

Sistema de monitoreo remoto de humedad, temperatura y estado de los brotes en un germinador automático

Remote monitoring system for humidity, temperature and sprout status in an automatic germinator

Marco Aurelio Nuño-Maganda*¹, Yahir Hernández-Mier¹, Angel David Mendoza-Valdez¹, Lessly Gabriela Galván-Villanueva¹, Said Polanco-Martagón¹

¹Polytechnic University of Victoria,
Victoria, Tamaulipas, 87138, Mexico

*mnunom@upv.edu.mx

Recibido: 30/09/24; Aceptado: 11/11/24

Abstract—The present work describes the design of electronic circuits for an irrigation system of an automatic germinator and the monitoring of the sprouts using a camera and artificial vision algorithms. This project aims to automate the seed development process to provide the right conditions for proper growth and later transplanting when it reaches the seedling stage, as well as to detect growth problems in the early stage. We tested the developed prototype with five fast-germinating crops: onion, lettuce, cilantro, chili, and bean seeds. We compared the performance of sprouts germinated in the proposed system with others germinated outside the device under different conditions. The irrigation system includes a basic control that, based on a target humidity threshold, turns on the water pump to modify the current conditions to reach the target humidity.

Keywords: Automatic Seed Germination; Automatic Irrigation; Computer Vision; Remote Monitoring, Embedded System.

Resumen— El presente trabajo describe el diseño de circuitos electrónicos para un sistema de riego de un germinador automático, así como el monitoreo de los brotes mediante una cámara y algoritmos de visión artificial. El propósito de este proyecto es poder automatizar el proceso de desarrollo de la semilla, para poder brindarle las condiciones adecuadas para un correcto crecimiento y posteriormente su trasplante cuando llegue a la etapa de plántula, además de detectar problemas de crecimiento en la fase temprana. El prototipo desarrollado fue probado con cinco cultivos de rápida germinación: semillas de cebolla, lechuga, cilantro, chile y frijol. Se comparó el desempeño de los brotes germinados en el sistema propuesto con otros germinados fuera del dispositivo bajo diferentes condiciones. El sistema de riego incluye un control muy básico, que en base a un umbral de humedad objetivo, enciende la bomba de agua para modificar la condiciones actuales y así alcanzar la humedad objetivo.

Palabras clave: Germinación Automática de Semillas, Riego Automático, Visión por Computadora, Monitoreo Remoto, Sistema Embebido

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a un estudio realizado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) en países de Latinoamérica, México

ocupa el cuarto lugar en consumo de alimentos ultra procesados, los cuales son los principales causantes de sobrepeso, obesidad e hipertensión. Los alimentos y bebidas ultra procesados se consideran productos particularmente obesogénicos y en general poco saludables, su consumo frecuente conlleva un aumento de calorías, mismo que se relaciona con el desarrollo de diabetes tipo 2, la forma más común de la enfermedad. Datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), señalan que las y los mexicanos compran 212 kilogramos de este tipo de alimentos al año, por persona [1], [2].

Una forma de cubrir estas necesidades alimenticias y mejorar, además de asegurar la calidad de los alimentos, es el consumo de alimentos cultivados en huertos caseros [3]. El uso de tecnologías de la agricultura de precisión puede ayudar a mejorar los márgenes, a través de un aumento del valor de rendimiento (cantidad o calidad), de una reducción en la cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente [4]. Para lograr este objetivo, son necesarias herramientas para detectar enfermedades y plagas en cultivos. Para esto, la inteligencia artificial, los sistemas expertos y el procesamiento de imágenes han sido ampliamente explorados [5].

La propagación sexual de las plantas se lleva a cabo mediante las semillas, las cuales tienen la función de multiplicar y perpetuar la especie. Las semillas son estructuras complejas que generalmente consisten de un embrión, que es el producto de la fusión entre el óvulo con el núcleo espermático; un endospermo que provee de nutrientes al embrión para el desarrollo y el crecimiento de la plántula; y la testa de la semilla formada externamente por los integumentos que representan los tejidos maternos del óvulo [6].

Para que la semilla cumpla con su objetivo, es necesario que el embrión se transforme en una plántula que sea capaz de valerse por sí misma, mediante mecanismos metabólicos y morfo-genéticos, conocidos como proceso de germinación. El proceso de germinación está constituido por varias fases: i) Absorción de agua por la semilla o imbibición; ii) Activación del metabolismo y proceso de respiración, síntesis de proteínas y movilización de sustancias de reserva; iii)

Elongación del embrión y ruptura de la testa a través de la cual se observa salida de la radícula [7].

El proceso de germinación está influenciado tanto por factores internos como externos. Dentro de los factores internos están la viabilidad del embrión, la cantidad y calidad del tejido de reserva y los diferentes tipos de dormancia. Algunos de los factores externos que regulan el proceso son el grosor de la testa, disponibilidad de agua, temperatura y tipos de luz [8]. Los germinadores son dispositivos que favorecen el proceso de germinación al mantener las semillas en las condiciones adecuadas de humedad. En el proceso de germinación se involucran factores internos y externos. Específicamente, los factores externos son controlables, entre los que se encuentran disponibilidad de agua, temperatura y tipos de luz [8]. Un ejemplo del estudio del proceso de germinación aplicado a un cultivo en particular (lechuga) se encuentra en [9], donde se evalúa la germinación de diferentes variedades de lechuga en temperaturas elevadas.

La tecnología de monitoreo y control se refiere al uso de dispositivos tecnológicos y sistemas automatizados para supervisar y regular diferentes variables y procesos en diversas aplicaciones, como la agricultura, la industria, la salud, entre otras. Esta tecnología permite recopilar datos en tiempo real, realizar análisis y tomar decisiones basadas en la información recopilada para optimizar el rendimiento, mejorar la eficiencia y garantizar la seguridad. En el contexto de la agricultura y la horticultura, la tecnología de monitoreo y control se utiliza para supervisar y gestionar factores ambientales críticos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, como la temperatura, la humedad, la luz, el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Esto se logra mediante el uso de sensores, actuadores, sistemas de riego automatizado, sistemas de iluminación controlada y software de gestión de datos [10].

La tecnología de monitoreo y control permite a los agricultores y productores optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas, minimizar el uso de recursos como agua y energía, prevenir enfermedades y plagas, y mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos. Además, esta tecnología facilita la recopilación de datos y el análisis de tendencias a largo plazo, lo que permite una toma de decisiones más informada y estratégica en la gestión de cultivos [11].

