la temperatura puede ayudarnos a proporcionar una evapotranspiración del cultivo ET_c adecuada para el cultivo.

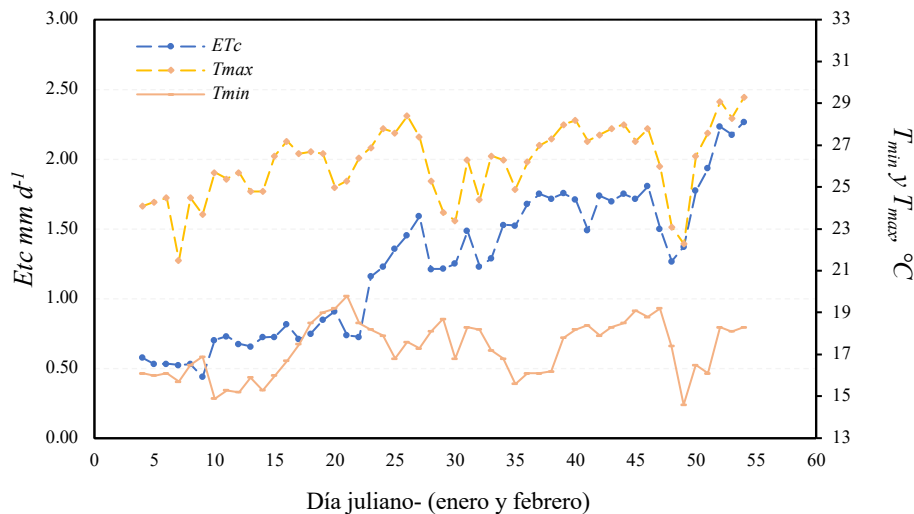


Figura 41. Evapotranspiración del cultivo y temperatura máxima y mínima del mes de enero y febrero.

4.7 Análisis de la evapotranspiración con el crecimiento del cultivo

Datos de análisis:

- Tiempo de monitoreo: Diciembre -febrero
- Variables evaluadas: Crecimiento del cultivo, K_c del cultivo, etapas del crecimiento de la calabacita y cantidad de agua diaria

Procedimiento:

La evapotranspiración se analizó considerando el crecimiento del cultivo de calabacitas a lo largo de tres meses (diciembre, enero y febrero), véase en la Figura 42. Para cada etapa del cultivo se consideró un K_c diferente, dependiendo del crecimiento de la misma, para la primera etapa de la calabacita se consideró un $K_c=0.50$ que aproximadamente se desarrolló en el mes de diciembre. La segunda etapa se consideró un $K_c=0.70$ y para la última etapa de

$K_c=0.95$. Esto con el fin de visualizar la cantidad de agua del cultivo dependiendo el periodo de maduración de la misma, ya que, la cantidad de agua varía para cada etapa del cultivo. Además, la cantidad de evapotranspiración del cultivo ET_c depende de las condiciones ambientales, para este caso la etapa de crecimiento de la calabacita coincidió con las bajas temperaturas, lo cual hace que el cultivo presente una menor cantidad de agua.

Resultados:

La evapotranspiración a lo largo de los tres meses se encuentra por debajo de los 2.50 mm-d^{-1} . El mes de diciembre es donde se presenta la menor cantidad de ET_o , por debajo de 1.00 mm-d^{-1} . El mes de enero con una $k=0.70$, la planta presenta mayor cantidad de ET_o , llegando a ser de hasta 1.50 mm-d^{-1} . En febrero se presenta la mayor cantidad de ET_o por arriba de 2.00 mm-d^{-1} . Como se puede observar, la ET_o presenta un incremento exponencial de diciembre a febrero, este incremento puede deberse al aumento de temperatura y al crecimiento de la planta, ya que necesita diferentes recursos a lo largo de su crecimiento.

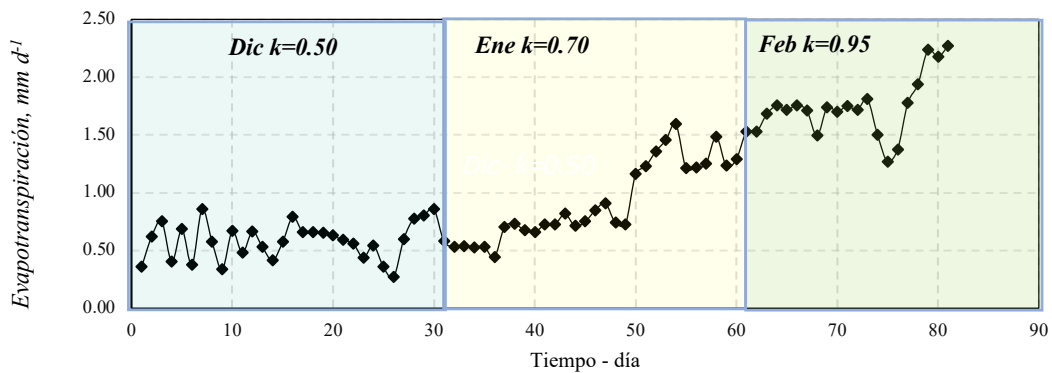


Figura 42. Evapotranspiración de las calabacitas considerando el crecimiento.

4.8 Análisis del modelo implementado con modelos basados en el estado del arte

Datos de análisis:

- Día juliano de inicio: 0- 60 días
- Tiempo de monitoreo: Diciembre -febrero
- Variables evaluadas: Crecimiento del cultivo, K_c del cultivo, etapas del crecimiento de la calabacita y cantidad de agua diaria

Procedimiento:

La Evapotranspiración del cultivo con programación genética $ETc-PG$ se analizó con el modelo de Hargreaves y Samani y con una referencia del riego del cultivo de hortalizas, véase la Figura 42. El análisis se consideró calculando la ETc de cada día evaluado en este caso los meses del estudio con su respectivo Kc y utilizando el modelo considerado, el modelo de referencia, y una referencia de lo que se utiliza convencionalmente. Esto con el fin de visualizar el comportamiento de los modelos y cual es la cantidad de agua que puede generar el modelo a utilizar en este estudio.

Resultados:

La línea roja representa la cantidad de ETo que los agricultores utilizan de manera convencional para el riego de las calabacitas. Las líneas azules representan ETo considerando el modelo de Hargreaves y Samani, y las líneas punteadas color rojo claro representa la ETo determinada con el modelo considerado para este estudio. Los modelos de HS y el modelo de PG muestran tendencias similares, sin embargo, la cantidad de evapotranspiración cambia considerablemente, llegando a presentar diferencias máximas de hasta de $3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Con lo anterior, el modelo que se utiliza para este estudio se considera en un intervalo similar a modelos considerados en la literatura, presentando mayores ahorros de agua. Lo cual, muestra que, utilizar modelos más precisos y sistemas inteligentes presenta mayores ahorros hídricos, considerando el caso de estudio en la Ciudad de Cuernavaca Morelos.

