

---

# Diseño y construcción de un sistema de automatización para la mejora del proceso de germinación en siembra indirecta basado en agricultura vertical

## Design and construction of an automation system to improve the germination process in indirect planting based on vertical farming

---

Rodrigo Alejandro Centeno Flores

Universidad de Sonsonate

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2985-9453>

[rodrigo.centeno@usonsonate.edu.sv](mailto:rodrigo.centeno@usonsonate.edu.sv)

Enviado: 15 de febrero de 2025

Aceptado: 28 de julio de 2025



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

---

### Resumen

La agricultura moderna enfrenta el desafío de producir de manera sostenible frente a la escasez de recursos y la variabilidad climática. En este contexto, la agricultura vertical surge como una alternativa innovadora que permite controlar las condiciones ambientales para optimizar el crecimiento vegetal en espacios reducidos. Sin embargo, los procesos iniciales como la germinación siguen dependiendo en gran medida de factores ambientales inestables que afectan la uniformidad y eficiencia de las plántulas. Ante ello, se planteó el desarrollo de un sistema automatizado que optimice dichas variables. La investigación fue de tipo aplicada y experimental, en la cual se realizó una revisión técnica y teórica sobre sistemas automatizados agrícolas, seguida del diseño físico del prototipo y la selección de sensores, actuadores y controladores. El sistema se alimentó con energía solar e integró rutinas automatizadas para mantener temperatura, humedad y luminosidad dentro de rangos óptimos para la germinación. El prototipo construido permitió monitorear y ajustar automáticamente las variables ambientales, obteniendo un ambiente controlado estable. Los resultados confirman que el sistema de agricultura vertical automatizado es una alternativa

viable, sustentable y escalable. Su implementación mejora la eficiencia de la germinación, promueve el uso racional de recursos y contribuye al desarrollo de modelos agrícolas resilientes frente a los desafíos ambientales actuales.

### Palabras clave

Agricultura vertical, automatización, germinación, energía solar, siembra indirecta.

### Abstract

Modern agriculture faces the challenge of producing sustainably in the face of resource scarcity and climatic variability. In this context, vertical farming emerges as an innovative alternative that allows environmental conditions to be controlled in order to optimize plant growth in limited spaces. However, early processes such as germination still largely depend on unstable environmental factors that affect the uniformity and efficiency of seedlings. In response, an automated system was developed to optimize these variables. The research was applied and experimental in nature,

involving a technical and theoretical review of automated agricultural systems, followed by the physical design of the prototype and the selection of sensors, actuators, and controllers. The system was powered by solar energy and integrated automated routines to maintain temperature, humidity, and light within optimal ranges for germination. The constructed prototype enabled automatic monitoring and adjustment of environmental variables, achieving a stable controlled environment. The results confirm that the automated vertical farming system is a viable, sustainable, and scalable alternative. Its implementation improves germination efficiency, promotes the rational use of resources, and contributes to the development of resilient agricultural models capable of addressing current environmental challenges.

## Keywords

Automation, germination, indirect sowing, solar energy, vertical farming.

## Introducción

La agricultura ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de las sociedades humanas desde sus inicios. Su importancia no solo radica en la producción de alimentos, sino también en su capacidad para impulsar el desarrollo económico, generar empleo y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Según el Grupo Banco Mundial (2024), el desarrollo agrícola es una de las herramientas más efectivas para erradicar la pobreza extrema, fomentar la prosperidad compartida y garantizar la seguridad alimentaria de una población en constante crecimiento. Este enfoque es respaldado por instituciones académicas, como la Universidad de San Pedro Sula (2023), que destaca cinco razones clave para la relevancia de la agricultura: seguridad alimentaria, generación de empleo, desarrollo económico, sostenibilidad ambiental e innovación tecnológica.

En la actualidad, el mundo enfrenta desafíos sin precedentes en términos de demanda de alimentos. El crecimiento demográfico, la urbanización acelerada y los efectos del cambio climático han puesto presión sobre los sistemas agrícolas tradicionales. Para satisfacer esta demanda, en los últimos años se han desarrollado diversas alternativas que buscan mejorar y optimizar las técnicas

de cultivo. Entre estas, la agricultura vertical ha surgido como una solución innovadora y prometedora. Este enfoque permite maximizar el uso del espacio y los recursos, lo que resulta especialmente relevante en áreas urbanas donde el terreno es limitado y costoso. Según Premier Tech Growers and Consumers (2021), la agricultura vertical no solo aborda los desafíos de la seguridad alimentaria, sino que también promueve la sostenibilidad al reducir el uso de agua, fertilizantes y pesticidas.

