



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Gutierrez-Lopera, Julieth Estefanía; Toloza-Rangel, Johan Andrés; Soto-Vergel, Angelo Joseph; López-Bustamante, Oriana Alexandra; Guevara-Ibarra, Dinael
Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales
en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad
Revista UIS ingenierías, vol. 20, núm. 2, 2021, Abril-Junio, pp. 163-180
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553770380014>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad

Integrated wireless monitoring system of agri-environmental variables in a tomato crop for the generation of intensity maps

Julieth Estefania Gutierrez-Lopera ^{1a}, Johan Andrés Toloza-Rangel ^{1b}, Ángelo Joseph Soto-Vergel ², Oriana Alexandra López-Bustamante ^{1c}, Dinael Guevara-Ibarra ^{1b}

¹ Departamento de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Orcid: ^a 0000-0002-6451-679X, ^b 0000-0001-9830-9919, ^c 0000-0003-4601-1111,

^d 0000-0003-3007-8354. Correos electrónicos: ^a juliestefaniagl@ufps.edu.co, ^b johanandrestr@ufps.edu.co, ^c orianaalexandralb@ufps.edu.co, ^d dinaelgi@ufps.edu.co

² Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Fundación Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Orcid: 0000-0001-5093-0183. Correo electrónico: jvergela@uninorte.edu.co

Recibido: 4 septiembre, 2020. Aceptado: 5 enero, 2021. Versión final: 17 febrero, 2021.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema integrado de monitoreo inalámbrico para la generación de mapas de intensidad enfocado en la agricultura de precisión empleando una metodología de cuatro etapas: análisis general, construcción, desarrollo del software y, validación y gestión de cambios. El sistema cuenta con la instrumentación para medir dióxido de carbono, temperatura, radiación ultravioleta y humedad del aire y suelo; además, implementa un sistema de posicionamiento global que permite la creación de los mapas. Los datos se envían a través del protocolo LoRaWAN a una interfaz gráfica para visualizar el comportamiento de cada variable y generar los mapas; la cual se construye bajo las necesidades particulares de un cultivo de tomate. Finalmente, se obtiene un sistema adaptable para analizar a detalle las condiciones agroambientales, facilitando la toma de decisiones del agricultor.

Palabras clave: agricultura de precisión; condiciones agroambientales; interfaz gráfica; LoRaWAN; mapa de intensidad; sistema de instrumentación.

Abstract

This project presents the design and construction of an integrated wireless monitoring system for the generation of intensity maps focused on precision agriculture using a four-stage methodology: general analysis, construction, software development, and validation and change management. The system has the instrumentation to measure carbon dioxide, temperature, ultraviolet radiation and humidity of the air and soil; it also implements a global positioning system that allows the creation of the maps.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, CC BY-ND 4.0 

Como citar: J. E. Gutiérrez-Lopera, J. A. Toloza-Rangel, Á. J. Soto-Vergel, O. A. López-Bustamante, D. Guevara-Ibarra, "Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad," *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 163-180, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n2-2021014](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021014)

The data is sent through the LoRaWAN protocol to a graphic interface to visualize the behavior of each variable and generate the maps; which is built under the particular needs of a tomato crop. Finally, an adaptable system is obtained to analyze in detail the agro-environmental conditions, facilitating the farmer's decision making.

Keywords: precision agriculture; agro-environmental conditions; graphic interface; LoRaWAN; intensity map; instrumentation system.

1. Introducción

El alto crecimiento de la población humana en el último siglo ha representado un gran reto en la agricultura a nivel mundial, debido a que ha requerido maximizar la producción de alimentos para sustentar la alta demanda presente. Sin embargo, esta sobreexplotación, además del uso indiscriminado de químicos y la contaminación ambiental presente, ha disminuido la productividad del suelo, generando pérdidas de micro y macronutrientes necesarios en la cosecha de los alimentos [1]. El desperdicio de alimentos ocasionado por la falta de infraestructura adecuada en producción, medios de transporte y conservación es otro factor a tener en cuenta; solo en Europa, se estima un desperdicio de alimentos de aproximadamente 89 millones de toneladas por año, de las cuales el 39 % proviene de la etapa de fabricación. Esto genera un impacto significativo al medio ambiente, por ejemplo, datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indican que 3.3Gt de CO₂ emitidos al ambiente provienen de alimentos desperdiciados [2].

Considerando lo anterior, los países en desarrollo han diversificado los esfuerzos en el fortalecimiento de la agroindustria con el objetivo de mejorar la calidad de los alimentos y aumentar la productividad en este sector, además de generar oportunidades de empleo, alcanzar crecimiento económico y tener mayor participación en el comercio internacional de frutas y hortalizas [3]. Esto puede lograrse con la tecnificación de los procesos que permitan al agricultor adaptarse a diferentes situaciones sin perder calidad o precisión en sus acciones [4], con el objetivo de manejar eficientemente los recursos y optimizar la producción de los alimentos con base en la información inferida desde las variables agroambientales del cultivo.

Una de las herramientas de mayor utilidad son los mapas de intensidad, definidos como una visualización de datos para representar valores en una imagen bidimensional utilizando colores [5], estos valores indican diferentes rangos de las variables agroambientales y son utilizados en la analítica de datos agrícolas, lo anterior les permite a los productores agrícolas observar la calidad de las condiciones agroambientales del terreno para tomar mejores decisiones en el cuidado del cultivo [6].

Por ende, se encuentra como oportunidad de desarrollo implementar dispositivos electrónicos que permitan la adquisición de factores importantes en las cosechas con la finalidad de tomar acciones de prevención y control.

La implementación de un sistema de monitoreo automatizado presenta una solución óptima ante los inconvenientes que se exponen de la agricultura; así mismo, permite llevar un historial de las mediciones de las variables físicas con el fin de analizar mejor el ambiente en que se encuentra el cultivo y comprender el proceso de crecimiento de la planta [7].

Por tal motivo, este artículo desarrolla un sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales como dióxido de carbono (CO₂), temperatura, radiación ultravioleta (UV) y humedad del aire y suelo para la generación de mapas de intensidad implementando el sistema de posicionamiento global (GPS); además, emplea el protocolo de comunicación LoRaWAN para el envío de los datos por su largo alcance (comprendido entre 10 - 20 Km), alta tolerancia a interferencias y bajo consumo energético. La información es recibida, almacenada y mostrada en una interfaz gráfica de usuario desarrollada en el lenguaje de programación Java utilizando la versión Java 8, con el objetivo de visualizar los mapas de cada una de las variables en la producción de un cultivo de tomate y observar su comportamiento en el tiempo. 2.

2. Metodología

El diseño y construcción del sistema integrado de monitoreo se desarrolla en cuatro etapas ilustradas en la Figura 1, las cuales se definen de acuerdo con las necesidades del proyecto y permiten la medición de las variables agroambientales.

2.1. Análisis general del sistema integrado de monitoreo

Comprende la búsqueda de variables agroambientales que influyen en la producción del cultivo de tomate, analiza diferentes sistemas de localización que le permitan conocer al agricultor la coordenada de cada medición y crear los mapas de intensidad correspondientes a cada una de las variables

seleccionadas y, explora protocolos de comunicación considerando aspectos como velocidad y tasa de transmisión de datos (bps), rango de alcance y sensibilidad al ruido. Para ello se realiza una revisión de literatura enfocada a investigaciones de agricultura de precisión, entre las cuales se destacan [8] y [9]. Posteriormente, se realiza el diseño general del sistema que permita abarcar las condiciones presentadas anteriormente.



Figura 1. Etapas de la metodología.

2.2. Construcción del sistema de medición

Especifica los componentes y las interconexiones del sistema de medición para su correcto funcionamiento teniendo en cuenta las siguientes fases:

2.2.1. Selección de los sensores

Determina la tecnología de la instrumentación empleando el método de selección binaria en cada uno de los respectivos parámetros a medir. Se consideran aspectos técnicos de los componentes electrónicos como: rango de medición, exactitud, precio, consumo energético, entre otros; permitiendo así seleccionar los

dispositivos que mejor se adapten a los requerimientos para lograr un funcionamiento óptimo e integral.

Para la aplicación del método de matriz binaria es necesario definir condiciones que permitan la comparación entre los diferentes sensores y realizar una búsqueda de dispositivos que posibiliten la medición correcta de los parámetros, especificando así sus características. Por otra parte, se crea una matriz de atributos, la cual consiste en darle peso a cada uno de los criterios planteados según su importancia, además consta de las matrices de coeficientes de énfasis que se basan en la comparación de cada característica entre cada sensor, estos dos tipos de matrices se realizan con el objetivo de crear la matriz de decisión que agrupa los pesos de la matriz de atributos y coeficientes de énfasis para, finalmente, calcular el sensor más apropiado [10].

