

**UTILIZACIÓN DE LAS TICS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CRECIMIENTO DE
HORTALIZAS EN INVERNADEROS URBANOS**

Elaborado por:

Eduard Galvis Restrepo

Tutora:

Lina Maria Chacón

Universidad Ean

Especialización en Gerencia de Proyectos

Seminario de Investigación

Bogotá D.C., Colombia

Noviembre, 2023

Título

Utilización de las TICs para la optimización del crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos.

Resumen

El proyecto de investigación propuesto está orientado a la Utilización de las TICs mediante el desarrollo de una implementación de infraestructura de un invernadero inteligente para cultivos de agricultura urbana, en el cual se implementa un sistema que incluye el monitoreo de variables en la interacción agua-suelo – planta – atmósfera, variables tales como: humedad relativa, temperatura, conductividad eléctrica, intensidad lumínica, radiación solar y concentración de CO₂. Adicionalmente se implementa un subsistema de instrumentación y adquisición de datos, que involucra la posibilidad de enviar señales a actuadores, tales como servomotores empleados para la motorización del techo desplegable del invernadero o bombas de aguas utilizadas para el sistema de riego de las plantas.

Para incorporar la tecnología de la automatización se utilizan dispositivos electrónicos (sistemas embebidos), sobre los que se desarrolla un algoritmo computacional con estrategias de control inteligente para regular la cantidad de agua para regar las plantas del invernadero teniendo como base el monitoreo de las variables atmosféricas, así como la información del suelo, estado de las plantas y además de conocimiento (experiencia) de buenas prácticas agronómicas de un cultivo en particular.

Palabras clave: Agricultura urbana, invernadero, automatización, factores climáticos.

Abstract

The proposed project is mainly focus on the use of ICTs through the design of an infrastructure of a smart greenhouse for urban agriculture crops. The system includes the monitoring of variables in the water-soil– plant – atmosphere interaction. Variables such as relative humidity, temperature, electrical conductivity, light intensity, solar radiation and CO₂ concentration are considered. Additionally, an instrumentation and data acquisition subsystem is implemented. The subsystem considers the option to send signals to actuators, such as servomotors used to motor the deployable roof of the greenhouse and also water pumps used for the plant irrigation system.

To incorporate automation technology, the system uses electronic devices (embedded systems). Additionally, a computational algorithm is developed with intelligent control strategies to regulate the amount of water of the irrigation process, so the greenhouse plants are irrigation is based on the monitoring of atmospheric variables as well as information on the soil, state of the plants and also knowledge (experience) of good agronomic practices of a particular crop.

Keywords: Urban agriculture, greenhouse automation, climatic factors.

Problema de Investigación

Antecedentes

Los invernaderos son lugares típicamente cerrados donde se puede obtener un microclima mediante el control de la temperatura, de la humedad y de otros factores ambientales (Aggarwal et al., 2023). Es de notar que, en muchos de los invernaderos operativos en Colombia, usualmente el control de algunas de las variables relacionadas con la interacción agua-suelo – planta – atmósfera, se realiza de forma manual y con base en el conocimiento /experiencia de personal calificado, considerando adicionalmente, las condiciones climáticas, el estado de las plantas y el estado del suelo o sustrato donde están sembradas las plantas.

Particularmente en Colombia, hay alrededor de 7.700 hectáreas de invernaderos, en las cuales se cultivan principalmente ornamentales, de acuerdo con Asocolflores (Gómez Galiano, 2020). En este sentido, en Colombia cultivar hortalizas y flores en invernadero se ha convertido en una opción para proteger a la producción agrícola de plagas y enfermedades, así mismo ha servido como herramienta para asegurar la producción anualmente (Gómez Galiano, 2020). Es innegable que la producción de hortalizas es fundamental para abastecer la demanda creciente de alimentos frescos en las áreas urbanas (Cepal, 2013). Sin embargo, el cultivo de hortalizas enfrenta retos significativos relacionados con las condiciones climáticas variables, la disponibilidad de recursos hídricos y la necesidad de optimizar la producción para satisfacer las necesidades de una población en constante crecimiento.

En el caso específico de la Universidad Ean, en el año 2021 se creó el Invernadero Ean, el cual se ha concebido como un laboratorio vivo en el que, además de obtener alimentos orgánicos, diversos y saludables, se buscan oportunidades para transformar las prácticas agrícolas a partir del uso de diferentes herramientas tecnológicas. El invernadero es un espacio académico útil para facilitar la comprensión de cómo funciona la agricultura urbana y las necesidades que se afrontan (Universidad Ean, 2021). Adicionalmente está estructurado como un espacio para que estudiantes y profesores experimenten en busca de ideas innovadoras de fácil implementación en procesos agrícolas.

Descripción del problema

Los cultivos en huertos urbanos ofrecen una solución prometedora para abordar desafíos asociados a la seguridad alimentaria en las ciudades, al proporcionar un entorno controlado para el cultivo de hortalizas. No obstante, aún existen obstáculos para lograr un crecimiento óptimo y sostenible en estos invernaderos. Algunos de los problemas identificados en el cultivo de hortalizas en sistemas agrícolas urbanos, son los siguientes:

- Control Inadecuado del Clima ya que las fluctuaciones de temperatura, humedad y luz solar dentro de los invernaderos pueden afectar negativamente el crecimiento de las hortalizas.
- Uso inapropiado de recursos, donde la gestión del agua y los nutrientes puede ser ineficiente, lo que resulta en un desperdicio de recursos, con un impacto negativo en el medio ambiente.

- No disposición de herramientas de monitoreo, lo cual dificulta la toma de decisiones basadas en los datos, para optimizar el crecimiento de las hortalizas.
- Deficiencia en el suministro de CO₂. Bajo condiciones de invernadero, niveles de CO₂ entre 1.000 y 2.000 ppm tienen una influencia directa sobre la tasa fotosintética, aunque no deben superarse los 3.000 ppm, ya que pueden generar toxicidad en algunos cultivos.
- Pérdidas de Cosecha por causa de las enfermedades y plagas, que pueden amenazar la producción de hortalizas en los invernaderos.

En este sentido, los invernaderos urbanos enfrentan desafíos únicos en términos de control de las variables en la interacción agua-suelo-planta-atmósfera. Es decir, en el control de variables como temperatura, humedad, iluminación y otros factores deben ser controlados y optimizados para asegurar un crecimiento óptimo de las hortalizas (Bacco et al., 2018). Adicionalmente, la variabilidad de un clima urbano como el de Bogotá y las limitaciones de espacio pueden dificultar este control de dichas variables. Además, la falta de información en tiempo real sobre las condiciones del invernadero y la falta de automatización pueden llevar a ineficiencias y pérdidas de cultivo (Walter et al., 2017).

