



Análisis de variables agrícolas implementando un gemelo digital

Analysis of Agricultural Variables Using a Digital Twin

Vivian Gabriela Amorocho Castro ⁽¹⁾
Diego Camilo Peña Ramírez ⁽²⁾

1. Magister en desarrollo rural. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Bogotá, Colombia.
vamoroch@sena.edu.co
2. Magister en automatización Industrial. Servicio Nacional de aprendizaje.
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Bogotá, Colombia
dpenar@sena.edu.co

RESUMEN

El Centro de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones CEET desarrolla un proyecto para optimizar el crecimiento de plantas y la productividad agrícola en la Región Metropolitana Bogotá-Cundinamarca, mediante la implementación de un gemelo digital basado en tecnologías de la Industria 4.0. Esta herramienta permitirá monitorear y ajustar en tiempo real variables como temperatura, humedad, pH y conductividad del suelo, mejorando procesos como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes. El proyecto consta de cuatro fases: identificación de tecnologías y especies vegetales, desarrollo del modelo digital y una aplicación, validación experimental en laboratorio y divulgación de resultados a la comunidad académica e industrial. Los resultados contribuirán a la sostenibilidad agrícola, beneficiando la agricultura urbana y periurbana. Además, se prevé una alianza con el Centro Nacional de Hotelería, Turismo y Alimentos para fortalecer el impacto en el sector productivo y educativo.

Palabras Claves: Agricultura, Gemelo Digital, IoT, Sistemas ciberfísicos.

ABSTRACT

The Center for Electricity, Electronics, and Telecommunications CEET is developing a project to optimize plant growth and agricultural productivity in the Bogotá-Cundinamarca Metropolitan Region through the implementation of a digital twin based on Industry 4.0 technologies. This tool will enable real-time monitoring and adjustment of variables such as temperature, humidity, pH, and soil conductivity, enhancing processes like photosynthesis and nutrient absorption. The project follows four phases: identification of technologies and plant species, development of the digital model and an application, laboratory validation, and dissemination of results to the academic and industrial communities. The outcomes will contribute to agricultural sustainability, benefiting urban and peri-urban farming. Additionally, an alliance with the National Center for Hospitality, Tourism, and Food is planned to strengthen the impact on Colombia's productive and educational sectors.

Keywords: Precision agriculture, Digital twin, IoT (Internet of Things), Cyber-physical systems (CPS).



1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las plantas es un proceso fundamental que depende de una serie de factores ambientales, como la luz, el agua, la temperatura y la humedad, que influyen directamente en la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y otras funciones vitales para el desarrollo vegetal. La luz es esencial para la fotosíntesis, ya que permite a las plantas transformar la energía solar en compuestos orgánicos; su intensidad, duración y calidad afectan directamente el crecimiento [1]. La temperatura, por otro lado, regula la actividad enzimática y las tasas metabólicas de las plantas, siendo cada especie sensible a un rango específico de temperatura [2]. El agua también es crítica, participando en la fotosíntesis y facilitando el transporte de nutrientes; un suministro adecuado de agua es crucial para evitar el estrés hídrico y mantener la salud de las plantas [3].

Con la incorporación de tecnologías de la Industria 4.0, se han desarrollado herramientas avanzadas para optimizar estos factores y así maximizar el crecimiento de las plantas. Los gemelos digitales, por ejemplo, permiten simular condiciones de cultivo en un entorno virtual, ajustando variables como el pH del suelo, la humedad y la disponibilidad de nutrientes en tiempo real, lo cual mejora la eficiencia en la gestión del crecimiento vegetal [4]. En su análisis exhaustivo sobre el uso de gemelos digitales en la agricultura, Pylianidis, Osinga y Athanasiadis concluyeron que, aunque esta tecnología está en etapas iniciales en el sector agrícola, su potencial para optimizar el crecimiento de las plantas es considerable [5].

Asimismo, el aprendizaje automático se ha destacado como una herramienta clave para predecir el rendimiento de cultivos, identificando patrones en variables como el tamaño de las ho-

jas, el pH del suelo y condiciones climáticas, lo que permite ajustes precisos en las prácticas de cultivo [6]. Klompenburg, Kassahuna y Catal demostraron que los algoritmos de redes neuronales, regresión lineal y bosques aleatorios son altamente efectivos en estos análisis, especialmente cuando se optimiza el uso de factores críticos para el crecimiento de las plantas [7].

La agricultura de precisión también ha introducido innovaciones como sensores inteligentes y sistemas de riego automatizados, que responden en tiempo real a las condiciones del suelo y del clima, asegurando que las plantas reciban agua y nutrientes en las cantidades necesarias [8]. En el contexto colombiano, el Centro de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones ha implementado proyectos con IoT y machine learning para monitorear cultivos y predecir condiciones meteorológicas, demostrando que estas tecnologías pueden mejorar el crecimiento de las plantas y la sostenibilidad agrícola en el país [9].

Estas tecnologías abren nuevas posibilidades para transformar la agricultura en un sistema más productivo y sostenible, donde el monitoreo y la optimización del crecimiento vegetal son centrales. Este proyecto busca, en consecuencia, aplicar estas innovaciones para mejorar la toma de decisiones y maximizar los resultados de producción en el sector agrícola colombiano, contribuyendo a enfrentar los retos de la seguridad alimentaria y el cambio climático.

2. OBJETIVOS

El objetivo primordial de este proyecto es implementar un gemelo digital a partir del análisis de las variables que afectan el rendimiento de un cultivo y el desarrollo de un modelo computacional, para ampliar las soluciones disponibles de toma de decisiones de cosecha.