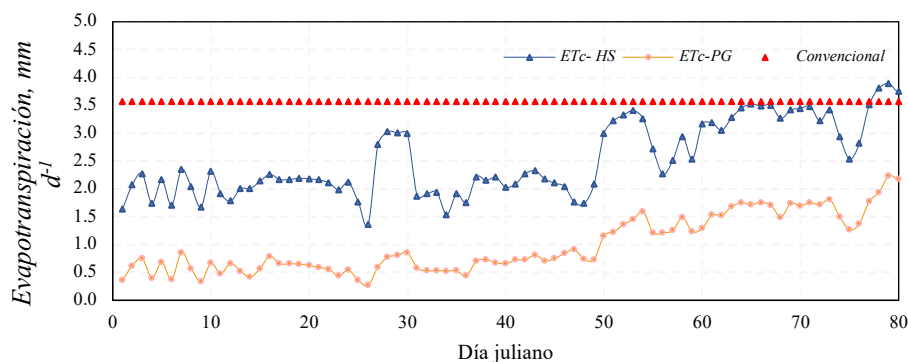


Figura 43. Comparativo de evapotranspiración.

El comparativo de la ETc en mm de la cantidad utilizada para el riego de hortalizas, considerando el modelo de Evapotranspiración del Cultivo con Programación genética ($ETc-PG$), un modelo de la literatura de evapotranspiración del cultivo Hargreaves y Samani ($ETc-HS$) y el riego convencional sin modelo se presenta en la Tabla 11. La diferencia entre modelos es considerable, el modelo con PG utilizado para este estudio genera un gasto

mínimo de 0.27 mm, mientras que el gasto mínimo con *HS* es de 1.36, y de manera convencional de 3.57, con esto podemos visualizar ahorros mínimos de hasta 3.3 l/m² diarios. La cantidad máxima de evapotranspiración del cultivo *ETc* es de 2.27 con el modelo *PG*, de 3.97 con el modelo de *HS* y de 3.57 de la manera convencional, presentando ahorros máximos de 1.7 l/m² diarios. El promedio de consumo de evapotranspiración del cultivo *ETc* para los tres meses es de 1 mm con *PG*, de 2.54 con *HS* y 3.57 de manera convencional, presentando ahorros de hasta el 2.57 l/m² en promedio diario. El consumo total de los tres meses con el uso de *PG* es de 81 mm, para *HS* de 205 mm y de manera convencional de 289 mm mes⁻¹. Presentando ahorros de hasta el 208 l/m² en un periodo de 3 meses con el método convencional y de 124 l/m² considerando el modelo de Hargreaves y Samani.

Tabla 11. Comparativo de *ETc* en mm considerando diferentes modelos.

Unidades		mm (l/m ²)	
Modelos	<i>ETc-PG</i>	<i>ETc- HS</i>	Convencional
Min	0.27	1.36	3.57
Max	2.27	3.97	3.57
Promedio	1.00	2.54	3.57
Total	81	205	289

4.9 Implementación del modelo de ETo

Datos de análisis (aplicación)

- Representación de datos (comportamiento)
- Obtención de datos mínimos y máximos diarios (en tiempo real)
- Base de datos (en tiempo real)
- Control del sistema de riego del invernadero

Procedimiento:

El modelo de evapotranspiración del cultivo con programación genética *ETc- PG* se implementó en un invernadero tipo malla sombra. La implantación del modelo se llevó a cabo con lenguaje de programación PHP, HTML, C y SQL en un servidor web. El sensado de las variables ambientales se realiza cada 15 min. El primer paso fue programar el microcontrolador *SP32*, en donde se almacenaron las variables ambientales de temperatura y humedad relativa T_{a-max} , T_{a-min} , HR_{-max} y HR_{-min} utilizando el paradigma internet de las cosas (IoT). En el servidor web se programó el modelo de *ETo* considerando la obtención de las

variables ambientales en tiempo real, el cual determinaba temperatura y humedad relativa T_{a-max} , T_{a-min} , HR_{-max} y HR_{-min} . El modelo se programa a fin de proporcionar la ET_o diaria de acuerdo a las condiciones ambientales del día a considerar. En este estudio se consideró un área de cultivo de $1\ m^2$, y la evapotranspiración del cultivo ET_c está dada en mm . Para la programación del riego, los mm de ET_o se consideraron a una relación de tiempo, para este caso se consideró que $1\ mm$ equivale a $1\ min$, y el minuto para fin de programación se convirtió a milisegundos. El sistema cada $24\ h$ almacena los datos y se reinicia. Cuando el sistema cumple la condición dada (considerar mínimos y máximos de temperatura y humedad relativa) manda la interpretación de la evapotranspiración del cultivo ET_c en milisegundos, considerando su equivalencia. El riego se realiza cumpliendo las 00:00 horas o 12:00 *a.m.*, esto con el fin de abarcar los mínimos y máximos de T y HR de un día completo y considerando las condiciones que se utilizan en el Capítulo 3. El riego se realiza de manera remota utilizando un dispositivo conectado a la red como se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Monitoreo remoto del invernadero mediante internet de las cosas(IoT).

4.10 Análisis de la implementación del cultivo de referencia y cultivo experimental

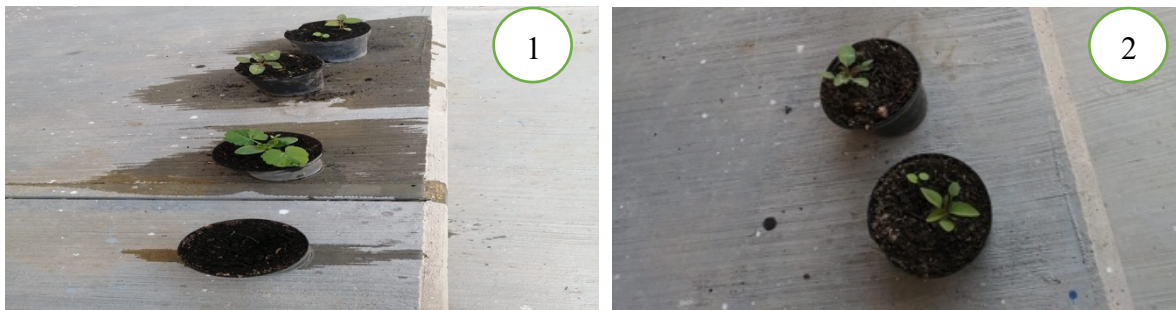
Datos de análisis:

- Tipo de cultivo: Calabacitas
- Etapas de crecimiento: Germinación, vegetativo y floración.
- Horas de riego: 24 horas

Procedimiento:

El progreso del cultivo en sus diferentes etapas se presenta de manera visual. En todas las etapas del cultivo se tomó una fotografía para evidenciar el crecimiento y las condiciones que se encontraba el cultivo, tomando en cuenta la Evapotranspiración del Cultivo con Programación genética *ETc-PG* y el riego sin el modelo. Esto con el fin de determinar de manera cualitativa si el modelo funciona de manera adecuada.