En este artículo, se reporta el diseño un prototipo de germinador automático, que permite al usuario monitorear el germinado de las semillas para su trasplante y cosecha. El objetivo del monitoreo remoto es extraer información de imágenes de los brotes (específicamente del tiempo que tardaron en brotar) e informarlo al usuario, reduciendo su preocupación de estar al pendiente de la evolución de los brotes. Para cumplir con dicho objetivo, fue necesario diseñar circuitos eléctricos y/o electrónicos, además de desarrollar el software necesario para controlar dichos circuitos, incluyendo un módulo de visión que a través de las imágenes adquiridas mediante una cámara, permite determinar el estado de los brotes.

II. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Existen varios sistemas que han resuelto el problema de monitorear el germinado de semillas tanto a pequeña

como a gran escala. A pequeña escala, en [12], proponen utilizar un dispositivo Raspberry Pi para adquisición de datos de los sensores, dejando a un lado el monitoreo de la germinación mediante visión por computadora. A gran escala, en [13], proponen un sistema de cuatro cámaras para monitorear hasta 400 semillas. Recientemente, en [14], se emplean técnicas complejas como el Aprendizaje Profundo (DL por sus siglas en inglés) para segmentar el tamaño de las hojas, dejando fuera el control de las condiciones de la germinación. En [15], además de desarrollar el algoritmo de segmentación, proponen un contenedor específico para dicho propósito, además de llevar a cabo el procesamiento en una computadora de reciente generación con tarjeta gráfica NVidia. Finalmente, en [16] reportan el uso de modelos de DL tanto para segmentación como para clasificación útiles para determinar el estado de germinación de las semillas. Para llevar a cabo el proceso, requieren de un kit NVIDIA Jetson Nano.

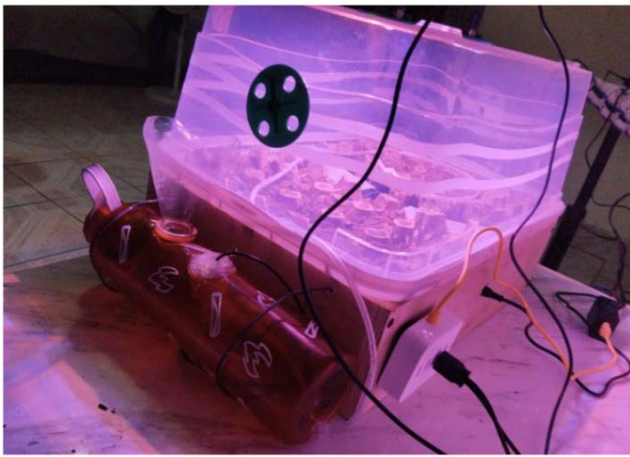
III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño del prototipo germinador

El diseño incluye una base tipo caja sin fondo con el propósito de almacenar los componentes de manera organizada y segura. Esta base no solo proporciona una mayor seguridad al usuario al salvaguardar los elementos internos, sino que también contribuye a realzar la estética global del germinador automático. Se integraron características de ventilación y circulación de aire en el diseño para garantizar un intercambio adecuado de aire dentro del prototipo. Se ha integrado un recipiente diseñado para almacenar el agua. Este tanque proporciona un suministro estable y accesible de agua para el sistema de riego, garantizando una disponibilidad continua de agua para las plantas.

En la parte superior del germinador, se instalaron estratégicamente dos sistemas de iluminación LED diseñados específicamente para plantas. Estas lámparas LED proporcionan un espectro completo de luz similar a la luz natural, lo que impulsa el crecimiento de las plantas de acelerar la fotosíntesis. Con tres modos de luz disponibles (rojo, azul, blanco cálido y combinaciones de estos) y cinco niveles de ajuste de brillo (20%, 40%, 60%, 80% y 100%), se pueden adaptar para satisfacer las necesidades específicas de las diferentes etapas de crecimiento de las plantas. En la figura 1, se muestran fotografías del prototipo de germinado desarrollado en este trabajo.

Se propone un diseño a pequeña escala que permita realizar pruebas extensivas, las cuales permitirán validar el diseño propuesto para posteriormente llevar el prototipo a gran escala. En base a materiales de bajo costo, se estableció que las medidas para este diseño sean de 27 cm de largo, 39 cm de ancho y 25 cm de alto. Alberga 30 espacios para semillas, estando el espacio diseñado para utilizar dos mitades de casillero de huevo hecho de cartón (material que además es biodegradable), cuyas medidas son estándar en el mercado mexicano. En la figura 2, se muestra el diseño modelado en SolidWorks, mientras que en la figura 3 se muestra la vista del interior obtenida por la cámara que obtendrá imágenes para el monitoreo de los brotes. Finalmente en la figura 4, se muestra el prototipo listo para llevar a cabo la fase de prueba.



(a) Vista Posterior



(b) Vista Frontal

Fig. 1: Diferentes vistas del prototipo del germinador propuesto en este artículo

Se integraron características de ventilación y circulación de aire en el diseño para garantizar un intercambio adecuado de aire dentro del prototipo. Esto contribuye a mantener condiciones ambientales estables y uniformes en el interior del germinador automático, promoviendo así un crecimiento saludable de las plantas. Se ha integrado un recipiente diseñado para almacenar el agua. Este tanque proporciona un suministro estable y accesible de agua para el sistema de riego, garantizando una disponibilidad continua de agua para las plantas.

B. Riego automático

Para el desarrollo del riego automático primero se fijó un parámetro que se tomaría como base para comenzar con su construcción. La humedad relativa. El nivel óptimo de humedad relativa para la mayoría de las plantas se sitúa en torno al 80% (normalmente 65-75% durante la noche y alrededor del 80% durante el día). Si el nivel de humedad aumenta o disminuye, es probable que los procesos fisiológicos de tu planta se ralenticen, provocando un crecimiento más lento y un rendimiento de menor calidad [17]. Esta será medida por el sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 que se encargará de informar al controlador cuando la humedad relativa en el aire y la temperatura sean menor a la requerida.

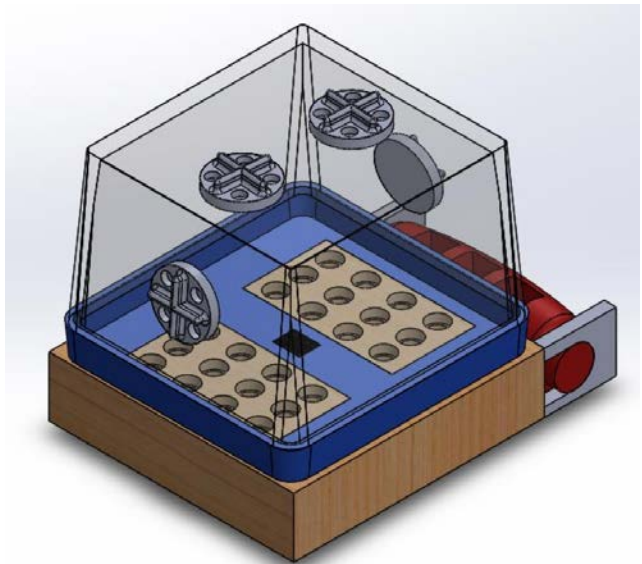


Fig. 2: Diseño del germinador utilizando SolidWorks™.

