	<b>GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>		<b>Código</b>	FO-GS-15
			<b>VERSIÓN</b>	02
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>		<b>FECHA</b>	03/04/2017
			<b>PÁGINA</b>	1 de 1
<b>ELABORÓ</b>		<b>REVISÓ</b>		<b>APROBÓ</b>
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): JULIETH ESTEFANIA

APELLIDOS: GUTIERREZ LOPERA

NOMBRE(S): JOHAN ANDRÉS

APELLIDOS: TOLOZA RANGEL

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ÁNGELO JOSEPH

APELLIDOS: SOTO VERGEL

NOMBRE(S): ORIANA ALEXANDRA

APELLIDOS: LOPEZ BUSTAMANTE

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO

RESUMEN

La investigación desarrollada presenta el diseño, construcción y pruebas de funcionamiento de un sistema de monitoreo inalámbrico enfocado en la agricultura de precisión encargado de recolectar información de variables agroambientales utilizando un vehículo terrestre no tripulado. El proyecto cuenta con enfoque cualitativo y cuantitativo a través de un diseño experimental con alcance exploratorio y descriptivo. Los resultados presentan un prototipo con la capacidad de cumplir las funciones requeridas en la investigación, creando un sistema que utiliza el protocolo de comunicación LoRaWAN para la transmisión de la información a una interfaz gráfica encargada de generar los mapas y almacenar los datos. Finalmente, 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 similar, haciendo de éste un prototipo de gran utilidad para el sector agrícola.

PALABRAS CLAVE: Cultivo de tomate, sistema embebido, vehículo terrestre no tripulado, mapas de intensidad.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 126 PLANOS:      ILUSTRACIONES:   47   CD ROOM   1

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR  
MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN  
VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO

JULIETH ESTEFANIA GUTIERREZ LOPERA

JOHAN ANDRÉS TOLOZA RANGEL

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR  
MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN  
VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO

JULIETH ESTEFANIA GUTIERREZ LOPERA

JOHAN ANDRÉS TOLOZA RANGEL

Proyecto de grado modalidad trabajo de investigación para optar por el título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR: MSc. IE. ÁNGELO JOSEPH SOTO VERGEL

CODIRECTOR: MSc. IE. ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE

ASESOR: ANTONIO ORTIZ ÁLVAREZ  
Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Colombia

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA


2021

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

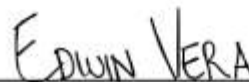
Fecha: CÚCUTA, 10 DE MAYO DE 2021  
Hora: 16:00  
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO  
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
Título de la Tesis: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO."  
Jurados: IE, ES<sub>p</sub> SERGIO IVÁN QUINTERO AYALA  
IE, MSc EDWIN JOSE VERA ROZO  
Director: IE, MSc. ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL  
Codirector: IE, MSc. ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
JULIETH ESTEFANIA GUTIERREZ LOPERA	1161339	CUATRO, OCHO (4,8)

### MERITORIA



SERGIO IVÁN QUINTERO AYALA



EDWIN JOSE VERA ROZO



**DINAEL GUEVARA IBARRA**  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Electrónica

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 10 DE MAYO DE 2021  
Hora: 16:00  
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO  
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
Título de la Tesis: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO."  
Jurados: IE, ES<sub>p</sub> SERGIO IVÁN QUINTERO AYALA  
IE, MSc EDWIN JOSE VERA ROZO  
Director: IE, MSc. ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL  
Codirector: IE, MSc. ORIANA ALEXANDRA LÓPEZ BUSTAMANTE  
Nombre del Estudiante Código Calificación  
JOHAN ANDRÉS TOLOZA RANGEL 1161310 CUATRO, OCHO (4,8)

### MERITORIA



SERGIO IVÁN QUINTERO AYALA



EDWIN JOSE VERA ROZO



**DINAELE GUEVARA IBARRA**  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Electrónica

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA  
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores

BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS

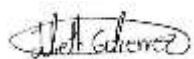
Ciudad

Cordial saludo:

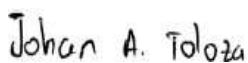
JULIETH ESTEFANIA GUTIERREZ LOPERA, JOHAN ANDRÉS TOLOZA RANGEL, identificado(s) con la C.C. N° 1.090.521.482, 1.090.513.929, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN PARA GENERAR MAPAS DE RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE TOMATE UTILIZANDO UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO presentado y aprobado en el año 2021, como requisito para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que “**los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores**”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



1.090.521.482



1.090.513.929

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecemos a Dios por la sabiduría, entendimiento y paciencia para la terminación del proyecto, así mismo, por brindarnos salud y guiarnos durante todo el camino recorrido considerando las diferentes dificultades que se presentaron en la carrera.

Gracias a nuestras familias quienes nos apoyaron en el transcurso de cumplir este sueño de ser profesionales con el título de Ingenieros Electrónicos, además de tener paciencia y de alentar en los momentos que se requirieron.

Gracias a nuestros docentes que nos transmitieron sus conocimientos en cada una de las materias cursadas, lo cual nos ayudó a formarnos como profesionales éticos. Por otro lado, agradecer a la Universidad Francisco de Paula Santander por brindarnos las herramientas que nos permitieron desarrollar todo nuestro potencial.

Gracias a Msc. IE. Ángelo Joseph Soto Vergel, MSc. IE. Oriana Alexandra López Bustamante y al asesor Antonio Ortiz Álvarez, Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia por guiarnos en la elaboración de este proyecto. Por otro lado, agradecer al Ph. Msc. IE Dinael Guevara Ibarra por aprobar el ingreso al Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones – GIDET.

Gracias a nuestros compañeros que nos apoyaron durante la carrera y el desarrollo de este proyecto.

## Tabla de Contenido

	<b>Pag.</b>
INTRODUCCIÓN	18
1. Planteamiento del problema	20
2. Justificación	21
2.1. Impacto esperado	22
2.2. Beneficios tecnológicos	22
2.3. Beneficios económicos	23
2.4. Beneficios sociales	23
2.5. Beneficios institucionales	23
3. Alcance	25
3.1. Tipo de proyecto	25
3.2. Resultados esperados	25
4. Limitaciones y delimitaciones	26
4.1. Limitaciones	26
4.2. Delimitaciones	26
5. Objetivos	28
5.1. Objetivo general	28
5.2. Objetivos específicos	28
6. Marco referencial	29
6.1. Antecedentes	29



6.2.	Marco teórico	30
6.2.1.	Agricultura de precisión	30
6.2.2.	Vehículo terrestre no tripulado	31
6.2.3.	Humedad relativa del aire y suelo	31
6.2.4.	Temperatura	32
6.2.5.	Radiación solar	33
6.2.6.	Sistema de información geográfica	35
6.2.7.	Sistema embebido	36
6.2.8.	Ingeniería de software	36
6.3.	Marco legal	37
7.	Diseño metodológico	39
8.	Cronograma de actividades	44
9.	Presupuesto	45
9.1.	Gasto global	45
9.2.	Gastos de personal	45
9.3.	Gastos de equipos	46
9.4.	Gastos de materiales	46
10.	Resultados	47
10.1.	Sistema de instrumentación electrónica para la medición de factores ambientales y climáticos en un cultivo de tomate	47

10.1.1. Matriz de selección para establecer los componentes necesarios para el desarrollo del sistema de medición	47
10.1.2. Diseño preliminar general del sistema de medición	61
10.1.3. Software del sistema de medición	64
10.1.4. Pruebas de funcionamiento del sistema de medición	71
10.2. Construcción del UGV para el desplazamiento entre las zanjas de un cultivo de tomate basado en técnicas de automatización	72
10.2.1. Técnicas y metodologías empleadas en la construcción de UGV's	72
10.2.2. Componentes físicos para la construcción del UGV	76
10.2.3. Diseño de la estructura física y el esquemático electrónico del UGV	82
10.2.4. Software para el desplazamiento del UGV	84
10.2.5. Pruebas de funcionamiento del UGV	86
10.3. Generación de mapas de intensidad	88
10.3.1. Base de datos para el almacenamiento de las mediciones tomadas por el SEMANT	88
10.3.2. Interfaz gráfica para visualizar las mediciones y generar los mapas de intensidad del cultivo	89
10.4. Evaluación del desempeño del SEMANT considerando factores de interés como la autonomía, tiempo de recorrido, precisión del recorrido y cantidad de datos tomados	94
10.4.1. Autonomía del SEMANT	95
10.4.2. Tiempo de recorrido del SEMANT en el cultivo de tomate	95

10.4.3. Tecnología para el transporte y almacenamiento de los datos medidos	96
10.5. Divulgación de los resultados obtenidos con la aplicación del SEMANT	97
10.5.1. Artículo publicado en revista científica	97
10.5.2. Participación en eventos de carácter científico y/o académico	98
10.5.3. Socialización de los resultados del proyecto con la comunidad académica de la Universidad Francisco de Paula Santander	101
CONCLUSIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXOS	113

<b>Lista de figuras</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sensor FC-28.	32
Figura 2. Módulo Sensor de humedad y temperatura DHT11.	33
Figura 3. Sensor de temperatura digital KY-028.	33
Figura 4. Sensor ML851.	34
Figura 5. Módulo UVM30A.	34
Figura 6. Módulo Fotorresistencia.	34
Figura 7. Módulo GPS para Raspberry Pi.	35
Figura 8. Módulo GPS GY-NEO6MV2.	35
Figura 9. Etapas de la metodología incremental.	37
Figura 10. Variables del sistema de medición del SEMANT.	49
Figura 11. Componentes electrónicos para el sistema de medición.	61
Figura 12. Circuito esquemático del sistema de medición.	62
Figura 13. Diseño PCB para el sistema de medición.	64
Figura 14. Pseudocódigo sensor de dióxido de carbono MH-Z19B.	66
Figura 15. Pseudocódigo sensor de temperatura y humedad DHT22.	67
Figura 16. Pseudocódigo sensor de radiación ultravioleta GROVE-UV.	68
Figura 17. Pseudocódigo sensor del suelo SEN0193.	68
Figura 18. Pseudocódigo servomotor MG995.	69
Figura 19. Pseudocódigo módulo GPS NEO-6M V2.	69
Figura 20. Software libre para los módulos LoRa.	70
Figura 21. Pseudocódigo módulo LoRa RF1276.	70
Figura 22. Funcionamiento del sistema de medición.	71

Figura 23. Almacenamiento de los datos en CSV.	72
Figura 24. Datos recibidos por el LoRa Receptor.	72
Figura 25. Dimensiones de la zanja del cultivo.	77
Figura 26. Componentes para desarrollar el UGV.	81
Figura 27. Circuito esquemático para todo el sistema del SEMANT.	83
Figura 28. Diseño PCB para todo el sistema del SEMANT.	83
Figura 29. Estructura del SEMANT.	84
Figura 30. Pruebas de funcionamiento del desplazamiento del UGV.	87
Figura 31. Pruebas de funcionamiento del desplazamiento y sistema de medición.	87
Figura 32. Etapas para la creación de la base de datos.	88
Figura 33. Distribución de la base de datos.	89
Figura 34. Circuito esquemático, PCB y estructura física del receptor.	91
Figura 35. Diseño de la ventana para generar los mapas de intensidad.	93
Figura 36. Artículo publicado en la revista UIS.	97
Figura 37. Correo del editor de la Revista Ingeniare.	98
Figura 38. Certificado de participación simposio.	98
Figura 39. Certificado de participación REDCOLSI.	99
Figura 40. Certificado de participación Julieth.	100
Figura 41. Certificado de participación Johan.	100
Figura 42. Certificado de participación Julieth.	101
Figura 43. Proceso 1: Algoritmo en el Arduino Nano.	120
Figura 44. Proceso 2: Algoritmo en la Raspberry Pi.	121
Figura 45. Algoritmo del desplazamiento.	124

Figura 46. Diseño de las ventanas para la visualización de datos.	125
Figura 47. Mapa de navegación de la Interfaz Gráfica.	126

<b>Lista de tablas</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Cronograma de actividades.	44
Tabla 2. Presupuesto Global del Proyecto por fuentes de financiación (en miles de \$).	45
Tabla 3. Descripción de los gastos de personal (en miles de \$).	45
Tabla 4. Descripción de los equipos de uso propio (en miles de \$).	46
Tabla 5. Descripción de materiales y suministros de uso propio (en miles de \$).	46
Tabla 6. Condiciones para la comparación de los sensores.	50
Tabla 7. Sensores para la medición de la Radiación UV.	50
Tabla 8. Matriz de atributos para los sensores de la Radiación UV.	51
Tabla 9. Sensores para la medición de la humedad y temperatura del aire.	52
Tabla 10. Matriz de atributos para los sensores de humedad y temperatura del aire.	52
Tabla 11. Sensores para la medición de la CO2.	53
Tabla 12. Matriz de atributos para los sensores de CO2.	54
Tabla 13. Sensores para la medición de la Humedad del suelo.	55
Tabla 14. Matriz de atributos para los sensores de humedad del suelo.	55
Tabla 15. Módulos GPS.	56
Tabla 16. Matriz de atributos para los módulos GPS.	56
Tabla 17. Módulos LoRa para la comunicación.	57
Tabla 18. Matriz de atributos para los módulos LoRa.	58
Tabla 19. Microcontroladores.	59
Tabla 20. Matriz de atributos para los microcontroladores.	59
Tabla 21. Índices Ultravioleta.	67
Tabla 22. Rangos de dimensiones.	77

Tabla 23. Chasis de robot móvil.	77
Tabla 24. Matriz de atributos para chasis.	78
Tabla 25. Puente H.	79
Tabla 26. Matriz de atributos para el puente H.	79
Tabla 27. Costos de los sistemas construidos.	84
Tabla 28. Condiciones de cada uno de los estados.	85
Tabla 29. Tiempo de descarga y carga de las baterías.	95
Tabla 30. Tiempo y velocidad aproximado por el vehículo.	96
Tabla 31. Comparación de la información en las dos bases de datos.	96
Tabla 32. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo sensores de radiación UV.	113
Tabla 33. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de humedad y temperatura del aire.	114
Tabla 34. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de CO2.	115
Tabla 35. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de humedad del suelo.	116
Tabla 36. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los módulos GPS.	117
Tabla 37. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los módulos LoRa.	118
Tabla 38. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los microcontroladores.	119
Tabla 39. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los chasis de robot móvil.	122
Tabla 40. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo del módulo puente H.	123



<b>Lista de anexos</b>	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de radiación UV	113
Anexo 2. Matrices de coeficientes de énfasis sensores de humedad y temperatura del aire.	114
Anexo 3. Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de CO2.	115
Anexo 4. Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de humedad del suelo.	116
Anexo 5. Matrices de coeficientes de énfasis para los módulos GPS.	117
Anexo 6. Matrices de coeficientes de énfasis para los módulos LoRa.	118
Anexo 7. Matrices de coeficientes de énfasis para los microcontroladores.	119
Anexo 8. Proceso 1: Algoritmo en el Arduino Nano.	120
Anexo 9. Proceso 2: Algoritmo en la Raspberry Pi.	121
Anexo 10. Matrices de coeficientes de énfasis para los chasis de robot móvil.	122
Anexo 11. Matrices de coeficientes de énfasis para el módulo puente H.	123
Anexo 12. Algoritmo del desplazamiento.	124
Anexo 13. Diseño de las ventanas de la interfaz para la visualización de datos.	125
Anexo 14. Mapa de navegación de la Interfaz Gráfica.	126

## INTRODUCCIÓN

El fortalecimiento de la agroindustria contribuye a mejorar la calidad y demanda de los productos agrícolas, además de generar oportunidades de empleo, por esto los países en desarrollo han diversificado los esfuerzos en el sector, con el objetivo de alcanzar crecimiento económico y mayor participación en el comercio internacional de frutas y hortalizas [1]. Por consiguiente, el estado colombiano en su Plan de desarrollo 2018 – 2022 tiene como objetivo aprovechar el potencial productivo agrícola en conjunto con la investigación en ciencia y tecnología y el desarrollo ambiental sostenible, así mismo, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) mediante la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) busca aportar conocimientos, métodos, tecnologías y productos tecnológicos necesarios para el desempeño del sector frente a los requerimientos nacionales e internacionales [2], [3].

Por lo tanto, este proyecto propone un modelo de agricultura de precisión basado en el desarrollo un Sistema Embebido para Mediciones Agrónomas No Tripulado (en adelante, SEMANT) utilizando un vehículo terrestre no tripulado (en inglés, *Unmanned Ground Vehicle – UGV*) que se desplace entre las zanjas del cultivo empleando técnicas de automatización para analizar variables ambientales como radiación, temperatura y humedad relativa del aire, del cultivo como distancia de siembra y del suelo como cantidad de materia orgánica, humedad y temperatura. La toma de datos de estas variables estará enmarcada en el concepto de Sistema de Información Geográfico (SIG) utilizando un módulo de Sistema de Posicionamiento Global (en inglés, *Global Positioning System – GPS*) o un encoder. Esta información será representada en mapas de rendimiento en función de cada variable a fin de ser analizados e interpretados por el productor para tomar decisiones sobre el cultivo en la fertilización, fumigación y cantidad de materia orgánica a suministrar.

Por otra parte, el SEMANT consta de dos construcciones: un sistema de medición de variables y un sistema de control del UGV sobre el cual estará acoplada la instrumentación electrónica. Estas construcciones implementan las placas de desarrollo Raspberry Pi y Arduino que serán las encargadas de controlar el movimiento de los motores y de procesar los datos tomados por el sistema de medición de variables del cultivo y del UGV. Además, el SEMANT contará con un software de monitoreo en tiempo real que utiliza la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa para el envío de los datos y generará los mapas de rendimiento con la data tomada del cultivo.

A continuación, se exponen los apartados planteamiento del problema, justificación, alcances, delimitaciones, objetivos, cronograma de actividades y tabla de presupuestos correspondientes.

## 1. Planteamiento del problema

La producción agrícola en el año 2016 representó un 9% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional en Colombia, es decir, una producción total de 77.378 millones de pesos con un crecimiento del 14 % comparado con el año 2015; así mismo, de acuerdo a estimaciones del Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (FINAGRO) generará aproximadamente 291 mil nuevos empleos para el 2020 [4].