Resultados:



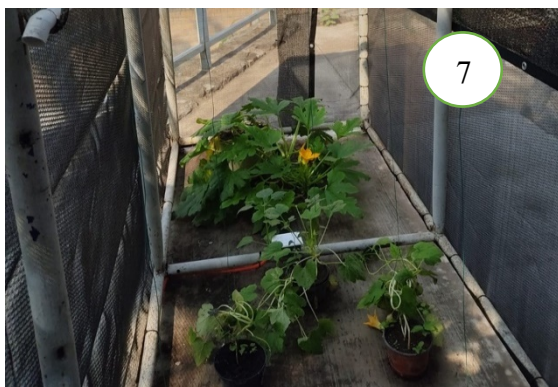
<p>Datos del cultivo</p> <p>Tipo de riego: Riego convencional</p> <p>Etapas: Germinación</p> <p>Hora de riego: 10:00 am</p> <p>Observaciones: La planta tardó 5 días en crecer después de colocar la semilla</p>	<p>Datos del cultivo</p> <p>Tipo de riego: Modelo de evapotranspiración</p> <p>Etapas: Germinación</p> <p>Hora de riego: 12:00 pm</p> <p>Observaciones: La planta tardó 4 días en crecer después de colocar la semilla</p>
--	--



<p>Datos del cultivo</p> <p>Tipo de riego: Riego convencional</p> <p>Etapas: Vegetativo</p> <p>Hora de riego: 10:00 am</p> <p>Observaciones: Algunas plantas se pusieron algo amarillas (exceso de agua)</p>	<p>Datos del cultivo</p> <p>Tipo de riego: Modelo evapotranspiración</p> <p>Etapas: Vegetativo</p> <p>Hora de riego: 12:00 pm</p> <p>Observaciones: Las hojas mantenían su color en ambas macetas.</p>
--	--



Datos del cultivo	Datos del cultivo
Tipo de riego: Riego convencional	Tipo de riego: Modelo evapotranspiración
Etapa: Floración	Etapa: Floración
Hora de riego: 10:00 am	Hora de riego: 12:00 pm
Observaciones: Las plantas contenían mosquitos blancos (Proceso natural y exceso de agua)	Observaciones: La planta contenía el mismo color.



Datos del cultivo	Datos del cultivo
Tipo de riego: Riego convencional	Tipo de riego: Modelo evapotranspiración
Etapa: Fructificación	Etapa: Fructificación
Hora de riego: 10:00 am	Hora de riego: 12:00 pm
Observaciones: Algunas de las macetas contenía manchas de color blanco en sus hojas y mosquitos blancos) y la tierra estaba muy húmeda y las flores siempre se caían.	Observaciones: Algunas de las hojas parecían estar más pequeñas manchitas y la tierra estaba semihúmeda. Y las flores siempre se caían.

4.11 Estudio de campo sobre el consumo de agua en hortalizas en Morelos

El consumo diario de agua en cultivo de hortalizas en diferentes invernaderos del estado de Morelos se presenta en la Figura 44. En este estudio se observó que, en los invernaderos no hay un control de riego y la cantidad de agua que utilizan en el riego no es controlada. El invernadero de Casasano presenta una mayor cantidad de agua utilizada, seguido de Cocoyoc y los invernaderos que presentan un menor consumo son el invernadero de Cuautla y el del polvorín, para obtener los valores del riego convencional.

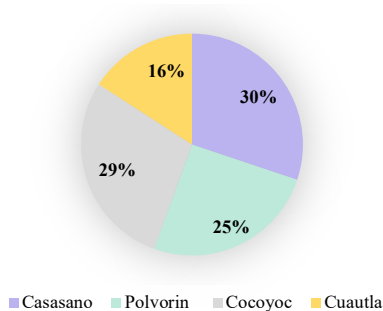


Figura 45. Consumo de agua en invernaderos en diferentes localidades del estado de Morelos.

Capítulo 5: Conclusiones

5.1 Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo de investigación, fueron las siguientes:

La construcción del invernadero para la implementación del modelo de evapotranspiración utilizando malla sombra y una estructura metálica, se llevó a cabo considerando un análisis de las condiciones ambientales del lugar donde se ubicaría el invernadero. El invernadero se diseñó considerando tamaño, orientación y ventilación. Los materiales seleccionados son duraderos para la estructura metálica y la malla sombra, se tomaron en cuenta varios problemas debido a los componentes eléctricos como fue el caso del sensor DTH11 y fue reemplazado por el sensor DTH22 hasta que no se tuviera ningún tipo de problema. Las tomas de lectura de los sensores se pusieron a prueba comparando los valores con otros instrumentos de medición, de esta manera se verificó el funcionamiento adecuado del invernadero, se tuvo que realizar ajustes en la colocación de los sensores para tomar lecturas adecuadas.

La puesta en marcha del sistema eléctrico y electrónico del invernadero para el monitoreo remoto de las variables climáticas mediante el microcontrolador, se llevó a cabo considerando un análisis de los diferentes microcontroladores como Arduino mega, Raspberry pi, ESP32 y Sim 900. Los microcontroladores se pusieron a prueba durante un mes completo en función constante tomando lecturas cada 10 minutos, se identificaron problemas como cuál resultaba presentar menos problemas al perder conexión de internet ESP32. Luego, se procedió al diseño del sistema eléctrico y electrónico, considerando la integración de sensores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. El microcontrolador ESP32 se utilizó para captar los valores del invernadero y transmisión de datos. Posteriormente, se seleccionaron los componentes y se diseñó el sistema dentro del invernadero. Finalmente, se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento adecuado del sistema en condiciones reales y se realizó la puesta en marcha del monitoreo remoto.

La implementación del modelo de evapotranspiración utilizando un microcontrolador ESP32 y considerando las variables obtenidas del invernadero, se llevó a cabo almacenando las variables climáticas capturadas dentro del invernadero (humedad relativa, temperatura y humedad del suelo). Se estructuró y programó el modelo de evapotranspiración para calcular la cantidad de agua necesaria para el cultivo en el servidor, utilizando los datos recopilados

por los sensores conectados por el microcontrolador ESP32. Durante este proceso, se tomó en cuenta las ecuaciones y algoritmos para el cálculo de la evapotranspiración. Una vez completada la programación, se llevaron a cabo pruebas para verificar la precisión y la eficacia del modelo en condiciones reales.

La implementación del modelo proporcionó información sobre las necesidades hídricas del cultivo, lo que permitió una gestión eficiente del riego y una optimización de los recursos hídricos.

La implementación de la interfaz para el monitoreo y control de los datos del invernadero en la nube utilizando un servidor web, se realizó considerando tanto las necesidades de monitoreo como las de control de los datos del invernadero. El diseño de la interfaz, toma en cuenta la usabilidad y la accesibilidad para los usuarios, así como la integración con los datos almacenados en la nube. La implementación de la interfaz se programó con diferentes lenguajes de alto nivel (HTML, CSS y C), se configuró el servidor web para alojar la interfaz y los datos del invernadero en la nube. Posteriormente, se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento correcto de la interfaz y su capacidad para mostrar y controlar los datos del invernadero de manera correcta.

Para alcanzar el objetivo general del trabajo de investigación (implementar un modelo matemático para calcular la evapotranspiración de referencia en un invernadero tipo malla sombra utilizando el Internet de las cosas (IoT) a través de un sistema de control de riego con un microcontrolador ESP32, considerando la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento mediante un servidor web), se realizaron pruebas y pasos para comprobar el correcto funcionamiento. En primer lugar, se llevó a cabo la investigación para comprender los principios de la evapotranspiración y los requisitos del invernadero. Luego, se implementó el modelo matemático, integrando variables climáticas y datos obtenidos en tiempo real mediante sensores conectados al microcontrolador ESP32. Posteriormente, se desarrolló un sistema de control de riego basado en el modelo de evapotranspiración, utilizando el microcontrolador para gestionar el suministro de agua de manera eficiente. Además, se configuró un servidor web para procesar y visualizar los datos recopilados, permitiendo un monitoreo remoto del invernadero. Una vez implementado el sistema, se realizaron pruebas para validar su funcionamiento y precisión en diferentes condiciones ambientales.

La implementación de este modelo matemático, proporciona una herramienta para gestionar el riego en el invernadero de manera eficiente, contribuyendo así a la optimización del cultivo y la conservación de recursos hídricos.