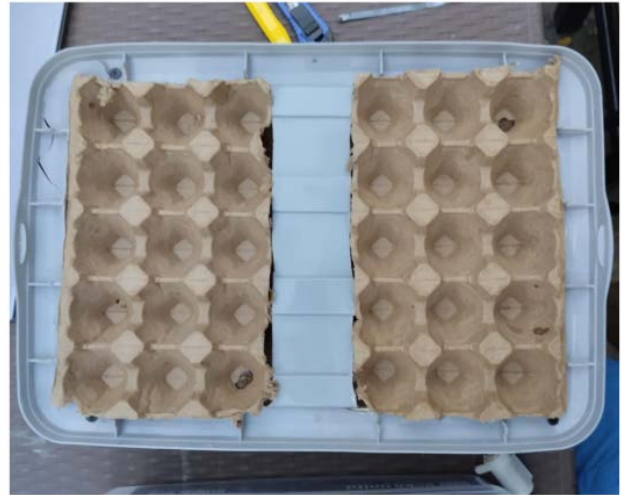


Fig. 3: Vista interior de la cámara de germinación.



Fig. 4: Prototipo finalizado.

En la figura 5, se muestra el circuito armado para el control del riego y ventilación. Los componentes son una fuente de alimentación, una bomba de agua, el sensor DTH-22 y una placa Arduino UNO, que incluye el código necesario para matener los niveles de humedad en un valor adecuado de acuerdo con lo establecido previamente.

C. Componentes hardware y software

En cuanto a los componentes electrónicos utilizados, se propone que sean económicos, por lo que se descartan plataformas de cómputo reportadas en el estado de la literatura como son una computadora de escritorio, un Raspberry Pi o un kit Jetson Nano. La lista de materiales es la siguiente:

- Módulo de ESP32-CAM
- Módulo de Cámara Arducam OV2640
- Sensor de temperatura y humedad DHT22.
- Mini Bomba de Agua RS-385
- Relevador 5V de 1 canal
- Kit de 8 leds de espectro completo.

En cuanto a la parte software, los módulos implementados al interior de ESP32-CAM son los siguientes:

- Módulo de control de condiciones del entorno. Este módulo monitorea continuamente el nivel de humedad, y cuando éste es bajo, envía los comandos para el encendido de la bomba. Cuando la humedad alcanza un nivel aceptable, se mandan los comandos necesarios para detener el suministro de agua.
- Módulo de procesamiento de imagen. Este módulo segmenta en tiempo real el brote, el cual es informado al usuario. Además, se incluye información acerca de total de semillas que han brotado. Los algoritmos implementados en este módulo tienen que ser muy ligeros, de tal forma que pueda ser llevados a cabo por el ESP32-CAM. De manera particular, el procesamiento involucra operaciones de umbralización local, operaciones morfológicas y detección de Blobs, lo cual permite detectar cuando un brote está en proceso avanzado de germinación. Se eligió la cámara Arducam debido al costo y al bajo consumo de potencia, lo que permite darle al sistema una autonomía de operación larga.
- Módulo de comunicación de resultados. Este módulo comunica a una aplicación externa el estado de la humedad del sistema y del estado de los brotes.

IV. RESULTADOS

A. Cultivos empleados

Las pruebas de germinación se llevaron a cabo con cinco tipos diferentes de semillas; cebolla, cilantro, chile, lechuga y frijol. Los cinco cultivos se sometieron a tres diferentes ambientes; luz directa de sol, luz indirecta de sol, y luz artificial UV. Las pruebas se llevaron a cabo en los primeros días de febrero, que en esta región la temperatura alcanzaba medias de 18° C como mínima, a 34° C como máxima pudiéndose considerar un clima “templado” en su mayor parte del día, pero siendo aun así un clima bastante cálido en el punto más alto del sol para diferentes cultivos y zonas:

- La cebolla es una planta que requiere climas templados y cálidos, con ambiente seco. No obstante, dado el

gran número de variedades existentes, posee una amplia adaptación, tanto a las condiciones climáticas como de suelo. Se necesita un período de elevada temperatura, acompañado de una gran luminosidad, para obtener un engrosamiento adecuado del bulbo. La temperatura mínima para la germinación de la cebolla se sitúa sobre los 4° C y la máxima en los 35° C. La temperatura óptima de crecimiento está entre los 14° y los 32° C. Una vez nacidas las plantitas resisten bastante bien el frío y las heladas primaverales. La cebolla se adapta a muy diversos tipos de suelos. No obstante, prefiere los suelos profundos, con buen contenido en materia orgánica y de textura suelta [18].

- El chile de preferencia debe sembrarse en suelos francos, pero produce muy bien en suelos pesados hasta suelos arenosos. Con respecto a la fecha de siembra, su mejor época es el trasplante en los meses de noviembre a enero pero se siembra todo el año. Estos meses son de menor incidencia de plagas y enfermedades [19].
- El cilantro es una planta anual de fácil y rápido crecimiento, prefiere el sol pero crece bastante bien en sombra parcial. La temperatura óptima de germinación varía de 15 a 30 °C y que los mejores resultados se obtienen con temperaturas de 27 y 22 °C durante el día y la noche, respectivamente, con un tiempo necesario para germinar de 10 a 21 días. El cilantro como una hortaliza de clima frío cuya temperatura media mensual de crecimiento debe ser de 15 a 18 °C; por lo cual, es probable que este cultivo requiere de días cortos y de noches con temperatura fresca [20].
- La lechuga requiere una temperatura óptima para su germinación de 20 °C. A temperaturas superiores a 30 °C no presentan germinación en la mayoría de cultivares o el proceso germinativo es retardado, muy común en condiciones tropicales. Por lo tanto, dependiendo del lugar y la época de siembra, la germinación puede ser errática o nula, comprometiendo el stand de plántulas al momento de la siembra [9]

B. Pruebas fuera del germinador automático

En una fase de experimentación previa, se sembraron 10 semillas de cada cultivo basado en las condiciones previamente descritas. En esta fase, se plantaron tanto fuera como dentro del germinador, con la finalidad de caracterizar las ventajas del uso de un germinador con condiciones controladas. Durante el desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas utilizando cuatro tipos de semillas: frijol, lenteja, cilantro y lechuga. Estas pruebas se realizaron tanto en el ambiente automatizado del germinador automático como en condiciones al aire.