Una de las técnicas que complementa eficazmente la agricultura vertical es la siembra indirecta. Como lo señala el Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, S.A. (2023), este método ofrece múltiples ventajas, como la reducción de la pérdida de semillas debido a condiciones meteorológicas adversas, la erosión del suelo o la acción de insectos y animales. Además, la siembra indirecta permite una mejor planificación del cultivo y la cosecha, así como la selección de plántulas más fuertes, lo que mejora el rendimiento y reduce el consumo de agua y tratamientos. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la siembra indirecta en sistemas de agricultura vertical enfrenta desafíos significativos, especialmente durante la etapa de germinación.

Matilla (2003) define la germinación como el conjunto de procesos metabólicos y morfogénicos que tienen como resultado la transformación de un embrión en una plántula capaz de valerse por sí misma y transformarse en una planta fotosintéticamente competente. El proceso de germinación inducido por una serie de señales ambientales, como la disponibilidad de agua, la temperatura óptima, el oxígeno y, en algunos casos, la luz. Posterior a la germinación, la planta entra en la fase de crecimiento vegetativo, caracterizada por la elongación de raíces, tallos y la expansión foliar.

La falta de atención específica a la optimización del proceso de germinación en sistemas de agricultura vertical puede tener repercusiones económicas y medioambientales significativas. Los recursos utilizados en la siembra, como semillas, agua, sustrato y energía, podrían no ser aprovechados de manera eficiente, lo que resulta en pérdidas económicas y un impacto ambiental negativo. Por ejemplo, el uso excesivo de agua o energía para mantener condiciones subóptimas durante la germinación no solo aumenta los costos operativos, sino que también contribuye al desperdicio de recursos valiosos. En un contexto global donde la sostenibilidad es una prioridad, es fundamental desarrollar soluciones que permitan un uso más eficiente de estos recursos.

El problema central de esta investigación radica en la necesidad de desarrollar e implementar un sistema de automatización y monitoreo que aborde de manera integral y precisa las condiciones ambientales durante la germinación de semillas en un modelo de siembra indirecta. Este sistema debe ser capaz de adaptarse a las variabilidades inherentes al entorno, garantizando una germinación uniforme, eficiente y de alta calidad, al tiempo que minimiza la intervención humana y maximiza la utilización de recursos. La implementación de un sistema de este tipo no solo optimizará la eficiencia y productividad del sistema, sino que también reducirá la dependencia de la intervención manual, minimizando errores y aumentando la uniformidad del cultivo.

La resolución de este problema no solo contribuirá al avance tecnológico en la agricultura, sino que también fortalecerá la sostenibilidad y la viabilidad económica de la siembra indirecta. Un sistema de automatización y monitoreo eficiente permitirá a los agricultores maximizar el rendimiento de sus cultivos, reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental. Además, este tipo de tecnología puede ser especialmente beneficiosa en regiones con recursos limitados, donde la agricultura vertical y la siembra indirecta pueden desempeñar un papel crucial en la seguridad alimentaria y el desarrollo económico.

En este contexto, la investigación propone el diseño y construcción de un sistema de automatización que integre tecnologías avanzadas, como sensores ambientales, sistemas de riego automatizados, energía solar y protocolos de comunicación entre dispositivos e internet. Este sistema no solo monitoreará y controlará las condiciones ambientales durante la germinación, sino que también permitirá la recopilación y análisis de datos en tiempo real, lo que facilitará la toma de decisiones informadas y la optimización continua del proceso. Además, el uso de energía solar como fuente de energía renovable contribuirá a la sostenibilidad del sistema, reduciendo su huella de carbono y alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015).

## Metodología

La metodología utilizada en este proyecto es de tipo aplicada, la Organisation for Economic Co-operation and Development (2015) define esta metodología como el

desarrollo de ideas y su conversión en algo funcional en un intento de solucionar problemas específicos. La investigación se basa en desarrollar una solución práctica mediante el diseño y construcción de un sistema automatizado para optimizar el proceso de germinación en un entorno de agricultura vertical tomando como validación el control de variables.