5.2 Logros obtenidos

Artículos publicados

- ✓ Irvin–Velásques, M., Martínez-Rebollar, A., Yesica-Saavedra, V., Javier-Ruiz, O., Utilizando el IoT para calcular la evapotranspiración de referencia en agricultura protegida. 1er. Congreso internacional de tecnología y ciencia aplicada, 6(1), 2023. Cenidet. En Cuernavaca Morelos.

Ponencias

- ✓ Simposio de la red multidisciplinaria de investigación y tecnología prodep, en las jornadas académicas de innovación, tecnología, liderazgo y sostenibilidad. Con el tema “Agricultura de precisión en invernaderos inteligentes”. Ubicado el Tecnológico Nacional de México Zacatepec. Con fecha del 25 y 26 de octubre de 2023.

5.2 Trabajos futuros

Implementar el modelo para calcular la evapotranspiración del cultivo, con diferentes tipos de plantas, debido a que cada cultivo tiene requisitos únicos de agua debido a sus características fisiológicas y sus demandas ambientales. Al aplicar el modelo de evapotranspiración específico para cada cultivo, se puede calcular con precisión la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas y comprobar cómo es que se comporta la evapotranspiración del cultivo en diferentes lugares. Esto permite una gestión más eficiente del agua de riego, evitando tanto el exceso como la escasez de agua, lo que a su vez puede mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos.

La evaluación a lo largo de un año permite observar cómo el modelo para calcular la evapotranspiración, se comporta durante diferentes estaciones y condiciones climáticas, incluyendo períodos de lluvia, sequía y variaciones de temperatura. Esto puede proporcionar información importante sobre cómo ajustar el riego a lo largo del año para optimizar el

crecimiento y rendimiento de cada cultivo, minimizando el desperdicio de agua y maximizando la eficiencia de los cultivos.

Al visualizar el comportamiento del modelo para calcular la evapotranspiración entre temporadas, se pueden identificar patrones estacionales en las necesidades hídricas de las calabacitas. Esto puede ayudar a observar cómo varía la evapotranspiración a lo largo del año y cómo estas variaciones afectan al crecimiento y desarrollo de los cultivos. Este análisis, puede ayudar a ajustar las estrategias de riego y manejo del cultivo para adaptarse a las condiciones cambiantes de cada estación. Evaluar el impacto económico del modelo para calcular la evapotranspiración del cultivo, podría proporcionar información sobre su rentabilidad a largo plazo. Si los costos de operación del modelo son menores y/o los beneficios económicos (por ejemplo, mayores rendimientos o ahorros en insumos) son mayores en comparación con los métodos convencionales, esto quiere decir que el modelo puede generar mayores ganancias para los agricultores y mayor exportación para el país.

Referencias

- [1] M. A. Altieri y C. I. Nicholls, "Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas," *LEISA revista de agroecología*, vol. 14, pp. 5–8, 2009.
- [2] D. C. Delgado, J. A. L. Rodríguez, y J. R. A. Cárdenas, "La evolución del patrón de cultivos de México en el marco de la integración económica, 1980 a 2009," *Rev Mex De Cienc Agric*, vol. 3, no. 5, pp. 893–906, 2012.
- [3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). México, referente mundial en el cultivo y exportación de jitomate: Agricultura. Gobierno de México. Recuperado de (Gobierno de México). Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-referente-mundial-en-el-cultivo-y-exportacion-de-jitomate-agricultura>.
- [4] F. Flores-López, V. Cossio, y A. Mejía, "Water Management in Mexican Agriculture: Challenges and Opportunities," *Water International*, vol. 45, no. 5, pp. 521-535, 2020.
- [5] C. A. Ochoa-Noriega, J. A. Aznar-Sánchez, J. F. Velasco-Muñoz, and A. Álvarez-Bejar, "The use of water in agriculture in Mexico and its sustainable management: a bibliometric review," *Agronomy*, vol. 10, no. 12, 2020.
- [6] I. Ghiat, H. R. Mackey, y T. Al-Ansari, "A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications," *Water*, vol. 13, no. 18, p. 2523, 2021.
- [7] G.B. Senay, J.P. Verdin, y R. Lietzow, "Global daily reference evapotranspiration modeling and evaluation," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, no. 4, pp. 818-829, 2011.
- [8] J. Veneros, L. García, E. Morales, V. Gómez, M. Torres, y F. López-Morales, "Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua," *Idesia (Arica)*, vol. 38, no. 4, pp. 99-107, 2020.
- [9] M. M. Rahman, Y. Guan, y H. Nguyen, "Evaluation of the performance of four machine learning algorithms for reference evapotranspiration estimation in the southeastern United States," *Hydrology Research*, vol. 51, no. 2, pp. 361-376, 2020.
- [10] M. A. Mendoza Muñoz, "Cuidado del agua y medio ambiente en el riego de cultivos, mediante el uso de sensores de humedad y energía solar fotovoltaica," Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Chihuahua, 2018.
- [11] S. I. O. Duque, "Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos," *Rev. Vector*, vol. 12, pp. 51-60, 2017.

-
- [12] A. Demirci, H. S. Ozturk, D. Sari, y A. Koc, "A deep learning model for estimating daily reference evapotranspiration using limited weather data," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 146, no. 6, p. 04020040, 2020.
- [13] F. Fernández, "IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas," *Reportes científicos de la FACEN*, vol. 14, no. 1, pp. 62-69, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2023.14.1.62>
- [14] R. Kumar, R. Singh, M. Gupta, y A. Mishra, "Estimation of reference evapotranspiration using machine learning and deep learning algorithms: A review," *Journal of Hydrology*, vol. 584, p. 124574, 2020.
- [15] S. Wanniarachchi and R. Sarukkalgige, "A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future," *Hydrology*, vol. 9, no. 7, pp. 1-23, Jul. 2022
- [16] M. Caballero, S. Lozano, y B. Ortega, "Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra", *Revista digital universitaria*, vol. 8, núm. 10, pp. 1–12, 2007.
- [17] M. López-Silva, D. Carmenates-Hernández, A. Mujica-Cervantes, y P. Paneque-Rondon, "Criterios de eficiencia para la evaluación del riego por aspersión," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 28, no. 3, 2019.
- [18] P. Yang, L. Wu, M. Cheng, J. Fan, S. Li, H. Wang y L. Qian, "Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China," en *Water*, vol. 15, no. 9, 2023.
- [19] M. Zhang, Y. Li, J. Liu, J. Wang, Z. Zhang, y N. Xiao, "Changes of Soil Water and Heat Transport and Yield of Tomato (*Solanum lycopersicum*) in Greenhouses with Micro-Sprinkler Irrigation under Plastic Film," *Agronomy*, vol. 12, no. 3, p. 664, 2022
- [20] Elmalthum, NA, Zeineldin, FI, Al-Khateeb, SA, Al-Barrak, KM, Mohammed, TA, Sattar, MN y Mohmand, AS. Eficiencia en el uso del agua y evaluación económica de los sistemas de cultivo hidropónicos versus convencionales para la producción de forraje verde en Arabia Saudita. *Sostenibilidad* , 15 (1), 822,2023.
- [21] L. A. García, J. M. López, y F. D. Orozco, "Efficiency of a nebulization system in the application of water and nutrients in a greenhouse tomato crop" *Agrociencia*, vol. 52, no. 6, pp. 673-683, 2018.
- [22] C. Schilardi, J. A. Morábito, R. Vallone, "Modelación matemática del riego por superficie como una alternativa superadora para el manejo del riego en finca," Instituto Nacional del