La hipótesis planteada en el proyecto, propone que es posible mejorar el crecimiento de las hortalizas en cultivos urbanos en invernaderos de Colombia, mediante el uso de una estrategia de un algoritmo computacional que contribuye a regular la cantidad de agua utilizada en el riego de las plantas de un huerto urbano, teniendo como base el monitoreo de las variables en la interacción agua-suelo-planta-atmósfera.

Pregunta de investigación

El presente proyecto de base tecnológica busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

En el contexto de uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) la agricultura urbana en Colombia, *¿Son realmente las TICs un aliado que ayuda a producir efectos positivos en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de hortalizas en los sistemas agrícolas urbanos?*

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado basado en las TICs, que involucra el monitoreo de variables en la interacción agua-suelo- planta-atmosfera, para optimizar en el crecimiento de hortalizas en los sistemas agrícolas urbanos.

Objetivos específicos

- Elaborar el estado del arte del proyecto en el contexto de la aplicación de TICs en la agricultura y específicamente en invernaderos urbanos.
- Construir el prototipo del subsistema de instrumentación y adquisición de datos, que involucra variables en la interacción agua-suelo- planta-atmosfera.
- Diseñar un algoritmo computacional para regular y optimizar la cantidad de agua para evitar el stress hídrico de un tipo específico de plantas cultivadas en un invernadero urbano.
- Desarrollar un proceso de análisis de los datos asociados con las variables en la interacción agua-suelo-planta-atmosfera, cuyos valores han sido registrados en una base de datos a lo largo de periodos de siembra y cosecha.

Justificación

Realizar la investigación propuesta es conveniente, ya que actualmente se ha construido un invernadero en la universidad Ean, el cual se ha empezado a instrumentar y es actualmente visto como un laboratorio experimental donde estudiantes de diferentes áreas, lo utilizan para fomentar iniciativas de investigación formativa en el contexto de una visión global de la agricultura urbana como opción para contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y reducir los impactos del cambio climático.

Por otro lado, el proyecto de Utilización de las TICs para la Optimización del Crecimiento de Hortalizas en Invernaderos Urbanos, aporta significativamente al ámbito teórico al explorar la convergencia entre la tecnología de la información y la comunicación y la agricultura urbana. El estudio podría generar nuevas ideas al examinar cómo la aplicación estratégica de las TICs puede influir en la productividad y la eficiencia en la producción de hortalizas en entornos urbanos, abordando así un área de investigación emergente, como lo es la agricultura 4.0. Desde la perspectiva metodológica, la recopilación y el análisis de datos generados por las variables sensadas, posibilitan el identificar patrones, correlaciones y mejores prácticas para optimizar el crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos. En este sentido, la utilidad metodológica del proyecto radica en su capacidad para ofrecer un potencial marco integral que combina la agricultura sostenible y la innovación tecnológica, proporcionando hallazgos prácticos para el diseño y la gestión de sistemas de cultivos en huertos urbanos.

Dentro de las implicaciones prácticas del proyecto, es de resaltar que, desarrollar un proyecto para optimizar en el crecimiento de hortalizas en los sistemas agrícolas urbanos

que involucra un sistema de supervisión y control que utiliza actuadores para regular y optimizar el riego de las plantas del invernadero, puede optimizar el uso de recursos disponibles. Se debe tener en cuenta que actualmente el riego del invernadero se realiza de forma programada, es decir, dos veces al día con dos intervalos de tiempo de 10 minutos, sin tener en cuenta la cantidad y variedad de plantaciones que hay en las 8 camas con las que actualmente se cuentan en las instalaciones de la Universidad Ean.

Finalmente, cabe mencionar que el proyecto de investigación propuesto, tiene una estrecha relación con la especialización en Gerencia de Proyectos, ya que la implementación de este tipo de proyectos implica la gestión misma de diversos aspectos que son fundamentales en el ámbito de la gerencia de proyectos. Dentro de las áreas de relación del proyecto con la gerencia de de proyectos, se incluyen: (1) Planificación y Ejecución del Proyecto para optimizar el crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos requerirá una planificación detallada, la identificación de recursos necesarios y la ejecución coordinada de actividades (2) Gestión de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y (3) Gestión de Riesgos para los posibles desafíos relacionados con la implementación de las TICs en el contexto de la agricultura urbana.

Marco institucional

El proyecto se lleva a cabo en la Universidad EAN, la cual es una institución educativa ubicada en Bogotá, Colombia, con más de 56 años de experiencia en la formación de profesionales en diversas áreas del conocimiento. Actualmente, la universidad cuenta con más de 10.000 estudiantes en modalidades presencial y virtual. En la oferta académica se incluyen pregrados, posgrados, programas de educación continua y programas de formación técnica. Dentro de sus programas se incluyen algunos relacionados con administración de empresas, ciencias sociales, economía e ingeniería. Cabe mencionar que la Universidad EAN fomenta el desarrollo de la investigación en diversas áreas y promueve la generación de conocimiento a través de grupos de investigación y proyectos que tienen un impacto social significativo. A continuación, la misión y visión institucional, así como la propuesta de valor de la institución:

Misión

La misión de la Universidad Ean es “contribuir a la formación integral de las personas y estimular su aptitud emprendedora, de tal forma que su acción coadyuve al desarrollo económico y social de los pueblos”.

Visión

Para el 2027, la universidad Ean será un referente en la formación e investigación en emprendimiento sostenible, mediante una entrega innovadora del conocimiento».

Propuesta de valor

Desarrollar capacidades para solucionar situaciones efectivas, acordes al proyecto de vida individual, que también mejoren la sociedad y el entorno.