2.2.2. Diseño del sistema de medición

Representa el diagrama eléctrico de los sensores y dispositivos electrónicos implementados en el sistema de medición. Para ello es necesario realizar pruebas de funcionamiento de cada uno de los sensores individualmente en protoboard, haciendo uso de un Arduino UNO como microcontrolador y de códigos diseñados por los fabricantes, con el objetivo de definir las respectivas conexiones de cada uno de estos, para finalmente, realizar la placa de circuito impreso (PCB) en el software Eagle versión 9.6.2 con una licencia académica, considerando el tamaño de los componentes para su ubicación adecuada. Es importante resaltar que este software permite crear librerías de cualquier componente electrónico en caso de no estar disponible.

2.2.3. Integración del sistema de medición

Ensambla en la PCB la instrumentación para el monitoreo de las variables seleccionadas, además, realiza pruebas de funcionamiento de todos los sensores en conjunto con el microcontrolador Arduino Nano, con la finalidad de obtener el consumo energético, el cual es necesario para la selección de las baterías.

2.3. Desarrollo del software del sistema integrado

Construye el software que permite el funcionamiento del sistema de medición construido y la visualización de los datos mediante interfaz gráfica considerando las siguientes fases:

2.3.1. Codificación

Describe la lógica de programación del sistema para la toma de mediciones y envío de información. Para ello se consideran las pruebas de cada sensor realizadas en la

etapa anterior, con el objetivo de construir el algoritmo de funcionamiento general, así como representar la codificación de cada uno de los componentes mediante pseudocódigos.

2.3.2. Diseño de la interfaz gráfica

Comprende el mapa de navegación de la interfaz gráfica con sus respectivas pestañas de trabajo. Para la creación de esta, se escoge el lenguaje de programación Java, en vista de que presenta facilidades en el desarrollo de aplicaciones al ser un lenguaje orientado a objetos, además es multiplataforma, es decir, los programas contruidos funcionan en diversos sistemas operativos, para lo cual solo se requiere la máquina virtual de Java (JVM). Para el diseño gráfico se utiliza el software Scene Builder en la versión 8.5.0 por su variedad de componentes que permiten una mejor usabilidad para el usuario y su implementación reduce la codificación de la interfaz.

2.4. Validación y gestión de cambios

En esta etapa se realizan las pruebas de funcionamiento del sistema integrado de monitoreo que cuenta con el sistema de medición y la interfaz gráfica, así mismo, las respectivas correcciones y optimización, teniendo en cuenta las siguientes fases:

2.4.1. Tratamiento de la información

Adquiere y envía los datos del sistema de medición a la interfaz gráfica teniendo en cuenta el protocolo de comunicación inalámbrica seleccionado. En este apartado se observa la calidad de la información transmitida considerando el tiempo de transmisión. Para ello se diseña un experimento utilizando dos Arduinos UNO, el primero como transmisor y el otro como receptor, a estos se les conectan los módulos de transmisión de datos seleccionados; el proceso consiste en enviar cada una de las mediciones del sensor que contiene más bytes utilizando diversas distancias de transmisión, posteriormente estos datos retornan al Arduino transmisor y se calcula el tiempo de transmisión.

2.4.2. Retroalimentación y mejoras

Esta fase tiene en cuenta las correcciones que se efectúan durante el desarrollo de cada etapa del proyecto, con el objetivo de obtener un sistema de monitoreo inalámbrico que satisfaga las necesidades y cumpla con la propuesta planteada. Estos cambios se realizan debido a errores de funcionalidad en software y hardware, sugerencias de usuarios de prueba, optimización de procesos, entre otros.

3. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología planteada en la Figura 1.

3.1. Diseño general del sistema integrado de monitoreo

La búsqueda de las variables agroambientales para la realización del sistema de medición se basó en la influencia que tienen sobre un cultivo de tomate, principalmente en la fotosíntesis del fruto, estas son:

- Temperatura del aire: es un factor importante en el desarrollo y crecimiento del cultivo, debido a que cuando este valor se encuentra por debajo de 17°C se reduce el crecimiento de la planta, aumenta el número de tomates bocos y disminuye la fertilidad del polen, así mismo, cuando se encuentra en ambientes con temperaturas superiores a los 35°C se puede generar estrés por calor, baja la calidad de los tomates y las flores en los racimos disminuye [8].
- Humedad del aire: es un valor influyente en el cuidado de la siembra, su valor óptimo es de aproximadamente 70 %, cuando se encuentra por debajo del 65 % las condiciones de la planta empeoran, debido a que el polen no se adhiere al estigma (órgano femenino de la flor) generando desperdicios; si la humedad es superior a 75 % el polen se aglomera y no viaja de la antera (órgano masculino de la flor) al estigma [9].
- Dióxido de carbono: este influye directamente en el crecimiento de la planta, sus niveles recomendables se encuentran entre 400-1000 ppm (partículas por millón). En caso de presentarse niveles superiores a 1000 ppm se genera estrés en la planta, disminuyendo la productividad, calidad del producto y generando desperdicios no deseados. Por otra parte, niveles inferiores a 400 ppm de este nutriente reducen la velocidad del proceso de la fotosíntesis [11, 12, 13].
- Humedad del suelo: monitorear la humedad del suelo le permite al agricultor regar únicamente zonas específicas del cultivo de acuerdo con las necesidades. Para cultivos de tomate obtener una medida superior a 40 % en esta variable indica que el suelo se encuentra en saturación, causando marchitación de las raíces, retrasando la floración y reduciendo el nivel de oxígeno en el suelo y de absorción de los nutrientes, esto aumenta la susceptibilidad a enfermedades de tipo bacteriano y fúngico. Por otra parte, un valor inferior a 25 % indica

que el suelo está seco, ocasionando estrés hídrico reduciendo el tamaño de los frutos, además, la coloración de las hojas se vuelve amarillentas o violetas y el suelo se pulveriza demasiado [14, 15].

- Radiación ultravioleta: la radiación ultravioleta presente en los rayos solares que llegan sobre un cultivo de tomate es importantes en el desarrollo de este, considerando que una exposición adecuada a estos genera un mejor rendimiento y crecimiento vegetativo; además, reducen la pérdida de peso y la descomposición de la planta [16]. Durante las horas solares el cultivo debe encontrarse expuesto a radiación ultravioleta B (UV-B), presente especialmente en un índice UV superior a 3, en caso de estar constantemente expuesto a un valor inferior las células esponjosas del mesófilo disminuyen su tamaño, número y densidad, y se origina una acumulación insuficiente de carbohidratos esenciales para la respiración. Por otra parte, también se encuentra la radiación ultravioleta A (UVA), presente en índices UV entre 6 y 10, los cuales benefician al cultivo en su totalidad, sin embargo, cuando se superan estos valores la planta puede generar estrés por exceso de radiación provocando aumento en la fotorrespiración de la planta afectando su productividad debido al consumo considerable de carbohidratos y provocando fotooxidación por la destrucción de los pigmentos fotosintéticos debido a la alta radiación y sobrecalentamiento de los frutos resultando en una degradación del licopeno [17].
- Sistema de localización: para la ubicación de las mediciones se seleccionó el Sistema de Posicionamiento global, dado que proporciona información a tiempo real de la ubicación de cualquier sistema fijo o móvil. Con respecto al sector agrícola estos sistemas pueden aplicarse para realizar cartografía de la producción y los suelos, construir el contorno de los campos y aplicar vigilancia a los cultivos; esta última, en algunas ocasiones se integra con prototipos adaptables a sistemas móviles, facilitando el proceso de vigilancia [18]. Por otra parte, un estudio realizado por [19] a 545 operadores agrícolas encontraron que el 88 % de ellos resultaron satisfechos con pruebas de sistemas de orientación por GPS en sus cultivos, demostrando que este sistema se adapta a las necesidades del agricultor.
- Protocolo de comunicación: en la selección del protocolo de comunicación se encontró que autores como [20] utilizan un sistema de medición basado en Wi-fi para un modelo IoT en un entorno agrícola de adquisición y extracción de datos, mientras tanto la investigación realizada por [21] implementa Sistema

Global para las Comunicaciones Móviles (GSM) en un prototipo de mediciones agroambientales; sin embargo, estos protocolos no cumplen con las necesidades del sistema de monitoreo planteado considerando que son tecnologías de difícil adquisición en sectores apartados donde se encuentran los cultivos. Finalmente, proyectos como [22] y [23], encuentran LoRaWAN como la tecnología que mejor se adapta a la agricultura de precisión por su modulación a largo alcance, baja complejidad y larga cobertura, además se basa en un sistema de nodos locales, ideal para aplicaciones en lugares remotos como campos agrícolas. Considerando lo anterior, se seleccionó el protocolo de comunicación LoRaWAN para la transmisión de datos en el sistema de monitoreo inalámbrico.