Sin embargo, datos del DNP reportan pérdidas en la producción aproximadamente de 3.951.866 en el año 2016 [5], ocasionadas por la ausencia de monitoreo de las cosechas y la no realización de mapas de producción, impidiendo tomar acciones oportunas para lograr el crecimiento homogéneo del cultivo. En este sentido, la Hacienda la Esperanza Vereda Pantanos en el Municipio de Chinácota en Norte de Santander no cuenta con tecnología de monitoreo que permita conocer el estado del ambiente y del suelo en el que se encuentra la siembra para tomar decisiones en el manejo de sus cultivos de tomate.

Por esta razón, se requiere construir un sistema que permita aplicar Agricultura de Precisión (AP) en un cultivo de tomate como herramienta de apoyo a las exigencias que enfrenta el agricultor en el manejo de la siembra, por lo cual se plantea el siguiente interrogante: ¿Cómo construir un sistema de monitoreo y mapeo agrícola para analizar el rendimiento de un cultivo de tomate utilizando un UGV?

## 2. Justificación

La Hacienda la Esperanza Vereda Pantanos en el Municipio de Chinácota en Norte de Santander cuenta actualmente con tres hectáreas de siembra de cebolla cabezona roja, sesenta mil matas de tomate, y dos mil quinientos árboles de aguacates, cuyo proceso de siembra y producción se desarrolla sin participación tecnológica.

En este sentido, se resalta la importancia de conocer las variables ambientales, del cultivo y del suelo como son la radiación, temperatura, humedad relativa del aire, distancia de siembra y cantidad de materia orgánica, las cuales contribuyen al adecuado manejo de la producción agrícola, permitiendo llevar un control óptimo basado en las condiciones climatológicas del entorno, esto con el objetivo de manejar eficientemente los recursos y optimizar la producción y la calidad de los alimentos. 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.

Con respecto a lo anterior, la implementación de un sistema de monitoreo automatizado presenta una solución óptima ante los inconvenientes que se exponen en la agricultura como lo son el cambio climático, la variabilidad del suelo y la no tecnificación de los procesos, permitiendo adaptarse a diferentes situaciones sin la necesidad de perder calidad o precisión en las acciones [6]; así mismo llevar un historial de las mediciones de las variables físicas con el fin de analizar mejor el ambiente en que se encuentra el cultivo para comprender el proceso de crecimiento [7].

Por otra parte, los mapas de rendimiento que se pueden realizar con la implementación de estos sistemas permiten conocer la distribución de la cosecha, posibilitando cuantificar y analizar la eficiencia de cada sector, las estrategias de manejo implementadas y las variables dinámicas del entorno para estudiar la productividad e incorporar la heterogeneidad en que se encuentra el campo

y el clima, suministrando información para identificar las zonas que requieren de mayor atención y cuidado con el fin de racionalizar los procedimientos [8]. Lo anterior enmarca el concepto de AP, la cual permite maximizar la eficiencia en el uso de los recursos y minimizar los efectos de la contaminación [9].

Por consiguiente, este proyecto tiene como finalidad realizar mediciones de radiación, temperatura y humedad relativa del aire, distancia de la siembra del cultivo y humedad del suelo en un cultivo de tomate en la Hacienda la Esperanza mediante un UGV de tipo autónomo que tenga la capacidad de desplazarse por toda el área de la siembra para posteriormente generar mapas de rendimiento que presenten sectorialmente la calidad de cada una de las zonas de la cosecha con la finalidad de tomar acciones de mejora y control.

### **2.1. Impacto esperado**

Mejorar la calidad de los cultivos de tomate en la Hacienda la Esperanza mediante la implementación de nuevas tecnologías, proporcionar datos importantes a través del sistema de medición que permitan realizar un análisis adecuado del estado de la siembra y generar desarrollo tecnológico en el área de la agricultura, además, prevenir el riesgo al que se exponen los agricultores realizando estas tareas.

### **2.2. Beneficios tecnológicos**

La manejabilidad del dispositivo electrónico posibilitado por las placas de desarrollo Raspberry Pi y Arduino permite su implementación en otros terrenos que presenten problemas y requieren de un sistema de monitoreo automatizado.

El SEMANT permite la medición de variables importantes en el crecimiento y desarrollo de un cultivo mediante sensores adaptados al internet de las cosas (en inglés, *Internet of Things* – IoT)

utilizando la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa, posibilitando nuevas estrategias por parte del agricultor.

### **2.3. Beneficios económicos**

Al ser un dispositivo móvil construido con tecnologías libres de bajo costo, reduce la inversión en comparación con otras soluciones que suelen estar basadas en estaciones fijas, las cuales requieren de varias infraestructuras para realizar la adquisición de datos.

El SEMANT permite la creación de mapas de rendimiento de los cultivos con la finalidad de identificar las zonas que requieren cuidado y atención mejorando la toma de decisiones y disminuyendo el costo de tratamiento en fertilizantes, pesticidas y herbicidas, puesto que su aplicación estaría sectorizada y dosificada según la implementación adecuada de la AP.

### **2.4. Beneficios sociales**

La construcción del SEMANT implica que la Hacienda la Esperanza desarrolle capacitaciones a los operarios encargados del control y supervisión de los cultivos en el uso de dispositivos electrónicos; por consiguiente, genera un crecimiento y desarrollo personal y de la industria agrícola.

La implementación del SEMANT mejora la eficiencia en el uso de agroquímicos encargados del buen crecimiento del cultivo; por lo tanto, se logra obtener una alta calidad de los alimentos que se producen y comercializan, disminuyendo los riesgos en la salud de la población.

### **2.5. Beneficios institucionales**

Fomenta la investigación de proyectos en el área de la agricultura de precisión permitiendo formar nuevas líneas investigativas en los grupos y semilleros.

El desarrollo e implementación del prototipo permite la creación de nuevos proyectos que se enfoquen en el análisis general de comportamientos de diferentes tipos de cultivos por parte de estudiantes de otras facultades de la universidad.



### **3. Alcance**

A continuación, se describe el tipo de proyecto en el que se enmarca esta investigación, así como los resultados esperados con el desarrollo de la misma.

#### **3.1. Tipo de proyecto**

El tipo de investigación que se realiza es descriptiva y exploratoria; descriptiva porque se enfoca en la evaluación del ambiente en el que se encuentra un cultivo, así como la variabilidad del suelo por medio de un sistema de medición autónomo, permitiendo observar a través de mapas de rendimiento las características del cultivo; y exploratoria debido a que posibilita la experimentación de dispositivos electrónicos como sensores y vehículos terrestres no tripulados implementados en el área de la agricultura de precisión.

#### **3.2. Resultados esperados**

Se espera obtener un dispositivo electrónico con la capacidad de ser autónomo en su desplazamiento que permita obtener información suficiente en cultivos de tomate a fin de caracterizar el ambiente y la variabilidad del suelo en que se encuentra, implementando un sistema de medición integrado a un vehículo terrestre no tripulado, impactando en el cuidado de los cultivos y por ende aportando una mejora en la tecnificación del sector agrícola.

Por otro lado, se espera publicar avances de los resultados obtenidos durante la realización del proyecto en una revista indexada por Colciencias y participar en eventos académicos y científicos.

## **4. Limitaciones y delimitaciones**

A continuación, se describen las limitaciones y delimitaciones de esta investigación teniendo en cuenta los diferentes factores que afectan el proyecto.

### **4.1. Limitaciones**

El UGV estará limitado en sus dimensiones físicas por el estrecho de las zanjas entre los cultivos, con la finalidad de que permita realizar recorridos y tomar mediciones evitando que el SEMANT irrumpa en la zona de crecimiento de la cosecha y pueda afectarla durante su funcionamiento.

Otro aspecto para considerar es el área del cultivo de tomate en la Hacienda la Esperanza Vereda Pantanos donde se realizarán las mediciones, debido a que el dispositivo debe cubrir la totalidad de esta para obtener una base de datos robusta, por ende, la energía suministrada al dispositivo debe ser suficiente para que logre su objetivo.

Por otra parte, el dispositivo no podrá realizar mediciones en dos aspectos, el primero cuando el suelo se encuentre en condiciones que impida un correcto desplazamiento del SEMANT y el segundo cuando se presenten lluvias durante la adquisición de datos puesto que el sistema de medición no cuenta con una protección.

### **4.2. Delimitaciones**

La investigación se desarrollará en las instalaciones de los laboratorios especializados del Departamento de Electricidad y Electrónica de la Universidad Francisco de Paula Santander ubicada en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, además la implicación de la investigación se realizará en la Hacienda la Esperanza Vereda Pantanos ubicada en el municipio de Chinácota, Norte de Santander.

Otro aspecto es el área donde se efectuarán las mediciones, dado que ésta determinará la trayectoria que debe seguir el vehículo terrestre no tripulado para realizar el recorrido.

## 5. Objetivos

### 5.1. Objetivo general

Evaluar el estado de un cultivo de tomate por medio de mapas de rendimiento utilizando un sistema de medición integrado a un vehículo terrestre no tripulado.

### 5.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el sistema de instrumentación electrónica para la medición de factores ambientales y climáticos en un cultivo de tomate.
- Construir el UGV para el desplazamiento entre las zanjas de un cultivo de tomate basado en técnicas de automatización e inteligencia artificial.
- Generar mapas de rendimiento en el ambiente del cultivo y la variabilidad del suelo basados en las mediciones tomadas por el SEMANT.
- Evaluar el desempeño del SEMANT considerando factores de interés.
- Divulgar los resultados obtenidos de la investigación exponiendo los beneficios alcanzados con la aplicación del sistema y prototipo del SEMANT.

## 6. Marco referencial

Teniendo en cuenta la revisión de la literatura enfocado a los temas de interés se presenta una serie de documentos de proyectos de investigación, revistas y artículos en el área de agricultura de precisión y UGV, fueron seleccionados los más relevantes aportando cada uno un elemento específico que sirve como base para el desarrollo del proyecto.

### 6.1. Antecedentes

**TITULO:** Evaluation of Haptic Feedback in the Performance of a Teleoperated Unmanned Ground Vehicle in an Obstacle Avoidance Scenario

Este estudio tiene como objetivo evaluar el rendimiento de un UGV utilizando retroalimentación háptica en el sistema de tele – operación. Emplearon ocho escáneres laser con una cobertura de 3m en la parte superior del UGV con el objetivo de detectar todos los obstáculos y una cámara Kinect con un rango de detección de hasta 4,5m y de profundidad de hasta 8m para el entorno virtual donde el operario realiza control del vehículo mediante el dispositivo. Los resultados experimentales muestran que el rendimiento en la estabilidad del UGV fue mejor cuando se utilizó la retroalimentación háptica [10].

**TITULO:** Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión.

Se desarrolló un sistema aplicado a la agricultura de precisión que dispone de sensores, microcontrolador Arduino Intel Galileo, protocolo Zigbee, GPS para localización y aplicación móvil, compuesto por nodos encargados de la adquisición de datos, los cuales se generan en forma de tablas de texto en formato CSV y son enviados inalámbricamente a un servidor remoto para posteriormente ser analizados por un servidor en la nube. Además, cada nodo cuenta con la opción de respaldo utilizando una memoria MicroSD en caso de fallos en la comunicación inalámbrica.

Finalmente se realizaron algoritmos para la interpretación gráfica de la información y visualización por parte del usuario [11].

**TITULO:** Sistema de control automático de variables climáticas para optimizar el rendimiento de cultivos bajo cubierta.

El propósito de esta investigación es el análisis de la implementación de un sistema de control en cultivos bajo cubierta, para ello se observan dos siembras de tomate paralelamente, con y sin el sistema de control. Con respecto al sistema de control automatizado se construyó una estructura tipo invernadero a escala en la sede rural de la Corporación Universitaria del Huila que contiene nodos de sensores encargados de recolectar datos de humedad, temperatura, intensidad lumínica y humedad del suelo, y actuadores para el control como lo son unidad extractora de aire, unidad inyectora de aire, nebulizadores, lámparas alógenas y motobomba, como central de procesamiento de datos se seleccionó la placa Arduino Leonardo y para la comunicación la tecnología XBEE. Los resultados mostraron que a partir de la semana 13 se observaron diferencias en los cultivos, se elevaron 64% la cantidad de ramas, 65% mayor cantidad de frutos y 55% mayor altura para las plantas controladas en el invernadero [12].

## **6.2. Marco teórico**

En los siguientes ítems se presentan las definiciones y conceptos relacionados con los temas más relevantes en los que se fundamenta el proyecto.

### **6.2.1. Agricultura de precisión**

La agricultura se define como un sistema de producción que sustenta la salud de los suelos, los ecosistemas y las personas, se basa en procesos ecológicos, biodiversidad y ciclos adaptados a las condiciones locales, en lugar del uso de insumos con efectos adversos, y combina tradición, innovación y ciencia para beneficiar el entorno compartido y promover relaciones justas y una

buena calidad de vida para todos los involucrados [13]. Dicho lo anterior, la agricultura de precisión es una mejora a los procesos tradicionales, su principal objetivo es optimizar la calidad y cantidad de un producto agrícola minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico en forma ambientalmente limpia. En definitiva, la agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola [14].

### **6.2.2. Vehículo terrestre no tripulado**

Este concepto viene del inglés *Unmanned Ground Vehicle* referido en la literatura con el acrónimo UGV y es definido como cualquier pieza de equipo mecanizado que se mueve a través de la superficie del suelo sin la necesidad de un operador humano debido a que es automático, automatizado o autónomo; considerando que no cuenta con instrumentación externa a la empleada para su desplazamiento. Pueden ser clasificados de acuerdo a sus características tales como el modo de desplazamiento, el tipo de sistema de control y el área de operación prevista [15], [16].

### **6.2.3. Humedad relativa del aire y suelo**

La humedad relativa del aire es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica, esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental, se expresa en tanto por ciento (%). Por otra parte, la humedad del suelo mide el contenido en agua de un volumen de tierra. La capacidad máxima de humedad del suelo depende del tipo de suelo, su desarrollo, la vegetación presente y los usos del suelo [17].

Para medir la humedad relativa tanto del aire como del suelo existen diferentes tipos de sensores, como el sensor FC-28 de la Figura 1, que permite medir la humedad del suelo. El sensor DHT 11 de la Figura 2, se implementa para tomar mediciones de la humedad relativa del aire.



**Figura 1.** Sensor FC-28.  
**Fuente:** Tomado de [18].

#### 6.2.4. Temperatura

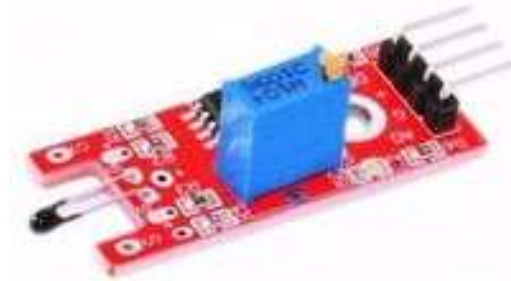
Se define como el indicador de la cantidad de energía calorífica acumulada en la atmósfera baja, la cual varía espacialmente y temporalmente, dado que los movimientos de rotación, traslación, así como a la latitud, altitud, estaciones del año, corrientes marinas, distribución y configuración de los continentes y océanos, exposición del relieve, cobertura nubosa, presencias de masas de aire frío, fenómenos cálidos y fríos como El Niño y La Niña, entre otros; además, es uno de los elementos climatológicos muy importantes que influye en el funcionamiento fisiológico de las plantas y animales, los cuales captan la energía para realizar las funciones vitales [19], [20].

En el mercado se encuentra variedad de sensores para la toma de temperatura como se observa en las Figuras 2 y 3.





**Figura 2.** Módulo Sensor de humedad y temperatura DHT11.  
**Fuente:** Tomado de [21].



**Figura 3.** Sensor de temperatura digital KY-028.  
**Fuente:** Tomado de [22].

### 6.2.5. Radiación solar

La radiación solar se define como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Esta energía se cuantifica por medio de la radiación solar global, una magnitud que representa la cantidad de energía electromagnética incidente en una superficie por unidad de tiempo, por unidad de área. En el caso de la agricultura, la falta o baja disponibilidad de luz solar tiende a ser un agente estresor para las plantas, esto a su vez dificulta el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Igualmente, si las plantaciones se encuentran en ecosistemas con climas áridos, el sobrecalentamiento puede producir daños en su desarrollo [23]–[25].

Existen variabilidad de sensores que permiten realizar mediciones de radiación solar como:

El sensor ML8511 de la Figura 4 y el módulo UVM30A que se observa en la Figura 5, permiten realizar mediciones de la luz ultravioleta y entregan una señal analógica que depende de la cantidad de luz ultravioleta que detecta [26] [27].



**Figura 4.** Sensor ML851.  
**Fuente:** Tomado de [28].



**Figura 5.** Módulo UVM30A.  
**Fuente:** Tomado de [29] .

El módulo de la fotorresistencia de la Figura 6, permite realizar mediciones de la intensidad lumínica.



**Figura 6.** Módulo Fotorresistencia.  
**Fuente:** Tomado de [30].

### 6.2.6. Sistema de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) se trata de un sistema de computación, una tecnología de manejo de información formada por un hardware adecuadamente programado (software) que permite manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) para la realización de análisis. En cualquiera de estos sistemas destaca siempre la disponibilidad de los datos geográficos como elemento diferenciador frente a otros sistemas de información relacionados con el uso de bases de datos. Los SIG tienen dos vertientes diferenciadas: la espacial, referente a la geografía y la temática, que incluye los datos incluidos para el análisis, los cuales pueden estar distribuidos en diferentes capas [31].

Para obtener la posición geográfica de las mediciones se pueden implementar módulos GPS como se observan en la Figura 7 y 8.



**Figura 7.** Módulo GPS para Raspberry Pi.  
**Fuente:** Tomado de [32].



**Figura 8.** Módulo GPS GY-NEO6MV2.  
**Fuente:** Tomado de [33].

### **6.2.7. Sistema embebido**

Un sistema embebido se define como un sistema electrónico de procesamiento de datos programado para efectuar funciones o tareas con el fin de cumplir un objetivo específico. Estos sistemas pueden contar, además de software, con elementos de hardware como partes mecánicas, eléctricas y electromecánicas. Cada sistema embebido contiene un microprocesador o microcontrolador; sin embargo, no ejecutará tantas tareas como un computador. En la actualidad existen un número considerable de aplicaciones de sistemas embebidos, desde comunicaciones, telefonía celular, electromedicina, sistemas de seguridad, antenas, procesamiento de datos, entre otras [34].