En el entorno del germinador automático, se observó que las plantas comenzaron a brotar después de ocho días, siendo el frijol el primer tipo de semilla en emerger. Durante el período de crecimiento, se observó un desarrollo saludable de las plantas, caracterizado por hojas verdes y vigorosas. Es importante destacar que no se detectó presencia de plagas en este entorno, posiblemente debido a las condiciones controladas proporcionadas por el contenedor del germinador automático. Además, se enfatiza que el germinador automático operaba bajo sombra, utilizando exclusivamente

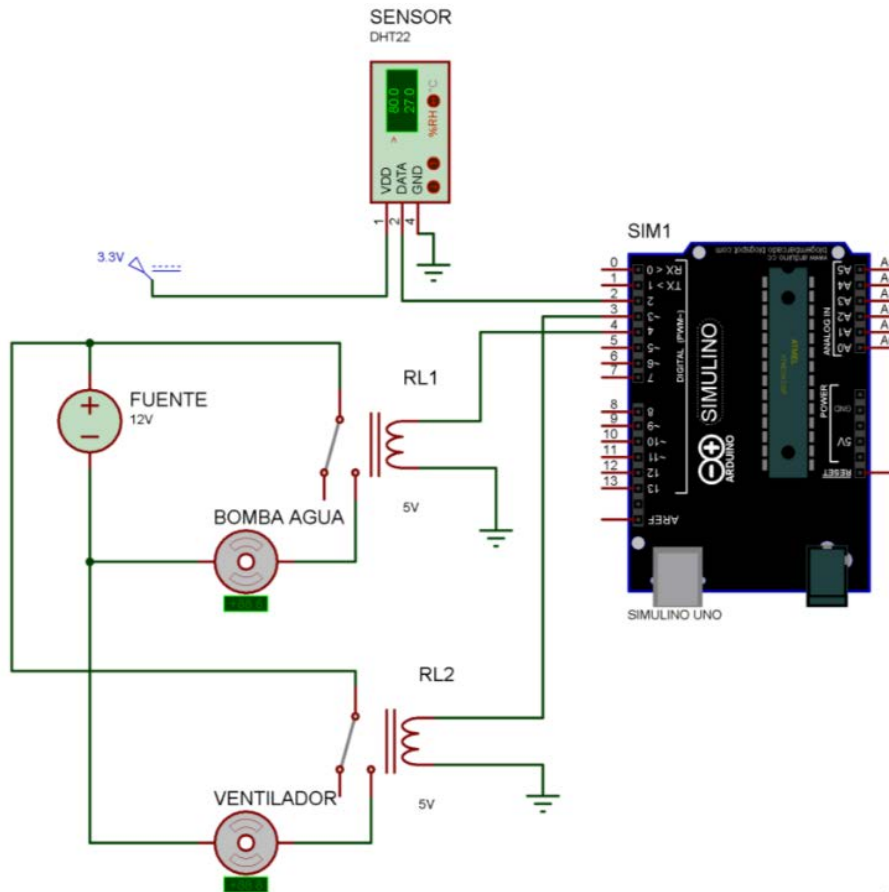


Fig. 5: Circuito eléctrico para control del riego y la ventilación

luz LED artificial para el proceso de fotosíntesis.

Por otro lado, se realizaron pruebas comparativas con las mismas cuatro semillas en condiciones al aire libre, tanto bajo sombra como bajo la exposición directa al sol. Se observó que las plantas que estuvieron expuestas al sol crecieron de manera significativa en altura, pero posteriormente murieron debido a la falta de humedad en el sustrato. Posiblemente la rápida evaporación del agua causada por la exposición solar contribuyó a la sequedad del suelo.

En contraste, las semillas que fueron cultivadas sin el uso del germinador automático, pero bajo sombra, mostraron un crecimiento más lento y prolongado. Este proceso fue caracterizado por la necesidad de riego manual, careciendo de un control y programación establecidos para el suministro de agua. En la figura 6, se muestran las condiciones de un cultivo seleccionado (específicamente lechuga), con su respectivo sustrato el cual fue dejado al aire libre.

C. Pruebas dentro del germinador automático

En la figura 7, se muestra evidencia del seguimiento de la germinación de brotes (el cultivo seleccionado es la cebolla, por ser la más resistente a las condiciones climatológicas de la región donde se hicieron las pruebas) al interior del sistema. Se pueden observar rectángulos verdes, resultados de detectar el brote en el espacio asignado a la semilla. A continuación se resume el seguimiento a lo largo de 25 días:

- Día 1. Inicia la experimentación, se han agregado las semillas de lechuga en 9 campos, esperando brotes de

estas como resultado del ambiente que le proporcionara el germinador automático.

- Día 5. Se puede observar en la fig. 7b la emergencia inicial de la germinación, marcada por la aparición del primer brote, representando así el inicio del proceso de desarrollo vegetal.
- Día 7. Se observan dos en la fig. 7c dos brotes emergentes, indicativos del inicio del proceso de germinación y crecimiento vegetal.
- Día 11. Se continúan observando dos brotes, siendo uno ligeramente más grande que el otro, lo que podría indicar un progreso diferencial en el desarrollo de las plantas.
- Día 9. Se continúan observando dos brotes, lo cual sugiere una estabilidad en el proceso de germinación y desarrollo de las plantas.
- Día 13. Se identifican tres plantas en el proceso de germinación, lo que sugiere buen avance en el crecimiento de los brotes detectados.
- Día 15. El análisis revela la persistencia de tres plantas en el proceso de germinación, evidenciando además un brote que ha desarrollado tres hojas.
- Día 17. El seguimiento visual indica la presencia de tres plantas en desarrollo, junto con la identificación de una maleza que ha surgido en el entorno.
- Día 19. Se logra observar cuatro plantas en crecimiento, acompañadas de la aparición de una maleza en el entorno.



(a) Cultivos con luz solar indirecta



(b) Cultivos con luz solar directa

Fig. 6: Pruebas realizadas sin utilizar el germinador automático exponiendo los brotes a luz directa e indirecta

- Día 21. Se identifican cinco plantas en crecimiento, lo cual sugiere que el ambiente proporcionado por el germinador es favorable para el crecimiento de las plantas.
- Día 23. Se observan cinco brotes que han crecido considerablemente, mostrando un mayor desarrollo en comparación con etapas anteriores.
- Día 25. Además de los cinco brotes en las áreas designadas para la siembra de semillas, se identifica un sexto brote en una ubicación no destinada para la siembra, lo cual plantea la posibilidad de que la semilla se haya desplazado debido al sistema de riego automático, generando así un resultado inesperado para la experimentación.