Y como objetivos específicos podemos contar:

Definir las propiedades del modelo de gemelo digital que permita simular y optimizar el rendimiento de un cultivo agrícola a partir del análisis de variables que afectan la cosecha.

Desarrollar el modelo de gemelo digital y la aplicación para la simulación y análisis del rendimiento de un cultivo agrícola.

- Evaluar el desempeño del modelo desarrollado para el análisis del rendimiento de un cultivo agrícola, mediante una prueba de validación funcional.
- Apropiar el conocimiento generado divulgando los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto con la comunidad académica e industrial.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La seguridad alimentaria en Colombia enfrenta desafíos significativos, evidenciados por el informe de la FAO de 2023, que indica que el 6.6% de la población, aproximadamente 3.4 millones de personas, padecen desnutrición, y 16 millones no pueden acceder a una dieta saludable [9]. Factores como el impacto económico de la pandemia de COVID-19, la crisis migratoria, el desplazamiento por violencia, la inestabilidad política y social, y la escasez de lluvias contribuyen a esta situación. Además, el Equipo Asesor Humanitario de OCHA en Colombia reportó que 7.7 millones de personas requerían asistencia en seguridad alimentaria y nutrición en 2022, cifra que se mantendría en 2023, destacando también la presencia de 2.9 millones de refugiados y migrantes venezolanos [10]. La Encuesta Pulso Social del DANE de 2021 reveló que aproximadamente el 30% de los hogares colombianos no consumen tres comidas al día.

Para abordar esta crisis, es esencial incrementar la productividad agrícola. Sin embargo, Colombia enfrenta obstáculos como la concentración de tierras [11], la degradación del suelo, la deforestación, la sobreexplotación de recursos naturales debido a la escasez y la falta de oportunidades económicas, la carencia de planificación y tecnología agropecuaria, los altos costos de producción y el uso excesivo de fertilizantes artificiales [12]. Además, las brechas tecnológicas en el sector agropecuario limitan la adopción de innovaciones, especialmente entre pequeños productores, debido a los altos costos y la falta de capacitación.

La implementación de tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), la analítica de datos y la inteligencia artificial, puede transformar la agricultura colombiana, optimizando el crecimiento de las plantas y mejorando la seguridad alimentaria. Estas herramientas permiten monitorear en tiempo real variables críticas como la humedad del suelo, la temperatura y los niveles de nutrientes, facilitando decisiones informadas para maximizar el rendimiento de los cultivos [13]. Por ejemplo, sistemas basados en IoT pueden detectar deficiencias nutricionales en las plantas y activar automáticamente sistemas de riego o fertilización, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento vegetal [6]. La analítica de datos y la inteligencia artificial permiten predecir patrones de crecimiento y rendimiento de los cultivos, considerando variables ambientales y genéticas, lo que facilita la implementación de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles [14].

La adopción de estas tecnologías requiere inversión en infraestructura, capacitación de agricultores y políticas públicas que promuevan la

innovación en el sector agrícola. Al integrar soluciones tecnológicas avanzadas, Colombia puede enfrentar los desafíos de seguridad alimentaria, mejorar la productividad agrícola y promover prácticas sostenibles que beneficien tanto a los productores como a los consumidores.

Para alcanzar el Objetivo General planteado para la ejecución de este proyecto, se han propuesto cuatro Objetivos Específicos, los cuales permitirán, analizar las variables que afectan el rendimiento de un cultivo mediante la implementación de un gemelo digital, para ampliar las soluciones disponibles de toma de decisiones de cosecha. Es importante aclarar que el centro de formación cuenta con capacidad física y tecnológica para ejecutar el proyecto y que se realizará empleando tecnologías ya disponibles en el Centro de formación. Para lograrlo se plantean las siguientes etapas para la ejecución del proyecto.

3.1. Etapa 1

Dentro de esta fase se hace un proceso de análisis inicialmente orientado a la búsqueda de información (expertos en agricultura, revistas especializadas, artículos académicos, libros, tesis, etc.) para tener una mejor comprensión de los elementos de estudio del proyecto. Posteriormente, se procederá a la Identificación de la población que se va a analizar que el caso específico de huertas urbanas en Bogotá sería alguna especie de hortaliza o alguna especie de planta aromática o medicinal, cultivos recomendados por el Jardín Botánico. Posteriormente se definirá el conjunto de herramientas y tecnologías de hardware y software de código abierto (Open Source) de uso académico que se utilizaran para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de los datos de las varia-

bles de interés en el contexto de rendimiento agrícola. Finalmente, con la información obtenida se realizará la caracterización del modelo de gemelo digital con el cual se desarrollará un modelo matemático o computacional del objeto físico, en este caso se desea replicar una pequeña huerta urbana.

3.2. Etapa 2

En esta fase, primero se realizará la implementación de las capas de la arquitectura del Gemelo digital. La capa de adquisición de datos permitirá la captura de datos de las variables relevantes para el estudio (humedad, temperatura, luminancia, CO₂) a través de un sistema IOT industrial (equipos pertenecientes al centro de formación) enviará esa información a la capa de Integración de datos que su vez se conecta con la capa de modelado y simulación, donde está el modelo matemático o computacional. La capa de visualización o interfaz, que podrá contener un modelo 2D o 3D, hará posible realizar un seguimiento en tiempo real a las variables capturadas y permitirá a su vez la interacción del usuario con el gemelo digital. Finalmente, la capa de analítica y procesamiento de datos permitirá la ayuda de toma de decisiones de cosecha, que puede ser basada en aprendizaje automático a partir del análisis de las variables medidas, la aplicación de modelos de Machine Learning permitirá determinar los comportamientos de los parámetros medidos.