Por otro lado, con respecto al modelo educativo, la Universidad Ean se caracteriza por tener un enfoque innovador y orientado al emprendimiento. A continuación, se muestran aspectos claves del modelo educativo (Universidad Ean, 2022):

- Enfoque Emprendedor y pensamiento sostenible: Se busca promover el espíritu emprendedor entre sus estudiantes. Se integra el emprendimiento como un componente central en sus programas académicos, fomentando la creatividad, la innovación y la capacidad de iniciar y gestionar proyectos empresariales de impacto social con visión de sostenibilidad. Se incorporan principios de responsabilidad social y ambiental en la formación de los estudiantes, buscando que se conviertan en profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible y la responsabilidad ética en sus prácticas empresariales.
- Equidad. La universidad está comprometida con convertir la educación superior en un espacio inclusivo y neutral frente a las diversas diferencias sociales, culturales y económicas presentes entre los actores involucrados en el proceso educativo. Se reconoce que estas disparidades provienen de contextos externos a la institución, pero la universidad asume la responsabilidad de abordarlas cuando los estudiantes están inmersos en el entorno educativo de la Universidad EAN.
- Innovación. Existe un compromiso institucional con la integración de la innovación en su modelo educativo, buscando potenciar la capacidad emprendedora de sus estudiantes y prepararlos para enfrentar los desafíos y oportunidades cambiantes en el mundo

empresarial. La implementación de plataformas tecnológicas a medida subraya la adaptabilidad de la universidad hacia las tendencias y herramientas actuales, facilitando así un entorno propicio para el desarrollo de habilidades innovadoras.

- Pensamiento Crítico. la formulación de competencias se fundamenta en la integración de dos componentes transversales esenciales: el pensamiento crítico y el pensamiento sistémico. El Modelo Educativo se erige sobre la premisa fundamental de cultivar en los estudiantes el juicio crítico. Esta perspectiva sostiene que aquellos capaces de tomar decisiones basadas en argumentos poseen una mayor capacidad para comprender diversos contextos, relacionarse efectivamente con los demás y realizar contribuciones auténticas a la sociedad (Arenas, 2007).

Finalmente, cabe mencionar que dentro de las políticas generales del proyecto educativo institucional (PEI) se incluyen: el emprendimiento sostenible, la formación integral de los estudiantes, la investigación aplicada a la resolución de problemas de las organizaciones, la consideración de la Comunidad de amistad como principal activo, los procesos académicos como eje central del proceso educativo, ya que estos últimos engloban las acciones actividades que se desarrollan en cuanto al modelo pedagógico institucional. Adicionalmente la gestión administrativa y la gobernanza plantean que la Universidad será dirigida como una empresa del conocimiento, donde prevalece la calidad académica, la gestión por procesos y el estímulo permanente hacia los buenos resultados (Universidad Ean, 2022).

Marco Teórico

Es de reconocer que la agricultura ha proporcionado el sustento básico para la supervivencia de la humanidad, permitiendo la producción de alimentos a través del cultivo de plantas y la cría de animales (Maroto, 2014). Con respecto al uso de las tecnologías de la información para mejorar los procesos en área de agricultura, se pueden encontrar múltiples trabajos en los últimos 20 años, por ejemplo, en (Odame et al., 2020) se muestra el rol que la tecnología y la innovación han jugado en beneficio de la agricultura urbana. Por su parte, (Yang et al., 2021) presenta resumen de estudios más relevantes en torno al tema de agricultura inteligente en la era de la agricultura 4.0 haciendo un particular énfasis en los desafíos en torno al tema de la seguridad. En (Bacco et al., 2019) se menciona acerca de los desafíos técnicos abiertos resaltando los relacionados con las oportunidades de mejora en analizar las técnicas de análisis de datos, así como el diseño de algoritmos más cercanos a las fuentes de los datos.

La agricultura urbana es la práctica de cultivar alimentos en áreas urbanas. Se puede realizar en tejados, balcones, terrenos baldíos e incluso en callejones. La agricultura urbana puede producir una variedad de cultivos, incluidas frutas, verduras y hierbas. (Aggarwal et al., 2023). La agricultura urbana surge como una alternativa ante el rápido crecimiento de la población mundial y su consecuente demanda de alimentos. En las próximas décadas, cada vez más personas vivirán en zonas urbanas, donde la tierra para la agricultura tradicional es escasa (Aggarwal et al., 2023). En este sentido, la agricultura urbana, incluida la agricultura periurbana, puede alimentar a alrededor de mil millones de habitantes de las ciudades y proporcionar múltiples beneficios sociales, económicos y ambientales (Martellozzo et al., 2014). La agricultura urbana puede potencialmente producir una parte de la demanda de alimentos,

principalmente hortalizas. Sin embargo, la agricultura urbana enfrenta desafíos de prácticas ineficientes y riesgos para la salud por el consumo de alimentos procedentes de zonas urbanas debido a la calidad de los suelos, el agua y el aire con más contaminación presente en las ciudades (Pradhan et al., 2023).

La agricultura de precisión (AP), por su parte, es el campo que se ocupa de la gestión precisa de los cultivos para aumentar el rendimiento de los cultivos, aumentar la rentabilidad y conservar el medio ambiente. Con la integración de enfoques aéreos y terrestres en una plataforma de detección híbrida (HSP) puede mejorar la eficiencia y la eficacia del proceso de gestión de la granja al reducir el costo y mejorar la calidad de los datos (Yavari et al., 2022). Por otro lado, en (Almalki et al., 2021) se desarrolló un experimental para cumplir con los requisitos de monitoreo automatizado y en tiempo real de los parámetros ambientales utilizando sensores tanto subterráneos como superficiales. Esta plataforma de bajo costo puede ayudar a los agricultores, el gobierno o los fabricantes a predecir los datos de las condiciones ambientales en el campo agrícola geográficamente grande, lo que conduce a la mejora de la productividad de los cultivos y la gestión agrícola de manera rentable y oportunas. Por su parte, en (Trilles et al., 2020), datos de variables agrícolas fueron capturados utilizando sensores de bajo costo en nodos de IoT implementados en minifundios de viñedos y en entornos al aire libre para realizar pruebas.

En los cultivos agrícolas, con el propósito de asegurar un crecimiento óptimo de la plantas, en la interacción agua-suelo-planta-atmósfera, además de los nutrientes del suelo y el control de plagas y enfermedades, las variables más relevantes a ser reguladas son: temperatura, CO₂, humedad del suelo y del aire e iluminación (Bacco et al., 2018). Con respecto al uso de sensores en el contexto de la agricultura 4.0, también se han presentado trabajo que permiten

evidenciar como el uso de las TICs posibilitan mejorar los procesos en área de agricultura en los últimos 20 años. Por ejemplo, (Voutos et al., 2019) hace una revisión de sensores ópticos, térmicos, y de microondas. Asimismo, revisa las metodologías y caracterizaciones de las respuestas de cada uno de estos tipos de sensores. Por su parte (Saha et al., 2023) y (Faid et al., 2020) muestran el desarrollo de sistemas para recopilar datos de sensores y predecir la cantidad de agua necesaria para las plantas internas. El controlador de flujo de agua, el sensor de pH, el sensor de monitoreo del nivel de agua en el estanque y los sensores de temperatura y humedad del suelo se utilizan para obtener información en el contexto de un sistema de internet de las cosas (IoT). Por su parte, (Islam* et al., 2020) presenta un sistema para recopilar datos de sensores y predecir la cantidad de agua necesaria para las plantas internas. El sistema también posibilita alertas a través de software móvil e informático. A si mismo, (Cabaccan et al., 2017), plantea un sistema WSN basado en una placa de desarrollo de bajo costo (Raspberry Pi) para adquirir datos de tres parámetros ambientales esenciales dentro de las cámaras de crecimiento de Lechuga (*Lactuca Sativa*); la luz, la temperatura y la humedad.