Para maximizar la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas, es esencial comprender en profundidad los procesos biológicos que subyacen al crecimiento y desarrollo de las plantas. El ciclo de vida de las plantas no solo explica cómo las plantas crecen y se reproducen, sino que también proporciona conocimientos valiosos sobre cómo optimizar las prácticas agrícolas como la germinación, la siembra y el manejo de cultivos para mejorar los rendimientos y la eficiencia en el uso de recursos.

La germinación es una fase crítica en el ciclo de vida de las plantas, ya que determina el éxito del cultivo. Este proceso está influenciado por una serie de factores ambientales que menciona Lira Saldivar (2007) como la temperatura, la humedad, la iluminación y la calidad del sustrato. En un entorno controlado, como el de la agricultura vertical, es esencial mantener estos factores dentro de rangos óptimos para garantizar una germinación uniforme y eficiente. Sin embargo, la variabilidad en las condiciones ambientales, incluso en sistemas aparentemente controlados, puede ser considerable y está sujeta a fluctuaciones imprevistas. Estas variaciones pueden resultar en tasas de germinación desiguales, retrasos en el crecimiento y, en última instancia, afectar la calidad y el rendimiento del cultivo.

## Evaluación de componentes

### Estructura mecánica

El diseño de estructuras para la agricultura vertical tiene como objetivo maximizar el uso del espacio en ambientes controlados, permitiendo el cultivo de diversas plantas en áreas limitadas. La estructura mostrada es un ejemplo de cómo se puede optimizar el espacio verticalmente para cultivar plantas en niveles sucesivos, asegurando un crecimiento uniforme y eficiente.

La estructura consiste en un conjunto de estantes dispuestos en varios niveles, hechos de un marco de pvc que proporciona soporte y estabilidad. Cada nivel está

formado por una plataforma con un diseño de malla, lo cual permite la circulación adecuada de aire y el drenaje eficiente del agua, reduciendo el riesgo de acumulación de humedad y, por tanto, la proliferación de enfermedades fúngicas.

### Sensores de monitoreo

Para garantizar un crecimiento óptimo de las plantas en la estructura de agricultura vertical, es esencial implementar un sistema de monitoreo que controle las condiciones ambientales y del suelo en tiempo real. Los sensores de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo proporcionan datos cruciales para ajustar las condiciones del entorno de cultivo y asegurar un riego eficiente y preciso. A continuación, se detallan los sensores que se utilizarán en este sistema:

#### Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental DHT22

El DHT22 es un sensor de alta precisión diseñado para medir tanto la temperatura como la humedad del ambiente. (Adafruit Industries, 2024) especifica en la ficha técnica las características del dispositivo:

- **Alta Precisión y Rango de Medición:** El DHT22 puede medir temperaturas en un rango de -40 a 80°C con una precisión de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  y humedad relativa en un rango de 0 a 100% con una precisión de  $\pm 2\text{-}5\%$ . Esto permite un monitoreo preciso del microclima en cada nivel de la estructura vertical.
- **Bajo Consumo de Energía:** Este sensor consume poca energía, lo que lo hace adecuado para sistemas de monitoreo continuo en instalaciones que pueden depender de fuentes de energía limitadas o renovables.
- **Fácil Integración y Configuración:** El DHT22 es fácil de integrar en sistemas de control automatizados mediante microcontroladores como Arduino o ESP32. Su conexión se realiza a través de un solo pin de datos, lo que simplifica el cableado y la instalación.

#### Sensor de Humedad de Suelo Capacitivo v1.2

El sensor de humedad de suelo capacitivo (DFROBOT, 2015) es un dispositivo crucial para medir el contenido de agua en el sustrato donde crecen las plantas. En la agricultura vertical, este sensor ayuda a determinar cuándo y cuánta agua se necesita en cada nivel de la

estructura. Las características clave de este sensor incluyen:

- **Monitoreo preciso de la humedad del suelo:** Este sensor proporciona mediciones precisas del nivel de humedad del suelo, lo que permite ajustar el riego para evitar tanto el exceso como la falta de agua, condiciones que pueden ser perjudiciales para las plantas.
- **Compatibilidad con sistemas automatizados:** Al igual que el DHT22, los sensores de humedad de suelo son compatibles con microcontroladores y sistemas de automatización. Los datos recogidos por estos sensores se utilizan para activar o desactivar el sistema de riego por nebulización según la humedad del suelo, optimizando así el uso del agua y asegurando que las plantas reciban el riego adecuado.
- **Durabilidad y resistencia:** Estos sensores están diseñados para ser resistentes a la corrosión y al desgaste por la exposición continua al agua y al suelo. Esto es especialmente importante en sistemas de agricultura vertical donde los sensores están constantemente en contacto con el sustrato.