-
- Agua-Centro Regional Andino y la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo, Mendoza, Argentina, 2009.
- [23] G. Sánchez y A. Ricardo, "Eficiencia en el uso del agua de variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con sistema de riego subsuperficial," *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 8, no. 4, pp. 429-435, 2017
- [24] D. Evans, "Internet de las cosas", *Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. Cisco Internet Business Solutions Group-IBSG, vol. 11, núm. 1, pp. 4–11, 2011.
- [25] I. Bonilla-Fabela, A. Tavizon-Salazar, M. Morales-Escobar, L. T. Guajardo-Muñoz, y C. I. Laines-Alamina, "IoT, el internet de las cosas y la innovación de sus aplicaciones", *Vinculatégica efan*, vol. 2, núm. 1, pp. 2313–2340, 2016.
- [26] A. Cama-Pinto, E. De-La-Hoz-Franco, y D. Cama-Pinto, "Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas", *Inge Cuc*, 2012.
- [27] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things," *Internet Technologies and Applications (ITA)*, IEEE, 2017, pp. 143–148, 2017.
- [28] R. Castro, "Avanzando en la seguridad de las redes WIFI", *Boletín de RedIRIS*, vol. 73, pp. 23–33, 2005.
- [29] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith, "Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", Roma: FAO, vol. 298, núm. 0, 2006.
- [30] E. Marín-García, J.-N. Torres-Marín, and A. Chaverra-Lasso, "Smart Greenhouse and Agriculture 4.0," *Revista Científica*, 46, vol. 46, no. 1, Jan. 2023.
- [31] S. Al-Naemi y A. Al-Otoom, "Smart sustainable greenhouses utilizing microcontroller and IOT in the GCC countries; energy requirements & economical analyses study for a concept model in the state of Qatar," *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100889, 2023.
- [32] G. L. Priya, C. Baskar, S. S. Deshmane, C. Adithya, and S. Das, "Revolutionizing Holy-Basil Cultivation With AI-Enabled Hydroponics System," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 82624–82639, 2023.
- [33] A. Sunardi, A. Yudhana, y Furizal, "Tsukamoto Fuzzy Inference System on Internet of Things-Based for Room Temperature and Humidity Control," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 6209-6227, 2023.
- [34] R. Salazar-Moreno, I. L. López-Cruz, E. Fitz-Rodríguez, R. Salazar-Moreno, I. L. López-Cruz, and E. Fitz-Rodríguez, "Predicción de la evapotranspiración de referencia utilizando redes neuronales artificiales," *CienciaUAT*, vol. 17, no. 2, pp. 181–196, Jan. 2023.

-
- [35] V. Chavarría, M. Sánchez, F. Soto-Bravo. “Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) cv Álvara promedio en invernadero. Tecnología en Marcha”, vol. 36, no 3, p. 65-77, 2023.
- [36] S. B. Gómez y H. J. Rivera Herrera, "Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0," *Ingeniería investiga*, vol. 4, 2022.
- [37] V. Ramírez Lora, “Sistema de información de riego para equipos presurizados”, Tesis de Máster en Ingeniería Civil con mención en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Pero, 2022.
- [38] Z. Hu, R. N. Bashir, A. U. Rehman, S. I. Iqbal, M. M. A. Shahid, and T. Xu, “Machine Learning Based Prediction of Reference Evapotranspiration (ET₀) Using IoT,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 70526–70540, 2022.
- [39] J. A. Villazón Gómez, P. Noris Noris, R. J. Vázquez Montenegro, G. Martín Gutiérrez, and Y. Cobo Vidal, "Comparación de métodos empíricos para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Holguín, Cuba," *Idesia (Arica)*, vol. 39, no. 3, pp. 103-109, 2021. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000300103>
- [40] C. Hernández, “Prototipo de sistema de riego agrícola autónomo basado en Arduino e internet de las cosas a escala de laboratorio, alimentado por un sistema fotovoltaico,” *Rev Invest (Guadalajara)*, vol. 10, no. 10, pp. 58–69, 2019.
- [41] J. J. Matías Quispe, "Adecuación de los modelos Hargreaves–Samani y Priestley–Taylor para estimar la evapotranspiración de referencia en función al modelo de Penman–Montheit en el centro de investigación y Experimentación Cañasbamba–UNASAM-Yungay," 2018.
- [42] A. Valverde, G. A. Vargas Galván, M. García Arboleda, and J. E. Díaz Figueroa, “Impacto de la implementación del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón,” *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, vol. 14, no. 2, pp. 90–107, 2022.
- [43] M. A. Segura-Castruita y C. A. Ortiz-Solorio, “Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud”, *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 8, núm. 3, pp. 93–110, 2017.
- [44] A. Subedi y J. L. Chávez, "Modelos de estimación de la evapotranspiración (ET) de cultivos: una revisión y discusión de la aplicabilidad y limitaciones de los métodos de ET," *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 7, no. 6, p. 50, 2015.
- [45] M. Azua-Barron, R. Arteaga-Ramirez, M. A. Vázquez-Peña, and A. Quevedo-Nolasco, "Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos," *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 11, no. 1, pp. 125-137, 2020.

-
- [46] M. I. S. Martínez, "Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile," *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 28, pp. 3-10, 2001.
- [47] M. S. Martínez, "Modelos y aproximaciones para la estimación de la evapotranspiración con información satelital," *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 29, pp. 107-120, 2002.
- [48] E. Chávez-Ramírez, "Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración", *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 4, núm. 4, pp. 115–126, 2013.
- [49] J. C. Ramos-Fernández, et al., "Una estructura neurodifusa para modelar la evapotranspiración instantánea en invernaderos," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 11, no. 2, pp. 127-139, 2010.
- [50] C. S. Cohen-Manrique, A. F. Burbano-Bustos, R. D. Salgado-Ordosgoitia, and R. H. Merlano-Porto, "Control de riego en cultivos de ahuyama en Sincelejo, Sucre (Colombia) gestionados a través del Internet de las Cosas," *Información tecnológica*, vol. 31, no. 5, pp. 79–88, 2020.
- [51] R. Aguilar-González, M. Cárdenas-Juárez, J. C. Rodríguez-Ortiz, and M. J. Romero-Méndez, "Monitoreo de Temperatura Mediante Red de Sensores para Mejorar el Uso del Agua en la Agricultura," *Terra Latinoamericana*, vol. 41, p. e1626, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>
- [52] C. A. Hernández-Morales, J. M. Luna-Rivera, F. Villarreal-Guerrero, P. Delgado-Sanchez, y Z. A. Guadiana-Alvarado, "IoT-based Spatial Monitoring and Environment Prediction System for Smart Greenhouses", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, núm. 4, pp. 602–611, 2023.
- [53] R. López-Urrea y R. López-Olivari, "Estimating reference evapotranspiration with minimum data in temperate European climates," *Agricultural Water Management*, vol. 223, pp. 105743, 2019.
- [54] I. Tsafaras et al., "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions," *Agric Water Manag*, vol. 250, p. 106807, 2021.
- [55] G. M. Spinelli, Z. L. Gottesman, and J. Deenik, "A low-cost Arduino-based datalogger with cellular modem and FTP communication for irrigation water use monitoring to enable access to CropManage," *HardwareX*, vol. 6, p. e00066, 2019.
- [56] R. V. Peña, L. T. Chávez, A. Q. Nolasco, y G. C. Pichardo, "Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México," *Terra Latinoamericana*, vol. 19, no. 3, pp. 281-291, 2001.