Por otro lado, en la literatura técnica se ha mostrado un marcado interés por afianzar el uso industrial de técnicas de control inteligente en los últimos 30 años, los progresos en materia de tecnología computacional le han dado la posibilidad a los investigadores de generar beneficios adicionales en la implementación del control automático, beneficios que no son factibles de alcanzar con controladores tradicionales como el PID (Celi et al., 2011) . Dentro de los beneficios se resaltan: la posibilidad de incorporación a sistemas de control multivariado, la reducción del consumo energético, el incremento de los rangos de operación, la mejoría en la uniformidad del producto manufacturado, entre otros (Celi et al., 2011; Mariagrazia et al., 2015) . Un resumen de las principales técnicas de control avanzado actualmente adoptadas en la automatización de procesos industriales se puede encontrar en (Mariagrazia et al., 2015).

Adicionalmente, un estudio de simulación y la implementación de un controlador basado en lógica difusa para un convertidor de potencia tipo Cuk para una aplicación de un sistema fotovoltaico es mostrado en (Mahmoud et al., 2002).

Particularmente, en aplicaciones de control automático de procesos que requieren sistemas de control en lazo cerrado, comúnmente se emplean las conocidas técnicas de control lineal como el control proporcional integral derivativo (PID) y los compensadores de adelanto-atraso. Una desventaja del control PID se presenta en la complejidad del diseño cuando se involucran sistemas multivariados o cuando se hace necesario incluir restricciones físicas que son propias de los actuadores o restricciones impuestas por el mismo sistema de control (Ogata, 2010) . El control inteligente por su parte, involucra el uso de herramientas de varias disciplinas, las cuales típicamente son técnicas de control basadas en un modelo matemático de la planta, técnicas de optimización, en inteligencia computacional o técnicas de control adaptativo (Martín-Sánchez et al., 2012)

Con relación a técnicas de análisis de datos, también se han mostrado diversos trabajos en los últimos 10 años. Particularmente, (Colombo-Mendoza et al., 2022) menciona que es factible utilizar técnicas de minería de datos para integrar datos heterogéneos de producción de cultivos y clima y explotarlos utilizando técnicas tradicionales de aprendizaje automático para predecir de forma fiable el volumen de producción de cultivos. Esto es crucial para un sistema agrícola inteligente basado en sensores IoT porque los datos capturados del mundo físico a través de sensores (en nuestro caso, datos climáticos) tienden a ser ruidosos y poco confiables. Por su parte, en (Visconti et al., 2020) desarrollan una aplicación móvil donde se recoge información de un conjunto de sensores para recoger datos meteorológicos. Este es un

ejemplo de un sistema configurado como de apoyo para la toma de decisiones (DSS, por sus siglas en inglés). Por otro lado,(Mahawar & Shrivastava, 2018) muestra resultados de modelos paramétricos utilizando minería de reglas de asociación y modelado ARIMA sobre los patrones de productividad de los cultivos fomentados por regiones y estacionales de un estado en particular en India, permitiendo pronosticar la productividad del estado para los siguientes 10 años.

Finalmente, la contribución del análisis de datos en las aplicaciones de la tecnología es agricultura es realmente transformadora y marca una nueva época en las prácticas agrícolas sostenibles. Con el enfoque de agricultura de precisión, la eficiencia de los recursos y la predicción de riesgos al convertir datos diversos en conocimientos prácticos. Los avances tecnológicos han ayudado a pronosticar las necesidades del mercado, mejorar los resultados de los cultivos y minimizar las huellas ecológicas, por lo que es crucial en el progreso agrícola moderno (Nawandar & Satpute, 2019). Por su parte, (Faid et al., 2020) propone un sistema de riego inteligente basado en IoT para la agricultura que utiliza un poste de sensor unificado (USP) para recopilar datos, calcular las necesidades de riego y tomar decisiones, el sistema consigue ahorro de agua y permite el seguimiento remoto. También (Patrizi et al., 2022) presenta el diseño de un sensor virtual de humedad del suelo para agricultura inteligente mediante aprendizaje profundo.

Diseño Metodológico

Enfoque Metodológico

El trabajo de investigación propuesto sigue un enfoque de tipo cualitativo, flexible y abierto, por cuanto se genera información a partir de los datos recolectados (Hernandez et al., 2016). Adicionalmente, en el proyecto se formula una propuesta de implementación del sistema de instrumentación y adquisición de datos. Particularmente, el enfoque metodológico aborda de forma general un problema desde una perspectiva descriptiva teniendo un marco institucional de trabajo específico y unas variables definidas para dicho contexto particular (León, 2023). Considerando las fuentes de datos que se van a utilizar, se considera un trabajo con enfoque cualitativo con un matiz experimental, puesto que, con el prototipo de sistema de instrumentación, se recopilan datos de variables reales monitoreadas con sensores en la interacción agua-suelo – planta –atmósfera. En cuanto a la temporalidad del proyecto se considera de tipo transversal, al considerar que la captura de información que se va a analizar se limita a un espacio de tiempo específico asociada principalmente a periodos de siembra y crecimiento de las plantas en el invernadero. En la etapa inicial del enfoque metodológico propuesto se realiza una revisión del estado del arte y la etapa final busca documentar de manera detallada los procesos, resultados y conclusiones más relevantes del proyecto.

Alcance

Se plantea un proyecto de investigación con un alcance correlacional, en el cual se cuantifican variables monitoreadas en la interacción agua-suelo – planta – atmósfera, variables

tales como humedad relativa, temperatura, conductividad eléctrica y concentración de CO₂ y se establecen relaciones pertinentes con el crecimiento de las plantas, la cantidad de luz solar y la optimización de recursos empleados en el cultivo de hortalizas en huertos urbanos.