D. Detección de brotes mediante visión por computadora

Para detectar los brotes, el sistema captura imágenes cada determinado tiempo (para este caso en particular, cada 12 horas). Una vez capturada la imagen, se utiliza el modelo YOLO para detectar si la semilla ha brotado [21]. El modelo YOLO está basado en redes neuronales, y en este caso en particular se encarga de predecir si en la imagen obtenida

hay un brote, y marcarlo. Los pasos requeridos para obtener dicha información son:

- Cargar la imagen: Se carga la imagen en la que se desea detectar los brotes de plantas utilizando `cv2.imread()`.
- Cargar el modelo pre-entrenado YOLO: Se carga el modelo pre-entrenado de detección de objetos YOLO, que consiste en un archivo de pesos (`yolov3.weights`) y un archivo de configuración (`yolov3.cfg`) utilizando `cv2.dnn.readNet()`.
- Definir las clases detectables: Se cargan las clases de objetos detectables por el modelo YOLO desde un archivo (`coco.names`) utilizando `open()` y `read().splitlines()`.
- Obtener las capas de salida del modelo: Se obtienen las capas de salida del modelo YOLO utilizando `modelo.getUnconnectedOutLayersNames()`.
- Preprocesamiento de la imagen: La imagen se redimensiona y normaliza los valores de píxeles utilizando `cv2.dnn.blobFromImage()`.
- Establecer la entrada para el modelo: Se establece la entrada para el modelo YOLO utilizando `modelo.setInput()`.
- Obtener las detecciones de la red neuronal: Se obtienen las detecciones de objetos en la imagen utilizando `modelo.forward()`.
- Mostrar las detecciones en la imagen: Para cada detección de objeto, se verifica si corresponde a un brote de planta con una confianza mayor al 50%. Si es así, se dibuja un rectángulo alrededor del brote de planta detectado en la imagen utilizando `cv2.rectangle()`.
- Mostrar la imagen con las detecciones de plantas: La imagen con los brotes de plantas detectados se muestra en una ventana utilizando `cv2.imshow()`.

E. Puesta en operación del germinador automático

En la figura 8, se muestra la vista interior del germinador, donde la tonalidad morada se debe al encendido de los leds utilizados para dotar de luz a los brotes. En la figura 9, se muestra el primer brote obtenido después de 8 días de monitoreo. Posterior a este periodo, se dejaron crecer los brotes otros 8 días para su trasplante. En la versión actual, el usuario establece la humedad deseada, se sugiere que sea del 60%. Cuando la humedad está por debajo de este umbral, se inicia un proceso de goteo de la bomba de agua, el cual continúa hasta alcanzar o superar dicho umbral en la próxima lectura. En el caso de la temperatura, dado que actualmente no es posible controlarla, solamente se lleva el registro de dicha variable.

En la figura 10, se muestra el resultado de la implementación de módulo de visión para detectar en una primera instancia las semillas que presentan brotes, y posteriormente detectar el número de hojas de los brotes obtenidos mediante el germinador. Como resultado de esta implementación, el sistema almacena de manera interna el histórico del número de plantas que han brotado desde su puesta en operación. Esta evolución se puede generar de manera gráfica, y un ejemplo de esto se muestra en la figura 11. No se realizó una comparativa de las semillas germinadas sin el sistema, debido a que priorizó la implementación de un sistema donde

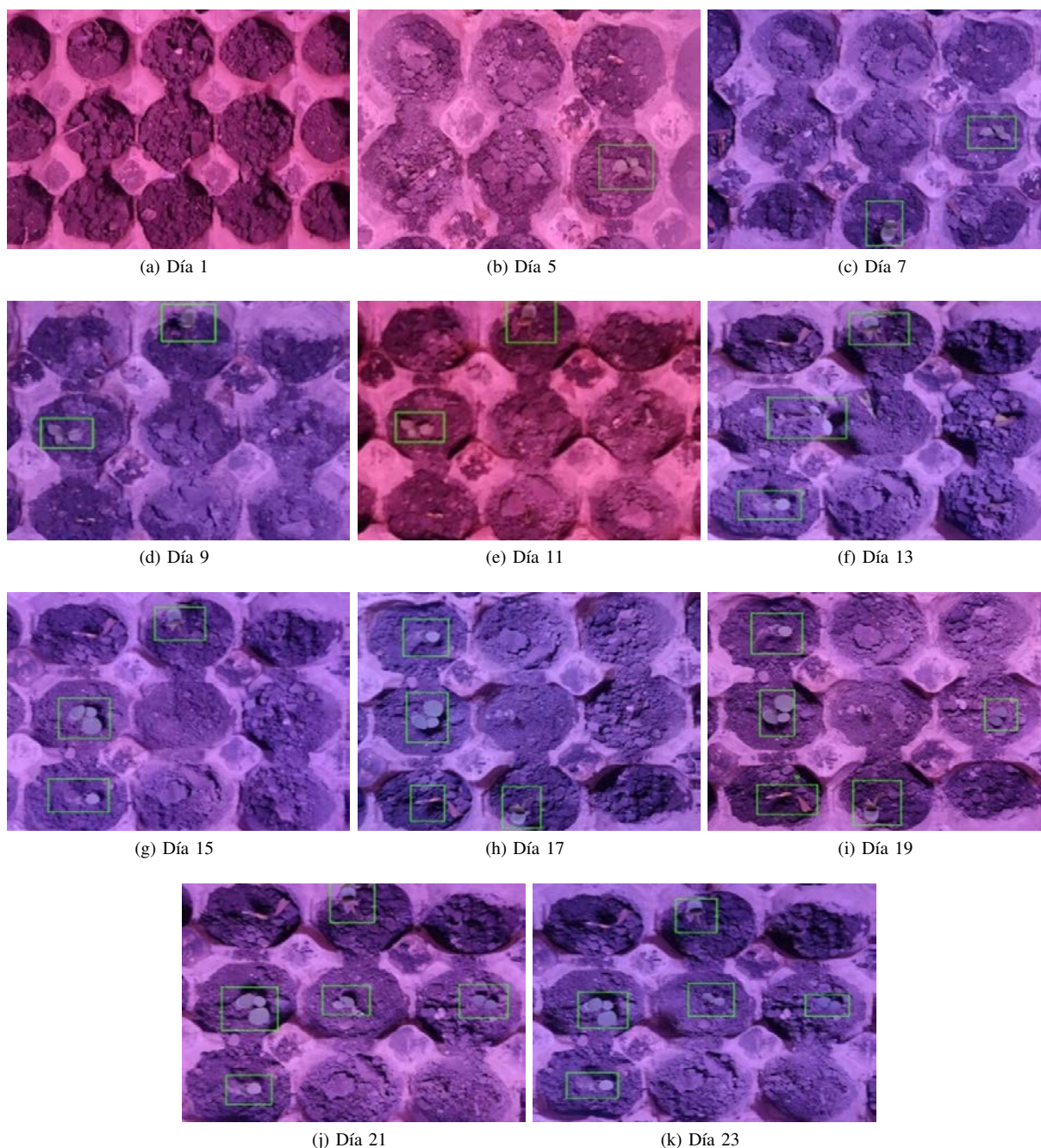


Fig. 7: Monitoreo embebido de cultivo de lechuga a lo largo de 25 días

el usuario no esté humedeciendo el sustrato ni verificando el estado de germinación de las semillas.