### Sistema de riego

El sistema de riego que se utilizará en el proyecto es por nebulización, esta es una técnica utilizada en la agricultura para proporcionar agua y nutrientes de manera eficiente a las plantas. Este sistema permite una distribución uniforme del agua en todos los niveles de la estructura, optimizando el crecimiento de las plantas y minimizando el desperdicio de recursos. El sistema de nebulización se implementará en cada nivel o piso de la estructura.

El proyecto utilizará directamente el agua proporcionada del sistema de tuberías de agua, el cual tendrá un control mediante electroválvulas que manejadas por un sistema automatizado que regula el tiempo y la duración de la nebulización. Los sensores de humedad y temperatura en la estructura proporcionan datos en tiempo real que permiten ajustar los ciclos de riego según las necesidades específicas de las plantas y las condiciones ambientales.

### Unidad de control

La elección de dispositivos adecuados es fundamental para asegurar un control preciso y confiable en este proyecto. El Heltec WiFi LoRa 32 (V3) es un sistema en

chip que combina un microcontrolador ESP32 con capacidades de comunicación LoRa, WiFi y Bluetooth. Esta integración permite gestionar tanto la comunicación local como remota, lo cual resulta esencial en un sistema de monitoreo de captación de CO<sub>2</sub>, incluso desde ubicaciones remotas.

Las características clave del Heltec WiFi LoRa 32 (V3) como muestra su hoja de datos (Heltec Automation, 2022) son que el microcontrolador proporciona un potente núcleo de procesamiento con capacidades de doble núcleo y soporte para múltiples tareas. El módulo LoRa facilita la comunicación de largo alcance, ideal para la transmisión de datos entre sensores y la unidad central en un entorno de cultivo extensivo. La conectividad WiFi permite la integración con redes y plataformas en la nube para el monitoreo y control remoto del sistema.

**Sistema de alimentación**

Para garantizar una operación autónoma y sostenible del sistema de automatización de germinación, la solución de alimentación se basa en un panel solar. Este enfoque no solo proporciona una fuente de energía renovable y ecológica, sino que también asegura la independencia de la red eléctrica, lo que es ideal para entornos de cultivo remotos o en áreas con acceso limitado a la electricidad. El sistema de alimentación consta de un panel solar, una batería de almacenamiento y un circuito de gestión de energía que permite la carga de la batería y el suministro directo de a los componentes del sistema.

El panel solar es el componente principal que captura la energía del sol y la convierte en electricidad. Este panel está dimensionado para proporcionar suficiente energía para el funcionamiento continuo del sistema, incluyendo el Heltec WiFi LoRa 32 (V3), los sensores de temperatura y humedad, las electroválvulas, y otros componentes eléctricos.

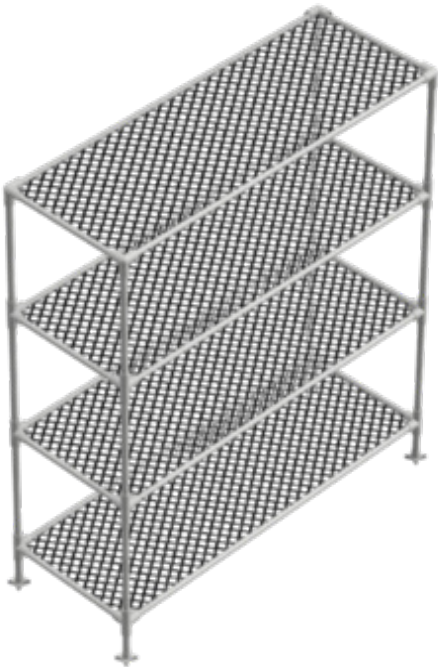
La batería de almacenamiento es fundamental para almacenar la energía capturada por el panel solar y proporcionar energía durante los períodos en que la luz solar no está disponible, como durante la noche o en días nublados. Esta batería se carga continuamente mientras el panel solar recibe luz solar. La capacidad de la batería está diseñada para asegurar que el sistema tenga suficiente energía almacenada para funcionar durante todo el ciclo de operación, incluso en condiciones de baja radiación solar.