### **6.2.8. Ingeniería de software**

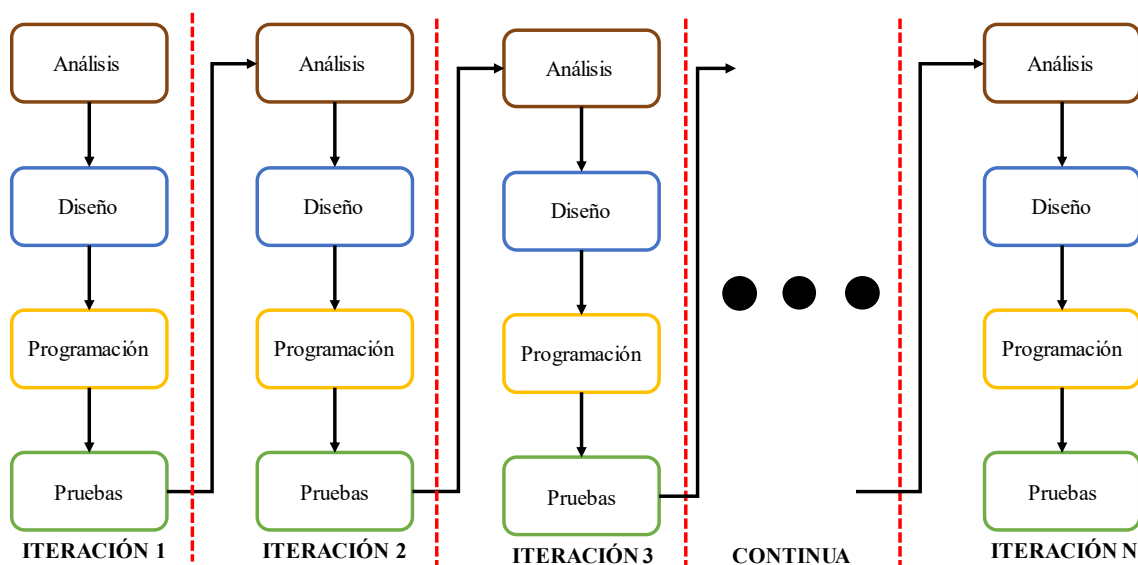
Un sistema embebido se define como un sistema electrónico de procesamiento de datos, programado para La Ingeniería de Software, también conocida como Desarrollo de Software o Producción de Software, es un concepto desarrollado a partir de las ingenierías de sistemas y de hardware, ésta se enfoca en el estudio científico de principios, métodos y metodologías de la ingeniería para el desarrollo, operación y mantenimiento de sistemas de software, los cuales deben adaptarse a las necesidades de empresas reales con el objetivo de mejorar sus procesos de producción. La aplicación de esta ingeniería es adaptativa y permite un desarrollo eficiente y sostenible de software, desde sus etapas iniciales hasta su implementación final y mantenimiento.

El proceso de construcción de un sistema de software cuenta con las siguientes etapas: la obtención de los requisitos, el diseño del sistema (preliminar y detallado), la codificación y las pruebas del sistema; cada una de estas etapas cuenta con subprocesos denominados ciclo de vida, los cuales establecen las actividades a desarrollar y los criterios a tener en cuenta para poder pasar de una etapa a la siguiente.

Los sistemas basados en ingeniería de software pueden realizarse de acuerdo con la metodología Waterfall (Cascada), Prototyping (Prototipo), Spiral (Espiral), Incremental y RAD (Diseño Rápido de Aplicaciones). A continuación, se detalla el modelo incremental debido a que se adapta a las necesidades del proyecto y permite realizar una evaluación constante de cada avance.

- **Modelo incremental**

Esta metodología desarrolla los sistemas en etapas incrementales, las cuales constan de análisis de requerimientos, diseño, codificación, pruebas y entrega; en vista de que su diseño basado en etapas el progreso se puede medir en periodos cortos de tiempo es posible realizar implementaciones parciales cuando se cuenta con una funcionalidad suficiente y disminuye el riesgo de fracaso debido a la retroalimentación y refinamientos sucesivos. En la Figura 9 se observa el esquema de funcionamiento del modelo incremental.



**Figura 9.** Etapas de la metodología incremental.  
**Fuente:** Adaptada de [35].

### 6.3. Marco legal

Este proyecto de investigación está enmarcado en normas, resoluciones, requisitos y decretos que regulan y limitan temas específicos de interés que se abordan en su desarrollo.

- **Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad”**

Impulsar la transformación productiva, la competitividad agropecuaria y agroindustrial y el desarrollo rural, promoviendo condiciones que dinamicen la provisión de bienes y servicios, la inversión privada, la innovación y el emprendimiento para la generación de oportunidades de crecimiento y bienestar de toda la población rural[2].

- **Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019 “Un Norte Productivo Para Todos”**

Los proyectos que se diseñen e implementen en el sector hortofrutícola deberán ir dirigidos a garantizar la seguridad alimentaria, en su orden, de la población del departamento, de la población colombiana y los excedentes para el abastecimiento de materias primas e insumos que demanda el desarrollo de la agroindustria para sustituir importaciones y para la exportación [36].

- **Decreto 1449 de 1977:**

**Artículo 2o.** En relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas, los propietarios de predios están obligados a:

- Aprovechar las aguas con eficiencia y economía en el lugar y para el objeto previsto en la resolución de concesión.
- No utilizar mayor cantidad de agua que la otorgada en la concesión [37].

## 7. Diseño metodológico

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados se presentan las actividades y metodologías como procedimiento a seguir.

**Objetivo específico 1:** Desarrollar el sistema de instrumentación para la medición de factores ambientales y climáticos en un cultivo de tomate.

**Actividad 1:** Construir una matriz de selección para establecer los componentes necesarios para el desarrollo del sistema de medición.

**Metodología:** Efectuar una búsqueda de dispositivos electrónicos que midan las variables seleccionadas; posteriormente elaborar una matriz de selección, basada en características como exactitud, precisión, rango de medida, precio, adaptabilidad, disponibilidad en el mercado y consumo energético, a fin de elegir los componentes que se implementarán en el sistema de medición.

**Actividad 2:** Elaborar un diseño preliminar general del sistema de medición.

**Metodología:** Diseñar el diagrama electrónico y físico del sistema de medición por medio de software libre, interconectando y especificando la ubicación de cada uno de los sensores y dispositivos que se emplean, teniendo en cuenta que el sistema debe cumplir con unas dimensiones mínimas para acoplarse al UGV.

**Actividad 3:** Desarrollar el software del sistema de medición.

**Metodología:** Diseñar el algoritmo que ilustre el comportamiento del sistema de medición; posteriormente codificar el código de programación basado en el diagrama del algoritmo considerando el hardware que se implementará.

**Actividad 4:** Ejecutar pruebas de funcionamiento del sistema de medición.

**Metodología:** Las pruebas iniciales se realizan teniendo en cuenta los dispositivos seleccionados para el sistema de medición con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del mismo. Luego se acopla el sistema electrónico en una placa de circuito impreso (PCB) y finalmente se evalúa el comportamiento del sistema de medición con la PCB ensamblada para observar posibles fallas y realizar correcciones.

**Objetivo específico 2:** Construir el UGV para el desplazamiento entre las zanjas de un cultivo de tomate basado en técnicas de automatización.

**Actividad 1:** Identificar técnicas y metodologías empleadas en la construcción de UGV's.

**Metodología:** Consultar proyectos de investigación, artículos y tesis de grado enfocados en la construcción de prototipos de UGV's, seleccionando los aspectos más importantes en cada uno de estos, teniendo en cuenta investigaciones relevantes de los últimos cinco años.

**Actividad 2:** Seleccionar los componentes físicos para la construcción del UGV.

**Metodología:** Realizar una matriz de selección de componentes y estructuras necesarias que permitan la construcción del UGV, basados en cualidades físicas como peso, dimensiones, autonomía, adaptabilidad al terreno, consumo energético y fuerza.

**Actividad 3:** Diseñar la estructura física y el esquemático electrónico del UGV.

**Metodología:** Diagramar la conexión electrónica y física de los elementos que conforman el UGV por medio de software libre, especificando las dimensiones y la ubicación de éstos teniendo en cuenta el aprovechamiento óptimo del espacio para lograr que el prototipo sea del menor tamaño posible.

**Actividad 4:** Desarrollar el software que permita el desplazamiento del UGV.



**Metodología:** Diseñar el algoritmo que ilustre el comportamiento autónomo del UGV; posteriormente, programar el código basado en el diagrama del algoritmo teniendo en cuenta el hardware que se implementará.

**Actividad 5:** Ejecutar pruebas de funcionamiento del UGV.

**Metodología:** Las pruebas iniciales se realizan teniendo en cuenta los dispositivos seleccionados para la construcción y programación del UGV con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento y autonomía del dispositivo. Posteriormente se ensambla el prototipo final UGV construyendo el sistema electrónico en una placa de circuito impreso (PCB). Finalmente se evalúa el comportamiento del UGV con el sistema de medición integrado para observar posibles fallas en el sistema y realizar correcciones.

**Objetivo específico 3:** Generar mapas de rendimiento en el ambiente del cultivo y la variabilidad del suelo basados en las mediciones tomadas por el SEMANT.

**Actividad 1:** Crear una base de datos que contenga las mediciones tomadas por el SEMANT.

**Metodología:** Se toman las mediciones en distancias que pueden ser variadas dependiendo del cultivo utilizando el SEMANT, con la finalidad de obtener un registro de la información para la creación de una base de datos contando con un sistema de clave valor, así mismo, relaciona la coordenada espacial y temporal de cada una de las mediciones agrupadas por recorridos.

**Actividad 2:** Construir la interfaz gráfica que permita visualizar las mediciones y generar los mapas de rendimiento del cultivo.

**Metodología:** Recurrir a la ingeniería de software para el análisis, diseño y desarrollo del software con la finalidad de permitir la interacción con el usuario, además de visualizar las mediciones y generar gráficas estadísticas en tiempo real para la toma de decisiones y el análisis de la información, por otra parte, al finalizar el recorrido del SEMANT contará con la opción de

generar un mapa de rendimiento del cultivo específico teniendo en cuenta cualquiera de los recorridos.

**Objetivo específico 4:** Evaluar el desempeño del SEMANT considerando factores de interés como la autonomía, tiempo de recorrido, precisión del recorrido y cantidad de datos tomados.

**Actividad 1:** Analizar la autonomía del SEMANT.

**Metodología:** Se evalúa el rendimiento de la batería teniendo en cuenta factores como la capacidad de energía que puede entregar en un periodo de tiempo y el tiempo de carga y descarga.

**Actividad 2:** Medir el tiempo de recorrido del SEMANT en el cultivo de tomate.

**Metodología:** Realizar una tabla comparativa con diferentes velocidades en los motores del SEMANT observando la variabilidad del tiempo que toma recorrer el 100% del cultivo, con la finalidad de establecer la velocidad más adecuada para su desplazamiento e identificando el punto óptimo de autonomía.

**Actividad 3:** Comparar la precisión del recorrido del SEMANT utilizando dos métodos de localización.

**Metodología:** Contrastar la precisión del desplazamiento en el SEMANT por medio de los mapas de rendimiento basado en dos sistemas de localización: encoder para medir las distancias del recorrido y geolocalización basada en sistemas satelitales.

**Actividad 4:** Analizar la tecnología para el transporte y almacenamiento de los datos medidos.

**Metodología:** Realizar una comparativa entre los datos obtenidos por medio de dos sistemas, transmisión a un servidor en tiempo real y almacenamiento interno, con la finalidad de detectar si hay pérdidas de información.

**Objetivo específico 5:** Divulgar los resultados obtenidos con la aplicación del SEMANT.

**Actividad 1:** Someter los resultados alcanzados en una revista científica por medio de un artículo.

**Metodología:** Redactar un documento que presente la información de manera coherente y sintetizada los resultados más relevantes en la adquisición de datos y construcción del UGV.

**Actividad 2:** Participar con los resultados del proyecto de investigación en un evento de carácter científico y/o académico.

**Metodología:** Socializar en un evento regional, nacional o internacional los resultados obtenidos en la ejecución del proyecto y la viabilidad de utilizar el SEMANT como sistema de monitoreo en cultivos de tomate.

**Actividad 3:** Socializar los resultados del proyecto con la comunidad académica de la Universidad Francisco de Paula Santander y el lugar donde se realizaron las mediciones.

**Metodología:** Realizar una invitación a los estudiantes y/o docentes de la Universidad Francisco de Paula Santander, exponiendo los resultados del proyecto con la finalidad de incentivar más a la investigación de temas como la agricultura de precisión, por otra parte, terminado el proyecto se entregan los resultados y datos obtenidos al personal encargado del cultivo, a fin de que realicen un análisis detallado de la información y tomen las acciones necesarias.

## 8. Cronograma de actividades

**Tabla 1.** Cronograma de actividades.

ACTIVIDADES	(Meses)						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>Objetivo específico 1:</b> Construir una matriz de selección para establecer los componentes necesarios para el desarrollo del sistema de medición.							
Elaborar un diseño preliminar general del sistema de medición.							
Desarrollar el software del sistema de medición.							
Ejecutar pruebas de funcionamiento del sistema de medición.							
<b>Objetivo específico 2:</b> Identificar técnicas y metodologías empleadas en la construcción de UGV's.							
Seleccionar los componentes físicos para la construcción del UGV.							
Diseñar la estructura física y el esquemático electrónico del UGV.							
Desarrollar el software que permita el desplazamiento del UGV.							
Ejecutar pruebas de funcionamiento del UGV.							
<b>Objetivo específico 3:</b> Crear una base de datos que contenga las mediciones tomadas por el SEMANT.							
Construir la interfaz gráfica que permita visualizar las mediciones y generar los mapas de rendimiento del cultivo.							
<b>Objetivo específico 4:</b> Analizar la autonomía del SEMANT.							
Medir el tiempo de recorrido del SEMANT en el cultivo de tomate.							
Comparar la precisión del recorrido del SEMANT utilizando dos métodos de localización.							
Analizar la tecnología para el transporte y almacenamiento de los datos medidos.							
<b>Objetivo específico 5:</b> Someter los resultados alcanzados en una revista científica por medio de un artículo.							
Participar con los resultados del proyecto de investigación en un evento de carácter científico y/o académico.							
Socializar los resultados del proyecto con la comunidad académica de la Universidad Francisco de Paula Santander y el lugar donde se realizaron las mediciones.							

## 9. Presupuesto

### 9.1. Gasto global

En esta sección se exponen los precios de manera porcentual indicando la financiación del proyecto por las diferentes fuentes de ingreso.

**Tabla 2.** Presupuesto Global del Proyecto por fuentes de financiación (en miles de \$).

RUBROS	FUENTES		TOTAL
	ESTUDIANTES	UFPS	
	Efectivo	Especie	
Personal	10.500	1.400	11.900
Equipos	2.313	160	2.473
Materiales e insumos	917	0	917
Infraestructura	500	1.000	1.500
Gastos administrativos	100	50	150
Servicio técnico	0	500	500
Imprevistos*	1.471,3	311	1.782,3
<b>TOTAL</b>	<b>15.801,3</b>	<b>3.421</b>	<b>19.222,3</b>

\*Los imprevistos representan el 10 % del subtotal acumulado desde el rubro de personal hasta administrativo. En caso de presentarse algún imprevisto en la realización del proyecto, el gasto correrá por partes iguales tanto para la contrapartida como para la fuente externa.

### 9.2. Gastos de personal

**Tabla 3.** Descripción de los gastos de personal (en miles de \$).

PERSONAL	FUNCIÓN DENTRO DEL PROYECTO	DEDICACIÓN HORAS/ SEMANA	\$/h	# de meses	FUENTES		TOTAL
					Estudiantes	UFPS	
Julieth Estefania Gutierrez Lopera	Tesista	35	5	7	4.900	0	4.900
Johan Andrés Toloza Rangel	Tesista	35	5	7	4.900	0	4.900
Ángelo Joseph Soto Vergel	Director	1	25	7	0	700	700
Oriana Alexandra López	Codirector	1	25	7	0	700	700
Antonio Ortiz Álvarez	Asesor	1	25	7	700	0	700
<b>TOTAL</b>					<b>10.500</b>	<b>1.400</b>	<b>11.900</b>

### 9.3. Gastos de equipos

**Tabla 4.** Descripción de los equipos de uso propio (en miles de \$).

DESCRIPCIÓN	\$/h	HORAS DE UTILIZACIÓN	JUSTIFICACIÓN	FUENTES		TOTAL
				Estudiantes	UFPS	
Computador Portátil	5.625	640	Necesario para la programación del microcontrolador y el diseño del prototipo	2.000	0	2.000
Pinza amperimétrica	0.25	640	Necesario para la medición y consumo de corriente eléctrica de los motores del UGV	0	160	160
Multímetro Digital	0.289	640	Necesario para la etapa de medición de voltajes y fallas en el circuito electrónico	185	0	185
Cargador de Baterías	0.200	640	Necesario para el reabastecimiento de energía de las baterías	128	0	128
<b>TOTAL</b>				<b>2.313</b>	<b>160</b>	<b>2.473</b>

### 9.4. Gastos de materiales

**Tabla 5.** Descripción de materiales y suministros de uso propio (en miles de \$).

DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	FUENTES		TOTAL
		Estudiantes	UFPS	
Sensores para la realización del sistema de medición	Necesario para la medición de las variables seleccionadas	210	0	210
Materiales para la construcción del UGV como: ruedas, baterías, sensores, motores, etc.	Necesario para la construcción del UGV	400	0	400
Hardware de programación	Necesarios para la programación del sistema de medición integrado a un UGV	218	0	218
Material tales como: cable, conectores, PCB'S, circuitos integrados, etc.	Necesario para realizar el control de mediciones y transferencia de datos	50	0	50
Dispositivos para la localización.	Necesario para obtener la posición donde realizó la medición el SEMANT	39	0	39
<b>TOTAL</b>		<b>917</b>	<b>0</b>	<b>917</b>

## **10. Resultados**

En esta sección se exponen los resultados teniendo en cuenta el diseño de metodológico planteado.