F. Monitoreo remoto del entorno y control de condiciones ambientales

Como resultado del monitoreo, es posible generar gráficas que muestran el comportamiento de la temperatura y humedad al interior del germinador. En la figura 12, se muestra la evolución de la temperatura a lo largo del día, y la respuesta del germinador para controlar los niveles de humedad aceptables a lo largo del día mediante el bombeo del agua. Cuando la humedad cae por debajo del umbral mínimo (60%), la bomba inicia un ciclo de goteo de 2 minutos y se apaga, y su efecto es notorio en la próxima lectura,



Fig. 8: Vista interior del germinador en operación con los leds encendidos.

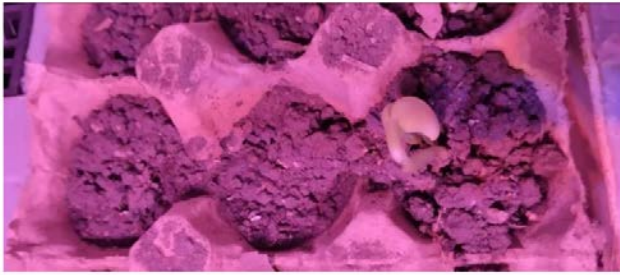


Fig. 9: Primer brote de frijol en el germinador propuesto.

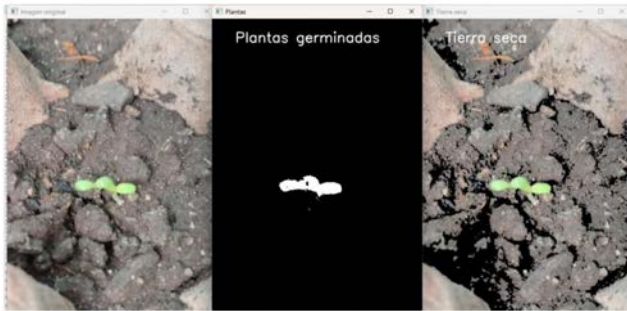


Fig. 10: Segmentación de las hojas de un brote de frijol por el módulo de visión.

donde esta humedad vuelve a estar por encima del nivel mínimo. De manera similar, en la figura 13, se muestran la temperatura y humedad promedio diaria capturadas durante una semana, que permite evaluar la respuesta del control de humedad al interior del germinador.

Los resultados de los experimentos reportados en este artículo fueron obtenidos en condiciones fuera del laboratorio. El germinador fue ubicado al interior de una casa habitación, con las condiciones de temperatura y humedad normales para la fecha del año en donde se llevó a cabo la experimentación. Una recomendación que se debe dar a conocer al usuario final es la ubicación del dispositivo en un lugar fresco, seco, con luz natural pero alejado de la luz solar directa. También se debe advertir que los resultados pueden variar dependiendo de las climatológicas externas. Otra recomendación es que se recomienda verificar de manera continua la conexión a Internet, ya que de haber

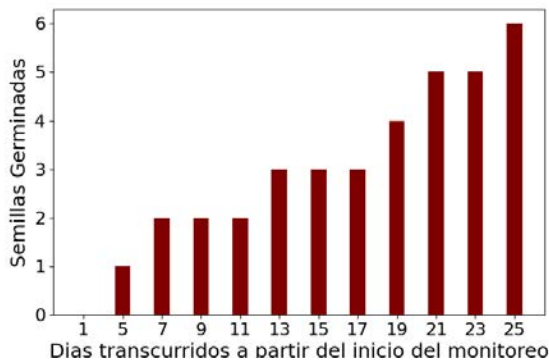


Fig. 11: Monitoreo de semillas germinadas a lo largo de un ciclo de prueba

una falla continua, esto podría ocasionar que las alertas no sean recibidas por el usuario en caso de un problema de crecimiento de los brotes.

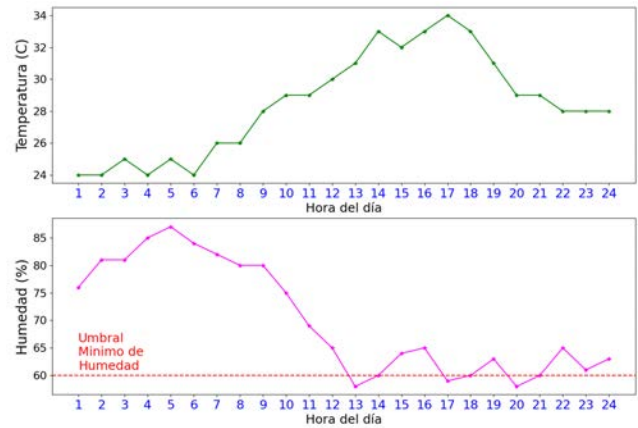


Fig. 12: Prueba del monitoreo temperatura y humedad del germinador automático a lo largo de un día específico del ciclo de prueba

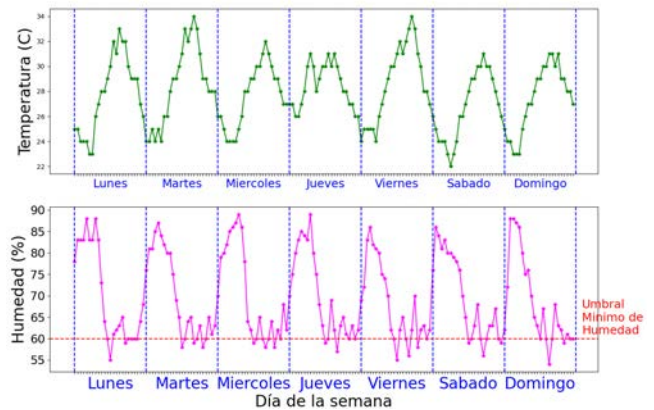


Fig. 13: Prueba del monitoreo temperatura y humedad del germinador automático a lo largo de una semana específica del ciclo de prueba

G. Interfaz de monitoreo remoto

El usuario final tiene dos alternativas para poder hacer el monitoreo del estado de las semillas al interior del germinador:

- Mediante el uso de una aplicación de escritorio desarrollada en python con interfaces implementadas en PyQt6, se despliega la información del estado del germinador. Para esto requiere computadora con conexión a Internet.
- Mediante el uso de una aplicación móvil, que hace uso de notificaciones para informar al usuario el estado del germinador. La ventaja de la aplicación móvil es que no se requiere de una computadora para su acceso, aunque si la conexión a Internet.