El circuito de gestión de energía regula la carga de la batería y el suministro de energía a los componentes del sistema. Incluye un controlador de carga que protege la batería contra sobrecargas y descargas excesivas, asegurando una vida útil prolongada. Además, el circuito de gestión asegura que la energía del panel solar se distribuya adecuadamente tanto para la carga de la batería como para el suministro directo a los componentes del sistema.

**Resultados**

Los materiales seleccionados para la estructura son tubos de pvc y malla metálica. El uso de pvc proporciona una gran resistencia y durabilidad, necesaria para soportar el peso de los semilleros y resistir condiciones de humedad constante. La elección de malla metálica para las plataformas permite que la estructura sea ligera, facilitando su montaje y mantenimiento.

**Figura 1.**  
*Prototipo simulado de la estructura mecánica*







El proceso también se podría realizar solo con un dispositivo, pero para garantizar el envío de datos a la nube desde cualquier lugar de implementación, se estableció el protocolo de comunicación LoRa para realizar el envío de datos entre dispositivos.

### Dispositivo transmisor

Para la programación del dispositivo transmisor se definieron las clases, pines, variables, constantes y funciones para envío de mensajes entre dispositivos y obtener los datos de los sensores de temperatura, humedad relativa y humedad de la tierra.

La función setup del dispositivo inicializa el puerto serial, protocolo de comunicación I2C, modulo LoRa, módulo DHT22 y los pines de los actuadores de electroválvulas.

La función loop está diseñada para la obtención de los valores de los sensores por medio de funciones y la transmisión de datos al dispositivo receptor mediante una cadena que concatena todos los datos y hace la referenciar al indicador único del dispositivo transmisor establecido en la declaración de constantes globales. Para realizar una correcta transmisión de datos se realiza el envío de un ACK que es un mensaje que el destino de la comunicación envía al origen para confirmar que el envío de datos se realizó de manera satisfactoria sin pérdida de datos.

El código para obtener la humedad de la tierra mediante el sensor capacitivo de humedad del suelo realiza una lectura del pin analógico y un mapeo del valor para dar un resultado adecuado a la lectura adaptado al suelo.

La función para obtener la humedad del ambiente mediante el sensor DHT22 utiliza la función de la clase DHT el cual devuelve el valor de humedad, para la escalabilidad se creó esta función para poder hacer múltiples lecturas si se tiene más de un sensor conectado y una condicional para descartar valores inexistentes.

La función para obtener la temperatura del ambiente mediante el sensor DHT22 utiliza la función de la clase DHT el cual devuelve el valor de temperatura, para la escalabilidad se creó esta función para poder hacer múltiples lecturas si se tiene más de un sensor conectado y una condicional para descartar valores inexistentes.

La función de envío de datos se realiza con un contador de intentos para garantizar un envío exitoso si resulta algún imprevisto en la comunicación. El mensaje se envía utilizando la función transmit() de la clase Radiolib aplicada al objeto lora, cuando se envía el dispositivo llama la función esperarACK que devuelve una respuesta verdadera si se realizó un envío correcto o falso si surgió un problema.

La función esperarACK convierte momentáneamente al transmisor en receptor para confirmar que el mensaje con los datos de las variables capturadas se envió correctamente. Este proceso se realiza mediante la función strarReceive() de la clase Radiolib aplicada al objeto lora para cambiar su estado a receptor y mediante la función readData almacena lo recibido en una variable.

### Dispositivo receptor

Para la programación del dispositivo receptor se estableció la lógica de recepción de datos del dispositivo transmisor, el envío del ACK para garantizar la calidad de los datos y el envío de datos a la nube Arduino Cloud para su almacenamiento.

En la declaración de clases, pines, variables y constantes globales también se incluye el archivo de cabecera para la configuración del servicio de Arduino Cloud con el dispositivo.

La función setup del dispositivo receptor es muy similar al transmisor, siempre se inicializa el puerto serial, protocolo de comunicación I2C, modulo LoRa y se implementa la comunicación con Arduino Cloud.