El alcance del proyecto de utilización de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) para la optimización del crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos se estructura, involucrando las siguientes actividades:

- Revisión del estado del arte
- Adquisición de sensores, actuadores y tarjetas electrónicas
- Recalibración del sistema de monitoreo de variables en la interacción agua-suelo – planta – atmosfera
- Diseño e implementación del prototipo del subsistema de actuación para regular el sistema de riego de agua y para el movimiento del techo corredizo del invernadero.
- Desarrollo de los algoritmos para configurar el sistema embebido con la estrategia de control inteligente
- Validación experimental de los algoritmos de control y monitoreo de variables en la interacción agua-suelo – planta – atmósfera.
- Desarrollo de proceso computacional para el análisis de los datos

Particularmente, en la fase inicial del proyecto, para el análisis externo del proyecto se propone realizar un ejercicio diagnóstico mediante la aplicación de un análisis tipo PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiental y Legal), para contextualizar de forma integral las condiciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ambientales y legales que pueden afectar directa o indirectamente la implementación del proyecto. Con este análisis,

se contribuye a la identificación y gestión de riesgos potenciales asociados con el proyecto y se facilita la planificación estratégica del mismo.

Definición de variables

Las variables del proyecto de utilización de TICs para la optimización del crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos, se describen en el contexto en la interacción agua-suelo – planta – atmósfera. Estas variables son fundamentales para evaluar el rendimiento del invernadero y el impacto de la tecnología en el crecimiento de las hortalizas. En este sentido se consideran variables tales como: humedad relativa, temperatura, conductividad eléctrica, intensidad lumínica, radiación solar y concentración de CO₂

- **Humedad Relativa:** Se refiere a la cantidad de humedad presente en el aire en comparación con la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a una temperatura específica. Por otra parte, la humedad del suelo es un indicador de la cantidad de agua en el sustrato y es un parámetro super importante para el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, demasiada agua en el suelo puede causar problemas de crecimiento por estrés hídrico.
- **Temperatura:** Variable importante para el crecimiento, desarrollo y rendimiento óptimo de las hortalizas. Se pueden establecer rangos específicos para diferentes tipos de plantas.
- **Conductividad eléctrica:** se refiere a la capacidad del suelo para conducir la electricidad. Esta propiedad está relacionada con la cantidad de sales disueltas. Cuando las sales están presentes en el suelo, entonces aumenta la conductividad

eléctrica. Una fuerte variación en estas sales me puede generar procesos de afectación al pH del suelo y sus pertinentes consecuencias en los nutrientes del suelo y el crecimiento de las plantas.

- Intensidad lumínica: Es la cantidad de luz disponible para las plantas.
- Concentración de dióxido de carbono (CO₂). La concentración de CO₂ en el ambiente del cultivo afecta la fotosíntesis de las plantas y por lo tanto su crecimiento y desarrollo. Esta concentración se mide en partes por millón (ppm).

El enfoque operacional de las variables mencionadas implica la integración de sensores de buena precisión con posibilidad de transducción a una variable eléctrica, para posibilitar ser leídos por tarjetas electrónicas y poder configurar un sistema automatizados donde los sensores, se comuniquen las tarjetas de control y estos con los actuadores, para así mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de las hortalizas. La retroalimentación continúa de la información de los sensores y el desarrollo Algoritmos de control para tomar decisiones en tiempo real basadas en los datos recopilados y la utilización de herramientas TICs permitirá ajustes rápidos y eficientes para optimizar el entorno de crecimiento de las plantas en el invernadero.

Población y Muestra

La población a considerar en el proyecto caso sería el conjunto completo de invernaderos urbanos en el área geográfica de la ciudad de Bogotá, valor que es muy difícil de conseguir pues no se encuentra disponible dicha información en la página del Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia. En Bogotá particularmente, existen varios invernaderos urbanos

(menos de 30) que podrían beneficiarse de la utilización de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) para optimizar el crecimiento de hortalizas.

En el proyecto propuesto se utiliza un muestreo por conveniencia, en el que no es necesario describir de forma explícita la población y muestra dado el enfoque experimental del proyecto. Cabe mencionar que para el desarrollo y validación del prototipo del sistema de monitoreo y control se cuenta con el Invernadero de las instalaciones de la Universidad EAN, el cual dispone de 8 camas con diversos cultivos. El invernadero se ha empezado a instrumentar y es actualmente visto como un laboratorio experimental donde estudiantes de diferentes áreas, lo utilizan para fomentar iniciativas de investigación formativa en el contexto de una visión global de la agricultura urbana como opción para contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y reducir los impactos del cambio climático.

Técnicas de análisis de datos

En el proyecto propuesto se emplean diferentes técnicas de análisis de datos para extraer información valiosa a partir de los datos recopilados por sensores instalados en el invernadero. Principalmente se plantea la utilización de técnicas de análisis estadístico, de series temporales y de análisis de correlación y regresión. El análisis de estadística descriptiva sirve para relacionar y entender las características básicas de los datos, como la temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica del invernadero. Por su parte, el análisis de series temporales sirve para identificar tendencias a lo largo del tiempo para comprender cómo ciertas variables cambian en función de las estaciones o períodos específicos del crecimiento de las plantas. La idea es utilizar modelos paramétricos a partir de técnicas de identificación de sistemas, como por ejemplo el ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), para extrapolar valores

basados en patrones de datos históricos de las plantas. Finalmente, los análisis de correlación y Regresión, son útiles para determinar las relaciones entre diferentes variables, por ejemplo, cómo la humedad afecta la tasa de crecimiento de las plantas y para elaborar modelos de regresión de una variable en función de otras variables predictoras.

Análisis y discusión de los resultados

En el desarrollo del proyecto, se ha establecido la estructura general del sistema de adquisición de datos, la cual está compuesta principalmente por los sensores, la tarjeta de control, una estación meteorológica portátil, la tarjeta DAQ y el sistema de almacenamiento en la nube (ver figura 1). Particularmente, cada uno de los sensores (temperatura, humedad relativa, intensidad de luz, conductividad y CO₂) se conectan a una tarjeta electrónica (PCB o circuito impreso) en donde se conectan a la tarjeta DAQ (tarjeta de desarrollo Arduino Uno). Por su parte, la tarjeta DAQ toma la información análoga y codificada de los sensores, recopila la información, la acondiciona e interpreta los datos para posteriormente enviarlos a la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi (tarjeta electrónica para el control del proceso).