3.3. Etapa 3

En esta fase se propone el análisis de los resultados de la Fase 2 para someterlos a un proceso de validación el cual se puede realizar a nivel de laboratorio, realizado integración de datos y comparaciones con los resultados de las experien-

cias de proyectos similares, como, por ejemplo el estudio sobre un Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana publicado en la Revista Científica de la Universidad Francisco José de Caldas y las experiencias adquiridas en proyectos previos de I+D+i realizados por el CEET, entre los que se destacan el proyecto denominado Identificación de un mecanismo que mejore la supervivencia de frailejones, durante germinación y plantación, involucrando Internet de las Cosas (IoT) en los que se implementaron tecnologías IoT y Machine learning para el estudio de sistemas de agricultura. Por otra parte, también se puede acudir a la ayuda de expertos en el campo de la agricultura urbana, agroindustria, biotecnología o ciencias relacionadas para realizar el proceso de validación de la herramienta de predicción desarrollada. Finalmente, otra posible forma de validación del modelo es a través de la implementación del sistema en una huerta urbana real.

3.4. Etapa 4

En esta fase se contempla la divulgación y socialización los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto con la comu-

nidad académica e industrial que permita la apropiación social del conocimiento mediante la participación en eventos especializados del ámbito nacional o internacional (congresos, seminarios, foros, entre otros) y a través de un artículo científico para someter a una revista indexada.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Sistema físico

Se construyó un ambiente controlado de 18 metros cuadrados para medir las variables en un ambiente controlado ubicado en el Centro de electricidad, electrónica y telecomunicaciones (CEET) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), la Figura 1 muestra el prototipo del invernadero.

4.2. Tecnologías utilizadas

Se integraron las siguientes tecnologías

- **Diseño CAD:** Para crear un modelo físico en 3D del invernadero se utilizó la plataforma Onshaper, la cual es una herramienta que, aunque propietaria, permite su uso a través de internet



Figura 1. Invernadero construido. Fuente: Propia

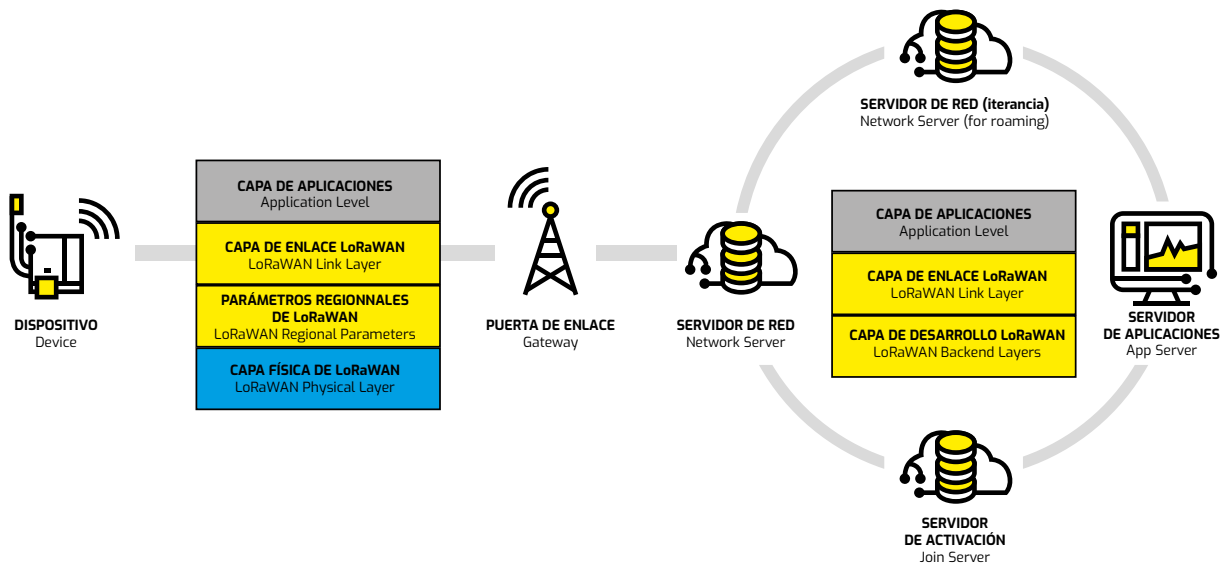


Figura 2. Arquitectura típica de una implementación de LoRaWAN.

Fuente: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>

usando el navegador para propósitos de investigación.

- **Sensores:** Se utilizaron sensores con transmisores LoraWAN que están midiendo las siguientes variables:
 - *Humedad:* Tanto ambiental como del suelo.
 - *Temperatura:* Tanto del ambiente como del suelo además se está tomando comparativamente la temperatura al interior del invernadero con la temperatura del ambiente.
 - *PH:* Se está tomando el PH para llevar un histórico de dicha variable y su influencia sobre el espécimen vegetal.
 - *Conductividad:* La conductividad del suelo permite determinar la salinidad de este y valores óptimos indican que tan fácil el espécimen vegetal va a absorber agua y nutrientes.
 - *CO₂:* Esta medida permitirá ver los efectos de la contaminación sobre la

planta además de hacer seguimiento a los procesos de respiración de esta.

- *Clima:* Se hizo uso de una estación meteorológica la cual comunica las condiciones climáticas para ver su impacto sobre el cultivo.
- **Comunicaciones:** Para realizar las comunicaciones se utilizó el protocolo de comunicaciones LoraWAN, la cual es una especificación de baja potencia y área amplia, diseñada para equipos de bajo consumo que apunta a aplicaciones específicas de internet de las cosas IOT2. Otros protocolos de comunicación utilizados fueron mqtt y websockets para garantizar la comunicación en tiempo real por medio de eventos generados por los sensores, así como el eventual control de dispositivos como bombas y ventiladores para los sistemas de riego y ventilación respectivamente.