### **10.1. Sistema de instrumentación electrónica para la medición de factores ambientales y climáticos en un cultivo de tomate**

#### **10.1.1. Matriz de selección para establecer los componentes necesarios para el desarrollo del sistema de medición**

La selección de las variables del sistema de medición se basó en la importancia que tienen sobre un cultivo de tomate, principalmente en la fotosíntesis del fruto, un ejemplo de esto es la humedad del suelo, el monitoreo de esta variable le permite al agricultor regar únicamente zonas específicas del cultivo de acuerdo a las necesidades a fin de aumentar la productividad y la conservación del agua y su interacción con el microclima, valores superiores al 40% indican que el suelo se encuentra en saturación, causando que las raíces se marchiten, retrasando la floración y reduciendo el nivel de oxígeno en el suelo, mientras que medidas inferiores al 25% indican que el suelo está seco, ocasionando estrés hídrico, reduciendo el tamaño de los frutos, el color de las hojas se vuelven amarillas o violetas y el suelo se pulveriza demasiado [38], [39].

Por otra parte, se encuentra la influencia del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el crecimiento de la planta, cuyos niveles recomendables se encuentran entre 400-1000 ppm (partículas por millón), por lo que en caso de presentarse un aumento considerable se puede generar estrés en la planta, disminuyendo la productividad y calidad del producto y generando desperdicios no deseados [40]–[43]; por otra parte, está la temperatura y humedad relativa del aire, encontrando que temperaturas por debajo de  $17^\circ\text{C}$  reducen el crecimiento de la planta, aumentan el número de tomates bocos y disminuyen la fertilidad del palem, así mismo, temperaturas superiores a los  $35^\circ$  pueden generar

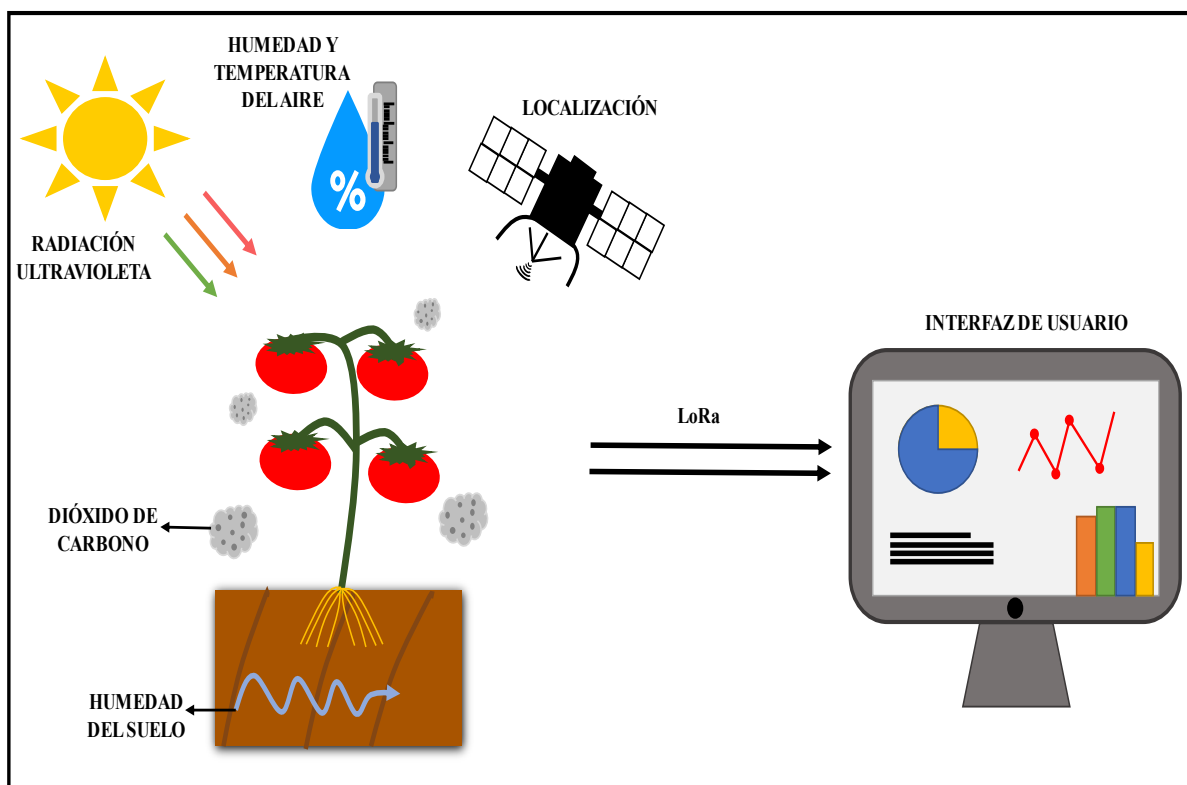
estrés por calor en el cultivo; añadido a esto, cuando la humedad del aire está por debajo del 65% y por arriba del 70% las condiciones de la planta empeoran, generando desperdicios significativos [44], [45].

Finalmente, están los índices ultravioleta (UV) presentes en los rayos solares que llegan sobre un cultivo, considerando que una exposición adecuada a estos generan un mejor rendimiento y correcto crecimiento vegetativo, además reducen la pérdida de peso y la descomposición de la planta [46]. El cultivo debe encontrarse expuesto a radiación ultravioleta B (UV-B) presente especialmente en un índice UV superior a 3, un valor inferior causa que las células esponjosas del mesófilo disminuyan su tamaño, número y densidad y se origina una acumulación insuficiente de carbohidratos esenciales para la respiración, por otra parte, se encuentra la radiación ultravioleta A (UV-A) presente en índices UV entre 6 y 10, los cuales benefician al cultivo en su totalidad, sin embargo un valor superior a estos 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 considerando la alta radiación y sobrecalentamiento de los frutos resultando en una degradación del licopeno, el cual es el responsable del color rojo [47].

El sistema de medición también cuenta con un GPS que posibilita obtener la ubicación precisa de las mediciones, permitiéndole al agricultor desplazarse únicamente a las áreas específicas que presenten anomalías [48], además, la implementación de este sistema permite la realización de mapas de intensidad [49]. Se debe agregar que las mediciones son enviadas a la interfaz de usuario empleando el protocolo de comunicación inalámbrica de largo alcance (en inglés, *LoRa Range* – LoRa), dado que su modo de comunicación permite realizar la transmisión de datos en lugares



rurales donde la cobertura a la red móvil es escasa y presenta un bajo consumo de energía [50], [51]. La Figura 10 contiene las variables seleccionadas para el sistema de medición.



**Figura 10.** Variables del sistema de medición del SEMANT.

La selección de los componentes del sistema de medición se realizó por medio del método de matriz de selección binaria [52] para cada una de las respectivas variables que se miden, considerando aspectos técnicos de los componentes electrónicos como: rango de medición, exactitud, precio, consumo energético, entre otros, permitiendo seleccionar los dispositivos que mejor se adapten a los requerimientos para lograr un funcionamiento óptimo e integral del sistema de medición.

La Tabla 6 representa las condiciones técnicas que se tuvieron en cuenta en la selección de los sensores para realizar la respectiva medición de las variables agroambientales, módulo GPS, módulo LoRa y microcontrolador.

**Tabla 6.** Condiciones para la comparación de los sensores.

Condiciones	Radiación UV	Temperatura y humedad del suelo	CO2	Humedad del suelo	GPS	LoRa	Micro-controlador
Rango de medición entre 100 a 400 nm	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Bajo consumo energético	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Dimensiones reducidas	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
Bajo precio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bajo porcentaje de exactitud (°C / %)	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Bajo tiempo de respuesta	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Peso liviano	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Alta distancia de comunicación	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
Variedad de protocolos de comunicación	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓

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

- **Radiación ultravioleta**

La Tabla 7 contiene diferentes sensores que permiten medir la Radiación UV y sus atributos.

**Tabla 7.** Sensores para la medición de la Radiación UV.

Atributo	Unidad	Sensor			
		GROVE UV	SI1145	UVM-30A UV	GYML8511
Rango de medición	nm <sup>a</sup>	200 – 400	280 – 950	200 – 370	280 – 390
Consumo de corriente	mA <sup>b</sup>	0.31	3500	0.1	0.3
Dimensiones	cm <sup>c</sup>	2.4x2.0	2.5x2.1	2.7x2.2	1.8x1.4
Precio	\$ <sup>d</sup>	42.000	42.000	42.000	20.600

**Nota.** <sup>a</sup>nanómetro, <sup>b</sup>miliamperios, <sup>c</sup>centímetros, <sup>d</sup>pesos colombianos.

La Tabla 8 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 8.** Matriz de atributos para los sensores de la Radiación UV.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>A2</b>	0	0	1	1	2	0.333
<b>A3</b>	0	0	0	1	1	0.167
<b>A4</b>	0	0	0	0	0	0
				<b>Suma</b>	6	1

**Nota.** <sup>a</sup>rango de medición, <sup>b</sup>consumo de corriente, <sup>c</sup>dimensiones, <sup>d</sup>precio.

En el Anexo 1 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de cuatro atributos entre los diferentes sensores de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 1 agrupa los pesos obtenidos de la Tabla 8 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 1. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: I1 – GROVE UV, I2 – SII145, I3 – UVM-30A UV, I4 – GYML8511.

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

Resolviendo la ecuación 1 se obtienen los valores de las variables.

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

Se observa en la ecuación 2 que I1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el sensor GROVE UV es la mejor opción para la medición de la Radiación UV, considerando que su rango de medición de 200 a 400 nm abarca en su totalidad las longitudes de onda de la radiación ultravioleta A y B, las cuales se encuentran entre 280 y 400 nm, y en gran parte la radiación ultravioleta C que se encuentra en el rango entre 100 y 280 nm, además, este sensor es compatible con dispositivos microcontroladores facilitando su implementación en sistemas de medición.

- **Humedad y temperatura del aire**

La Tabla 9 contiene variedad de sensores disponibles para la medición de la humedad y temperatura del aire con sus respectivos atributos.

**Tabla 9.** Sensores para la medición de la humedad y temperatura del aire.

Atributo	Unidad	Sensor				
		AMT1001	AM2301	SHT10	DHT11	DHT22
Exactitud de temperatura	°C <sup>a</sup>	1	0.5	0.5	2	0.2
Exactitud de humedad	% <sup>b</sup>	5	3	4.5	5	2
Precio	\$ <sup>c</sup>	16.924	13.936	24.752	5.454	18.516
Dimensiones	cm <sup>d</sup>	6.3x3.8	6.0x2.8	2.1x1.2	3.8x1.4	2.0x1.5
Tiempo de respuesta	seg <sup>e</sup>	10	2	8	1	2

**Nota.** <sup>a</sup>grados Celsius, <sup>b</sup>porcentaje, <sup>c</sup>pesos colombianos, <sup>d</sup>centímetros, <sup>e</sup>segundos.

La Tabla 10 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 10.** Matriz de atributos para los sensores de humedad y temperatura del aire.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	A5 <sup>e</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	1	4	0.4
<b>A2</b>	0	0	0	1	0	1	0.1
<b>A3</b>	0	1	0	1	1	3	0.3
<b>A4</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>A5</b>	0	1	0	1	0	2	0.2
					<b>Suma</b>	10	1

**Nota.** <sup>a</sup>exactitud de temperatura, <sup>b</sup>exactitud de humedad, <sup>c</sup>precio, <sup>d</sup>dimensiones, <sup>e</sup>tiempo de respuesta.

En el Anexo 2 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cinco atributos entre los diferentes sensores de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 3 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 10 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 2. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: T1 – AMT1001, T2 – AM2301, T3 – SHT10, T4 – DHT11, T5 – DHT22.

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

Resolviendo la ecuación 3 se obtienen los valores de las variables.

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

Se observa en la ecuación 4 que T5 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el sensor DHT22 es la mejor opción para la medición de la humedad y temperatura del aire, considerando que cuenta con la mejor exactitud, lo cual permite obtener valores más cercanos a los parámetros reales, como resultado a esto se logra crear una base de datos más precisa respecto al comportamiento del entorno a medir.

- **Dióxido de carbono**

Se realizó una búsqueda de los diferentes sensores que permiten medir CO2 y sus atributos como se observa en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Sensores para la medición de la CO2.

Atributo	Unidad	Sensor			
		MQ135	MG811	MH-Z19B	MH-Z14A
Consumo de corriente	mA <sup>a</sup>	150	200	100	150
Precio	\$ <sup>b</sup>	9.000	150.000	60.000	135.000
Tiempo de respuesta	seg <sup>c</sup>	10	10	60	90
Peso	g <sup>d</sup>	7.5	10	21	15

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>pesos colombianos, <sup>c</sup>segundos, <sup>d</sup>gramo.

La Tabla 12 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada uno de los atributos que se tienen en cuenta.

**Tabla 12.** Matriz de atributos para los sensores de CO2.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
A1	0	1	0	1	2	0.333
A2	0	0	0	1	1	0.167
A3	1	1	0	1	3	0.5
A4	0	0	0	0	0	0
	<b>Suma</b>				6	1

**Nota.** <sup>a</sup>consumo de corriente, <sup>b</sup>precio, <sup>c</sup>tiempo de respuesta, <sup>d</sup>peso.

En el Anexo 3 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes sensores de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 5 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 12 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 3. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: C1 – MQ135, C2 – MG811, C3 – MH-Z19B, C4 – MH-Z14A.

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

Resolviendo la ecuación 5 se obtienen los valores de las variables

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

Se observa en la ecuación 6 que C3 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el sensor MH-Z19B es la mejor opción para la medición de CO2, este cuenta con protocolo de comunicación serial que permite tener transferencia de datos más estable con el microcontrolador, disminuyendo la pérdida de información, además, su bajo consumo energético evita sobrecargas.

- **Humedad del suelo**

Se realizó una búsqueda de los diferentes sensores que permiten medir la humedad del suelo y sus atributos como se observa en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Sensores para la medición de la Humedad del suelo.

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

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>pesos colombianos, <sup>c</sup>gramo, <sup>d</sup>centimetro.

La Tabla 14 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 14.** Matriz de atributos para los sensores de humedad del suelo.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	3	0.6
<b>A2</b>	0	0	1	1	2	0.4
<b>A3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>A4</b>	0	0	0	0	0	0
	<b>Suma</b>				5	1

**Nota.** <sup>a</sup>consumo de corriente, <sup>b</sup>precio, <sup>c</sup>peso, <sup>d</sup>dimensiones.

En el Anexo 4 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes sensores de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 7 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 14 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 4. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: H1 – Sonda YL19, H2 – Resistente a corrosión, H3 – SKU: SEN0193, H4 – SKU: SEN0114.

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

Resolviendo la ecuación 7 se obtienen los valores de las variables.

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

Se observa en la ecuación 8 que H3 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el sensor SKU: SEN0193 es la mejor opción para la medición de la Humedad del suelo, considerando que cuenta con un material que evita la corrosión, lo cual permite tomar gran cantidad de mediciones sin perder precisión y estabilidad; otro rasgo es su bajo consumo energético.

- **Localización**

La Tabla 15 contiene variedad de módulos GPS con sus diferentes atributos.

**Tabla 15.** Módulos GPS.

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

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>pesos colombianos, <sup>c</sup> gramo, <sup>d</sup>centímetros.

La Tabla 16 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 16.** Matriz de atributos para los módulos GPS.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	0	1	1	2	0.333
<b>A2</b>	0	0	0	1	1	0.167
<b>A3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>A4</b>	0	0	1	1	2	0.333
				<b>Suma</b>	5	1

**Nota.** <sup>a</sup>consumo de corriente, <sup>b</sup>precio, <sup>c</sup>peso, <sup>d</sup>dimensiones.

En el Anexo 5 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cinco atributos entre los diferentes módulos GPS de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.



La matriz de decisión de la ecuación 9 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 16 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 5. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: L1 – NEO-6M V2, L2 – SIM808, L3 – A7, L4 – SIM868.

$$\begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ L4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0.167 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.333 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0.4 \\ 0.4 & 0 & 0.5 & 0.4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.333 \\ 0.167 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación 9 se obtienen los valores de las variables

$$\begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ L4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.428 \\ 0.222 \\ 0.067 \\ 0.283 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Se observa en la ecuación 10 que L1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el módulo GPS NEO–6M V2 es la mejor opción para obtener los puntos de localización de las mediciones, teniendo en cuenta su alta sensibilidad que le permite captar la señal de los satélites en entornos complejos, así mismo, tiene un acondicionamiento que le permite comunicarse con microcontroladores de voltaje 1.8V, 3.3V o 5V en su puerto serial, adaptándose fácilmente a un sistema de medición.

- **LoRa**

Se realizó una búsqueda de los diferentes módulos LoRa y sus atributos para la comunicación entre el sistema de medición y la interfaz de usuario remota como se observa en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Módulos LoRa para la comunicación.

Atributo	Unidad	Módulo			
		6100AES	611AES	RF1276	E22-400T22S
Consumo de corriente	mA <sup>a</sup>	600	150	100	105
Precio	\$ <sup>b</sup>	374.00	153.500	58.310	33.700
Prueba de distancias	m <sup>c</sup>	8000	5000	5000	4000
Dimensiones	cm <sup>d</sup>	7.0x3.9	6.2x3.2	5.5x2.5	2.6x1.6

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>pesos colombianos, <sup>c</sup>metros, <sup>d</sup>centímetros.

La Tabla 18 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 18.** Matriz de atributos para los módulos LoRa.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>A2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>A3</b>	0	1	0	0	1	0.167
<b>A4</b>	0	1	1	0	2	0.333
				<b>Suma</b>	6	1

**Nota.** <sup>a</sup>consumo de corriente, <sup>b</sup>precio, <sup>c</sup>prueba de distancia, <sup>d</sup>dimensiones.