La información mostrada es similar en ambas aplicaciones. Por un lado es posible consultar de manera remota las condiciones actuales del germinador (temperatura, humedad y semillas germinadas), además de desplegar el histórico de comportamiento de dichas variables. De manera

manual es posible establecer el umbral de humedad, así como los intervalos de monitoreo (que por defecto están establecidos por hora, pero pueden ser cambiados dependiendo de lo que el usuario requiera). En la figura 14, se muestra la distribución de componentes de interfaz de usuario de la aplicación móvil para el monitoreo del germinado de las semillas. En la figura 15, se muestra la distribución de componentes de interfaz de usuario de la aplicación de escritorio para el monitoreo del germinado de las semillas. Ambas aplicaciones se conectan con un servidor, el cual se encarga de la comunicación entre el sistema embebido en el dispositivo de monitoreo y la aplicación de escritorio o móvil. Ambas aplicaciones permiten al usuario confirmar la duración del histórico de los monitoreos, Por defecto, el monitoreo semana esta configurado para 7 días, pero se puede personalizar para que abarque un periodo arbitrario de días, desde un mínimo de 3 días y hasta un máximo de 28 días. En el caso del monitoreo diario, este se adapta a lo solicitado por el usuario para monitorear por horas, o incluso establecer la separación por minutos (una separación mínima de 3 minutos entre las lecturas) y hasta un máximo de 120 minutos como separación entre las lecturas.

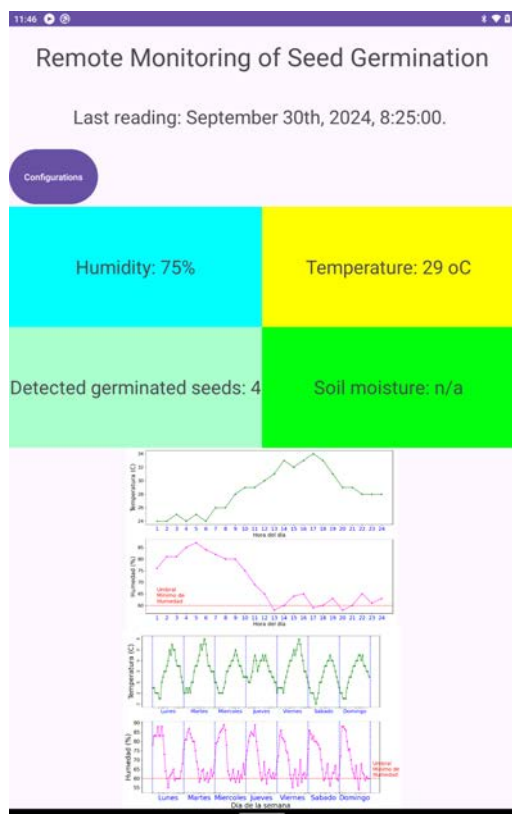


Fig. 14: Aplicación móvil de monitoreo remoto del estado de los brotes

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El germinador automático propuesto ofrece un control preciso y constante de las condiciones ambientales, lo que contribuye a un crecimiento saludable de las plantas. La capacidad de monitoreo visual proporcionada por la cámara ESP32-CAM y los algoritmos de análisis de imagen en Python permite la observación del proceso de germinación y

crecimiento de las plantas, facilitando la detección temprana de problemas y la toma de decisiones informadas.

El diseño y la implementación del germinador automático representan un avance significativo en el campo de la agricultura urbana y doméstica. A través de la integración de tecnologías como sensores ambientales, algoritmos de visión por computadora y sistemas de control automatizado, se ha demostrado la viabilidad y la eficacia de este sistema para facilitar el cultivo de plantas en entornos controlados.

El uso del sistema de riego automatizado tuvo un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas dentro del germinador. Las plantas mostraron un crecimiento más vigoroso y saludable en comparación con aquellas no expuestas al sistema automatizado de riego. Durante el período de observación, se pudo constatar que el germinador automático demostró una notable precisión en el control ambiental. El sistema logró mantener de manera efectiva condiciones estables de temperatura, humedad y luz, elementos críticos para el desarrollo saludable de las plantas. La implementación de un sistema de riego automatizado, junto con la activación del ventilador cuando se detectaba un exceso de humedad, contribuyó significativamente a mantener la humedad del sustrato en niveles óptimos.

Durante el proceso de investigación y desarrollo, se ha comprobado que el germinador automático ofrece un control constante de las condiciones ambientales, lo que contribuye a un crecimiento saludable y óptimo de las plantas. La capacidad de monitoreo visual proporcionada por la cámara ESP32-CAM y los algoritmos de análisis de imagen en Python ha permitido la observación del proceso de germinación y crecimiento de las plantas, facilitando la detección temprana de problemas y la toma de decisiones informadas.

Además, se ha evidenciado que el germinador automático tiene el potencial de democratizar el cultivo de plantas al hacerlo más accesible y fácil de realizar para una amplia gama de usuarios, incluidos aquellos con espacios limitados o sin experiencia previa en agricultura. Esto podría tener un impacto positivo en la seguridad alimentaria, la salud y el bienestar de las comunidades al promover la producción local y el consumo de alimentos frescos y nutritivos.

En resumen, el germinador automático representa una herramienta innovadora y prometedora para la agricultura urbana y doméstica, con el potencial de mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la accesibilidad del cultivo de plantas en entornos urbanos y domésticos.

Dentro de las potenciales mejoras de este proyecto son la evaluación exhaustiva y minuciosa del desempeño del modelo Yolo, ya que en las pruebas reportadas en este artículo no se han encontrado fallas, pero tampoco se garantiza que sea infalible.