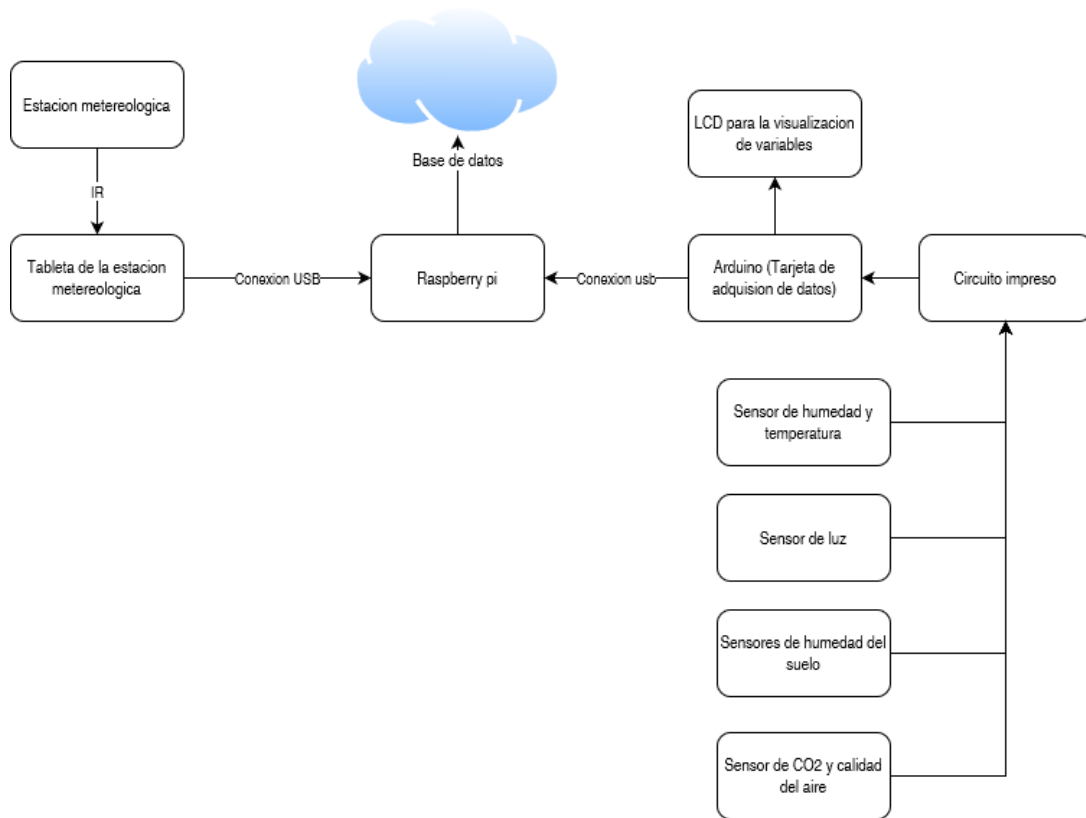


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema de adquisición de datos

Por su parte, la tarjeta electrónica de control está conectada a una red inalámbrica (WiFi) y se encarga de subir los datos recolectados a la nube en un periodo de muestreo de 8 s. Adicionalmente, esta tarjeta de control recopila la información de la estación meteorológica, y es la encargada de tener una copia local de los datos que no requiere necesariamente de tener una conexión a internet siempre y además de verificar que los datos que se recopilaron de los sensores se entreguen de forma correcta.

Adicionalmente se tiene una pantalla de cristal líquido (LCD) que va a estar instalada en una de las camas del invernadero de la Universidad Ean, en esta pantalla se muestra la información de las variables medidas al interior del invernadero. La caja contenedora de la pantalla LCD se

ha diseñado en Solidworks y se ha impreso en 3D utilizando una de las impresoras que para tal fin tiene la universidad Ean. El diseño preliminar del módulo de visualización que utiliza la pantalla LCD se muestra en la figura 2.



Figura 2. Módulo de visualización con pantalla LCD

Por otro lado, la implementación física con todos los sensores ha requerido que las placas electrónicas estén protegidas contra la humedad relativa tal alta dentro del invernadero. En este sentido, se han colocado las placas en una caja de plástico, en la cual se utiliza un ventilador pequeño para una refrigeración mínima requerida por la tarjeta dada la disipación de potencia en forma de calor (ver figura 3). La caja que contiene el prototipo de sistema de instrumentación y adquisición de datos se ha colocado al lado de las camas que contienen en sustrato para las plantas. Es de señalar que para la conexión con la placa principal por medio de un cable UTP categoría 5.

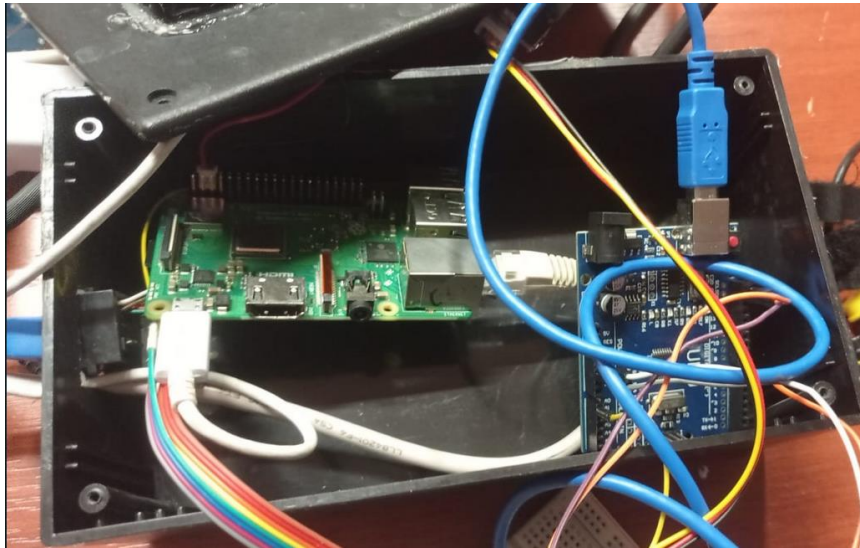


Figura 3. Fotografía de la caja utilizada para encapsular la tarjeta de control y la tarjeta de adquisición de datos de los sensores.