- **Interfaz de usuario:** la interfaz de usuario y las tecnologías empleadas en todo lo que respecta a la interfaz de usuario, presentación de información y la interactividad del operario con el gemelo digital.
- *NodeRed:* Es una herramienta de desarrollo basada en Node JS³, hecha para construir flujos para programación visual y conectar dispositivos de Hardware y otros servicios en línea para Internet de las cosas (como protocolos MQTT, HTTP, Conexiones TLS, etc. ...). Cuyo editor de flujo puede accederse directamente usando un navegador, además permite la creación rápida de tableros o Dashboards para ayudar a la presentación de información.
- *Godot Engine:* Es un motor de videojuegos multiplataforma, libre y de código abierto⁴, que funciona en sistemas operativos Windows, Linux, BSD y Android. Permite además exportar los videojuegos y aplicaciones creadas a PC (Windows, OS X y Linux), teléfonos móviles (Android, iOS), y HTML⁵. El enfoque usado en este proyecto es completamente Web, lo cual permite el acceso a la plataforma desde un navegador, sin necesidad de instalar software adicional, esto gracias a que Godot permite exportar a HTML⁵.
- **Servicios de gestión y almacenamiento:** También conocido como Backend o servidor de aplicaciones es de desarrollo propio y se encarga de recibir y procesar los datos recibidos por los el Gateway y sensores (como se mostrará más adelante), a continuación, se mencionan las tecnologías utilizadas.
- *Python:* Es un lenguaje de programación de alto nivel interpretado, cuya filosofía se centra en la legibilidad del código⁵ y la aplicación de múltiples paradigmas de programación, su uso está ampliamente difundido en múltiples campos desde la programación de servidores hasta la ciencia de datos, para el presente proyecto Python está siendo utilizado para desarrollar el Backend utilizando el framework FastAPI⁶ con un enfoque de microservicios. También se está utilizando la herramienta Jupyter por medio de JupyterHub⁷ para realizar los análisis de los datos medidos por los sensores y registrados en la base de datos.
- *MQTT:* Es un protocolo de comunicaciones ligero para mensajes⁸, basado en la suscripción y publicación, el cual permite la conexión rápida entre máquinas mediante el uso de un servidor dedicado para la gestión de estos mensajes llamado “broker”, este broker tiene como única tarea gestionar la recepción de mensajes de los diferentes dispositivos y enviar los mensajes a sus correspondientes destinatarios según el topic al que publiquen o se suscriban.
- *PostgreSQL:* Es una base de datos relacional de código abierto⁹ como una alternativa a opciones propietaria-

rias de Microsoft u Oracle. En esta base de datos se están almacenando las mediciones de los sensores relacionados con el Gateway, se seleccionó esta opción de almacenamiento, ya que permite buenas velocidades de lectura y escritura, y su consulta por medio de *Querys* de SQL estándar de forma fácil.

- Otras herramientas: Otras herramientas utilizadas para el desarrollo del gemelo digital fueron *docker* para la organización y gestión de la plataforma en múltiples contenedores, lo cual permite la portabilidad de la plataforma y su

ejecución en múltiples computadores, incluso en sistemas embebidos. También se utilizó para servir los archivos estáticos del gemelo digital, el proxy reverso *NGINX*¹¹ el cual está basado en *Node JS*, y está configurado como servidor web, para poder servir los archivos generados por *Godot*, también se está configurando otra instancia de *NGINX* como proxy reverso para poder acceder a los diferentes microservicios de forma más segura. Así mismo en un futuro se planea usar *Kubernetes*¹² para gestionar cargas de trabajo y clusters