En el Anexo 6 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes módulos de LoRa de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 11 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 18 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 6. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: W1 – 6100AES, W2 – 611AES, W3 – RF1276, W4 – E22-400T22S.

$$\begin{bmatrix} W1 \\ W2 \\ W3 \\ W4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0. & 0. & 0.6 & 0 \\ 0.167 & 0.167 & 0.2 & 0.167 \\ 0.5 & 0.333 & 0.2 & 0.333 \\ 0.333 & 0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0.167 \\ 0.333 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación 11 se obtienen los valores de las variables.

$$\begin{bmatrix} W1 \\ W2 \\ W3 \\ W4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.172 \\ 0.394 \\ 0.333 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Se observa en la ecuación 12 que W3 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el módulo LoRa RF1276 es la mejor opción para la comunicación entre el sistema de medición y la interfaz de usuario remota, en vista que su bajo consumo de corriente evita sobrecargas en sistemas de medición complejos, así mismo, la comunicación basada en nodos que presenta es ideal para aplicaciones en lugares remotos como campos agrícolas.

- **Microcontrolador**

Se realizó una búsqueda de diferentes microcontroladores con sus atributos para integrar y utilizar los sensores seleccionados para el sistema de medición como se observa en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Microcontroladores.

Atributo	Unidad	Microcontrolador			
		Arduino Nano	ESP32	PIC 16F877	EK-TM4C129AXL
Consumo de corriente	mA <sup>a</sup>	15	180	25	140
Protocolo de comunicación	–	I2C, UART, SPI	I2C, I2S, UART, TCP/IP, RED	SPI, I2C, UART	SSI, UART, I2C, CAN, RED
Peso	g <sup>b</sup>	5	10	6.6	16.2
Precio	\$ <sup>d</sup>	18.000	35.000	12.500	129.500

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>gramo, <sup>c</sup>pesos colombianos.

La Tabla 20 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 20.** Matriz de atributos para los microcontroladores.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>A2</b>	0	0	0	1	1	0.167
<b>A3</b>	0	1	0	1	2	0.333
<b>A4</b>	0	0	0	0	0	0
				<b>Suma</b>	6	1

**Nota.** <sup>a</sup>consumo de corriente, <sup>b</sup>protocolo de comunicación, <sup>c</sup>peso, <sup>d</sup>precio.

En el Anexo 7 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes microcontroladores de acuerdo a las condiciones planteadas de la Tabla 6.

La matriz de decisión de la ecuación 13 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 20 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 7. Para cada tipo de sensor se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: M1 – Arduino Nano, M2 – ESP32, M3 – PIC16F877, M4 – EK-TM4C1294XL.

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0.333 \\ 0 & 0.5 & 0.167 & 0.167 \\ 0.333 & 0 & 0.333 & 0.5 \\ 0.167 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.167 \\ 0.333 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Resolviendo la ecuación 13 se obtienen los valores de las variables.

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.417 \\ 0.139 \\ 0.278 \\ 0.167 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Se observa en la ecuación 14 que M1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que la placa Arduino Nano es la mejor opción para controlar el sistema de medición, teniendo en cuenta que se adapta a las necesidades de cada uno de los sensores seleccionados, facilitando su implementación y manejo, además, cuenta con una amplia gama de librerías que permiten optimizar los algoritmos de programación a utilizar.

- **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 MG995 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 y contiene un torque de 10.5kg-cm a 4.8V o 13Kg-cm a 6V.

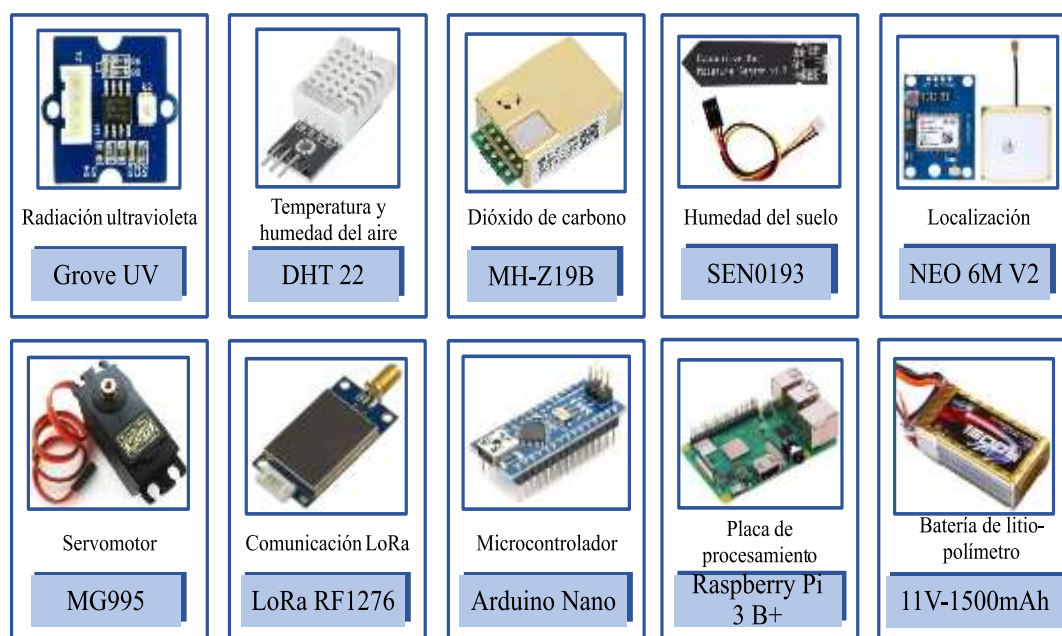
- **Placa de procesamiento**

Se selecciona la Raspberry Pi 3 B+ como placa de procesamiento considerando que tiene la capacidad de almacenar información y funcionar como base de datos de respaldo para los datos adquiridos, además, tiene 40 pines GPIO que permiten realizar las respectivas conexiones de los componentes para realizar el desplazamiento del UGV, por otra parte, su procesador de 1,4 GHz puede realizar los procesos requeridos por el sistema sin presentar fallas por sobrecarga de

información. Cabe resaltar que esta placa se consideró para integrar todo el sistema, sin embargo fue descartada debido a que no cuenta con sistema de medición analógico, necesario para el 33% de los sensores seleccionados, y solo cuenta con un puerto de comunicación serial, el cual es insuficiente debido a que 50% de los sensores lo requieren.

Además de los dispositivos mencionados anteriormente se seleccionan dos baterías de litio - polímetro de 11.1V y 1500mAh, las cuales se utilizan para alimentar todo el sistema.

En la Figura 11 se pueden observar los componentes electrónicos seleccionados para desarrollar el sistema de medición.

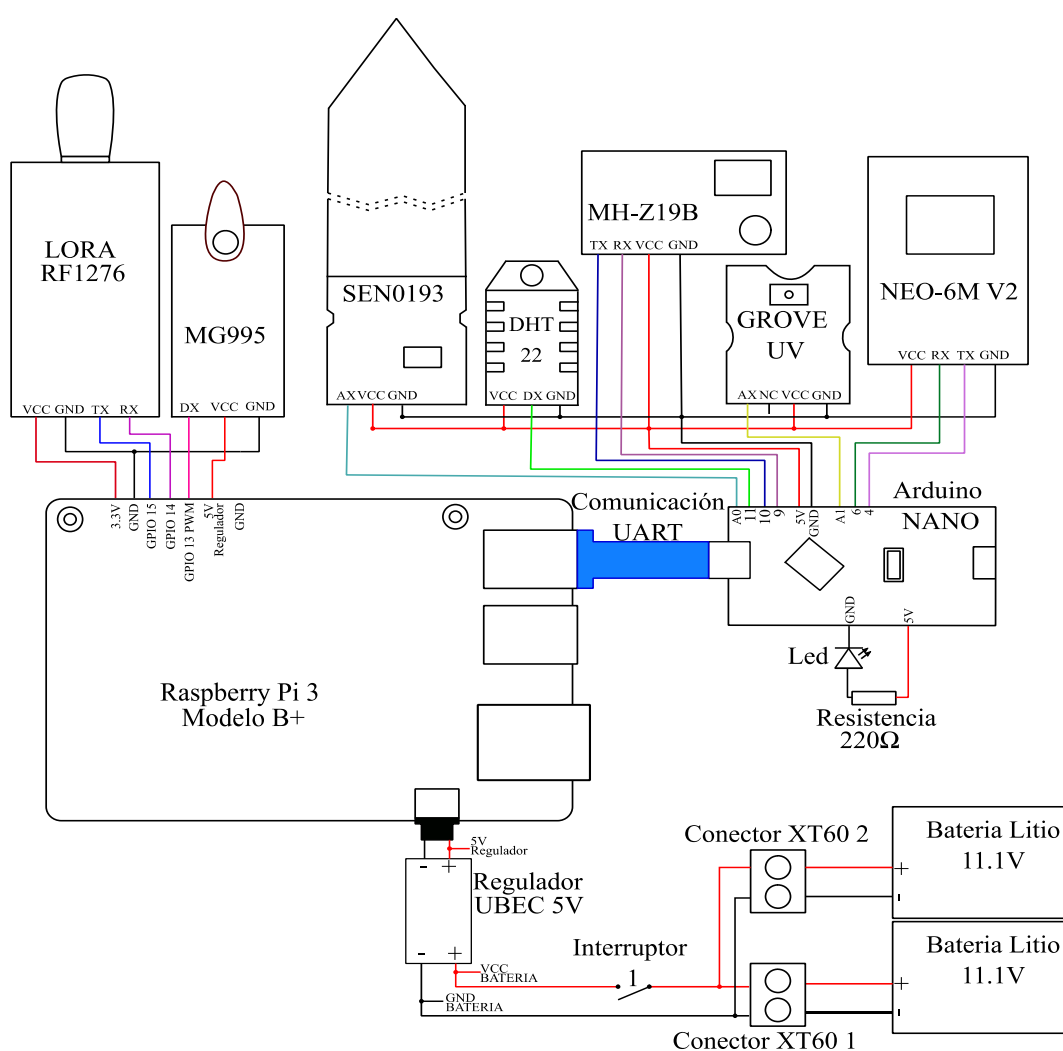


**Figura 11.** Componentes electrónicos para el sistema de medición.

### 10.1.2. Diseño preliminar general del sistema de medición

La Figura 12 detalla las conexiones empleadas para el sistema de medición, utilizando el Arduino Nano como placa principal debido a que tiene pines analógicos 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, así mismo, se observa que el Arduino Nano se interconecta directamente con la placa secundaria Raspberry Pi 3 B+, empleada

para el almacenamiento de los datos de los sensores mencionados anteriormente, el módulo de comunicación LoRa y el servo motor. Por otro lado, en la alimentación del sistema se emplean dos conectores XT60 para las dos baterías de 11V a 1500maH que se interconectan en paralelo obteniendo una corriente de 3000maH, se emplea un regulador de voltaje debido a que la Raspberry Pi requiere de 5V, el Arduino Nano se alimenta directamente del puerto USB de la Raspberry Pi, cabe resaltar que todo el sistema se activa a través del interruptor 1 y se implementa un led indicador para verificar si está energizado correctamente.



**Figura 12.** Circuito esquemático del sistema de medición.

Los sensores SEN0193 y GROVE UV emplean conexiones analógicas, el sensor DHT22 forma parte de las conexiones digitales, el sensor MH-Z19B, el módulo GPS NEO 6-M y LoRa F1276 emplean el protocolo de comunicación UART, y el servomotor MG995 funciona a través de PWM, cabe resaltar que el LoRa y el servomotor son conectados a la Raspberry Pi.

En cuanto al diseño de la PCB se emplea el Software libre EAGLE con licencia estudiantil, inicialmente se declara el tamaño de la PCB de 14.73x13.49 centímetros teniendo en cuenta el tamaño del chasis y los componentes seleccionados, las placas Arduino Nano y Raspberry Pi se ubican en la capa inferior de la PCB como SHIELD's con la finalidad de utilizar la capa superior para los componentes que se emplean en el sistema de medición. Como se observa en la Figura 13 el Arduino Nano se ubica al lado izquierdo de la Raspberry Pi para evitar que se interponga con los periféricos y la alimentación. Así mismo, los componentes del sistema de medición se encuentran cerca de la placa Arduino Nano dado que facilita las conexiones, evitando caminos extensos y posibles fallas en la transmisión de datos. Por otra parte, el módulo LoRa y el servomotor son ubicados sobre la Raspberry Pi en vista de que sus conexiones se realizan en ella. Cabe resaltar que para el módulo LoRa y los sensores de UV y humedad del suelo se emplean cables externos debido a que estos módulos contienen conectores macho JST, además, el servomotor también requiere de estos conectores considerando que debe ubicarse en la parte delantera del vehículo para la manipulación del sensor de humedad del suelo.

Por otro lado, el regulador UBEC se ubica en la parte inferior izquierda para mayor comodidad, además allí se ubica el interruptor y los dos conectores XT60 para la conexión de las baterías. Los dos puentes que se interconectan con el UBEC se emplean en la alimentación de la Raspberry Pi.

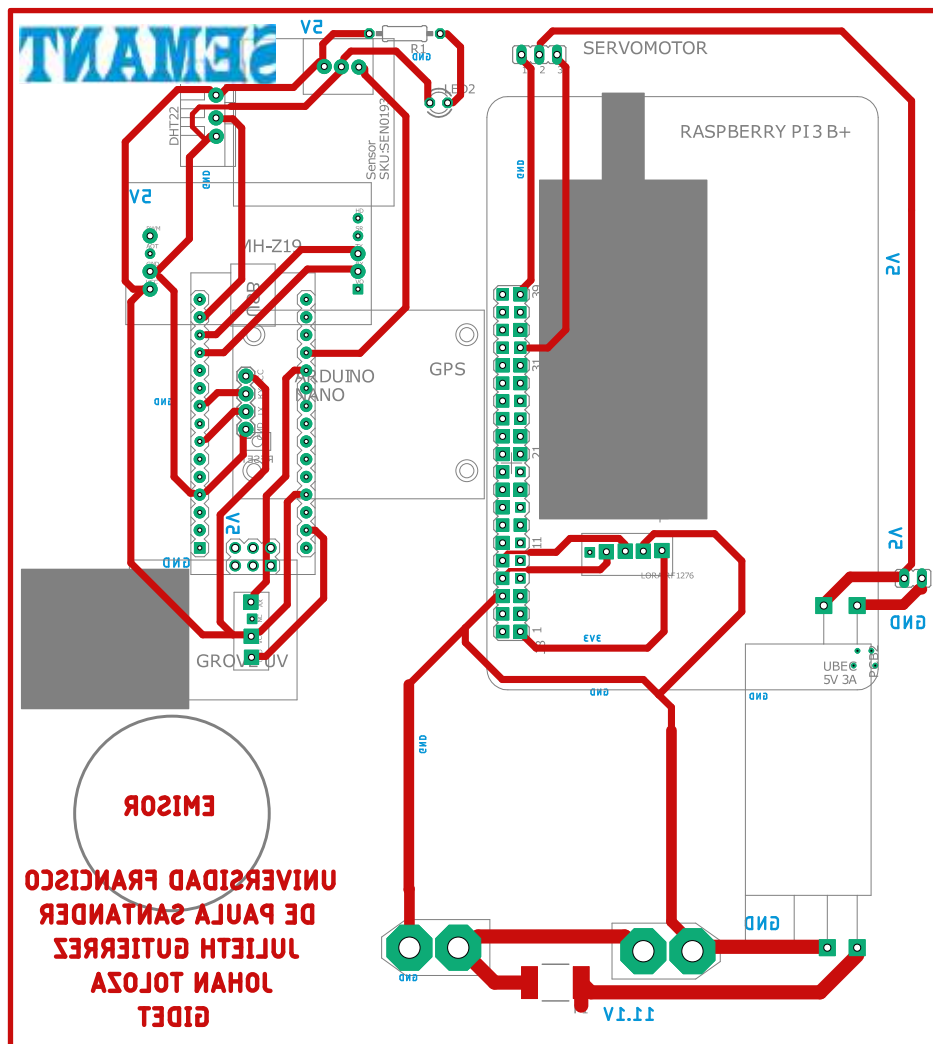


Figura 13. Diseño PCB para el sistema de medición.

### 10.1.3. Software del sistema de medición

Comprende el diseño del algoritmo general que da funcionalidad de todos los componentes integrados en el sistema de medición, además de los pseudocódigos de funcionamiento de cada componente.

El algoritmo del sistema de medición se divide en dos procesos que se ejecutan de manera paralela, el primer proceso consiste en la codificación empleada en la placa Arduino Nano como se observa en el Anexo 8, este algoritmo contiene el proceso de medición de las variables de CO<sub>2</sub>, humedad del suelo, índice ultravioleta y humedad y temperatura del ambiente, además de los datos



de geolocalización. 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 Raspberry Pi mediante el cable de datos del Arduino. Para la etapa de medición de humedad del suelo se realiza un proceso de conversión para calcular el porcentaje de humedad mediante la ecuación 15, la cual se obtiene realizando un proceso de calibración similar a [53].

$$hum = 600000 * (lect_{hum_{suelo}})^{-2,149} \quad (15)$$

El proceso 2 que se observa en el Anexo 9 consiste en la recepción y decodificación de la información transmitida por el Arduino Nano en la Raspberry Pi, leyendo cada variable correspondiente a través del puerto USB, enviando los datos a través del módulo de comunicación LoRa por el puerto serial y almacenando la información en formato CSV como respaldo. La etapa de lectura de los datos de humedad del suelo requiere de una activación previa del servomotor, el cual se encarga de introducir el sensor de humedad del suelo en el montículo, posterior a la realización de esto se repite el procedimiento ejecutado en las demás variables y se desactiva el servo para regresar el sensor a su posición inicial. Es importante resaltar que el proceso de lectura y transmisión de las variables se ejecuta únicamente cuando el GPS cuenta con mediciones correctas de latitud y longitud, debido a que estos valores son necesarios para generar los mapas de intensidad, además de ser importantes al momento de observar la calidad de las condiciones agroambientales del cultivo.

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

La lógica de programación para el sensor de dióxido de carbono se representa en la Figura 14, teniendo en cuenta que para su correcto funcionamiento requiere de 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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>.

---

```

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 14.** Pseudocódigo sensor de dióxido de carbono MH-Z19B.

El pseudocódigo de la Figura 15 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 (°C)
11.         imprimir: hum (%)
12.      fin si
FIN PROCESO

```

---

**Figura 15.** Pseudocódigo sensor de temperatura y humedad DHT22.

La medición de la radiación ultravioleta a través del sensor GROVE UV requiere de un sistema estándar sencillo representado en la Tabla 21 en el cual se establecen los diferentes niveles e índices UV para cada lectura del sensor según [54].