En el contexto de las herramientas TICs, para el sistema de información, para el envío de datos se ha utilizado una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi. El envío de los paquetes de datos se realiza por clases, lo que permite dividir las tareas que cumple cada módulo, cada 8 minutos se ejecuta un script en el cual se configuran las conexiones a las bases de datos. En este sentido, al ser exitosa la conexión, se procede a leer la información de los sensores por medio del puerto serial, esta información también se utiliza para la interfaz al usuario. Adicionalmente en el script se configura una copia local y la creación de los “EndPoints” para exponer al internet la base de datos. Es de notar que actualmente está en proceso, el diseño de una página web para manejar la base de datos, la cual permita a los usuarios remotos acceder desde cualquier dispositivo móvil por medio de un navegador web (ver figura 4). Finalmente, mencionar que los datos de las variables se están registrando en una aplicación en la nube y el proceso que a continuación procede, es el aplicar diferentes técnicas de análisis de datos para extraer información valiosa a partir de los datos recopilados por sensores instalados en el invernadero.

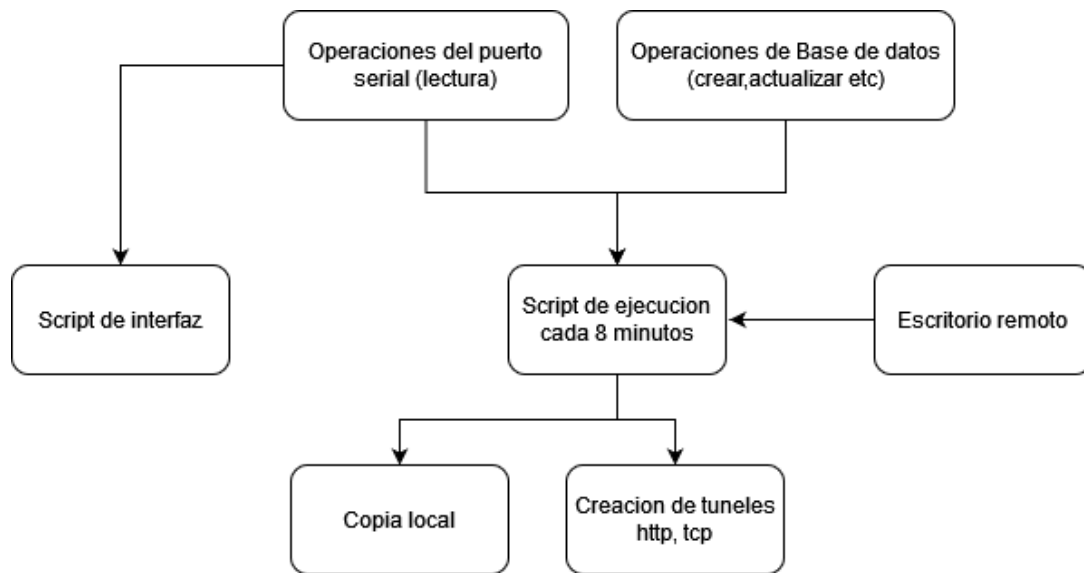


Figura 4. Diagrama en bloques de operación lógica de almacenamiento de datos.

Conclusiones

Como resultado del desarrollo de la unidad de estudios se ha desarrollado este escrito con una propuesta para el desarrollo de un proyecto de investigación que articula la agricultura urbana y las tecnologías de la información y comunicación (TICs). Se ha realizado una revisión la literatura científica y técnica relacionada con la aplicación de TICs en la agricultura y específicamente en invernaderos urbanos. Se han identificado el uso de tecnologías existentes, tipos de sensores, los métodos y control, técnicas de análisis de datos y los resultados obtenidos en proyectos similares.

En el contexto de la implementación de un sistema automatizados para la utilización de las TICs para la optimización del crecimiento de hortalizas en invernaderos urbanos, utilizando el monitoreo y control de variables en la interacción agua-suelo – planta – atmósfera en invernaderos urbanos, se ha mostrado la versión preliminar de un prototipo de un subsistema de instrumentación y adquisición de datos desarrollado por estudiantes y profesores de la universidad Ean en Colombia.

En el estado actual del proyecto, se está trabajando en la consecución de los objetivos relacionados con el proceso diseño de un algoritmo computacional para regular y optimizar la cantidad de agua que se suministra a las plantas cultivadas y además en el proceso de análisis de los datos asociados con las variables críticas como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, PH, luz y CO₂. Cabe mencionar que el proyecto se ha visto limitado en el desarrollo de estos procesos, por temas de logística y presupuesto externo, que han impactado la operatividad y mantenimiento oportuno de elementos constitutivos del invernadero Ean.

Desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, el desarrollo y la implementación de este proyecto, resalta la importancia de la planificación estratégica y la gestión adecuada de recursos. Adicionalmente, para el éxito en la ejecución del proyecto, es fundamental la coordinación estratégica del equipo de trabajo multidisciplinario, equipo que involucra profesionales conocedores de agronomía hasta ingenieros familiarizados con herramientas TICs. Finalmente, la identificación oportuna de riesgos y la utilización de un enfoque de metodología ágil como SCRUM, dada la complejidad técnica del proyecto, son también aspectos a tener en cuenta por lo que hasta el momento se ha evidenciado en la ejecución del proyecto.

Referencias

- Aggarwal, B., Rajora, N., Raturi, G., Dhar, H., Kadam, S. B., Mundada, P. S., Shivaraj, S. M., Varshney, V., Deshmukh, R., Barvkar, V. T., Salvi, P., & Sonah, H. (2023). *Biotechnology and urban agriculture: A partnership for the future sustainability*.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111903>
- Almalki, F. A., Soufiene, B. O., Alsamhi, S. H., & Sakli, H. (2021). A Low-Cost Platform for Environmental Smart Farming Monitoring System Based on IoT and UAVs. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 5908, 13(11), 5908. <https://doi.org/10.3390/SU13115908>
- Arenas, C. A. (2007). Modelo de pensamiento crítico. In J. Joven nNúñez & Vicente (Eds.), *Pensamiento crítico : técnicas para su desarrollo*. Magisterio.
<http://bibliotecadigital.magisterio.co/libro/pensamiento-cr-tico-t-cnicas-para-su-desarrollo>
- Bacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M. (2019). The Digitisation of Agriculture: a Survey of Research Activities on Smart Farming. *Array*, 3–4, 100009.
<https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100009>
- Bacco, M., Berton, A., Ferro, E., Gennaro, C., Gotta, A., Matteoli, S., Paonessa, F., Ruggeri, M., Virone, G., & Zanella, A. (2018). Smart farming: Opportunities, challenges and technology enablers. *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany, IOT Tuscany 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373043>
- Cabaccan, C. N., Cruz, F. R. G., & Agulto, I. C. (2017). Wireless sensor network for agricultural environment using raspberry pi based sensor nodes. *HNICEM 2017 - 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, 2018-January*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/HNICEM.2017.8269427>
- Celi, M. R., Prada, C. De, Villegas, T., Sarabia, D., & Aguilera, A. (2011). Feasibility study for implementing model based predictive control in a Programmable Electronic Device. *IEEE International Conference on Control and Automation*, 1091–1096.
- Cepal, O. (2013). *Serie Seminarios y Conferencias*. Cepal.
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/1a1d1964-5555-47e9-93e4-eaa3505179e3/content>
- Colombo-Mendoza, L. O., Paredes-Valverde, M. A., Salas-Zárate, M. D. P., & Valencia-García, R. (2022). Internet of Things-Driven Data Mining for Smart Crop Production Prediction in the Peasant Farming Domain. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 1940, 12(4), 1940.
<https://doi.org/10.3390/APP12041940>
- Faid, A., Sadik, M., & Sabir, E. (2020). IoT-based Low Cost Architecture for Smart Farming. *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2020*, 1296–1302. <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148455>
- Gómez Galiano, A. (2020, November 11). *Nivel tecnológico y desarrollo de los invernaderos en Colombia*. <https://redagricola.com/nivel-tecnologico-y-desarrollo-de-los-invernaderos-en-colombia/>
- Hernandez, Roberto., Fernandez, Carlos., & Baptista, Pilar. (2016). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). Mc Graw Hill.
- Islam*, Md. M., Al-Momin, Md., Tauhid, A. B. M., Hossain, Md. K., & Sarker, S. (2020). IoT Based Smart Irrigation Monitoring & Controlling System in Agriculture. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 2436–2439.
<https://doi.org/10.35940/IJRTE.E6851.038620>