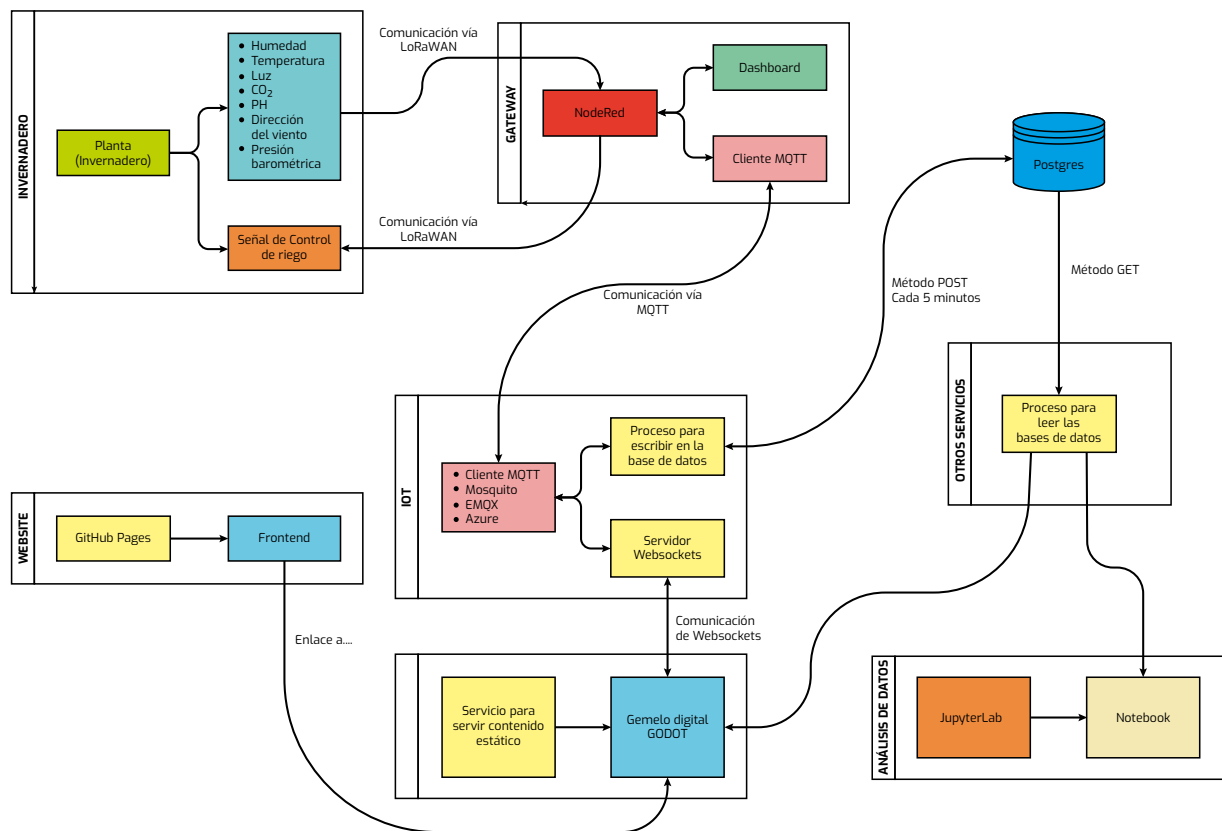


Figura 3. Arquitectura de los servicios involucrados en el gemelo digital. Fuente: Propia

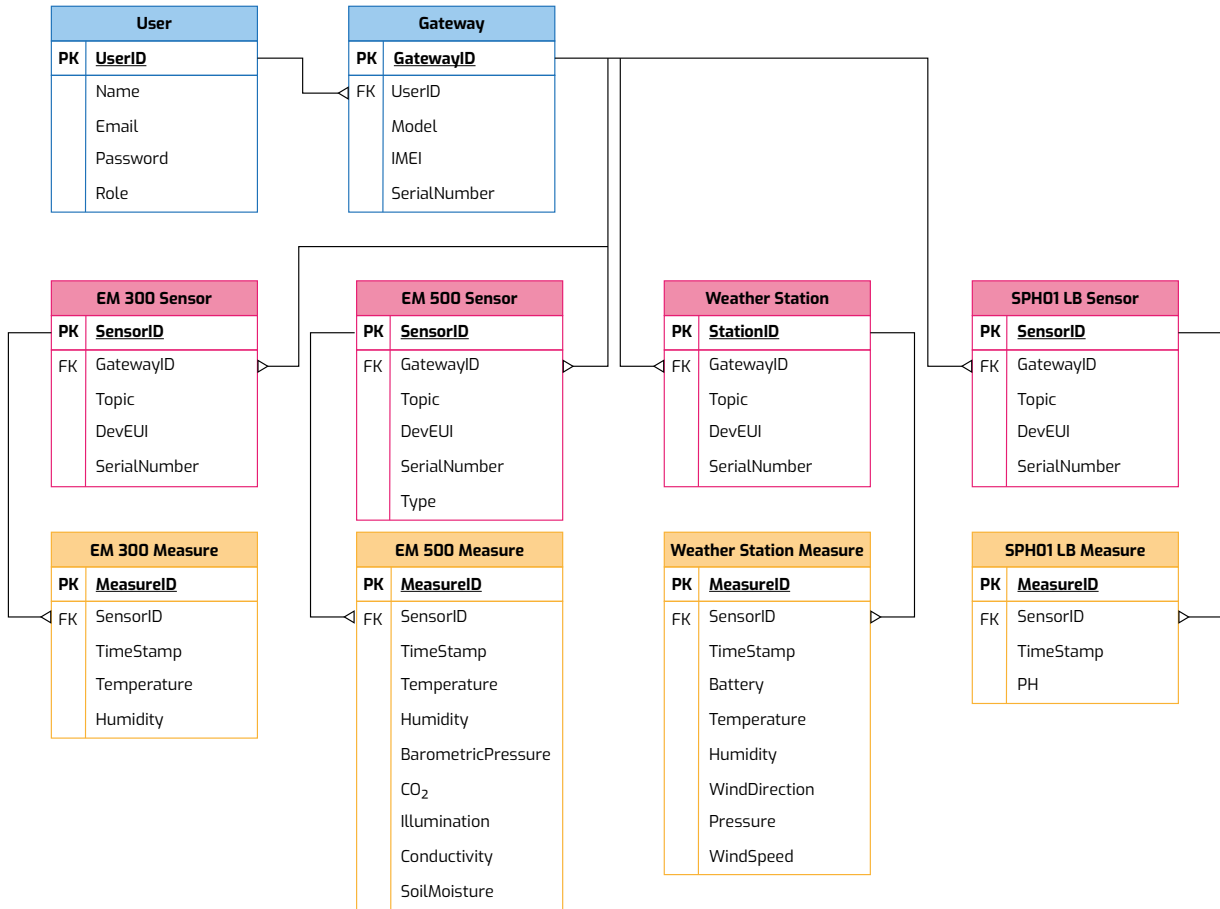


Figura 3. Arquitectura de los servicios involucrados en el gemelo digital. Fuente: Propia

de servidores o servicios en la nube para el despliegue y publicación de gemelo digital para así poder acceder desde cualquier lugar.

4.3. Resultados

A continuación, se enumerará lo desarrollado hasta la fecha:

4.3.1. Arquitectura del sistema

La Figura 4 muestra un diagrama típico de implementación de tecnología LoRaWAN en donde cada dispositivo de campo se conectará a un dispositivo GateWay el cual a su vez se

conectará por protocolos más convencionales como WiFi, LAN Ethernet o Red Celular a un servidor de aplicación para el posterior procesamiento de los datos obtenidos.