El sistema propuesto puede tener aplicaciones variadas que van desde evaluar las mismas condiciones de temperatura/humedad/iluminación con diferentes variedades de semillas, o varias las condiciones con sobre la misma variedad de semilla y con esto lograr una caracterización de las condiciones idóneas que permitan obtener la mayor cantidad de brotes en el menor tiempo posible. Con respecto al módulo de visión, se desea determinar de manera precisa el número de hojas del brote, con la finalidad de indicar al usuario del momento adecuado para hacer el trasplante o se

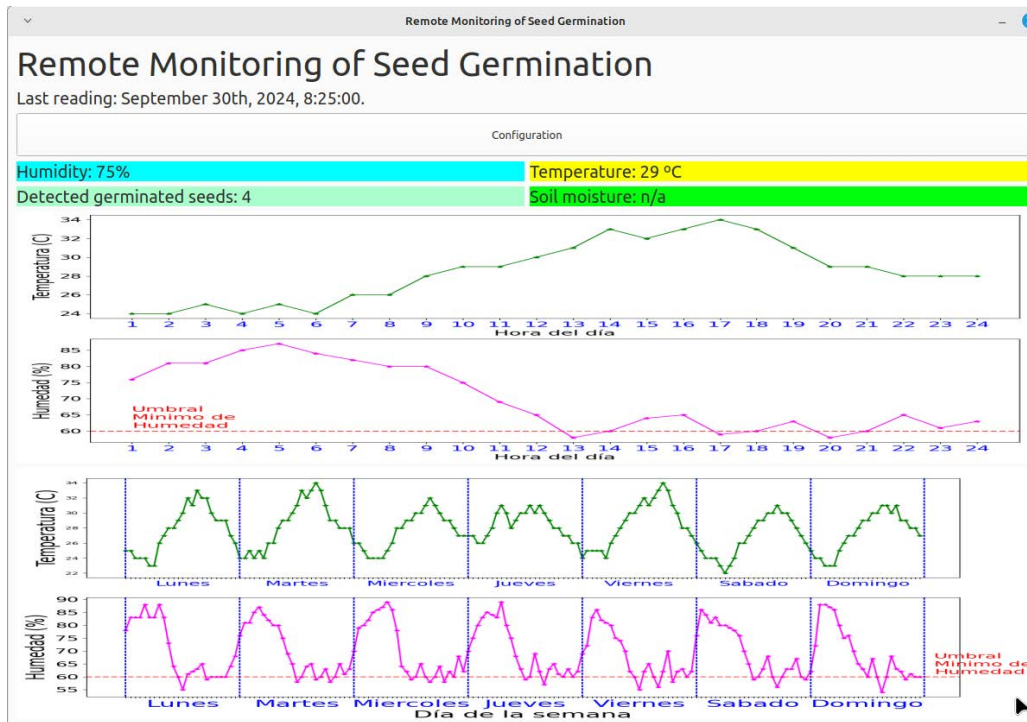


Fig. 15: Aplicación de escritorio para el monitoreo remoto del estado de los brotes

requiera atención especial.

REFERENCES

[1] Organización Panamericana de la Salud, “Alimentos y bebidas ultraprocesados en América Latina: tendencias, efecto sobre la obesidad e implicaciones para las políticas públicas,” 2015, publications. [Online]. Available: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/7698/9789275318645_esp.pdf?sequence=5

[2] —, “Alimentos y bebidas ultraprocesados en América Latina: ventas, fuentes, perfiles de nutrientes e implicaciones,” 2019, publications. [Online]. Available: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/51523/9789275320327_spa.pdf?sequence=1

[3] J. I. Macdiarmid, “Seasonality and dietary requirements: will eating seasonal food contribute to health and environmental sustainability?” *Proceedings of the Nutrition Society*, vol. 73, no. 3, pp. 368–375, 2014.

[4] E. García and F. Flego, “Agricultura de precisión,” *Ciencia y tecnología*, pp. 99+, 2024/4/4/ 2008, 99. [Online]. Available: <https://link.gale.com/apps/doc/A381667270/IFME?u=anon~c514f2b1&sid=googleScholar&xid=a5e8395e>

[5] J. Gómez-Camperos, H. Jaramillo, and G. Guerrero-Gómez, “Técnicas de procesamiento digital de imágenes para detección de plagas y enfermedades en cultivos: una revisión,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 24, no. 1, oct. 2021. [Online]. Available: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/10973

[6] H. Hartmann and D. Kester, *Hartmann and Kester’s Plant Propagation: Principles and Practices*, ser. Always learning. Prentice Hall, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=SNtXAAAAYAAJ>

[7] J. Nau, *Ball Culture Guide: The Encyclopedia of Seed Germination*. Ball Pub., 1999. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=AUsjAQAAMAAJ>

[8] J. M. P. Villamil and F. P. García, *Germinación de semillas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998.

[9] H. d. S. Lemos Neto, M. d. A. Guimarães, B. d. N. Silva, and S. Medeiros Filho, “Germination and emergence of lettuce at elevated temperatures,” *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 12, no. 3, p. 677–684, Sep. 2018. [Online]. Available: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/7720

[10] A. Srinivasan, *Handbook of Precision Agriculture: Principles and Applications*. CRC Press, 2006. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=EUhZDwAAQBAJ>

[11] A. Castrignano, G. Buttafuoco, R. Khosla, A. Mouazen, D. Moshou, and O. Naud, *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming*. Elsevier Science, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.com.mx/books?id=kyzJDwAAQBAJ>

[12] R. R. Urquijo and M. J. Marinelli, “Sistema de monitoreo de una cámara de germinación hidropónica con iot basado en raspberry pi,” in *IV Simposio Argentino de GRANdes DATos (AGRANDA 2018)-JAIIO 47 (CABA, 2018)*, 2018.

[13] M. Wagner, D. Demilly, S. Ducournau, C. Dürr, and J. Léchappé, “Computer vision for monitoring seed germination from dry state to young seedlings,” *Seed Test*, vol. 142, pp. 49–51, 2011.

[14] M. Trivedi, A. Gupta et al., “Automatic monitoring of the growth of plants using deep learning-based leaf segmentation,” *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 1–9, 2021.

[15] Q. Peng, L. Tu, Y. Wu, Z. Yu, G. Tang, and W. Song, “Automatic monitoring system for seed germination test based on deep learning,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2022, p. 4678316, Oct 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/4678316>

[16] R. R. Donapati, R. Cheruku, and P. Kodali, “Real-time seed detection and germination analysis in precision agriculture: A fusion model with u-net and cnn on jetson nano,” *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*, vol. 1, no. 2, pp. 145–155, 2023. [Online]. Available: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1166689761>

[17] M. Carrara, P. Catania, F. Pipitone, M. Vallone, S. Piraino, M. Salvia, and C. Paolino, “Temperature and relative humidity distribution inside a greenhouse using wireless sensors,” *Acta Hort*, vol. 801, no. 1, pp. 595–599, 2008.

[18] J. Japón Quintero, *Cultivo extensivo de la cebolla*, ser. Hojas divulgadoras (MAPA) ; 18. Madrid: Ministerio de Agricultura, 1982.

[19] J. M. Crispin Mora, “Crecimiento y producción de Chile jalapeño (*capsicum annum* L.), bajo fertilización orgánica en casa sombra y campo.”

[20] J. Hernández Dávila, “Crecimiento y desarrollo del cilantro coriandrum sativum L. por efecto del fotoperíodo y la temperatura y su control con fitoreguladores,” Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2003.

[21] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” 2015, cite arxiv:1506.02640. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1506.02640>