La función loop del dispositivo receptor contiene las funciones para recibir los datos del dispositivo transmisor, cuando este recibe un mensaje pasa a ser evaluado con la función porcesarDatos(), si el mensaje es correcto envía la señal ACK de confirmación al dispositivo transmisor y procede a cargar las variables a la nube.

La función procesarDatos() verifica la integridad del mensaje recibido, esto mediante un proceso de separación de los datos individuales de la cadena para su almacenamiento en variables.

La construcción de la estructura aprovecha de las ventajas del pvc de 1 pulgada para tener un sistema resistente, duradero y accesible. La estructura fue diseñada con la idea de ser escalable, por lo que puede apilarse y ampliarse a las necesidades del usuario.

Para formar la estructura se necesitan uniones de injerto doble a escuadra e incluso una unión de 5 entrantes, pero los precios de estas son muy altos y la accesibilidad muy limitada, para resolver el problema se decide modificar las uniones tipo tees y cruz añadiendo un tapón para generar la conexión extra necesaria para la estructura como se muestra en la Fig. 4.

**Figura 4.**  
*Modificación de unión tipo tees*



Las medidas de cada sección son de un área de 70x90 cm, estas medidas se establecieron por la flexión del pvc, ya que a mayor longitud su deformación es más fácil. Cada sección utiliza tela de gallinero como base donde irán los semilleros, se utiliza esta tela para obtener un buen drenaje del agua como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5.**  
*Sección de trabajo de la estructura*



La altura entre secciones puede variar según las necesidades de los usuarios, para el caso de este proyecto se establece en 60 cm, esto debido al sistema de nebulización que cubra el área necesaria, con esta distancia se garantiza un riego uniforme en todos los semilleros.

La incorporación del sistema de riego se hizo en los techos de cada nivel, utilizando los orificios de la tela de gallinero se logra sostenerlo de manera adecuada. El sensor de temperatura y humedad DHT22 se ubica en el lateral de un tubo para garantizar la captación de temperatura ambiente como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.**  
*Ubicación de sensor DHT22 en la estructura*



El manejo de la humedad de la tierra se hace de manera individual por nivel para obtener un promedio del total, estos valores son los que proporcionan los datos necesarios para la activación del sistema de nebulización.

El sistema final para la mejora del proceso de germinación se compone de una unidad central de control basada en el Heltec WiFi LoRa 32 (V3), sensores distribuidos por la estructura como el DHT22 para temperatura y humedad ambiente, así como el sensor capacitivo de humedad de suelo, un módulo de comunicación LoRa para la transmisión de datos, y un sistema de riego automatizado mediante electroválvulas. La Figura 7 muestra la estructura final del sistema.

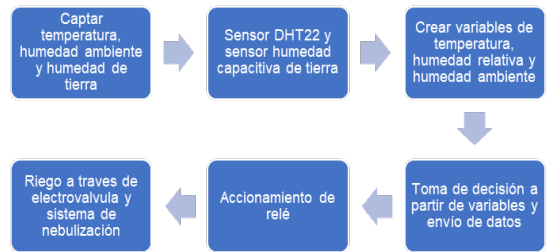


Figura 7.  
Montaje final de la estructura



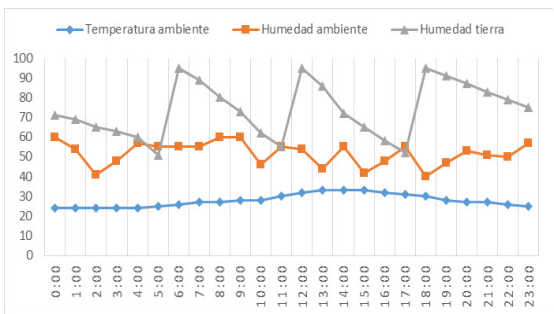
La Figura 8 muestra el proceso de trabajo del sistema, este comienza con la necesidad de captar la temperatura, humedad ambiente y humedad de la tierra. La captación de estos factores ambientales se realiza mediante los sensores DHT22 y el sensor capacitivo de tierra, los sensores transforman una señal eléctrica a la magnitud deseada. Al conocer los valores se almacenan en variables para el proceso de toma de decisión y envío de datos, dependiendo de los valores se deberá accionar el relé que controla la electroválvula y deja fluir el agua a través del sistema de riego por nebulización.