- El sistema implementado para el siguiente proyecto puede verse en la Figura 4, los servicios desarrollados fueron los encargados de recibir los datos del “broker MQTT” y renviarlos bien sea al servidor o al cliente frontend.

A continuación, se enumeran los que se encuentran actualmente bajo desarrollo:



Figura 4. Gemelo Digital desarrollado en Godot. Fuente: Propia

- Servidor de Websockets: Se encarga de recibir los datos por MQTT y reenviarlos por Websockets.
- Servidor de escritura de base de datos: Se encarga de recibir los datos por MQTT y escribir cada registro en la base de datos.
- Servidor de lectura de base de datos: Se encarga de leer los datos en la base de datos para ser consumidos por servicios externos.
- Gemelo Digital: Es la representación en 3D del invernadero, fue generado por Godot y exportado como una aplicación HTML5.

También se implementan otros servicios de terceros como un broker MQTT mosquitto y los servicios Node Red, para el desarrollo de flujos y dashboards para la representación de información, los servicios y su interconexión por ahora se encuentra en desarrollo.

4.3.2. Modelo de Datos

Somo se seleccionó una base de datos relacional, se procedió a realizar un modelo entidad-relación para realizar el modelo de datos del gemelo digital como puede verse en la Figura 5.

Las tablas que almacenaran los datos:

- Tabla de Usuario: O la tabla *User* se encarga de almacenar los datos básicos de usuario y a esta tabla se le asocia a uno o más GateWay.
- Tabla de GateWay: Es el dispositivo encargado de recibir la información medida por los sensores por el protocolo LoraWAN, contiene información útil como número serial e IMEI para diferenciar el GateWay y poder conectarlo usando una SIM Card.
- Tablas de identificación Sensores: Son las tablas *Em300Sensor* (correspondiente



Figura 5. Dashboard realizado con Node Red. Fuente: Propia

a los sensores de temperatura y humedad ambientales), Em500Sensor (correspondiente a los sensores de CO₂, Iluminación y suelos), WeatherStation (correspondiente a la estación meteorológica) y SPHoiLBSensor (correspondiente a los sensores de medición de PH).

- Tabla de medición de sensores: Está asociada a los sensores anteriormente mencionados y contiene las mediciones recolectadas por estos.

4.3.3. Gemelo Digital desarrollado

Se desarrollaron dos interfaces, la primera usando el motor de videojuegos Godot, con el cual el usuario puede recorrer el invernadero, La Figura 6 muestra la representación virtual hecha con este motor de video juegos, en donde mediante comunicación en tiempo real se están recibiendo los datos de los diferentes sensores como por ejemplo el clima. El enfoque usado en este proyecto es completamente Web, lo cual permite el

acceso a la plataforma desde un navegador, sin necesidad de instalar software adicional, esto gracias a que Godot permite exportar a HTML5.

Con NodeRed cuyo editor de flujo puede accederse directamente usando un navegador, se crearon los tableros o Dashboards para ayudar a la presentación de información como puede verse en la Figura 7.

4.3.4. Datos recolectados

Los datos recolectados son almacenados en la base de datos de PostgreSQL, se está tomando un intervalo de 5 minutos de tiempo entre cada medida para facilitar el desarrollo de los diferentes servicios, por ahora con los datos recolectados son parciales y para realizar pruebas se ha obtenido como resultados iniciales que como muestra en la Figura 8 que al aumentar la temperatura disminuye la humedad y viceversa como es obvio.

También se están haciendo comparaciones del clima exterior con los sensores internos del