- Diseño general: la Figura 2 representa el diseño general del sistema integrado de monitoreo inalámbrico teniendo en cuenta las variables agroambientales seleccionadas, la localización por GPS y el protocolo de comunicación LoRaWAN. Así mismo, los datos son recibidos por una interfaz gráfica remota que le permite al usuario visualizar el comportamiento de las variables y tomar decisiones oportunas en la siembra, reduciendo las pérdidas y optimizando los recursos empleados. Se debe agregar que el sistema de medición es adaptado a un vehículo terrestre no tripulado (en inglés, Unmanned Ground Vehicle - UGV), con la intención de desplazarse entre las zanjas del cultivo de tomate alcanzando una distancia de una hectárea, esto evita el uso de varios sistemas de medición basados en nodos, lo cual implicaría un aumento en los costos de implementación, cabe resaltar que no se detalla la construcción del UGV debido a que este tema no corresponde con el alcance del presente artículo.

3.2. Construcción del sistema de medición

Esta etapa desarrolla el hardware que compone el sistema de medición, comenzando por la selección de los sensores y componentes para el funcionamiento requerido, seguidamente se realiza el diseño eléctrico de conexiones y, por último, la integración y construcción del sistema de medición. A continuación, se detallan las secciones mencionadas anteriormente.

3.2.1. Tratamiento de la información

La Tabla 1 representa las condiciones técnicas a tener en cuenta en la selección de los sensores para cada una de las variables agroambientales a medir y el GPS.

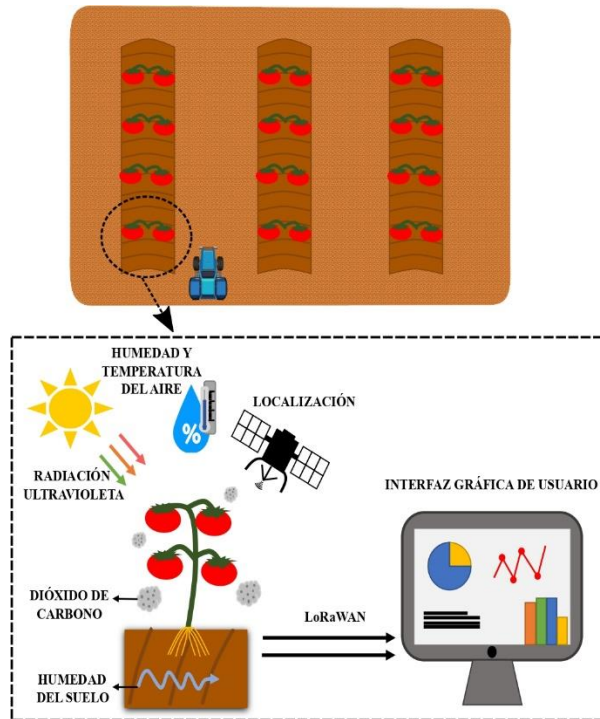


Figura 2. Diseño general del sistema integrado.

Tabla 1. Condiciones para la comparación de los sensores

Condiciones	Radiación UV	Temperatura y humedad del aire	CO ₂	Humedad del suelo	GPS
Rango de 100-400 nm	✓	✗	✗	✗	✗
Bajo consumo energético	✓	✗	✓	✓	✓
Dimensiones reducidas	✓	✓	✗	✓	✓
Bajo precio	✓	✓	✓	✓	✓
Bajo porcentaje exactitud (°C- %)	✗	✓	✗	✗	✗
Bajo tiempo de respuesta	✗	✓	✓	✗	✗
Peso liviano	✗	✗	✓	✓	✓

Nota: (✓) se tiene en cuenta, (✗) no se tiene en cuenta.

- Radiación ultravioleta: se realizó una búsqueda de los diferentes sensores que permiten medir la radiación UV con sus características como se observa en la Tabla 2. La Tabla 3 es un ejemplo de la matriz de

atributos que se aplica de manera similar para cada una de las demás variables de acuerdo con las condiciones planteadas en la Tabla 1. La matriz detalla los valores ponderados según la importancia de cada condición. A través de la Tabla 1 se evaluaron los diferentes sensores empleando las matrices de coeficientes de énfasis; con ello se construye la matriz de decisión de la Ecuación 1, la cual agrupa los pesos de la Tabla 3 y las matrices de coeficientes de énfasis; donde I1-GROVE UV, I2-SI1145, I3-UVM-30A UV, I4-GYML8511.

$$\begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.167 & 0.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0.167 & 0 \\ 0.333 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.167 & 0.333 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.333 \\ 0.167 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dando solución a la Ecuación 1 arroja como resultado los valores de la Ecuación 2, concluyendo que I1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el sensor GROVE UV es la mejor opción para la medición de la radiación UV con una ponderación de 0.361.

$$\begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.361 \\ 0.028 \\ 0.333 \\ 0.278 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tabla 2. Sensores para la medición de radiación UV

	Rango de medición (nm ^a)	Consumo de corriente (mA ^b)	Dimensiones (cm ^c)	Precio (\$ ^d)
Grove UV	200 – 400	0.31	2.4x2.0	42.000
SI1145	280 – 950	3500	2.5x2.1	42.000
UVM-30A UV	200 – 370	0.1	2.7x2.2	42.000
GYML8511	280 – 390	0.3	1.8x1.4	20.600

Nota: ^a nanómetro, ^b miliamperios, ^c centímetros, ^d pesos colombianos.

Tabla 3. Matriz de atributos para los sensores de radiación UV

	A1 ^a	A2 ^b	A3 ^c	A4 ^d	Valor	Peso
A1	0	1	1	1	3	0.5
A2	0	0	1	1	2	0.333
A3	0	0	0	1	1	0.167
A4	0	0	0	0	0	0

Nota: ^a rango de medición, ^b consumo de corriente, ^c dimensiones, ^d precio.

- Temperatura y humedad del aire: la Tabla 4 contiene variedad de sensores disponibles para la medición de la humedad y temperatura del aire con sus respectivas características.

Tabla 4. Sensores para la medición de la humedad y temperatura del aire

	Exactitud de temperatura (°C ^a)	Exactitud de humedad (% ^b)	Precio (\$ ^c)	Dimensiones (cm ^d)	Tiempo de respuesta (seg ^e)
AMT1001	1	5	16.924	6.3x2.8	10
AM2301	0.5	3	13.936	6.0x2.8	2
SHT10	0.5	4.5	24.752	2.1x1.2	8
DHT11	2	5	5.454	3.8x1.4	1
DHT22	0.2	2	18.516	2.0x1.5	12

Nota: ^a grados Celsius, ^b porcentaje, ^c pesos colombianos, ^d centímetros, ^e segundos.

En la Tabla 1 se observa la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes sensores empleando las matrices de coeficientes de énfasis; se construye la matriz de decisión de la Ecuación 3, la cual agrupa los pesos de la matriz de atributos y las matrices de coeficientes de énfasis; donde T1-AMT1001, T2-AM2301, T3-SHT10, T4-DHT11, T5-DHT22.

$$\begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.111 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.222 & 0.333 & 0.3 & 0 & 0.222 \\ 0.222 & 0.222 & 0 & 0.222 & 0.111 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.333 & 0.444 \\ 0.444 & 0.444 & 0.1 & 0.444 & 0.222 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \\ 0 \\ 0.2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La solución de la Ecuación 3 arroja como resultado los valores de la Ecuación 4, concluyendo que el sensor DHT22 es la mejor opción para la medición de la temperatura y humedad del aire con una ponderación de 0.297.

$$\begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.104 \\ 0.257 \\ 0.133 \\ 0.209 \\ 0.297 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- Dióxido de carbono: en la Tabla 5 se encuentran diferentes sensores que permiten medir CO₂ y sus características. Teniendo en cuenta la Tabla 1 se compararon los cuatro atributos entre los diferentes sensores empleando las matrices de coeficientes de énfasis; lo cual permite construir la matriz de decisión de la Ecuación 5 que agrupa los pesos de la matriz de atributos y las matrices de coeficientes de énfasis; donde C1-MQ135, C2-MG811, C3- MH-Z19B, C4-MH-Z14A.

$$\begin{bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.286 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.286 & 0.333 \\ 0.6 & 0.333 & 0.286 & 0 \\ 0.2 & 0.167 & 0.143 & 0.167 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.167 \\ 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tabla 5. Sensores para la medición de la CO₂

	Consumo de corriente (mA ^a)	Precio (\$ ^b)	Tiempo de respuesta (seg ^c)	Peso (g ^d)
MQ135	150	9.000	10	7.5
MG811	200	150.000	10	10
MH-Z19B	100	60.000	60	21
MH-Z19B	100	60.000	60	21
MH-Z14A	150	135.000	90	15

Nota: ^a miliamperios, ^b pesos colombianos, ^c segundos, ^d gramo.