- [57] F. J. Ruiz-Ortega, E. Clemente, A. Martínez-Rebollar, y J. J. Flores-Prieto, "Un enfoque evolutivo parsimonioso para estimar la evapotranspiración diaria de referencia," *Informes científicos*, vol. 14, no. 1, p. 6736, 2024.
- [58] M. Ippolito, D. De Caro, M. Cannarozzo, G. Provenzano y G. Ciraolo, "Evaluation of daily crop reference evapotranspiration and sensitivity analysis of FAO Penman-Monteith equation using ERA5-Land reanalysis database in Sicily, Italy," *Agric Water Manag*, vol. 295, p. 108732, abril 2024
- [59] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith, "Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", Roma: FAO, vol. 298, 2006.
- [60] O. Ruíz Álvarez, A. Corrales Suastegui, L. A. González Jasso, L. A. Díaz García, M. P. Narváez Mendoza, R. E. Ontiveros Capurata, y J. A. Ruíz Corral, "Comportamiento espacio temporal de la evapotranspiración de referencia en la República Mexicana," *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 5, no. spe10, pp. 1963-1976, 2014. Recuperado en 16 de junio de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342014001401963&lng=es&tlng=es.
- [61] J. Pérez, E. Urdaneta y Á. Custodio, "Metodología para el diseño de una red de sensores inalámbricos," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 18, no. 70, pp. 12-22, 2014.

Anexos

Anexo 1. Kc del cultivo de calabaza

Los coeficientes Kc para el cultivo de calabaza con lo que respecta a su ciclo de vida se muestra en la siguiente tabla, para sus cuatro etapas de desarrollo y 120 días

Kc del cultivo de hortalizas

<i>Tabla de kc del cultivo de calabacitas</i>		
Etapas	Días	Kc
<i>Inicial</i>	0-30	0.51
<i>Crecimiento vegetativo</i>	31-60	0.71
<i>Floración y fructificación</i>	61-90	0.93
<i>Maduración y cosecha</i>	91-120	0.82

Anexo 2. Relación entre ETo con la cantidad del riego.

Datos obtenidos de la base y el modelo (evapotranspiración)

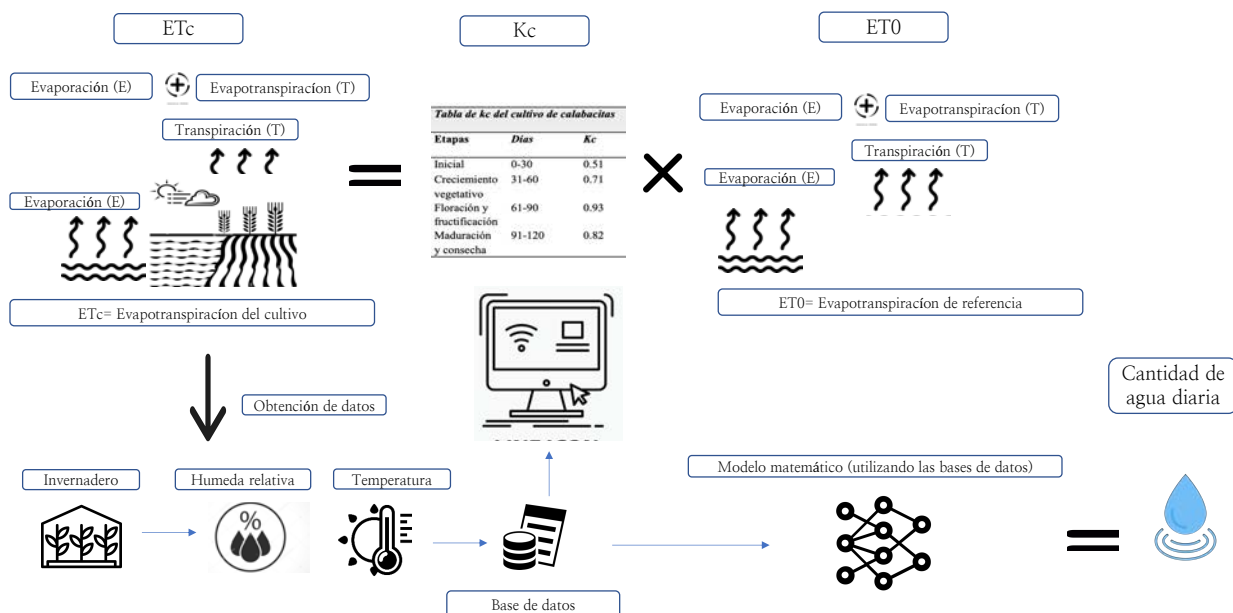
<i>ETc mm</i>			
Fecha	ET0	Kc del cultivo	ETc del cultivo (mm)
<i>02/12/23 0:32</i>	13.24670793	0.71	12.6
<i>03/12/23 0:32</i>	20.03650271	0.71	19.0
<i>04/12/23 0:32</i>	22.00600474	0.71	20.9

La relación entre ETo (Evapotranspiración de referencia) y la cantidad de riego es importante para calcular la cantidad de agua que se pierde del suelo debido a la evaporación del agua de las plantas. Cuanto mayor sea la ETo, mayor será la demanda de agua de las plantas y, por lo tanto, mayor será la cantidad de riego necesaria para mantenerlas sanas y productivas.

Los agricultores utilizan la información sobre ETo para programar y ajustar los sistemas de riego de manera eficiente. Al conocer la ETo diaria o semanal, puede calcular la cantidad exacta de agua que las plantas necesitan y aplicarla de manera precisa, evitando el desperdicio de agua y maximizando el rendimiento de los cultivos [60].

La relación entre ETo y la cantidad de riego se presenta en la siguiente imagen:

RELACIÓN (ETO) CON LA CANTIDAD DEL RIEGO



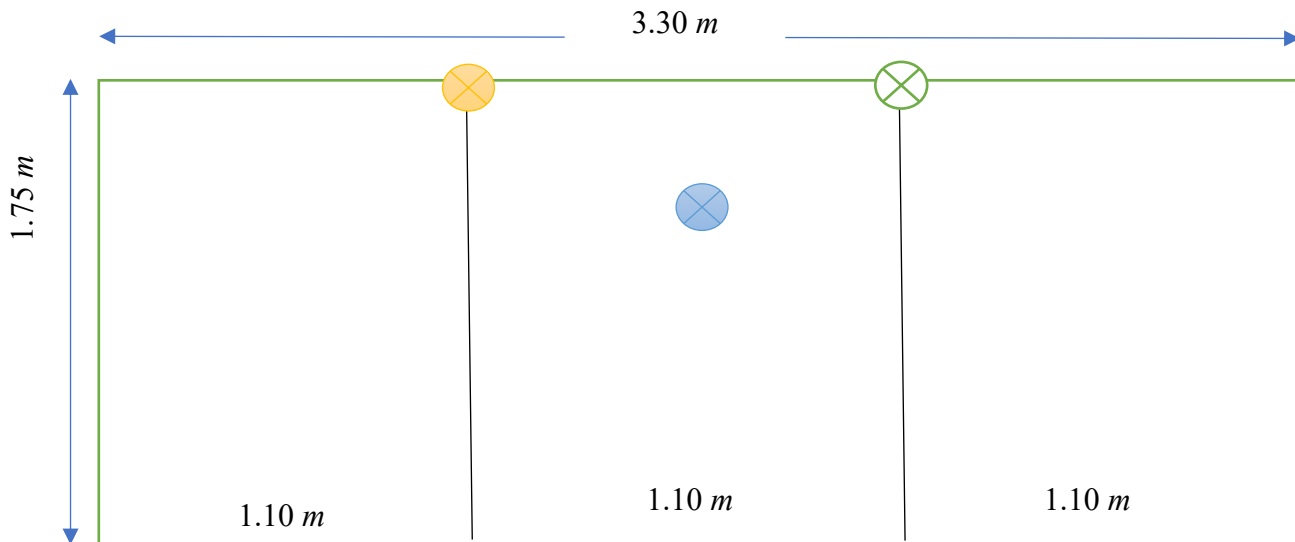
Anexo 3. Características de los sensores y componentes utilizados