- León, T. K. (2023). *Plan de transformación digital sostenible para los procesos de apoyo de la Personería de Bogotá D.C.* Universidad Ean.
- Mahawar, P., & Shrivastava, V. (2018). Analysing and forecasting Rajasthan's agriculture productivity using association rule mining and ARIMA modelling. *2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation, ICCCA 2018*.
<https://doi.org/10.1109/CCAA.2018.8777574>
- Mahmoud, A. M. A., Mashaly, H. M., Kandil, S. A., El Khashab, H., & Nashed, M. N. F. (2002). Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking. *Proceedings 9th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. IEEE RO-MAN 2000 (Cat. No.00TH8499)*, 155–160. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2000.892487>
- Mariagrazia, D., Alexander, F., Marek, M., & Carla, S. (2015). A Survey on Advanced Control Approaches in Factory Automation. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 394–399.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.113>
- Maroto, J. V. (2014). *Historia de la agronomía* (2nd ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bTsoDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA17&dq=Desde+la+antigüedad,+la+agricultura+ha+proporcionado+el+sustento+básico+para+la+supervivencia+de+las+comunidades+humanas,+permitiendo+la+producción+sistemática+de+alimentos+a+tr>
- Martellozzo, F., Landry, J. S., Plouffe, D., Seufert, V., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2014). Urban agriculture: a global analysis of the space constraint to meet urban vegetable demand. *Environmental Research Letters*, 9(6), 064025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064025>
- Martín-Sánchez, J. M., Lemos, J. M., & Rodellar, J. (2012). Survey of industrial optimized adaptive control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 26(10), 881–918. <https://doi.org/10.1002/acs.2313>
- Nawandar, N. K., & Satpute, V. R. (2019). IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 979–990.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.05.027>
- Odame, H. S., Okeyo-Owuor, J. B., Changeh, J. G., & Otieno, J. O. (2020). The role of technology in inclusive innovation of urban agriculture. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 43, pp. 106–111). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.12.007>
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (Fifth). Pearson.
- Patrizi, G., Bartolini, A., Ciani, L., Gallo, V., Sommella, P., & Carratu, M. (2022). A Virtual Soil Moisture Sensor for Smart Farming Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3196446>
- Pradhan, P., Callaghan, M., Hu, Y., Dahal, K., Hunecke, C., Reusswig, F., Lotze-Campen, H., & Kropp, J. P. (2023). A systematic review highlights that there are multiple benefits of urban agriculture besides food A R T I C L E I N F O Keywords: Urban agriculture Topic model Systematic review Sustainability Ecosystem services Multi-functional. *Global Food Security*, 38, 100700. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100700>
- Saha, P., Kumar, V., Kathuria, S., Gehlot, A., Pachouri, V., & Duggal, A. S. (2023). Precision Agriculture Using Internet of Things and Wireless Sensor Networks. *2023 International Conference on Disruptive Technologies, ICDDT 2023*, 519–522.
<https://doi.org/10.1109/ICDDT57929.2023.10150678>
- Trilles, S., González-Pérez, A., Zaragoza, B., & Huerta, J. (2020). Data on records of environmental phenomena using low-cost sensors in vineyard smallholdings. *Data in Brief*, 33, 106524. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2020.106524>

- Universidad Ean. (2021, September 10). *Invernadero Ean: un laboratorio para transformar la agricultura orgánica a partir del uso de la tecnología*. Noticias Ean .
<https://universidadean.edu.co/noticias/invernadero-ean-un-laboratorio-para-transformar-la-agricultura-organica-partir-del-uso-de-la-tecnologia>
- Universidad Ean. (2022). *Modelo Educativo Universidad Ean*.
- Visconti, P., Giannoccaro, N. I., de Fazio, R., Strazzella, S., & Cafagna, D. (2020). IoT-oriented software platform applied to sensors-based farming facility with smartphone farmer app. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(3), 1095–1105.
<https://doi.org/10.11591/EEI.V9I3.2177>
- Voutos, Y., Mylonas, P., Katheriotis, J., & Sofou, A. (2019). A Survey on Intelligent Agricultural Information Handling Methodologies. *Sustainability 2019*, Vol. 11, Page 3278, 11(12), 3278. <https://doi.org/10.3390/SU11123278>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 114, Issue 24, pp. 6148–6150). National Academy of Sciences.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Yang, X., Shu, L., Chen, J., Ferrag, M. A., Wu, J., Nurellari, E., & Huang, K. (2021). A Survey on Smart Agriculture: Development Modes, Technologies, and Security and Privacy Challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(2), 273–302.
<https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003536>
- Yavari, A. ; , Modica, G. Di, Cucchiatti, F., Bagha, H., Yavari, A., & Georgakopoulos, D. (2022). Hybrid Sensing Platform for IoT-Based Precision Agriculture. *Future Internet 2022*, Vol. 14, Page 233, 14(8), 233. <https://doi.org/10.3390/FI14080233>