Figura 8.  
Diagrama de proceso del dispositivo transmisor



Las pruebas del sistema se registraron en la plataforma de Arduino Cloud para analizar los resultados de las variables medidas. En la Figura 9 se observan los datos de temperatura ambiental, humedad ambiente y humedad de tierra a lo largo de un día.

Figura 9.  
Datos de temperatura, humedad ambiente y humedad de tierra en un tiempo de 24 horas



La línea gris de la Figura 17 muestra los resultados del sistema, cuando la humedad de la tierra cae del 45%, el sistema detecta que se ha llegado al umbral mínimo de humedad por lo que activa la señal del relé para accionar la electroválvula y comience el riego. La acción del sistema hace que la siguiente lectura muestre un cambio abrupto por el riego y desactivando el relé al llegar al umbral del 95%.

Discusión

El diseño y construcción de un sistema de automatización para mejorar el proceso de germinación en siembra indirecta basado en agricultura vertical representa una solución innovadora y necesaria para los desafíos actuales de la agricultura moderna. A lo largo de esta investigación, se ha evidenciado que la germinación es una etapa crítica en el ciclo de vida de las plantas, y su éxito depende en gran medida de la gestión precisa de factores ambientales como la temperatura, la humedad y la iluminación. La implementación de un sistema automatizado no solo optimiza estos parámetros, sino que también reduce la dependencia de la intervención humana, minimizando errores y maximizando la eficiencia en el uso de recursos.

La agricultura vertical, combinada con técnicas de siembra indirecta, ha demostrado ser una estrategia efectiva para maximizar la producción de alimentos en espacios reducidos, especialmente en entornos urbanos. Sin embargo, los desafíos asociados a la variabilidad ambiental durante la germinación han limitado su potencial. Este proyecto aborda dichos desafíos al proponer un sistema integrado que utiliza tecnologías avanzadas, como sensores ambientales, sistemas de

riego automatizados, energía solar y protocolos de comunicación. Estas herramientas permiten un monitoreo y control preciso de las condiciones de germinación, asegurando una mayor uniformidad y calidad en los cultivos.

Uno de los aportes más significativos de este sistema es su capacidad para adaptarse a las fluctuaciones ambientales, garantizando un entorno estable y óptimo para la germinación. Esto no solo mejora las tasas de éxito en esta etapa, sino que también contribuye a reducir el desperdicio de recursos como agua, energía y semillas. Además, al utilizar energía solar como fuente principal, el sistema se alinea con los principios de sostenibilidad, reduciendo su impacto ambiental y promoviendo prácticas agrícolas más responsables.

La implementación de este sistema tiene implicaciones positivas tanto a nivel económico como social. Por un lado, al aumentar la eficiencia y productividad de los cultivos, se reducen los costos operativos y se mejora la rentabilidad para los agricultores. Por otro lado, al contribuir a la seguridad alimentaria, especialmente en áreas urbanas y regiones con recursos limitados, este proyecto tiene el potencial de impactar positivamente en la calidad de vida de las comunidades. Además, al ser un sistema accesible y escalable, puede ser adaptado a diferentes contextos y escalas, lo que amplía su alcance y aplicabilidad.

En el contexto global, este proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, particularmente con aquellos relacionados con la seguridad alimentaria, la agricultura sostenible y la innovación tecnológica. Al promover prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles, este sistema no solo contribuye a resolver problemas actuales, sino que también sienta las bases para un futuro más resiliente y equitativo.

En conclusión, el sistema de automatización propuesto en esta investigación representa un avance significativo en la agricultura vertical y la siembra indirecta. Su capacidad para optimizar el proceso de germinación, reducir el desperdicio de recursos y minimizar la intervención humana lo convierte en una herramienta valiosa para enfrentar los desafíos de la producción de alimentos actuales. Este proyecto no solo tiene el potencial de transformar la forma en que se practica la agricultura, sino también de contribuir a un futuro más sostenible y seguro para las generaciones venideras.