Componente	Características
<p>(FC-28). Capacitivo</p>	<p>Alimentación: 3V dc- 5V dc</p> <p>Señal de salida: Digital</p> <p>Rango de medida Temperatura: De 0 a 50 °C</p> <p>Precisión Temperatura: ±2°C</p> <p>Resolución Temperatura: 0.1°C</p> <p>Rango de medida Humedad: De 20% a 90% RH</p> <p>Precisión de humedad: 4 % RH</p> <p>Resolución Humedad: 1% RH</p> <p>Tiempo de sensado: 1s</p> <p>Tamaño: 12 x 15.5 x 5.5mm</p>
<p>(DTH-22)</p>	<p>Alimentación: 3.3 V dc- 6V dc</p> <p>Señal de salida: Digital</p> <p>Rango de medida Temperatura: De - 40°C a 80 °C</p> <p>Precisión Temperatura: < ± 0.5 °C</p> <p>Resolución Temperatura: 0.1°C</p> <p>Rango de medida Humedad: De 0 a 100% RH</p> <p>Precisión de humedad: 2% RH</p> <p>Resolución Humedad: 0.1% RH / Tiempo de sensado: 2s</p>
<p>(YF-S201)</p>	<p>Tipo de sensor: Sensor de flujo de efecto Hall.</p> <p>Rango de flujo: 1 a 30 litros por minuto.</p> <p>Voltaje de funcionamiento: 5 a 24 voltios DC.</p> <p>Salida de señal: Pulsos digitales cuadrados proporcionales al flujo.</p> <p>Material de construcción: Carcasa de plástico de alta calidad, partes internas generalmente de acero inoxidable o latón.</p> <p>Conexiones: Conexiones de rosca estándar.</p> <p>Precisión: Varía según las condiciones de operación, pero suele ser precisa dentro de su rango.</p>

	<p>Aplicaciones típicas: Monitoreo y control de flujo de agua en sistemas industriales, sistemas de riego, sistemas de calefacción y refrigeración, entre otros.</p>
<p>(DS18B20)</p> 	<p>Tipo de sensor: Sensor de temperatura digital de 1 cable. Rango de temperatura: -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$. Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en el rango de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$. Resolución: 9 a 12 bits seleccionable por el usuario. Alimentación: 3.0V a 5.5V. Interfaz de comunicación: Protocolo de comunicación OneWire. Encapsulado: TO-92 (también disponible en otros encapsulados). Tiempo de respuesta: 750ms (12 bits), 375ms (11 bits), 188ms (10 bits), 94ms (9 bits). Calibración: Calibrado de fábrica, no requiere ajustes adicionales. Aplicaciones: Control de temperatura, monitorización ambiental, sistemas de climatización, control industrial, entre otros.</p>
<p>(ESP 32)</p> 	<p>Arquitectura de CPU: Dual-core Xtensa LX6 a 32 bits, con soporte para hasta 240 MHz. Memoria RAM: 520 KB de SRAM. Memoria Flash: 448 KB de memoria ROM, 4 MB de memoria flash integrada (puede variar según el modelo y el fabricante). WiFi: Soporte integrado para WiFi 802.11 b/g/n. Bluetooth: Soporte integrado para Bluetooth v4.2 y Bluetooth Low Energy (BLE). Periféricos: Amplia gama de periféricos, incluidos puertos UART, SPI, I2C, GPIO, PWM, entrada/salida de captura (input/output capture), ADC (convertidor analógico a digital) de 12 bits, DAC (convertidor digital a analógico) de 8 bits, entre otros. Seguridad: Soporte para criptografía acelerada (AES, SHA-2, RSA, ECC), Secure Boot, y mecanismos de seguridad adicionales. Consumo de energía: Modos de bajo consumo disponibles para aplicaciones con requisitos de energía sensibles. Compatibilidad: Amplio soporte de desarrollo a través del entorno de desarrollo integrado (IDE) Arduino, así como soporte para el framework de desarrollo de Espressif, el IDF (ESP-IDF). Otras características: Modo de sueño profundo para minimizar el consumo de energía, soporte para OTA (actualización de firmware por el aire), y capacidad de funcionar como un microcontrolador independiente o como parte de un sistema más grande.</p>
	<p>Rápido y Preciso: Govee Termohigrómetro tiene el sensor humedad de fabricación suiza y proporciona lecturas humedad $\pm 3\%$ RH.precisas. Precisión de temperatura $\pm 0,54^{\circ}\text{F}$ / $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ y la humedad $\pm 3\%$ RH. Se mantendrá actualizado periódicamente. 2 formas de Conexión: Supervise los datos en tiempo real. Con una conexión de WiFi y Bluetooth por la aplicación Govee Home podrá reaccionar a los cambios de temperatura y humedad a tiempo. (No compatible con 5G WiFi) Datos Gratuitos: Govee termómetro higrómetro carga datos en la aplicación a través de Bluetooth o WiFi. Soporta almacenamiento de datos en línea de 20 días y exporta hasta 2 años de datos vistos a través de gráficos y tendencias históricas claras.</p>

Anexo 4. Topología y distribución de los sensores

Dimensiones: 3.30m · 1.75m · 1.10m



DS18B20 (Temperatura)



DTH22 (Humedad y temperatura)

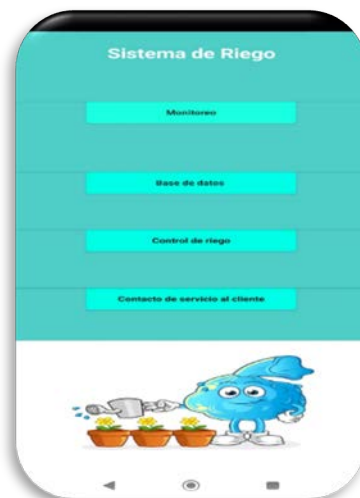


Referencia (Humedad relativa, temperatura, punto de condensación y VPD)

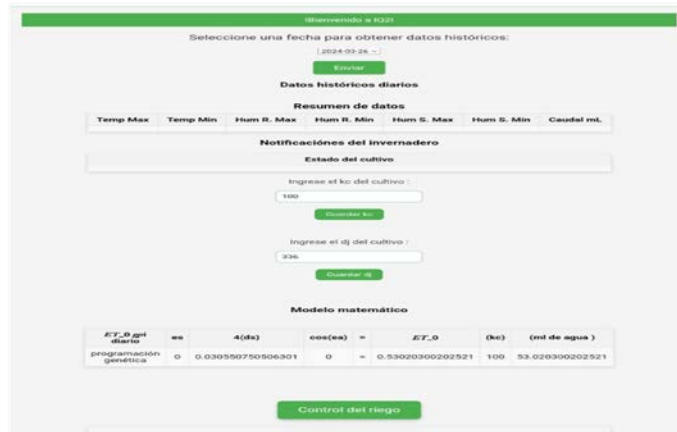


Anexo 5. Interfaz y funcionamiento del servidor web

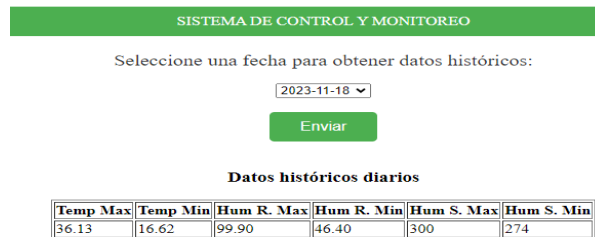
- Aplicación del sistema para calcular la evapotranspiración del cultivo y obtención de datos



- Interfaz del servidor web para calcular la evapotranspiración del cultivo de calabacitas



- Interfaz del servidor web para selección de datos históricos



- Interfaz del servidor web para ingresar datos del cultivo según sea el caso.