**Tabla 21.** Índices Ultravioleta.

Niveles	UV-B						UV-A				
	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	

El pseudocódigo de la Figura 16 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 con el que cuenta el Arduino es de 10 bits, finalmente el valor obtenido es comparado con datos de medición previamente establecidos 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 índice uv'
7.          si no:
8.              total_lect = lect_uv + total_lect
9.              j++
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 16.** Pseudocódigo sensor de radiación ultravioleta GROVE–UV.

La Figura 17 representa la lógica de programación para el 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 15 obtenida en la calibración inicial.

---

```

INICIO PROCESO: LECTURA HUMEDAD DEL SUELO
1.      Entradas: lectura análoga 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 (15)
9.              imprimir: hum
10.         si no:
11.             imprimir: 'Lectura errónea'
12.         fin si
13.     fin si
FIN PROCESO

```

---

**Figura 17.** Pseudocódigo sensor del suelo SEN0193.

La lógica de programación para el servomotor se representa en la Figura 18, esta implementa la librería Rpi.GPIO encargada de controlar los pines PWM de la Raspberry Pi, al ser un servomotor de movimiento continuo su funcionamiento consiste en activar el giro en el sentido

necesario para insertar el sensor de humedad del suelo en el montículo durante 2 segundos, posteriormente se realiza la espera para la medición de la humedad y finalmente se repite el proceso inicial en sentido contrario para ubicar el servomotor en su posición inicial.

---

```

INICIO PROCESO: ACTIVACIÓN SERVOMOTOR
1.      librerías: Rpi.GPIO
2.      activar servo a favor de las manecillas del reloj
3.      esperar 2000ms
4.      esperar LECTURA HUMEDAD DEL SUELO
5.      activar servo en contra de las manecillas del reloj
6.      esperar 2000ms
7.      desactivar servo
FIN PROCESO

```

---

**Figura 18.** Pseudocódigo servomotor MG995.

La lógica de programación para el módulo GPS se representa en la Figura19, 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 sensor; 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.

---

```

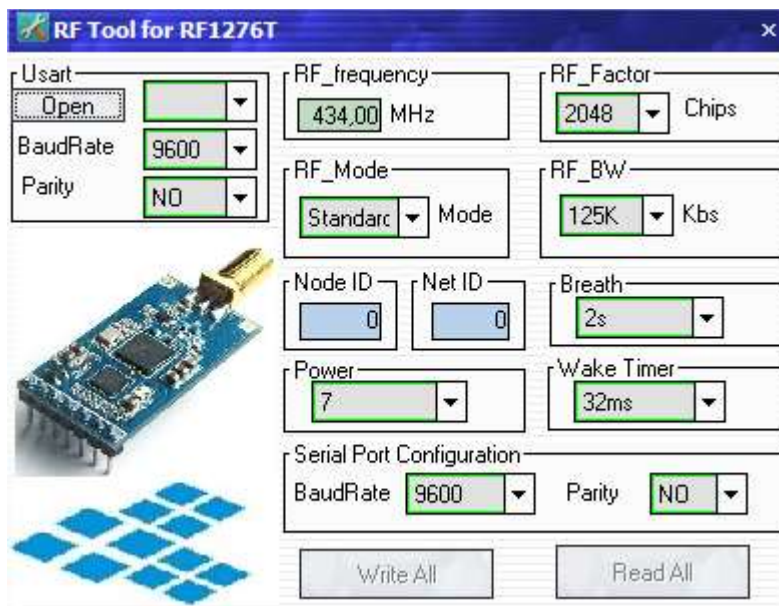
INICIO PROCESO: LECTURA POSICIONAMIENTO MEDIANTE GPS
1.      Entradas: latitud y longitud desde el sensor
2.      librerías: SoftwareSerial , TinyGPS
3.      variables iniciales: flat, flon, lect, validar
5.      lect <- leer puerto serial
6.      validar <- decodificar( lect)
7.      si validar == true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

```

---

**Figura 19.** Pseudocódigo módulo GPS NEO-6M V2.

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 20 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.



**Figura 20.** Software libre para los módulos LoRa.

**Fuente:** Tomada de [55].

El pseudocódigo de la Figura 21 representa el funcionamiento del módulo transmisor de comunicación LoRa en la Raspberry Pi, 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.

---

**INICIO PROCESO:** ENVIO DE DATOS LORA

1. **Salidas:** datos de envío
2. variables iniciales: *dato*
3. librerías: serial, time
4. abrir puerto serial
5. escribir por el puerto serial -> *dato*

**FIN PROCESO**

---

**Figura 21.** Pseudocódigo módulo LoRa RF1276.

### 10.1.4. Pruebas de funcionamiento del sistema de medición

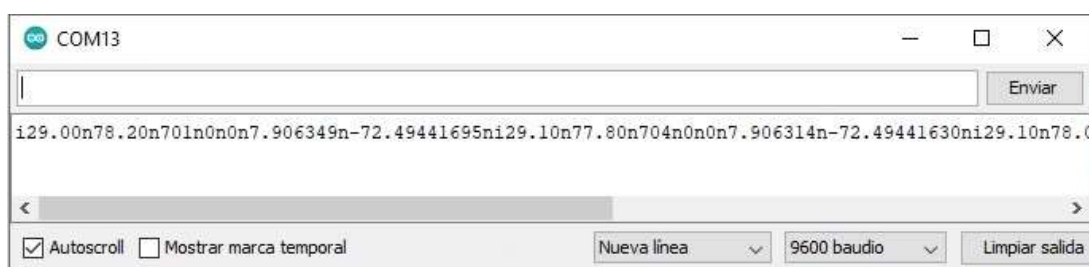
En la Figura 22 se observa el correcto funcionamiento del sistema de medición luego de ser acoplado a la PCB y ejecutado en la Raspberry Pi y la Figura 23 ilustra el almacenamiento de los datos en formato CSV al momento de realizar las mediciones. Por otra parte, se realizó un sistema receptor provisional compuesto por el dispositivo LoRa receptor y un Arduino UNO, con el objetivo de verificar la transmisión de los datos entre los dos puntos, en la Figura 24 se observan los datos recibidos a través de la consola proporcionada por el software Arduino IDE, donde el carácter “i” es implementado para indicar que ha iniciado un nuevo ciclo de medición y el carácter “n” para separar cada variable medida

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO2 (ppm)	Indice_UV	Humedad del suelo	Latitud	Longitud
13-10-2020	10:17:01	29.00	78.20	701	0	0	7.906349	-72.49441695
13-10-2020	10:17:09	29.10	77.80	704	0	0	7.906314	-72.49441630
13-10-2020	10:17:17	29.10	78.00	705	0	0	7.906318	-72.49441668
13-10-2020	10:17:26	29.10	78.10	705	0	0	7.906369	-72.49441624
13-10-2020	10:17:34	29.10	78.00	708	0	0	7.906398	-72.49441677
13-10-2020	10:17:42	29.10	78.40	708	0	0	7.906311	-72.49441698
13-10-2020	10:17:50	29.10	78.40	710	0	0	7.906344	-72.49441641
13-10-2020	10:17:58	29.10	77.90	710	0	0	7.906318	-72.49441688
13-10-2020	10:18:06	29.10	77.50	708	0	0	7.906301	-72.49441623
13-10-2020	10:18:14	29.20	77.60	710	0	0	7.906356	-72.49441656
13-10-2020	10:18:22	29.20	77.50	709	0	0	7.906387	-72.49441633
13-10-2020	10:18:31	29.10	77.90	705	0	0	7.906362	-72.49441620
13-10-2020	10:18:39	29.10	78.10	702	0	0	7.906378	-72.49441616

Figura 22. Funcionamiento del sistema de medición.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO2 (ppm)	Índice UV	Humedad del suelo	Latitud	Longitud
2	13-10-2020	10:17:01	29.00	78.20	701	0		07.906349	-72.49441695
3	13-10-2020	10:17:09	29.10	77.80	704	0		07.906314	-72.49441630
4	13-10-2020	10:17:17	29.10	78.00	705	0		07.906318	-72.49441668
5	13-10-2020	10:17:26	29.10	78.10	705	0		07.906369	-72.49441624
6	13-10-2020	10:17:34	29.10	78.00	708	0		07.906398	-72.49441677
7	13-10-2020	10:17:42	29.10	78.40	708	0		07.906311	-72.49441698
8	13-10-2020	10:17:50	29.10	78.40	710	0		07.906344	-72.49441641
9	13-10-2020	10:17:58	29.10	77.90	710	0		07.906318	-72.49441688
10	13-10-2020	10:18:06	29.10	77.50	708	0		07.906381	-72.49441623
11	13-10-2020	10:18:14	29.20	77.60	710	0		07.906356	-72.49441656
12	13-10-2020	10:18:22	29.20	77.50	709	0		07.906387	-72.49441633
13	13-10-2020	10:18:31	29.10	77.90	705	0		07.906362	-72.49441620
14	13-10-2020	10:18:39	29.10	78.10	702	0		07.906378	-72.49441616
15	13-10-2020	10:18:47	29.20	78.10	701	0		07.906327	-72.49441610
16	13-10-2020	10:24:03	29.20	77.00	770	0		07.906373	-72.49441619
17	13-10-2020	10:24:03	29.20	77.00	770	0		07.906373	-72.49441619
18									

**Figura 23.** Almacenamiento de los datos en CSV.



**Figura 24.** Datos recibidos por el LoRa Receptor.

## 10.2. Construcción del UGV para el desplazamiento entre las zanjas de un cultivo de tomate basado en técnicas de automatización

### 10.2.1. Técnicas y metodologías empleadas en la construcción de UGV's

El diseño y construcción de UGV's ha tenido alto un crecimiento a través de los años, gracias a la innovación tecnológica y la creación de dispositivos electrónicos con gran velocidad de procesamiento de información, por lo que se han desarrollado prototipos adaptables a diversas condiciones de terreno y con la capacidad de cumplir las tareas para las cuales fueron diseñados. Un vehículo debe cumplir con dos características principales para considerarse como UGV: Tener la capacidad de desplazarse de manera autónoma sin humanos conduciéndolo y tener una aplicación donde reemplace al humano en una tarea específica [56]. Para ello, se deben tener en cuenta consideraciones previas al diseño del vehículo que permitan seleccionar componentes que se adapten a la aplicación donde se desea implementar [57].



- **Restricciones de la aplicación**

Es importante considerar la zona donde se desea implementar y las funciones que debe cumplir el UGV, debido a que delimita aspectos como tamaño y tipo de ruedas; por ejemplo, [57] construyen un UGV para la exploración de un cultivo estableciendo el límite en las dimensiones del vehículo de acuerdo al ancho de la zanja, con el objetivo de evitar invadir la zona de siembra y provocar daños en el cultivo, además, tienen en cuenta la altura de la planta para la ubicación de una cámara que logre cubrir correctamente la zona y realizar una exploración adecuada, por otra parte, al ser un terreno irregular implementan ruedas tipo oruga que le permite moverse a través de la zanja sin detenerse o desviarse.

- **Chasis**

El chasis del vehículo se considera como un aspecto significativo, este elemento se puede construir manualmente seleccionando tipo de material, forma propia, tamaño, entre otros, o comprar marcos fabricados por empresas especializadas, para seleccionar o construir un chasis es importante tener en cuenta: Peso, un robot muy pesado puede provocar estancamiento del vehículo, además de mayor esfuerzo de los motores para poder desplazarlo, por otra parte seleccionar un chasis muy liviano tiene el riesgo de desarmarse cuando la carga sea muy pesada; capacidad de carga, para esta característica es importante considerar los dispositivos ensamblados para su desplazamiento y funciones a cumplir, debido a que cuando el peso de estos elementos supera la capacidad de carga puede provocar daño en los motores por el sobreesfuerzo. La investigación realizada por [58] se enfoca en el la cartografía y evasión de obstáculos mediante un UGV, el cual debe tener la capacidad de moverse en diferentes direcciones y moverse por espacios pequeños, teniendo en cuenta lo anterior implementan una plataforma de 68.5cm x 38cm con ruedas tipo oruga para su dirección de desplazamiento, tiene un peso de alrededor de 15,4Kg, donde el 55%

se atribuye a las baterías de plomo que utiliza para alimentar todo el sistema, además tiene bajo valor económico, el tren de tracción del vehículo base no es muy robusto y no tiene un conjunto bien adaptado de motores, sin embargo cumple con las características necesarias del proyecto.

- **Ruedas**

En el diseño de UGV's los tipos de ruedas dependen del terreno en donde se desplazarán, como en terrenos irregulares donde las ruedas más comunes son las orugas, las cuales requieren de motores de mayor potencia y son de alto costo, en terrenos no irregulares las ruedas lisas son implementadas junto a motores más simples y de bajo costo. El UGV construido por [59] implementa ruedas tipo oruga, debido a que fue diseñado para transitar, reconocer y mapear senderos y zonas rurales; mientras que [60] se enfocan en un robot impreso en 3D con ruedas lisas, considerando que fue construido para reconocer zonas más civiles cuyo terreno es pavimentado y regular.

- **Motores**

Existen diversidad de motores disponibles para la construcción de UGV's, como lo son con codificador incorporado, paso a paso, servo-motores, con y sin escobillas y motores de corriente continua con escobilla, estos últimos son los más utilizados, un ejemplo de esto es [61] que desarrollan un robot para recopilar datos fenotípicos para plantas individuales, el cual cuenta con dos motores de corriente continua DG-158 A de SuperDroid Robots Inc. capaces de generar una potencia de 200 W, sin embargo las investigaciones desarrolladas en UGV's en los últimos años han comenzado a implementar motores con codificador incorporado, debido a que estos dispositivos convierten el movimiento mecánico en señal eléctrica, lo cual permite controlar el desplazamiento con mayor precisión, el UGV desarrollado por [62] utiliza estos motores junto a

sensores de medición de las unidades de inercia para generar la trayectoria del vehículo y la información de odometría.

- **Controlador**

El controlador de motor es fundamental en la construcción de UGV's, dado que es el dispositivo que acopla la CPU con los motores del vehículo, permitiendo controlar la energía proporcionada a los motores. Para la selección de éste es importante tener claridad de los motores utilizados, puesto que así se logra determinar cuanta corriente debe suministrar el controlador, además de evitar sobrecalentamiento y posibles daños en los circuitos del sistema. La investigación desarrollada por [63] implementa dos controladores de motor ESCON 36/3 Maxon que les permite acoplar una Raspberry Pi 2 B con dos motores EC-flat Maxon.

- **Batería**

La selección de la batería depende del tiempo de autonomía deseado y el consumo energético de todo el sistema, el cual en su gran mayoría se da por el funcionamiento de los motores, gracias a estos dos factores se obtiene el valor más adecuado en Ah (Amperios – hora) de la batería. En [64] desarrollan un UGV con el objetivo de monitorear y mapear sitios con entornos cerrados y desconocidos, además debe realizar un reconocimiento total de la zona, es por esto que funciona con una batería 20V – 24Ah con autonomía de aproximadamente 3h, la cual le permite cumplir con las tareas requeridas.

- **CPU**

En la selección de la CPU se deben tener en cuenta los dispositivos y sensores conectados al sistema y el nivel de procesamiento que requiere, debido a que ésta debe ser capaz de funcionar continuamente durante todo el tiempo que el vehículo se encuentre trabajando. En [57] emplean la Raspberry Pi 3 dado que el sistema cuenta con sensores de fenotipado y navegación mediante

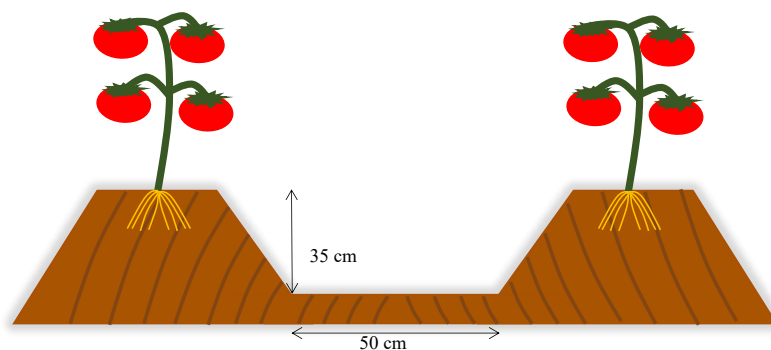
cámaras montadas en el UGV, comunicación a través de wifi y radio y sistema operativo ROS, por lo cual se requiere gran capacidad de procesamiento en todo el sistema para su correcto desempeño.

- **Tecnologías para el desplazamiento**

La tecnología para el desplazamiento del UGV es un factor fundamental en la construcción del sistema, debido a que permite identificar los obstáculos presentes en el entorno y evitar que el vehículo se choque con el montículo, además posibilita el desplazamiento en línea recta y asegura una adecuada distancia respecto a la planta. Hoy en día se han desarrollado diferentes tipos de tecnologías que permiten la detección de obstáculos como la visión computacional, los sensores infrarrojos, ultrasonidos y laser, entre otros. Algunas investigaciones como [65] consideraron el uso de los sensores ultrasónicos, con la finalidad de realizar la detección de obstáculos que se encuentran en el terreno; mientras que [66] implementan sensores infrarrojos con el objetivo de obtener el proceso de evitar obstáculos con una precisión y exactitud; por otra parte, también se presenta otro método tradicional empleado en [67] para la caracterización de puntos de referencia el cual es basado en visión por computadora para corregir su trayectoria; por último, [68] implementan sensores laser que permiten una mayor precisión en comparación con otros sensores empleados para dispositivos omnidireccionales.

### **10.2.2. Componentes físicos para la construcción del UGV**

En la selección de los componentes y estructura física para la construcción del UGV se tuvieron en cuenta los factores descritos anteriormente, en el apartado del chasis fue necesario obtener las dimensiones de la zanja del cultivo en la Hacienda la Esperanza Verde Pantanos en el Municipio de Chinácota en Norte de Santander como se observa en la Figura 25.



**Figura 25.** Dimensiones de la zanja del cultivo.

Teniendo en cuenta las dimensiones de la Figura 25 se establecen los rangos de la Tabla 22, los cuales se consideran en la selección del chasis adecuado para el correcto desplazamiento entre la zanja del cultivo, evitando choques o invasión en la zona de la siembra.