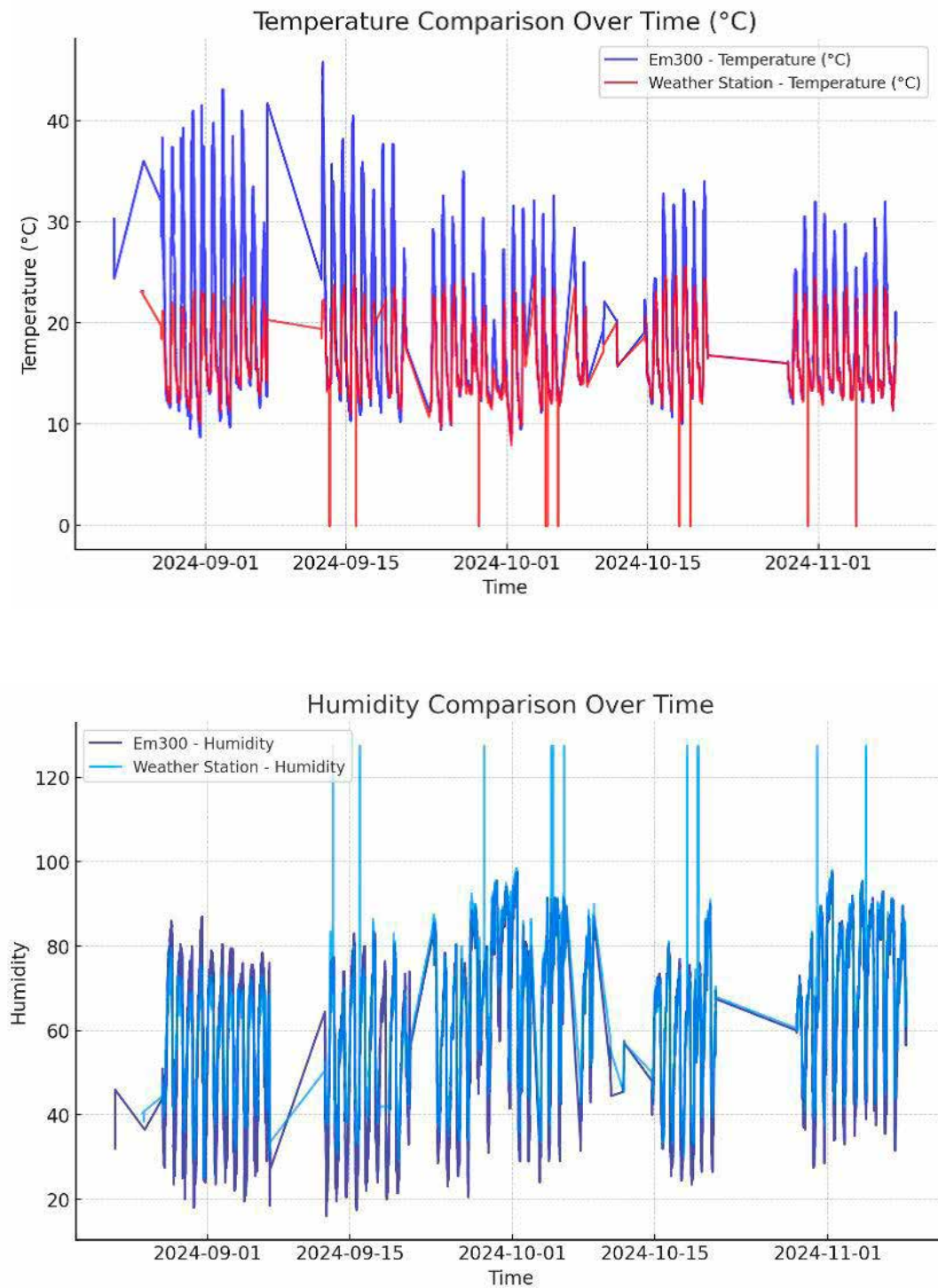


Figura 6. Gráficos de humedad y temperatura comparados el Em300 está localizado dentro del invernadero y “Weather Station” es la estación meteorológica que mide el clima externo. Fuente: Propia

invernadero como puede verse en la Figura 9 nótese que has una diferencia de entre 10 hasta 20°C hasta la fecha del 21 de septiembre de 2024 aproximadamente, y esto se debe a que se tomó la temperatura durante la construcción del invernadero, y se notó que sellar totalmente el invernadero, aumentaba excesivamente la temperatura, por lo cual se debió implementar un sistemas de circulación de aire, además debido a la llegada de temporada de lluvias, la temperatura pudo compensarse, por lo cual la temperatura de los sensores internos comparados con la estación meteorológica comenzó a ser similar.

También se midieron otras variables como el PH (Figura 9) en donde se evidencio que el suelo con mayor alcalinidad dificultaba el crecimiento y desarrollo de las plantas (en este caso de Ruda).

5. DISCUSIÓN

La adopción de tecnologías avanzadas como los gemelos digitales, el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) está revolucionando la agricultura moderna, especialmente en el crecimiento de las plantas y la seguridad alimentaria. Los gemelos digitales, como representaciones virtuales de sistemas físicos, permiten monitorear en tiempo real y simular escenarios agrícolas, optimizando la toma de decisiones y promoviendo prácticas sostenibles [16]. En la agricultura de precisión, esta tecnología ha demostrado ser eficaz en el ajuste de variables críticas como la humedad, la temperatura y la aplicación de fertilizantes, lo cual incrementa la eficiencia en el uso de recursos y mejora el rendimiento de los cultivos [17].

Estudios recientes destacan que los gemelos digitales facilitan la previsión del impacto de estrategias de manejo, como los planos de riego y

fertilización, permitiendo una toma de decisiones fundamentada en datos [18]. La simulación predictiva es crucial en la planificación agrícola, ya que permite realizar análisis de escenarios hipotéticos para anticipar y mitigar riesgos relacionados con el clima y las plagas. Según Purcell y Neubauer, esta función predictiva ayuda a los agricultores a responder de forma proactiva a los desafíos ambientales, favoreciendo una agricultura resiliente y adaptativa [19].

La combinación de gemelos digitales con tecnologías IoT e IA amplía aún más su aplicabilidad en la agricultura. Con sensores conectados, IoT permite el monitoreo constante de variables clave, como el pH del suelo, la temperatura y la humedad. Paralelamente, la IA posibilita la automatización de decisiones en el manejo de cultivos, optimizando el suministro de nutrientes y facilitando el control de plagas, reduciendo así la dependencia de intervenciones humanas y promoviendo una mayor eficiencia [20]. Richards y Tzachor señalan que la sinergia entre gemelos digitales e IA permite no solo monitoreo continuo, sino también automatización en la toma de decisiones sobre el manejo de cultivos en entornos complejos [21].

Además, la creación de granjas virtuales mediante gemelos digitales abre posibilidades para la experimentación bajo condiciones climáticas variables sin poner en riesgo cultivos reales, lo cual es esencial para desarrollar prácticas sostenibles [22]. Sin embargo, la adopción de gemelos digitales en la agricultura enfrenta desafíos. En zonas rurales, las brechas tecnológicas y la falta de infraestructura limitan el acceso a estas herramientas, requiriendo inversiones importantes en capacitación y recursos [23]. La gestión de grandes volúmenes de datos es otro reto, ya que el uso efectivo de gemelos digitales depende de datos precisos en tiempo

real, planteando necesidades de almacenamiento, análisis y seguridad de la información [24].

A pesar de estos obstáculos, el potencial de los gemelos digitales para fomentar la sostenibilidad agrícola es significativo. La capacidad de simular condiciones de cultivo bajo diversos escenarios permite identificar cultivos más resilientes al cambio climático y reducir la huella de carbono mediante la optimización de agroquímicos. Integrar gemelos digitales con IA y aprendizaje automático facilita la creación de sistemas agrícolas autónomos que gestionen el riego, la fertilización y el control de plagas en tiempo real, avanzando hacia un modelo agrícola sostenible y resiliente [25].