Solucionando la Ecuación 5 se obtienen los resultados de la Ecuación 6, donde el sensor MH-Z19B es la mejor opción para la medición del CO₂ con una ponderación de 0.398.

$$\begin{bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.293 \\ 0.143 \\ 0.398 \\ 0.166 \end{bmatrix} \quad (6)$$

- Humedad del suelo: la Tabla 6 detalla diferentes sensores que permiten medir la humedad del suelo con sus respectivas características. Se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes sensores empleando las matrices de coeficientes de énfasis teniendo en cuenta la Tabla 1; con ello se construye la matriz de decisión de la Ecuación 5, la cual agrupa los pesos de la matriz de atributos y las matrices de coeficientes de énfasis; donde H1-Sonda YL19, H2-Resistente a corrosión, H3-SKU: SEN0193, H4-SKU: SEN0114.

$$\begin{bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.2 & 0.2 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.167 & 0.6 & 0.6 \\ 0 & 0.333 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Tabla 6. Sensores para la medición de la humedad del suelo

	Consumo de corriente (mA ^a)	Precio (\$ ^b)	Peso (g ^c)	Dimensiones (cm ^d)
Sonda YL69	35	4.600	20	6.0x3.0
Resistente a corrosión	30	25.000	28	9.9x1.5
SKU: SEN0193	5	19.600	15	4.4x2.2
SKU: SEN0114	35	8.971	20	6.0x2.0

Nota: ^a miliamperios, ^b pesos colombianos, ^c gramo, ^d centímetro.

Los resultados de la Ecuación 7 se observan en la Ecuación 8, donde H3 contiene el mayor puntaje, por lo que el sensor SKU: SEN0193 es la mejor opción para la medición de la humedad del suelo con un resultado de 0.427.

$$\begin{bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.24 \\ 0.427 \\ 0.133 \end{bmatrix} \quad (8)$$

- Sistema de posicionamiento global: la Tabla 7 contiene variedad de módulos GPS con sus diferentes características para obtener la localización de las mediciones. A través de la Tabla 1 se compararon los cuatro atributos entre los diferentes sensores empleando las matrices de coeficientes de énfasis; con ello se construye la matriz de decisión de la Ecuación 9, la cual agrupa los pesos de la matriz de atributos y las matrices de coeficientes de énfasis; donde H1-NEO-6MV2, H2-SIM808, H3-A7, H4-SIM868.

Tabla 7. Módulos GPS

	Consumo de corriente (mA ^a)	Precio (\$ ^b)	Peso (g ^c)	Dimensiones (cm ^d)
NEO-6M V2	45	39.000	18	6.5x5.5
SIM808	0.002	65.000	12	3.2x3.2
A7	0.002	65.000	27	4.4x3.4
SIM868	24	85.000	15	1.7x1.5

Nota: ^a miliamperios, ^b pesos colombianos, ^c gramo, ^d centímetro.

$$\begin{bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0.167 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.333 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0.4 \\ 0.4 & 0 & 0.5 & 0.4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.333 \\ 0.1667 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En la Ecuación 10 se observa la solución a la Ecuación 9, concluyendo que L1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el módulo GPS NEO-6M V2 es la mejor opción para generar la ubicación de las mediciones con una ponderación de 0.428.

$$\begin{bmatrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.428 \\ 0.222 \\ 0.067 \\ 0.283 \end{bmatrix} \quad (10)$$

- LoRaWAN: en la selección del dispositivo de comunicación que implemente protocolo LoRaWAN se tuvieron en cuenta las siguientes características.
 - Bajo consumo de corriente.
 - Bajo precio.
 - Amplia distancia de comunicación.
 - Dimensiones reducidas.

Considerando lo anterior, se opta por el módulo LoRaWAN LoRa RF1276, en vista que su bajo consumo de corriente evita sobrecargas en sistemas de medición complejos, cuenta con una cobertura de 5000 metros, sus dimensiones de 5.5x2.5cm permite que se adapte a sistemas que se construyen con dimensiones pequeñas y es hasta 50 % más económico respecto a dispositivos con características similares; así mismo, la comunicación basada en nodos que presenta es ideal para aplicaciones en lugares remotos como campos agrícolas.

- Servomotor: la implementación del sensor de humedad del suelo requiere emplear un servomotor que realice el movimiento necesario para introducirlo en el montículo donde se encuentra sembrada la planta de tomate y tomar la respectiva medición. Se selecciona el servomotor MG995R debido a que sus engranajes metálicos soportan mejor las vibraciones, son de alta resistencia y buena distribución de fuerza, además; emplea rotación continua de hasta 360° permitiendo controlar su posición y velocidad, además contiene un torque de 10.5kg-cm a 4.8V o 13Kg-cm a 6V.

3.2.2. Diseño del sistema de medición

La Figura 3 detalla las conexiones empleadas para el sistema de medición, utilizando una placa Arduino nano, debido a que tiene pines análogos y digitales adaptables al protocolo de comunicación UART, permitiendo interconectar la instrumentación conformada por el GPS y los sensores SEN0193, DHT22, GROVE UV y MH-Z19B, además del módulo de comunicación LoRa RF1276 y el servomotor.

Por otro lado, para la alimentación del sistema se emplea el conector XT60 para la batería de 11V a 1500maH; además, se añade el regulador de voltaje UBEC 5V a 1.5A para la alimentación directa hacia el servomotor, debido a que el arduino no suministra la corriente suficiente para el correcto funcionamiento de este. Hay que mencionar que todo el sistema se activa a través del interruptor 1 y se implementa un led indicador para verificar si está energizado correctamente.

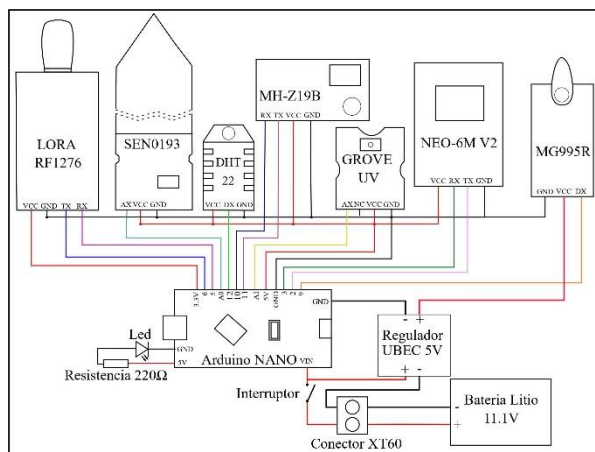


Figura 3. Circuito esquemático del sistema de medición.

Los sensores SEN0193 y GROVE UV emplean conexiones analógicas, el sensor DHT22 y el servomotor MG995R forman parte de las conexiones digitales y, el sensor MH-Z19B, el módulo GPS y LoRa RF1276 emplean el protocolo de comunicación UART.

La Figura 4 integra todos los componentes en la PCB donde los sensores se encuentran distribuidos equitativamente en la placa, con el objetivo de realizar trayectorias cortas y evitar interconexión entre estas, debido a que en caso de encontrarse muy contiguos se pueden generar fallas como mediciones erróneas o daño en los dispositivos; se debe agregar que el regulador UBEC y los sensores GROVE UV y LoRa RF1276 no contaban con librerías en el software de diseño, por lo tanto fue necesario construirlos considerando las dimensiones de estos.

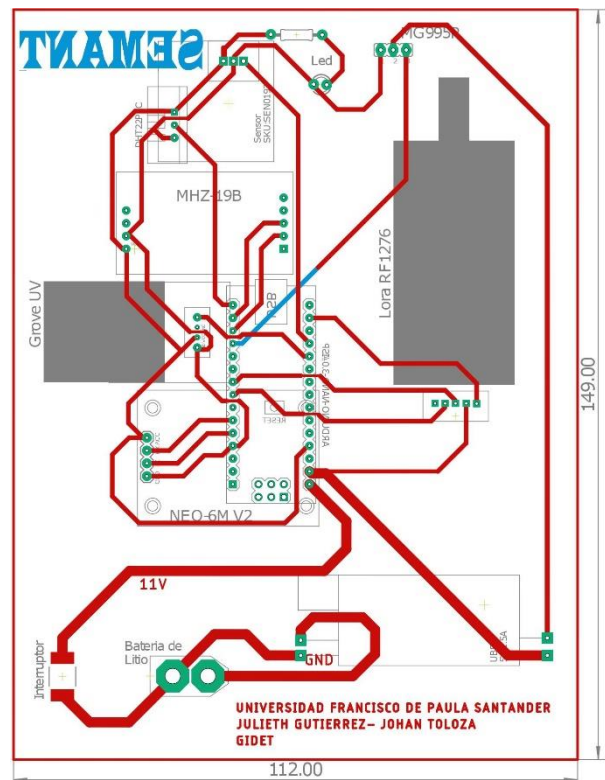


Figura 4. Esquema de la PCB del sistema de medición.