**Tabla 22.** Rangos de dimensiones.

	Dimensiones	Unidad
Largo	30-33	<sup>a</sup> cm
Ancho	22-25	
Altura	10-13	

**Nota.** <sup>a</sup>centímetros.

- **Chasis**

Se realizó una búsqueda de diferentes chasis de robot móvil o vehículos con diferentes atributos como se observa en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Chasis de robot móvil.

Atributo	Unidad	Chasis				
		KIT Y100	T300	Gazechimp	Carro inteligente 6WD	Robot móvil 80mm
Tipo de ruedas	–	Oruga	Oruga	Plástico	Plástico	Omnidireccional
Precio	\$ <sup>a</sup>	210.000	273.000	454.600	423.700	300.600
Dimensiones	cm <sup>b</sup>	43x43x27	29x27x10	35x19.5x9	28x21x11.5	20x16x16
Capacidad de carga	g <sup>c</sup>	6000	5000	7000	6000	5000
Motor con encoder	–	Si	Si	No	No	Si

**Nota.** <sup>a</sup>pesos colombianos, <sup>b</sup>centímetros, <sup>c</sup>gramos.

La Tabla 24 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 24.** Matriz de atributos para chasis.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	A5 <sup>e</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	1	4	0.4
<b>A2</b>	0	0	0	1	0	1	0.1
<b>A3</b>	0	1	0	1	1	3	0.3
<b>A4</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>A5</b>	0	1	0	1	0	2	0.2
						<b>Suma</b>	10
							1

**Nota.** <sup>a</sup>tipo de ruedas, <sup>b</sup>precio, <sup>c</sup>dimensiones, <sup>d</sup>capacidad de carga, <sup>e</sup>motor con encoder.

En el Anexo 10 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cinco atributos entre los diferentes chasis de robot móvil, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Tipo de rueda específicamente oruga
- Bajo precio
- Dimensiones adaptadas al cultivo basado en la Tabla 29
- Mayor capacidad de carga
- Tecnología encoder

La matriz de decisión de la ecuación 16 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 24 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 10. Para cada tipo de chasis se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: R1 – KIT Y100, R2 – T300, R3 – Gazechimp, R4 – Carro inteligente 6wd, R5 – Robot móvil 80mm.

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \\ R4 \\ R5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.25 & 0.33 \\ 0.5 & 0.3 & 0.25 & 0 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.25 & 0.25 & 0.0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0.33 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0 \\ 0.2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Resolviendo la ecuación 16 se obtienen los valores de las variables

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \\ R4 \\ R5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.452 \\ 0.385 \\ 0 \\ 0.067 \\ 0.096 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Se observa en la ecuación 17 que R1 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el chasis robot móvil KIT Y100 es la mejor opción para la construcción del UGV, debido a que se encuentra en las dimensiones que se declaran del cultivo en la Tabla 22, emplea dos motores de 9V a 150rpm con encoder óptico, ruedas de apoyo y motrices metálicas para mayor resistencia y estabilidad y su valor económico cumple con el objetivo de construir un prototipo de bajo costo.

- **Puente H**

Se realizó una búsqueda de diferente puente H que permiten controlar los motores DC del vehículo con sus atributos como se observa en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Puente H.

Atributo	Unidad	Puente H			
		DUAL L9110S	Controlador motor 2A	L298N	DUAL MX1919
Corriente del canal	A <sup>a</sup>	0.8	2	4	2
Precio	\$ <sup>c</sup>	5.400	81.300	9.000	7.400
Peso	g <sup>b</sup>	18	29	30	11
Dimensiones	cm <sup>d</sup>	3.0x2.6	4.7x5.3	4.3x4.3	3.1x3.2

**Nota.** <sup>a</sup>miliamperios, <sup>b</sup>gramo, <sup>c</sup>pesos colombianos.

La Tabla 26 detalla los valores ponderados según la importancia entre cada atributo.

**Tabla 26.** Matriz de atributos para el puente H.

	A1 <sup>a</sup>	A2 <sup>b</sup>	A3 <sup>c</sup>	A4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
<b>A1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>A2</b>	0	0	1	0	1	0.167
<b>A3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>A4</b>	0	1	1	0	2	0.333
				<b>Suma</b>	6	1

**Nota.** <sup>a</sup>Consumo de corriente, <sup>b</sup>Precio, <sup>c</sup>Peso, <sup>d</sup>Dimensiones.

En el Anexo 11 se encuentran las matrices de coeficientes de énfasis, en las cuales se realizó la comparación de los cuatro atributos entre los diferentes puentes H, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Mayor corriente por el canal
- Bajo precio
- Peso liviano
- Dimensiones reducidas

La matriz de decisión de la ecuación 18 agrupa los pesos obtenidos en la Tabla 26 y las matrices de coeficientes de énfasis del Anexo 11. Para cada puente H se le asignó una variable, quedando de la siguiente manera: P1 – DUAL L9110S, P2 – Controlador motor 2A, P3 – L298N, P4 – DUAL MX1919.

$$\begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.333 & 0.5 \\ 0.2 & 0 & 0.167 & 0 \\ 0.6 & 0.167 & 0 & 0.167 \\ 0.2 & 0.333 & 0.5 & 0.333 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.167 \\ 0 \\ 0.333 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Resolviendo la ecuación 18 se obtienen los valores de las variables

$$\begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.1 \\ 0.383 \\ 0.267 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Se observa en la ecuación 19 que P3 obtuvo el mayor puntaje, por lo que el puente H L298N es la mejor opción para controlar los motores, debido a que cuenta con la mayor capacidad de corriente por canal, comprende de un rango amplio de voltaje de operación que va desde 5V a 35V, además tiene la capacidad de controlar dos motores, aspecto necesario debido al chasis escogido, y cuenta con disipador de potencia que lo protege ante daños generados por altas temperaturas.

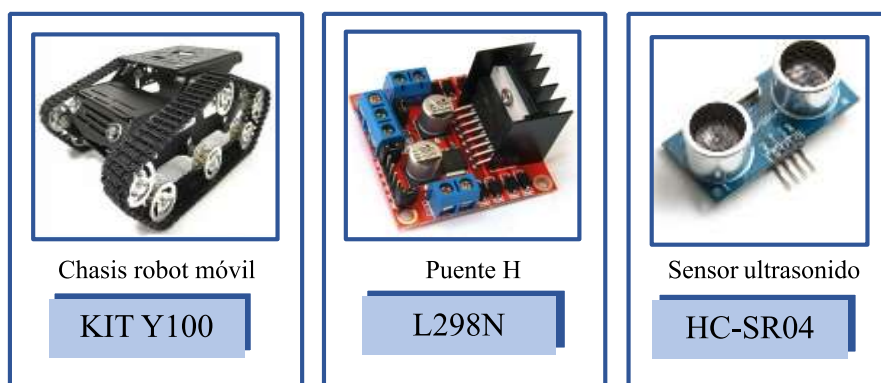
- **Tecnologías de desplazamiento**



Se realiza la selección de la tecnología de desplazamiento teniendo en cuenta aspectos como capacidad de detectar cualquier objeto y bajo consumo computacional y energético.

Los sensores laser permiten una detección de los obstáculos más precisa en comparación a los otros, sin embargo su precio es mayor debido a esta característica; los sensores ultrasónicos en comparación con los demás generan mejor rendimiento energético, tienen la capacidad de detectar cualquier material y su consumo computacional es bajo, además de poder obtener una medida más precisa en comparación a la proporcionada por la visión computacional, que requiere un procesamiento de imágenes más detallado pixel por pixel, implementando mayor cantidad de recursos computacionales; los módulos infrarrojos tienen la gran desventaja de solo medir distancias relativamente cortas en comparación a las requeridas por el sistema y no permiten la detención de algunos objetos como el vidrio y sus derivados. Considerando lo anterior se seleccionan los sensores ultrasónicos, específicamente el sensor HC-SR04 de la Figura 24 que cuenta con una precisión de 3mm, dimensiones reducidas permitiendo ser ubicado fácilmente en el UGV y un rango de medición de 2 a 400 cm. Cabe señalar que se implementan tres sensores HC-SR04 con el objetivo de medir la distancia lateral izquierda, derecha y frontal.

En la Figura 26 se pueden observar los componentes seleccionados para el desarrollo del UGV.



**Figura 26.** Componentes para desarrollar el UGV.

### **10.2.3. Diseño de la estructura física y el esquemático electrónico del UGV**

La Figura 27 detalla las conexiones empleadas para el UGV, las cuales acoplan los sistemas de medición y desplazamiento, permitiendo generalizar el circuito esquemático del SEMANT. El sistema consta de dos motores DC con sus respectivos encoder, los cuales son empleados para determinar la distancia que ha recorrido el UGV, el puente H L298N es empleado para interconectar y controlar los motores, por otra parte se encuentran los tres sensores HC-SR04, cada uno con su respectivo divisor de tensión en la salida del pin ECHO, con la finalidad de asegurar un voltaje de 3.3V en el pin de entrada de la Raspberry Pi 3 B+. Se puede observar en la Figura 27 que el puente H se encuentra directamente conectado a la batería debido a que este proporciona una entrada de alimentación hasta de 12V. Además, se decide energizar los sensores HC-SR04 a través del regulador de voltaje con la finalidad de suministrar la corriente necesaria para su correcto funcionamiento, considerando que los demás elementos están alimentados por la salida de 5V de la Raspberry Pi 3 B+ y puede ocurrir una sobrecarga sobre esta.

Otro aspecto para señalar es que el servomotor y los pines ENA y ENB del puente H L298N funcionan a través de PWM. Por último, la sección denominada “conexiones internas” permite controlar la activación y desactivación de los puertos seriales.

En la Figura 28 se encuentra el diseño de la PCB del SEMANT donde se interconectan todos los dispositivos utilizados en el sistema construido, es importante resaltar que los sensores HC-SR04 requieren de cable externo para ubicarlos en los exteriores del UGV.

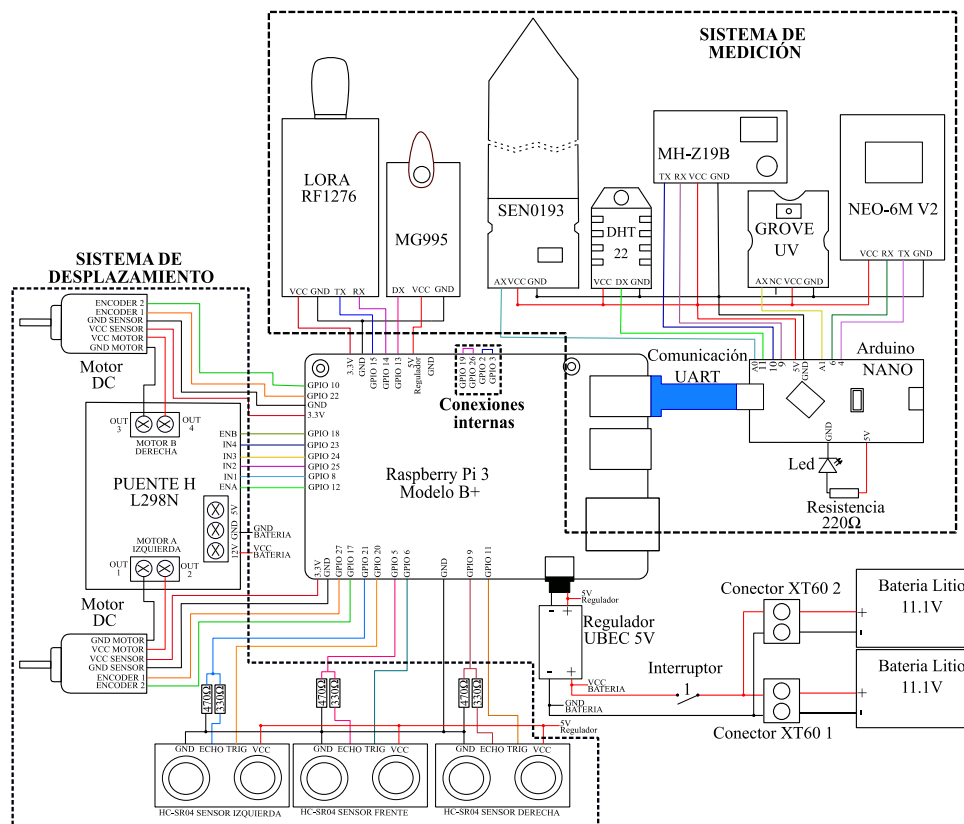


Figura 27. Circuito esquemático para todo el sistema del SEMANT.

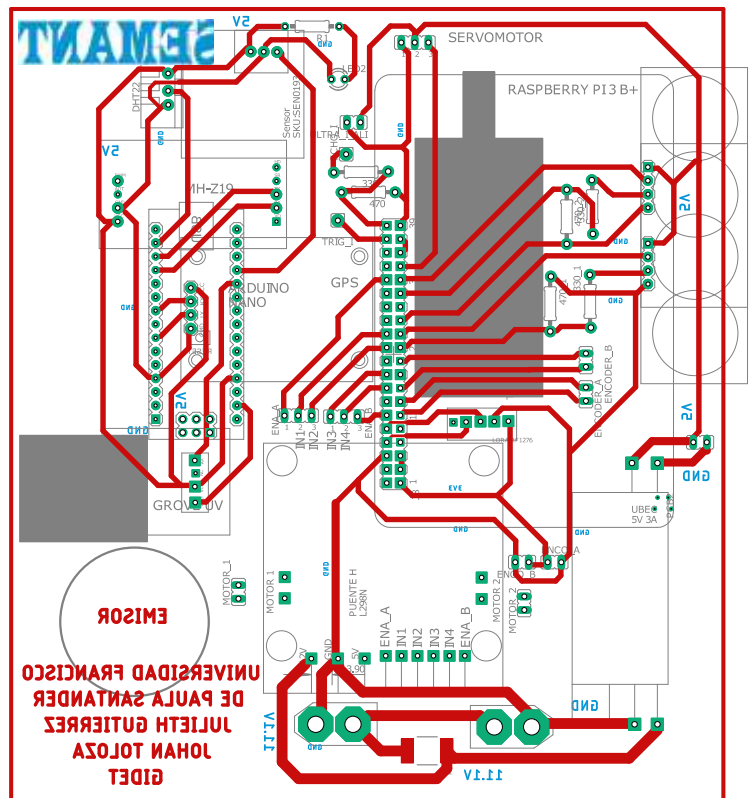
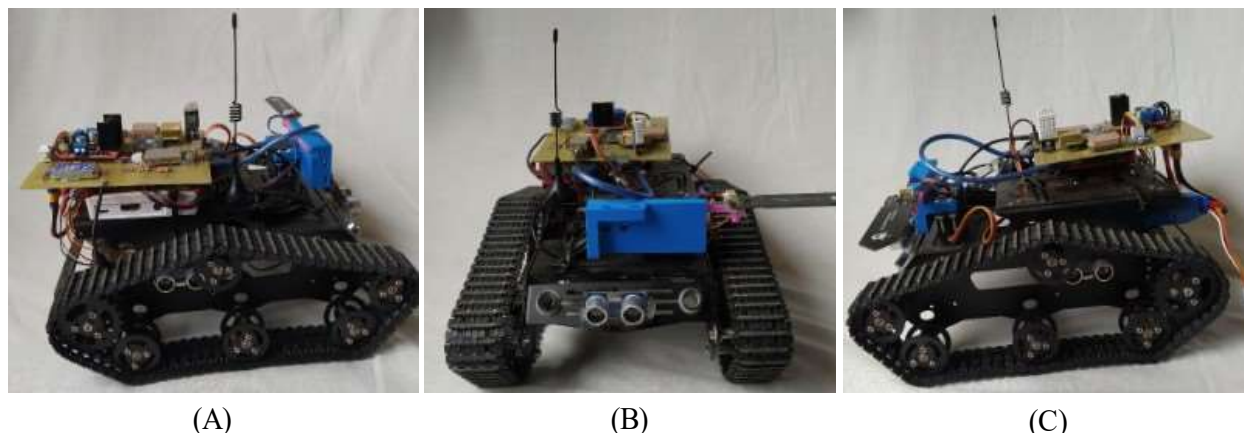


Figura 28. Diseño PCB para todo el sistema del SEMANT.

En la Figura 29 se observan los diferentes ángulos del SEMANT y la ubicación de los sensores ultrasónicos, donde (A) es el costado derecho, (B) el frente y (C) el costado izquierdo del vehículo.



**Figura 29.** Estructura del SEMANT.

Finalmente, la Tabla 27 se observa el presupuesto del sistema de medición diseñado para la toma de cada una de las variables, además del total de los componentes para realizar el correcto desplazamiento del vehículo.

**Tabla 27.** Costos de los sistemas construidos.

<b>Sistema</b>	<b>Precio</b>
Desplazamiento	400.000
Medición	517.000
<b>Total del SEMANT</b>	<b>917.000</b>

#### 10.2.4. Software para el desplazamiento del UGV

El sistema de control de desplazamiento del UGV utiliza tecnología basada en sensores ultrasónicos como se mencionó anteriormente, de acuerdo con esto el modelo de control implementado es una máquina de estados, la cual tiene como entradas los tres sensores y como salidas los dos motores presentes en el vehículo, las condiciones de cada uno de los estados se establecen en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Condiciones de cada uno de los estados.

Ultrasonido frente	Ultrasonido lateral derecho	Ultrasonido lateral izquierdo	Motor derecho	Motor izquierdo
0	0	0	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
0	0	1	0 <sup>b</sup>	1 <sup>b</sup>
0	1	0	1 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>
0	1	1	0	0
1	0	0	Q <sup>d</sup>	Q <sup>d</sup>
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

**Nota.** <sup>a</sup>estado 1, <sup>b</sup>estado 2, <sup>c</sup>estado 3, <sup>d</sup>estado 4.

Donde “1” en los ultrasónicos indica distancia inferior a la permitida respecto al obstáculo y “0” indica distancia igual o superior, por otro lado, Q contiene valores de “1” y “0” teniendo en cuenta el giro anterior realizado por el UGV.