## Referencias

- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, S.A. (19 de Octubre de 2023). Qué son la siembra directa y la indirecta: diferencias, pros y contras. Obtenido de Banco Bilbao Vizcaya Argentaria: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-la-siembra-directa-y-la-indirecta-diferencias-pros-y-contras/>
- Adafruit Industries. (8 de Marzo de 2024). Digital Digital relative relative relative relative humidity humidity humidity & temperature emperature emperature emperature sensor AM2302/DHT22. Obtenido de Digital Digital Digital relative relative relative relative humidity humidity humidity humidity & temperature emperature emperature emperature sensor AM2302/DHT22: <https://www.mouser.com/datasheet/2/737/dht-932870.pdf>
- Berger. (15 de Marzo de 2018). Agricultura vertical: Una gran opción para la agricultura del futuro. Obtenido de <https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/agricultura-vertical-una-gran-opcion-para-la-agricultura-del-futuro/>
- De La Cuadra, C. (03 de 1992). Germinación, latencia y dormición de las semillas. Obtenido de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1992\\_03.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_03.pdf)
- Denisen, E. L. (1991). Fundamentos de horticultura. México: Noriega Limusa.
- DFROBOT . (2015). Capacitive Soil Moisture Sensor SKU:SEN0193. Obtenido de Capacitive Soil Moisture Sensor SKU:SEN0193: <https://www.datocms-assets.com/28969/1662716326-hw-101-hw-moisture-sensor-v1-0.pdf>
- Food and Agriculture Organization. (1996). ECOLOGIA Y ENSEÑANZA RURAL: Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. Obtenido de Food and Agriculture Organization: <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s07.htm#:~:text=La%20plantas%20nos%20proporcionan%20alimentos,a%20la%20estabilidad%20del%20clima.>

- Fundación Alternativas. (Diciembre de 2015). Técnicas de siembra. Obtenido de [https://alternativascc.org/wp-content/uploads/2018/05/siembra\\_web-1.pdf](https://alternativascc.org/wp-content/uploads/2018/05/siembra_web-1.pdf)
- Grupo Banco Mundial. (15 de Marzo de 2024). Agricultura y alimentos. Obtenido de Grupo Banco Mundial: <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>
- Heltec Automation. (Septiembre de 2022). LoRa Node Development Kit. Obtenido de LoRa Node Development Kit: [https://resource.heltec.cn/download/WiFi\\_LoRa\\_32\\_V3/HTIT-WB32LA\\_V3\(Rev1.1\).pdf](https://resource.heltec.cn/download/WiFi_LoRa_32_V3/HTIT-WB32LA_V3(Rev1.1).pdf)
- Hydroponic Systems. (s.f.). Cultivos sin suelo: una solución sostenible para ahorrar agua de riego. Obtenido de <https://hydroponicsystems.eu/es/cultivos-sin-suelo-ahorrar-agua-sequia/>
- Leyva, L. (23 de Noviembre de 2018). Semilleros: El inicio de un gran huerto. Revista Landuum. Obtenido de <https://www.landuum.com/laboratorio/semilleros-el-inicio-de-un-gran-huerto/>
- Lira Saldivar, R. H. (2007). Fisiología vegetal (Segunda ed.). México: Trillas.
- Matilla Carro, A. J. (2003). La ecofisiología vegetal : una ciencia de síntesis. Madrid: Thomson-Paraninfo.
- Naciones Unidas. (25 de Septiembre de 2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). Manual de Frascati 2015. Obtenido de Manual de Frascati 2015: [https://www.oecd.org/es/publications/manual-de-frascati-2015\\_9789264310681-es.html](https://www.oecd.org/es/publications/manual-de-frascati-2015_9789264310681-es.html)
- Premier Tech Growers and Consumers. (1 de Marzo de 2021). ¿Qué debes de saber acerca de la agricultura vertical? Obtenido de Premier Tech Growers and Consumers: <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/que-debes-de-saber-acerca-de-la-agricultura-vertical>
- Reyes Castañeda, P., Reyes Méndez, C. A., & Reyes Méndez, F. E. (2002). Introducción a la agronomía. México: Trillas.
- Silos del Cinca S.A. (11 de 11 de 2020). Silos del Cinca. Obtenido de SIEMBRA DIRECTA O SIEMBRA CONVENCIONAL: <https://www.silosdelcinca.com/fertilizantes-agricolas/siembra-directa-convencional/>
- Universidad de San Pedro Sula. (7 de Diciembre de 2023). La importancia de la agricultura: razones para valorar este sector. Obtenido de Universidad de San Pedro Sula: <https://www.usap.edu/blog/importancia-de-la-agricultura/>