3.2.3. Integración del sistema de medición

El sistema de medición se expone en la Figura 5 con sus respectivos dispositivos instalados y funcionando en la placa, cabe resaltar que el sensor SEN0193 no se encuentra ensamblado directamente debido a que este se encarga de medir la humedad del suelo en la planta. Como se observa en la Figura 5, este cuenta con un sistema que permite convertir el movimiento circular del servomotor a movimiento lineal, con la finalidad que el sensor ingrese al suelo, tome la medición y regrese a su posición inicial evitando que se choque con el montículo del cultivo.

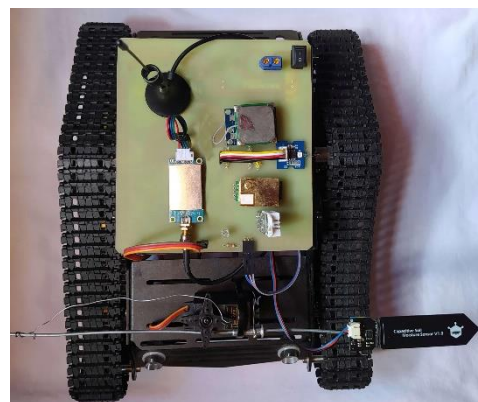


Figura 5. Sistema de medición.

El sistema tiene un consumo total de 745.3mA, donde 110.3mA van dirigidos a los sensores, 150mA al Arduino Nano, 45mA al GPS, 100mA al LoRa y 300mA al servomotor. De acuerdo con la capacidad de 1500mAh con la que cuenta la batería implementada, el tiempo de funcionamiento es de aproximadamente 2 horas hasta que sea necesario recargarla.

3.3. Desarrollo del software del sistema de medición

Comprende el diseño del algoritmo general que da funcionalidad a todos los componentes integrados en el

sistema de medición, los pseudocódigos de funcionamiento de cada componente y, el diseño y construcción de la interfaz gráfica.

3.3.1. Codificación

El algoritmo del sistema de medición de la Figura 6 contiene el proceso de medición de las variables de CO₂, humedad del suelo, índice ultravioleta y, humedad y temperatura del ambiente, además de los datos de geolocalización.

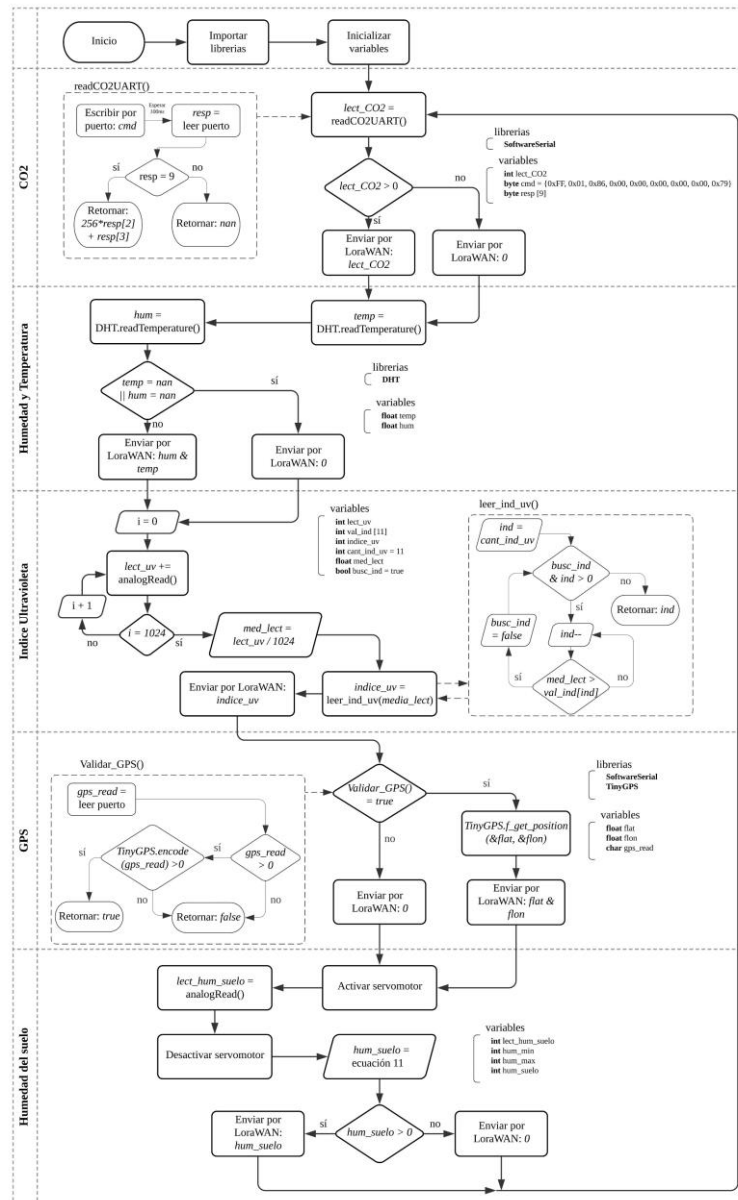


Figura 6. Algoritmo de funcionamiento del sistema de medición.

La etapa inicial consiste en importar las librerías empleadas para el funcionamiento de cada componente y la inicialización de las variables utilizadas en las demás etapas, posterior a esto, cada proceso de medición se basa en medir la variable a través del sensor, validar la información recibida y transmitir estos datos a la interfaz gráfica y base de datos mediante el módulo de comunicación LoRa, donde el tiempo empleado en cada ciclo de mediciones es de aproximadamente 8 segundos.

En la etapa de medición de humedad del suelo se realiza un proceso de conversión para calcular el porcentaje de humedad mediante la Ecuación 11, la cual se obtiene a través de un proceso de calibración similar a [24], hay que mencionar que se requiere de una activación previa del servomotor, posterior a la realización de esto se repite el procedimiento de los demás sensores y se desactiva el servomotor para regresar el sensor a su posición inicial.

$$hum = 6000000 * ((lect_{hum_{suelo}})^{-2.149}) \quad (11)$$

Donde:

- hum : Humedad del suelo (%)
- $lect_{hum_{suelo}}$: Lectura del sensor

A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los componentes empleados para el sistema de la medición.

- Dióxido de carbono: la lógica de programación para el sensor de dióxido de carbono se representa en la Figura 7, teniendo en cuenta que para su correcto funcionamiento se requiere un precalentamiento de 3 minutos antes de tomar las mediciones. Para ello, se emplean los niveles TTL de comunicación serial que dispone el sensor, por medio del cual se envía una trama de 9 bytes específicos con la finalidad de activar el sensor e iniciar la medición de CO₂; éste envía una respuesta de 9 bytes al Arduino, el cual realiza un proceso de decodificación y verifica los datos recibidos para convertirlos en lecturas de CO₂.

```

INICIO PROCESO: LECTURA DE DIOXIDO DE CARBONO
1.  Entradas: bytes entregados desde el sensor
2.  librerías: SoftwareSerial
3.  variables iniciales:  $s, lect\_CO2$ 
4.  escribir por el puerto serial -> {0xFF,0x01,0x86,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x79}
5.   $s <-$  leer respuesta del sensor por el puerto serial
6.  si  $s != 9$  bytes &  $s[0] != 0xFF$  &  $s[1] != 0x86$  entonces:
7.      imprimir: 'Error en la lectura de CO2'
8.  si no:
9.       $lect\_CO2 <- s[2]*256 + s[3]$ 
10.     imprimir: lect_CO2
11.  fin si
FIN PROCESO
    
```

Figura 7. Pseudocódigo sensor de dióxido de carbono MH-Z19B.

- Temperatura y humedad: el pseudocódigo de la Figura 8 describe el funcionamiento del sensor de humedad y temperatura DHT22, el cual se mantiene inicialmente en modo de bajo consumo al momento de encender; únicamente pasa a modo ejecución cuando el Arduino envía la señal de activación por el pin de datos, en este modo el sensor realiza la toma de mediciones y envía una respuesta de 40 bits a la placa, los cuales son decodificados mediante la librería “DHT” y convertidos a valores de lectura de las variables de temperatura y humedad.

```

INICIO PROCESO: LECTURA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
1.  Entradas: temperatura y humedad ambiente desde el sensor
2.  librerías: DHT
3.  variables iniciales:  $hum, temp$ 
4.  modelo del sensor: DHT22
5.   $hum <-$  humedad del ambiente desde el sensor
6.   $temp <-$  temperatura del ambiente desde el sensor
7.  si  $isnan(lect\_hum) || isnan(lect\_temp)$  entonces:
8.      imprimir: 'Error en la lectura de Temperatura y Humedad'
9.  si no:
10.     imprimir:  $temp (^{\circ}C)$ 
11.     imprimir:  $hum (\%)$ 
12.  fin si
FIN PROCESO
    
```

Figura 8. Pseudocódigo sensor de temperatura y humedad DHT22.