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto demuestra un potencial transformador de las tecnologías de la Industria 4.0 en la agricultura. Con la capacidad de monitorear en tiempo real y ajustar variables críticas como la temperatura, la humedad, el pH y la conductividad del suelo, el gemelo digital permite optimizar procesos fundamentales como el fotosíntesis y la absorción de nutrientes, aumentando así la resiliencia de las plantas frente a los cambios climáticos y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- C. Pylianidis, S. Osinga, and I. N. Athanasiadis, "Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review," *Agriculture*, vol. 11, no. 4, pp. 1-16, Apr. 2021.
- T. Klompenburg, A. Kassahuna, and C. Catal, "Crop Yield Prediction Using Machine Learning: A Systematic Literature Review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105709, Sep. 2020.
- A. Adesipo, et al., "Implementing Industry 4.0 in Agriculture," *J. Agric. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- C. Gunawan, et al., "Application of IoT and AI in Urban Agriculture," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 15, no. 6, pp. 234-244, 2019.
- X. Xiong, et al., "Climate-Smart Agriculture in China: Simulating the Impact of Climate Change," *Int. J. Agric. Sustain.*, vol. 12, no. 3, pp. 345-357, 2014.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "El estado de la

Este enfoque digital facilita la adopción de prácticas de agricultura de precisión que emplean sensores y algoritmos avanzados para ajustar automáticamente las condiciones de cultivo. Al simular y prever diferentes escenarios, el gemelo digital también permite una toma de decisiones informada y anticipada, reduciendo los riesgos asociados a factores climáticos y el uso ineficiente de recursos. En entornos urbanos y periurbanos, la aplicación del gemelo digital ofrece un marco para optimizar el cultivo en áreas con espacio limitado, contribuyendo a la seguridad alimentaria y a la sostenibilidad de la producción.

El proyecto no solo contribuye a la eficiencia y productividad agrícola, sino que también impulsa la colaboración con centros académicos e industriales para fomentar la apropiación social del conocimiento generado. Sin embargo, la implementación exitosa de estas tecnologías depende de superar desafíos de infraestructura, costos y capacitación en zonas rurales, así como de una gestión eficaz de los datos. La combinación de IoT, IA y análisis de datos para gestionar en tiempo real el desarrollo de cultivos ofrece un modelo escalable y adaptable que, con el apoyo adecuado, puede extenderse a otras regiones del país. ☺

- seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023,” Roma: FAO, 2023.
- Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), “Panorama global de las necesidades humanitarias 2023,” OCHA, 2023.
- A. Segrelles, “La desigualdad en el reparto de la tierra en Colombia: Obstáculo principal para una paz duradera y democrática,” *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 38, no. 2, pp. 409-433, 2018.
- M. Castro Castro y L. Díaz-Dueñas, “Problemáticas del agro colombiano, una revisión de su sostenibilidad económica y ambiental,” *Universidad de Investigación y Desarrollo*, pp. 1-19, 2020.
- J. A. Gómez-Ramírez, J. A. Gómez-Ramírez y J. A. Gómez-Ramírez, “Aplicación de tecnologías de la Industria 4.0 en la agricultura: Una revisión,” *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 73, no. 3, pp. 9051-9060, 2020.
- M. A. Ríos, J. A. Gómez-Ramírez y J. A. Gómez-Ramírez, “Internet de las cosas en la agricultura: Una revisión,” *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 73, no. 3, pp. 9061-9070, 2020.
- J. A. Gómez-Ramírez, J. A. Gómez-Ramírez y J. A. Gómez-Ramírez, “Inteligencia artificial en la agricultura: Una revisión” *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 73, no. 3, pp. 9071-9080, 2020.
- D. Zheng et al., “Gemelos digitales en la agricultura: cómo permitirán la próxima generación de agricultura de precisión”, *Sensors*, vol. 24, núm. 10, págs. 3117-3129, 2024.
- Y. Kim, S. Cho y M. Lee, “Agricultura digital utilizando tecnologías de IoT e IA: precisión y eficiencia en la producción de cultivos”, *Applied Sciences*, vol. 14, núm. 5, págs. 1709-1725, 2023.
- P. Papageorgas, et al., “Integración de gemelos digitales en la agricultura para la analítica predictiva y la optimización de la gestión”, *Sensors*, vol. 23, núm. 16, pág. 7128, 2023.
- M. Purcell y E. Neubauer, “Simulaciones de escenarios en gemelos digitales: mejora de las estrategias agrícolas proactivas”, *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 10, no. 4, págs. 112-126, 2023.
- B. Richards y T. Tzachor, “Automatización y toma de decisiones en la agricultura digital con integración de IoT e IA”, *Journal of Digital Agriculture*, vol. 3, no. 2, págs. 34-48, 2023.
- JR Smith, “Agricultura de precisión y gemelos digitales: transformando la eficiencia agrícola”, *International Journal of Digital Agriculture*, vol. 2, no. 1, págs. 95-102, 2024.
- ED Ramirez, et al., “Granjas virtuales y gemelos digitales: simulación de los efectos climáticos en los cultivos”, *Journal of Agricultural Technology*, vol. 15, págs. 56-67, 2023.
- H. Liu y W. Xie, “Desafíos en la adopción de gemelos digitales para la agricultura rural”, *Smart Agriculture*.
- S. Gupta y T. Chan, “Gestión de datos y seguridad en la transformación digital de la agricultura”, *Agricultural Information Systems*, vol. 18, núm. 3, pp. 231-245, 2024.
- R. Zhao et al., “Agricultura autónoma con gemelos digitales e IA: hacia una agricultura sostenible”, *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 24-38, 2024.