Ingrese el kc del cultivo :

Ingrese el dj del cultivo :

- Interfaz del servidor web para calcular con datos registrados la evapotranspiración del cultivo.

Modelo matemático


<i>ET_0 gpi</i> diario	es	4(ds)	cos(ea)	=	<i>ET_0</i>	(kc)	(ml de agua)
programación genética	2.8327449901869	0.028635730482192	1.816424831715	=	5.1684641426575	30	1.5505392427972

- Botón para accionar el sistema de riego manualmente desde cualquier lugar donde se localice el usuario independiente si el modelo es evaluado.




- Botones de accionamiento para accionar otras funciones del sistema de riego manualmente desde cualquier lugar a través de red global.


SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO



Riego - Board 1 - GPIO 12 [\(Delete\)](#)



Riego 2 - Board 1 - GPIO 33 [\(Delete\)](#)

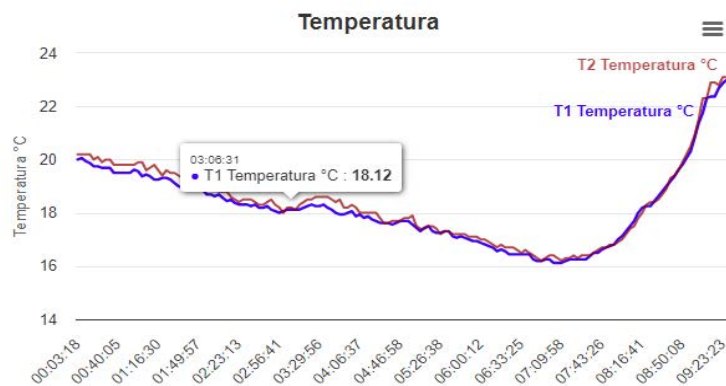


Boards

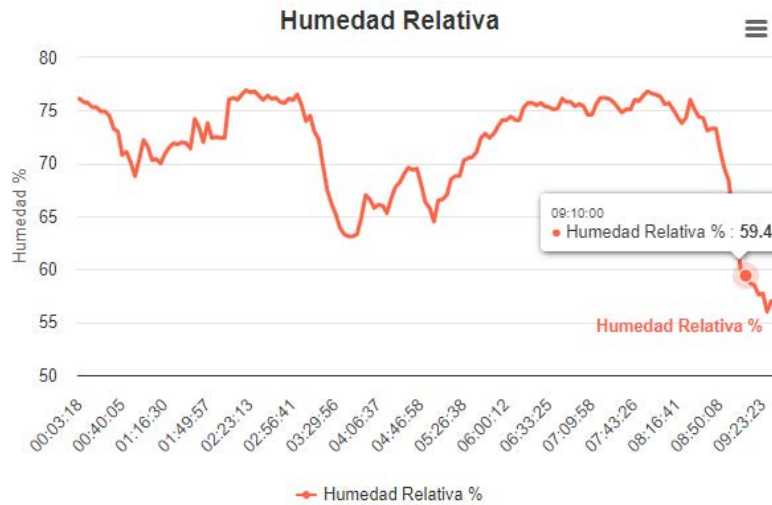
Board 1 - Last Request Time: 2024-04-18 11:46:28

- Visualización gráfica del monitoreo de la temperatura en tiempo real cada tres minutos (fecha de captura 18/11/2023).

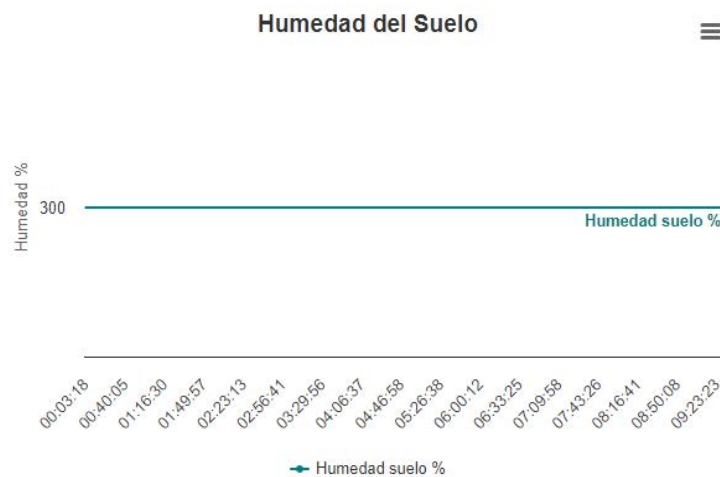
Comportamiento de sensado diario



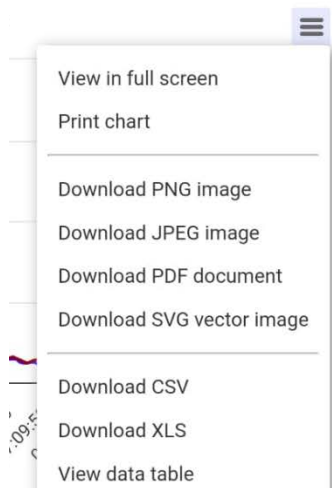
- Visualización gráfica del monitoreo de la humedad relativa en tiempo real cada tres minutos (fecha de captura 18/11/2023).



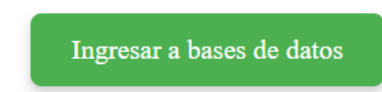
- Visualización gráfica del monitoreo de la humedad del suelo en tiempo real cada tres minutos (fecha de captura 18/11/2023).



- Funciones del servidor web para descargar las gráficas y los datos diarios en tiempo real.



- Botón para ingresar a la base de datos almacenada en tiempo real.



- Registro de lectura con ID de los sensores con la fecha y hora.

ID	Temp DS18B20 °C	Temp DTH22 °C	Hum Relativa %	Hum Suelo %	Fecha	Hora
27200	23.19	23.20	56.40	300	2023-11-18	09:33:25
27199	23.06	23.40	57.00	300	2023-11-18	09:30:04
27198	23.00	23.10	56.00	300	2023-11-18	09:26:43
27197	22.87	23.10	57.70	300	2023-11-18	09:23:23
27196	22.69	22.80	57.60	300	2023-11-18	09:20:02
27195	22.37	22.90	58.50	300	2023-11-18	09:16:41
27194	22.37	22.90	58.70	300	2023-11-18	09:13:21
-----	-----	-----	-----	---	-----	-----