- Radiación ultravioleta: la medición de la radiación ultravioleta a través del sensor GROVE UV requiere de un sistema estándar sencillo representado en la Tabla 8 en el cual se establecen los diferentes niveles e índices UV para cada lectura del sensor según [14].

Tabla 8. Índices Ultravioleta

Niveles	Bajo		Moderado			Alto		Muy alto		Extremo	
Índice UV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Lectura	227	318	408	503	606	696	795	881	976	1079	1170
Longitud de Onda (nm)	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370-400	
Radiación Ultravioleta	UV-B					UV-A					

El pseudocódigo de la Figura 9 describe el funcionamiento del sensor de radiación ultravioleta, este se conecta a un pin analógico del Arduino encargado de tomar la medición, considerando que se promedian 1024 lecturas para obtener un resultado más preciso, debido a que la resolución del conversor análogo-digital que cuenta el Arduino es de 10 bits; finalmente, el valor obtenido es comparado con datos de medición de la Tabla 8 para conocer el valor de índice UV presente al momento de realizar la medición.

```

INICIO PROCESO: LECTURA INDICE ULTRAVIOLETA
1.  Entradas: lectura analógica del sensor
2.  variables iniciales: lect uv, indice, cont lect, valor ind uv, media lect, total lect, busc ind
3.  repetir desde j = 0:
4.    lect uv <- lectura analógica desde el sensor
5.    si isnan(lect uv) entonces:
6.      imprimir: 'Error en la lectura del indice uv'
7.    si no:
8.      total lect = lect uv \ total lect
9.      j = j + 1
10.     media lect = total lect / cont lect \
11.   fin si
12.   hasta j = 1024
13.   repetir:
14.     indice = 1
15.     si lectura > valor ind uv [indice]:
16.       busc ind = falso
17.     fin si
18.     mientras que busc ind == falso && indice > 0
19.       imprimir: indice
FIN PROCESO

```

Figura 9. Pseudocódigo sensor de radiación ultravioleta GROVE-UV.

- **Humedad del suelo:** la Figura 10 representa la lógica de programación del sensor de humedad del suelo. Para realizar la toma de mediciones el sensor se conecta a un pin de lectura analógica del Arduino, este se encarga de realizar la lectura y convertir los datos recibidos a valores de humedad aplicando la Ecuación 11 obtenida en la calibración inicial. Cabe resaltar que mientras el servomotor no se active, el sistema envía el valor de -1 % para identificarla como un valor descartable en el análisis.

```

INICIO PROCESO: LECTURA HUMEDAD DEL SUELO
1.  Entradas: lectura analógica desde el sensor
2.  variables iniciales: lect hum suelo, hum min, hum max, hum
3.  lect hum suelo <- lectura analógica desde el sensor
4.  si isnan(hum suelo) entonces:
5.    imprimir: 'Error en la lectura del humedad del suelo'
6.  si no:
7.    si lect hum suelo > hum min & lect hum suelo < hum max entonces:
8.      hum <- conversión a porcentaje mediante ecuación (11)
9.      imprimir: hum
10.   si no:
11.     imprimir: 'Lectura errónea'
12.   fin si
13.   fin si
FIN PROCESO

```

Figura 10. Pseudocódigo sensor del suelo SEN0193.

- **GPS:** la lógica de programación para el módulo GPS se representa en la Figura 11, este implementa el protocolo de comunicación UART, por lo que se emplea la librería SoftwareSerial proporcionada por Arduino, además la librería TinyGPS encargada de

procesar los datos proporcionados por el módulo GPS; para su funcionamiento se decodifican los bytes entregados, entre los cuales se encuentra información de latitud, longitud, variación magnética, fecha, entre otros; posterior a verificar la información se extraen los datos de latitud y longitud para visualizarlos, en caso de recibir datos nulos o incorrectos se informa al usuario del error.

```

INICIO PROCESO: LECTURA POSICIONAMIENTO MEDIANTE GPS
1.  Entradas: latitud y longitud desde el sensor
2.  librerías: SoftwareSerial, TinyGPS
3.  variables iniciales: flat, flon, lect, validar
4.  lect <- leer puerto serial
5.  validar <- decodificar(lect)
6.  si validar true entonces:
7.    flat <- latitud desde el sensor
8.    flon <- longitud desde el sensor
9.    imprimir: flat
10.   imprimir: flon
11.   si no:
12.     imprimir: "Error en lectura de GPS"
13.   fin si
FIN PROCESO

```

Figura 11. Pseudocódigo módulo GPS NEO-6M V2.

- **LoRa:** Los módulos de comunicación LoRa requieren de un establecimiento de parámetros previo a su implementación, para ello se utiliza el software libre “RF tool for RF1276T” de la Figura 12 proporcionado por “AppconWireless”, esta herramienta permite ajustar los valores de frecuencia, velocidad de baudios, ID del nodo e ID de la red, los cuales deben estar sincronizados para una correcta comunicación punto a punto. El pseudocódigo de la Figura 13 representa el funcionamiento del módulo transmisor de comunicación LoRa en el Arduino Nano, donde los datos son escritos a través del puerto serial al módulo, el cual automáticamente los transmite a los demás nodos presentes en el sistema, en este caso en concreto, al módulo LoRa conectado en el puerto USB del computador donde se encuentre la interfaz gráfica instalada.

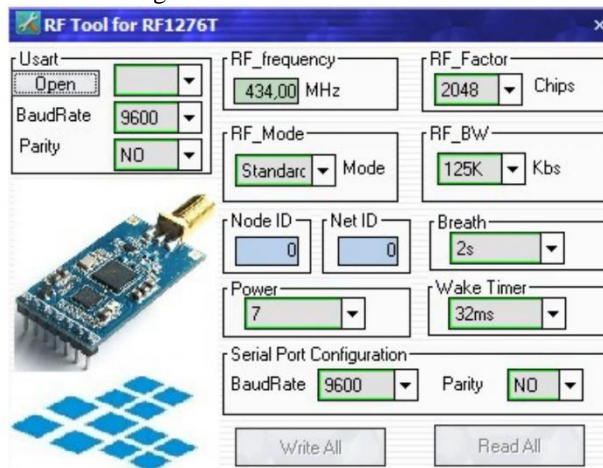


Figura 12. Configuración de los módulos LORA en el Software libre. Fuente: [25].

INICIO PROCESO: ENVIO DE DATOS LORA

1. **Salidas:** datos de envío
2. librerías: SoftwareSerial
3. variables iniciales: *dato*
4. iniciar puerto serial
5. escribir por el puerto serial -> *dato*
6. **esperar 1500ms**

FIN PROCESO

Figura 13. Pseudocódigo módulo LORA RF1276 emisor.

- Servomotor: La lógica de programación para el servomotor se representa en la Figura 14, este implementa la librería Servo proporcionada por Arduino; para su funcionamiento se le envía el ángulo de desplazamiento deseado a la librería, la cual se encarga de convertir este valor a datos PWM y enviarlos al servomotor para que realice el respectivo movimiento, posteriormente se repite el proceso para ubicar el servomotor en su posición inicial.

INICIO PROCESO: DESPLAZAMIENTO SERVOMOTOR

1. **Salidas:** Ángulo de desplazamiento
2. librerías: Servo
3. variables iniciales: *ang_final*, *ang_inicial*
4. escribir al servo -> *ang_final*
5. **esperar 5000ms**
6. escribir al servo -> *ang_inicial*
7. **esperar 5000ms**

FIN PROCESO

Figura 14. Pseudocódigo servomotor MG995R.

3.3.2. Codificación

La Figura 15 contiene el mapa de navegación que comprende la interfaz gráfica diseñada en Scene Builder y programada en Java, en ella el usuario puede navegar a través de 6 ventanas que le permiten observar información importante para el desarrollo del cultivo. Cabe señalar que la interfaz de usuario no es adaptable a cualquier resolución de pantalla.

- Inicio: contiene el objetivo del proyecto junto con el control de la medición a tiempo real. Los datos recolectados en este proceso son almacenados mediante archivos de valores separados con comas (csv) en una carpeta denominada “Datos_SEMANT” ubicada en la raíz del disco duro, posteriormente el usuario puede acceder a esta información a través de la interfaz.
- Base de datos: permite observar mediante una tabla las mediciones almacenadas en la base de datos o la información de las variables a tiempo real utilizando la fecha y hora establecidas por el servidor donde se encuentra almacenada la base de datos debido a que el microcontrolador no cuenta con un dispositivo que permita conocer estos datos.

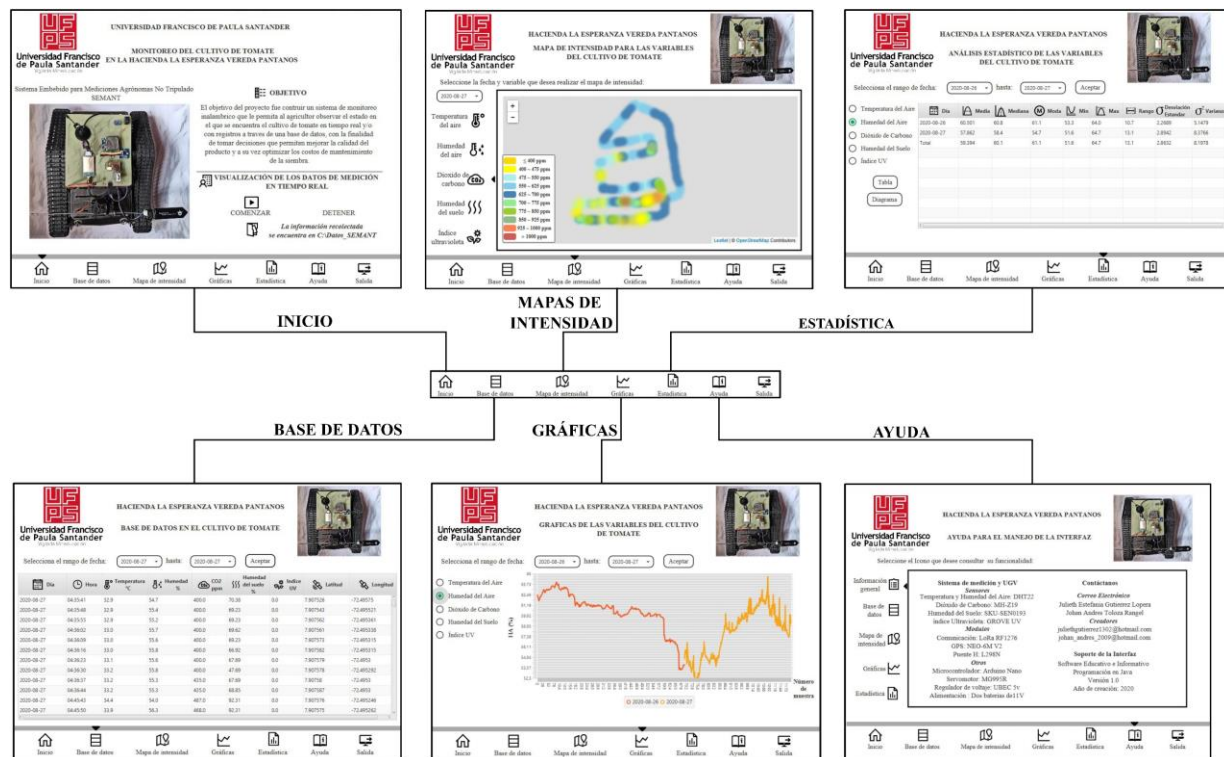


Figura 15. Mapa de navegación de la interfaz gráfica.

- Mapa de intensidad: Cuenta con la opción de generar los mapas de intensidad de cada variable agroambiental individualmente en una fecha específica correspondiente a un día.
- Gráficas: permite observar mediante gráficas lineales todas las variables agroambientales en la medición a tiempo real o cada variable individualmente tomando información de la base de datos.
- Estadística: con el objetivo de generar en una tabla o gráfica de barras medidas estadísticas como media, mediana, desviación estándar, entre otras; esta opción funciona únicamente para la información de la base de datos.
- Ayuda: despliega pestañas de información acerca del funcionamiento de la interfaz, así como una descripción general del proyecto y sus autores.

En las ventanas de “Base de datos”, “Gráficas” y “Estadística” para acceder a la información de la base de datos el usuario debe seleccionar un rango de una o más fechas de acuerdo con los archivos almacenados, los cuales se distribuyen por día.

3.4. Validación y gestión de cambios

Realiza las pruebas de funcionamiento a todo el sistema de monitoreo, así mismo, las respectivas correcciones y optimización.

3.4.1. Tratamiento de la información

Inicialmente se realizan pruebas para obtener el tamaño de bytes de la medición retornada por cada sensor, obteniendo que las mediciones de CO₂ e Índice UV tienen un peso de 2 bytes, mientras que los valores de temperatura, latitud, longitud y humedad del aire y suelo son de 4 bytes, considerando esto, los datos enviados en el experimento cuentan con un peso de 4 bytes.

En la Figura 16 se observan las gráficas de mediciones en tiempo real al momento de realizar las pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo. Es importante resaltar que el vehículo tarda alrededor de 4 horas recorriendo una hectárea, esto sin tener en consideración el tiempo de recarga de las baterías. La información recolectada en este proceso es almacenada correctamente en la base de datos de acuerdo con lo estipulado en la sección 3.3.2.

Posteriormente, mediante la interfaz se accede a la información recolectada y se generan los mapas de intensidad como se observa en la Figura 17.

La distribución de colores en el mapa de intensidad se realiza mediante colores cálidos (tonalidades de amarillo y rojo) para representar zonas de cuidado, y colores fríos (tonalidades de azul y verde) para representar zonas con valores adecuados, lo cual le permite al agricultor observar claramente el estado en el que se encuentra el cultivo.

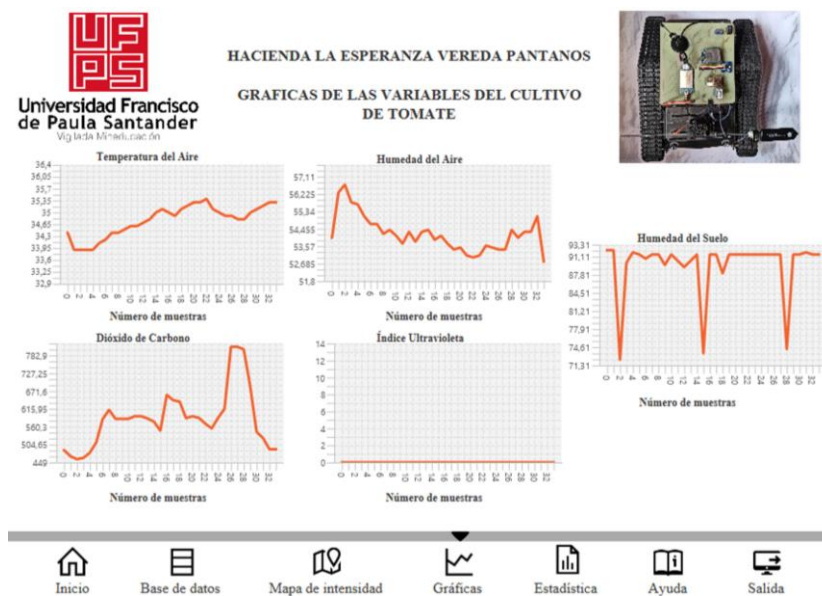


Figura 16. Gráficas de tiempo real.

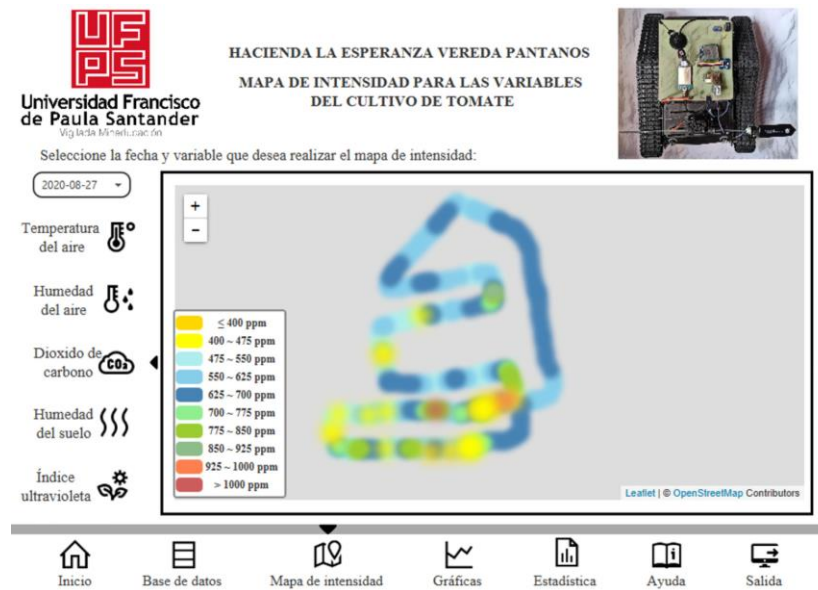


Figura 17. Mapa de intensidad para temperatura del aire.

Gracias a esto las personas encargadas del manejo de la siembra pueden enfocarse principalmente en las zonas de mayor necesidad, reduciendo costos y tiempo de mantenimiento.

3.4.2. Retroalimentación y mejoras

Esta etapa fue empleada desde el comienzo del desarrollo del proyecto, puesto que inicialmente se emplearon pruebas de funcionamiento en los sensores utilizando códigos de prueba creados por cada fabricante, con el objetivo de ver su comportamiento y detectar deficiencias; así mismo, a medida que se acoplaban los sensores, se realizaban pruebas para optimizar la codificación y reducir el consumo de memoria en el microcontrolador.

En el desarrollo de la interfaz gráfica se realizaba la retroalimentación posterior a la creación de cada ventana, con el propósito observar la fluidez y usabilidad que esta presentaba, posteriormente se hacían cambios y mejoras de acuerdo con los criterios de desarrollo de los autores.

Por otro lado, realizando el sistema de monitoreo se pudo observar que no se informaba al usuario cuando se interrumpía la conexión entre el sistema de medición y la interfaz gráfica, por lo tanto, se agregó un mensaje de alerta que cumpliera este objetivo como se observa en la Figura 18.

4. Conclusiones

El artículo presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales para la generación de mapas de intensidad, para ello el sistema de medición recolecta y envía la información a la interfaz gráfica construida en Java a través del protocolo de comunicación LoraWAN, la cual se encarga de procesar los datos y generar los mapas. Este sistema resulta ser eficiente y confiable para el monitoreo y almacenamiento de la información utilizando una base de datos que permite llevar el control de las mediciones con el objetivo de realizar un análisis de los datos para la toma de decisiones.

Adaptar a un UGV el sistema de medición diseñado y construido resulta 70 % más económico en comparación a utilizarlo mediante nodos distribuidos por el cultivo, debido a que el vehículo permite que el sistema realice un recorrido a través de las zanjales para tomar las mediciones, logrando, además, un mayor rango de cobertura.

El diseño de la interfaz gráfica se limita únicamente a sistemas operativos Windows, además, cuenta con una resolución fija, dificultando su manejo en pantallas que tengan un tamaño inferior, estos dos aspectos son considerados para futuras mejoras y correcciones.



Figura 18. Ventana de error.

El sistema construido se adapta a cultivos en zonas abiertas o cerradas de tipo invernadero, y, a pesar de estar diseñado para tomate, el agricultor puede implementar el sistema en cualquier otro tipo de siembra y observar las condiciones ambientales en las que se encuentra, haciendo de este un prototipo de gran utilidad para el sector agrícola.

Referencias

- [1] P. K. Dubey, G. S. Singh, P. C. Abhilash, "Agriculture in a Changing Climate", en *Adaptive Agricultural Practices*, Suiza: Springer Nature Switzerland, 2020, pp. 1-10, doi:10.1007/978-3-030-15519-3
- [2] J. M.-M. D. Hidalgo, "El desperdicio de alimentos, un problema global", *IndustriAmbiente: gestión medioambiental y energética*, vol. 29, pp. 28-33, 2020.
- [3] C. Silva, D. Baker, A. Shepherd, C. Jenane, S. Miranda da Cruz, "Tecnologías que dan forma al futuro", en *Agroindustrias para el desarrollo*. Roma, Italia: La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 1998, pp. 124-132.
- [4] C. M. Burbano-Labrador, "Sistema de monitoreo de gases de efecto invernadero de económica implementación", tesis de grado, Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, 2016.
- [5] T. S. Brugler, R. A. Craig, V. C. Conzola, T. M. Eischeid, M. E. Molander, "Interactive data visualization for trend analysis", US 8959003B2, 17-feb-2015.
- [6] M. P. Wachowiak, D. F. Walters, J. M. Kovacs, R. Wachowiak Smolíková, A. L. James, "Visual analytics and remote sensing imagery to support community-based research for precision agriculture in emerging areas", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 143, pp. 149-164, 2017, doi:10.1016/j.compag.2017.09.035
- [7] J. Gómez, S. Castaño, T. Mercado, J. García, A. Fernández, "Sistema de internet de las cosas (iot) para el monitoreo de cultivos protegidos internet", *Ingeniería e Innovación*, vol. 5, no. 1, pp. 24-31, 2017, doi: 10.21897/23460466.1101
- [8] T. Andrea, "Manual de cultivo del tomate al aire libre", Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile, Boletín INIA No. 376, 2017.

- [9] S. Q. Yang, Z. Q. Yang, L. Wang, J. Li, M. Y. Zhang, K. W. Li, "Effect of high humidity and high temperature interaction on photosynthetic characteristics of greenhouse tomato crops", *Chinese Journal of Ecology*, vol. 37, pp. 57-63, doi: 10.13292/j.1000-4890.201801.007
- [10] O. Cárdenas, "Capítulo 6 Selección de instrumentos", 2010. [En línea]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosD ictados/web%20instrumentacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/libro%20pdf/CAP%206%20Selecci%F3n.pdf>
- [11] De Ruiter, "Managing Light and CO2 for Tomatoes in Protected Culture", *De Ruiter*, pp. 1-2, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.deruiterseeds.com/en-ca/resources/cultivation-insights/managing-light-and-co2-for-tomatoes-in-protected-culture.html>.
- [12] H. Yamazaki, N. Suzui, Y. G. Yin, N. Kawachi, S. Ishii, H. Shimada, S. Fujimaki, "Live-imaging evaluation of the efficacy of elevated CO2 concentration in a closed cultivation system for the improvement of bioproduction in tomato fruits", vol. 32, no. 1, pp. 31-37, 2015, doi:10.5511/plantbiotechnology.14.1210a
- [13] Y. Ji, T. Li, M. Zhang, S. Sha, "Design of CO2 fertilizer optimizing control system on WSN", vol. 46, pp. 201-207, doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033
- [14] E. C. Martin, C. Munoz, *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿cuándo?*. Tucson, AZ, USA: College of Agriculture, University of Arizona, 2017.
- [15] B. I. Ramos López et al., "Estimación del consumo de agua en plantas de tomate (*solanum lycopersicum* L.) y su interacción con el microclima del invernadero", tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [16] H. A. Ibrahim, M. A. Abdullah, N. M. Hassan, H. S. ElBatan, "Effect of different level of solar ultra violet radiation on the vegetative growth, yield and quality of cherry tomatoes", *Bioscience Research*, vol. 15, no. 3, pp. 2408-2415, 2018.
- [17] A. Martinez, "Efecto de la radiación solar en la calidad de los productos hortalizas", en *Congreso Internacional de Hortalizas en el Trópico*, 2012, pp. 1-15.
- [18] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, I. Moscholios, "A compilation of uav applications for precision agriculture", *Computer Networks*, vol. 172, pp. 107-148, 2020, doi:10.1016/j.comnet.2020.107148
- [19] A. R. Khanal, A. K. Mishra, D. M. Lambert, y K. K. Paudel, "Modeling post adoption decision in precision agriculture: A Bayesian approach", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 162, pp. 466-474, 2019, doi:10.1016/j.compag.2019.04.025
- [20] M. R. Suma y P. Madhumathy, "Acquisition and Mining of Agricultural Data Using Ubiquitous Sensors with Internet of Things", en *International Conference on Computer Networks and Communication Technologies*, vol. 15. Singapur: Springer, 2019, doi:10.1007/978-981-10-8681-624
- [21] Meeradevi, M. A. Supreetha, M. R. Mundada, J. N. Pooja, "Design of a smart water-saving irrigation system for agriculture based on a wireless sensor network for better crop yield", en *International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering 2018*, vol. 500. Singapur: Springer, 2018, doi:10.1007/978-981-13-0212-111
- [22] D. Taskin, S. Yazar, "A Long-range context-aware platform design for rural monitoring with IoT In precision agriculture", *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 15, no. 2, pp. 1-11, 2020, doi:10.15837/IJCCC.2020.2.3821
- [23] R. K. Singh, M. Aernouts, M. De Meyer, M. Weyn, R. Berkvens, "Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses", *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 18-27, 2020, doi:10.3390/s20071827
- [24] F. S. Muzdrikah, M. S. Nuha, F. A. Rizqi et al., "Calibration of capacitive soil moisture sensor (sku: Sen0193)", en *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST). IEEE*, 2018, pp. 1-6.
- [25] Appconwireless, "Professional IoT solution, LoRa radio solution, LoRaWAN solution, Radio data module", [En línea]. Disponible en: <https://www.appconwireless.com/>.