Posteriormente se desarrolla el algoritmo de funcionamiento del sistema de control, el cual en su etapa inicial realiza el proceso de importar las librerías empleadas e inicializar las variables utilizadas para el funcionamiento de cada componente, seguidamente se establecen los valores permitidos para los sensores laterales en 15cm para izquierda y derecha, los cuales son requeridos para las condiciones de la máquina de estados y permiten que el vehículo se encuentre a una distancia considerable del montículo, a continuación se encienden los motores solo cuando el GPS tenga conexión correcta con el satélite y se realiza el proceso de control de desplazamiento teniendo en cuenta la Tabla 28, corrigiendo la trayectoria de acuerdo a los valores establecidos y realizando el giro correspondiente del vehículo en caso de ser necesario, es importante resaltar que se requiere un obstáculo frontal cuando se desee realizar el giro, para el funcionamiento de este proceso se establece una distancia de máxima de 40cm, cuando el sensor frontal obtenga un valor inferior y los sensores laterales no detecten ningún obstáculo el carro comienza a girar, con el objetivo de asegurar que el vehículo se desplace a la siguiente zanja únicamente cuando haya salido

de la anterior, en esta etapa se toma la distancia del sensor frontal y se enciende uno de los dos motores de acuerdo a la dirección del giro, el cual se mantiene energizado hasta que el sensor lateral detecte el obstáculo frontal, logrando así que el vehículo haya rotado 90° sobre su propio eje, posteriormente se encienden los motores y se realiza el mismo procedimiento para el siguiente giro, el cual le permite al robot entrar a la nueva zanja, finalmente se modifica la variable que indica la dirección del giro para que en la siguiente ocasión lo realice en dirección opuesta. Por otra parte se acopló el sistema para medir humedad del suelo compuesto por el servomotor y el sensor SKU: SEN0193, debido a que esta variable se debe medir únicamente cuando el vehículo se encuentre detenido, y se añadieron los 4 pines de conexión interna, considerando que los sistemas de medición y desplazamiento requieren del uso de los puertos USB y serial, los cuales no tienen la capacidad de transmisión de datos paralela, estos pines permiten comunicar los dos sistemas y controlar la lectura y escritura de datos a través de los puertos mencionados anteriormente, finalmente se repite el procedimiento para cada una de las zanjas que recorra el UGV.

En el Anexo 12 se encuentra el algoritmo del desplazamiento del UGV.

#### **10.2.5. Pruebas de funcionamiento del UGV**

Las pruebas iniciales se realizan teniendo en cuenta los dispositivos seleccionados para la construcción y programación del UGV con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento y autonomía del dispositivo. Posteriormente se ensambla el prototipo final UGV construyendo el sistema electrónico en una placa de circuito impreso (PCB). Finalmente se evalúa el comportamiento del UGV con el sistema de medición integrado para observar posibles fallas en el sistema y realizar correcciones.

En la Figura 30 se puede observar el funcionamiento del desplazamiento del UGV, donde (A) ilustra la ventana de comandos con la lectura de los sensores ultrasonidos y la acción que ejecuta el UGV y en (B) se puede observar cuando el UGV realiza el primer giro a la derecha.



**Figura 30.** Pruebas de funcionamiento del desplazamiento del UGV.

Posteriormente se realizaron las pruebas de funcionamiento del desplazamiento con el sistema de medición. En la Figura 31 se ilustra el funcionamiento del todo el sistema construido, donde (A) ilustra la ventana de comandos con el comportamiento del desplazamiento junto con la lectura del sensor de humedad del suelo y en (B) se observa el UGV con el servomotor activado para realizar la respectiva medición de humedad del suelo.



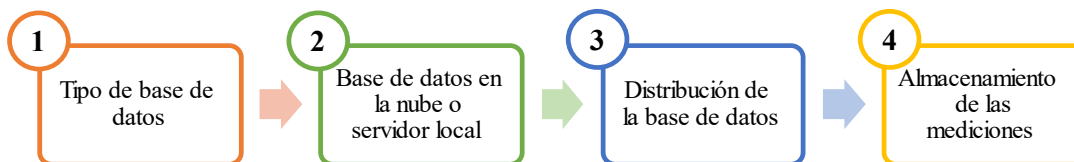
**Figura 31.** Pruebas de funcionamiento del desplazamiento y sistema de medición.

El siguiente enlace contiene un video del vehículo SEMANT realizando el desplazamiento <https://drive.google.com/file/d/1XFif67x2cExZfleX32qLiAZ3pCG9cR1c/view?usp=sharing>.

### 10.3. Generación de mapas de intensidad

#### 10.3.1. Base de datos para el almacenamiento de las mediciones tomadas por el SEMANT

La creación de la base de datos se realiza teniendo en cuenta las etapas de la Figura 32.



**Figura 32.** Etapas para la creación de la base de datos.

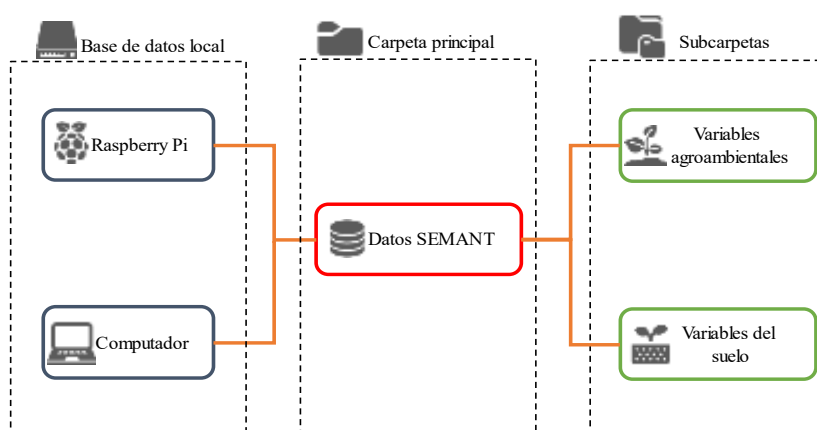
1. **Tipo de base de datos:** Existe variabilidad de tipos de bases de datos según la utilidad o necesidad que se desea llevar a cabo. En este caso se selecciona el tipo de base de datos estática, dado que el objetivo es almacenar la información adquirida por el SEMANT a través del tiempo, limitando a que estas puedan modificarse, ya sea añadir, eliminar o cambiar algún dato que se encuentre ya almacenado [69].

2. **Base de datos en la nube o servidor local:** El sistema basado en la nube cuenta con el beneficio de poder acceder a la base de datos desde cualquier ubicación, sin embargo requiere en todo momento de conexión a internet para su correcto funcionamiento [70]. En cambio el almacenamiento de la base de datos en un servidor local no implementa algún tipo de red, debido a que la información se almacena directamente en el equipo donde ejecuta el software [71]. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y la limitación que se presenta al ser un proyecto que se implementa en fincas que normalmente no cuentan con conexiones a internet se selecciona la base de datos local para el almacenamiento de la información. Cabe resaltar que se tienen dos bases de datos locales, la principal en el computador donde se encuentra instalado el software o



interfaz de usuario y la secundaria donde se encuentra el sistema de adquisición de datos basado en la Raspberry Pi.

3. **Distribución de la base de datos:** Como se observa en la Figura 33 cada una de las bases de datos locales tiene una carpeta principal y dos subcarpetas, debido a que el sistema de medición se secciona en dos procesos: adquisición de variables agroambientales mientras el SEMANT (UGV) se desplaza a través de las zanjas y medición de humedad del suelo cuando el SEMANT(UGV) se detenga cada 2 metros.



**Figura 33.** Distribución de la base de datos.

4. **Almacenamiento de las mediciones:** Las mediciones se almacenan con la extensión de archivo CSV con el nombre del día en que se realiza la adquisición de los datos y se guardan en la subcarpeta correspondiente. Cabe resaltar que en el archivo CSV cada medición de las variables agroambientales y variables del suelo contiene la hora y su respectiva ubicación.

### 10.3.2. Interfaz gráfica para visualizar las mediciones y generar los mapas de intensidad del cultivo

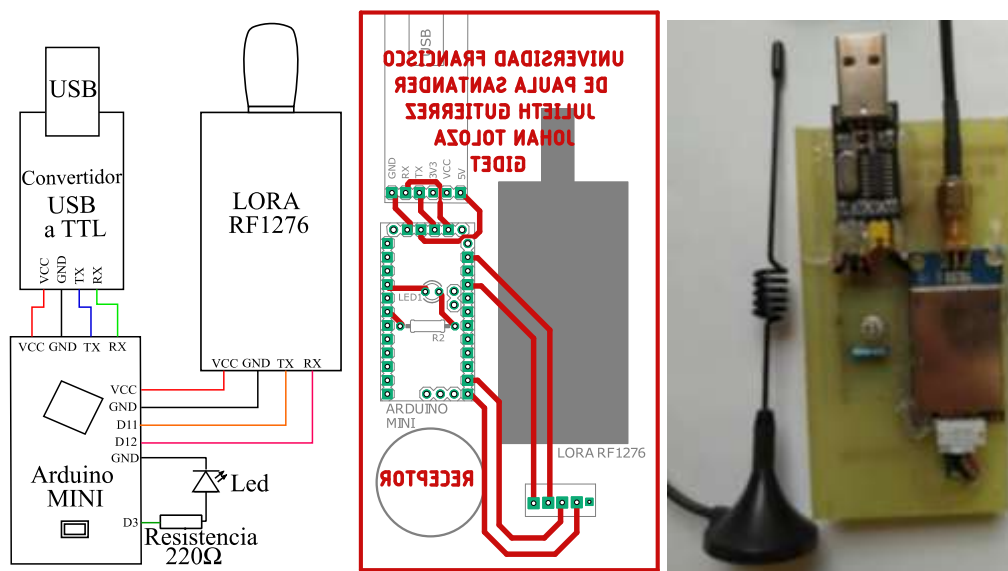
Considerando las metodologías basadas en la ingeniería de software se selecciona el modelo incremental, debido a que se adapta a las necesidades del proyecto y permite realizar una evaluación constante de cada avance en el desarrollo de la interfaz gráfica. Para la creación de esta se escoge el lenguaje de programación Java utilizando la versión de Java 8 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 construidos funcionan en diversos sistemas operativos, para lo cual solo se requiere la máquina virtual de Java (JVM); por otra parte, 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 y su implementación reduce la codificación de la interfaz. Para la implementación de este modelo se establecen las siguientes iteraciones con sus respectivos subprocesos.

#### **Iteración 1:** Visualización de las mediciones

- **Análisis:** La interfaz gráfica debe tener la capacidad de visualizar las mediciones en tiempo real o utilizando la información almacenada en la base de datos, para el primer apartado se requiere recibir los datos a través del dispositivo LoRa, decodificarlos y mostrarlos al usuario por medio de tablas y/o gráficas, además de almacenarlos en la base de datos, lo anterior le permite al agricultor observar de manera constante la calidad actual de las variables agroambientales del cultivo y tomar acciones inmediatas en caso de ser necesario, por otra parte, la información guardada en la base de datos posibilita un análisis más detallado del comportamiento de las condiciones agroambientales del cultivo en un periodo más largo de tiempo, considerando lo anterior, es importante proporcionar parámetros estadísticos como media, moda, mediana, entre otros, que le permitan al usuario observar tendencias en el comportamiento de los datos y tomar acciones a mediano y largo plazo. Es importante considerar que la variable agroambiental de humedad del suelo no se mide con la misma frecuencia que las demás, por lo que esta debe visualizarse en otra sección de la interfaz gráfica y almacenarse individualmente en la base de datos. Por otra parte, se requiere de un sistema receptor que le permita al dispositivo LoRa transmitirle los datos al equipo, el cual

se construye utilizando un convertidor TTL-USB conectado a un Arduino Mini encargado de recibir los datos del LoRa y enviarlos al PC. En la Figura 34 se puede observar el circuito esquemático y la PCB con los respectivos componentes.



**Figura 34.** Circuito esquemático, PCB y estructura física del receptor.

- **Diseño:** El diseño de la interfaz debe tener una sencilla usabilidad para permitirle al usuario observar de manera clara los valores medidos en el cultivo, considerando esto se realiza a través de botones que permitan seleccionar un rango de fechas de acuerdo con la información almacenada, posteriormente los datos se visualizan a través de tablas generales y graficas individuales donde se pueden observar los parámetros estadísticos o las variables medidas a través del tiempo. En el Anexo 13 se puede observar el diseño de cada una de las ventanas que permitirán visualizar los datos adquiridos. Donde (A) presenta la ventana de inicio que contiene dos botones denominados “Iniciar” y “Detener” para la adquisición de datos en tiempo real, (B) muestra la ventana de las gráficas en tiempo real, (C) contiene el diseño de la tabla para visualizar los datos en tiempo real o almacenados en la base de datos, (D) presenta la ventana para graficar los datos almacenados a través del tiempo, (E) muestra la ventana para visualizar los datos de la variable del suelo en tiempo real y almacenados en la

base de datos por medio de una tabla y gráfica y (F) contiene el diseño de la ventana para realizar el análisis estadístico de los datos almacenados a través del tiempo, la cual consta de dos botones que permiten seleccionar la visualización por medio de un diagrama de barras o una tabla.

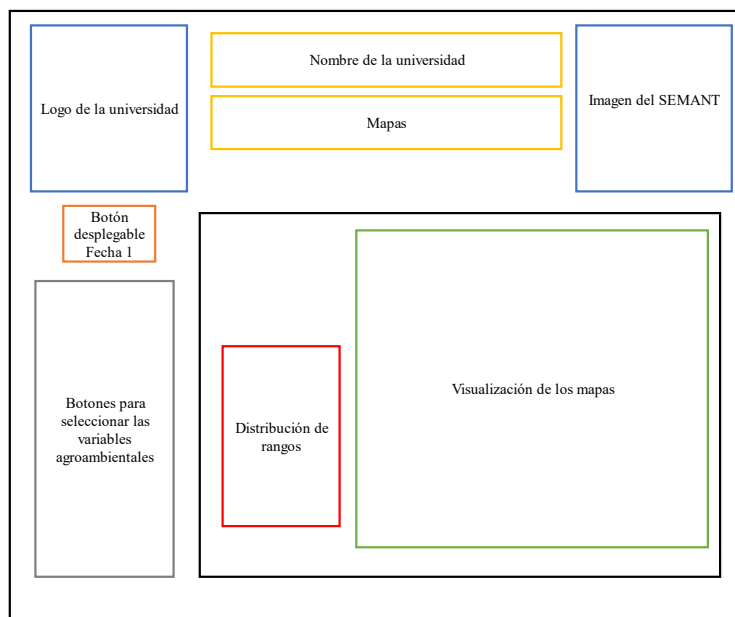
- **Programación:** La visualización de los datos en tiempo real requiere la lectura y decodificación de los datos recibidos por el LoRa, para ello se utiliza la librería `jSerialComm`, esta se encarga de abrir el puerto USB y leer la información recibida, posteriormente estos datos son decodificados y clasificados de acuerdo a caracteres específicos que permiten identificar a la variable que pertenecen, por último se visualizan y almacenan en formato `.csv` junto con la fecha y hora actual del equipo que recibe la información implementando la librería `csvreader`, cada una de las variables se guarda en su carpeta correspondiente como se observa en la Figura 33, cabe resaltar que cuando alguna de las variables sea incorrecta se descartan los datos del ciclo de medición actual y se espera por el siguiente ciclo repitiendo los procesos mencionados anteriormente.
- **Pruebas:** En el Anexo 14 se puede observar el correcto funcionamiento de las ventanas teniendo en cuenta las mediciones a tiempo real, el almacenamiento en la base de datos y la posterior visualización de la información en la interfaz gráfica.

### **Iteración 2:** Generación de los mapas de intensidad

- **Análisis:** Generar los mapas de intensidad requiere de la base de datos creada, la cual debe contener los datos de ubicación satelital y las variables agroambientales medidas por el sistema de medición. Así mismo se deben considerar los valores máximos y mínimos permitidos para las variables agroambientales en un cultivo de tomate, con el objetivo de realizar la distribución de rangos y asignar 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, permitiendo que el agricultor observe claramente el estado en el que se encuentra el cultivo. Por otro lado, para obtener una visualización más detallada y clara de las condiciones agroambientales del cultivo es necesario realizar los mapas de intensidad de cada variable individualmente y tomar únicamente los datos de un día específico.

- **Diseño:** Teniendo en cuenta el análisis anterior se considera un botón desplegable que le permita al usuario seleccionar una única fecha de las mediciones que desea generar el mapa de intensidad, así mismo contiene botones de selección que permiten elegir la variable agroambiental para visualizar en el mapa, además cuenta con una ventana que permite observar la distribución de los rangos con su respectiva asignación de colores como se observa en la Figura 35.



**Figura 35.** Diseño de la ventana para generar los mapas de intensidad.

- **Programación:** Existe la posibilidad de generar los mapas de intensidad haciendo uso de diferentes bibliotecas que emplean conexión Wifi como Leaflet de JavaScript, pero

considerando que el proyecto está diseñado para implementarse en lugares escasos y/o nulos de cobertura Wifi se decide que los datos de geolocalización medidos por el GPS permitan crear los mapas en un sistema de coordenadas X-Y, por lo tanto es necesario crear una función encargada de normalizar estos valores para visualizarlos en una gráfica, por otro lado cada coordenada previamente normalizada se clasifica en su respectivo color teniendo en cuenta la variable seleccionada y los valores límites establecidos para un cultivo de tomate, finalmente se delimita la gráfica y se genera el mapa utilizando la clase BubbleChart, proporcionada por Java.

- **Pruebas:** En el Anexo 14 se puede observar el correcto funcionamiento del mapa de intensidad teniendo en cuenta los rangos establecidos para un cultivo de tomate y las tonalidades de color mencionadas previamente.

Finalmente, se creó una ventana de ayuda que le permite al usuario tener una guía del manejo de la aplicación y una breve información acerca de la influencia que tienen las variables agroambientales medidas en un cultivo de tomate. Por otra parte, se creó un menú general que contiene botones para navegar a través de cada una de las ventanas, en este menú se agregó un botón de salida para cerrar el aplicativo en caso de requerirse. En el Anexo 14 se encuentra el mapa de navegación final de la interfaz gráfica desarrollada con cada una de las respectivas ventanas de funcionamiento.

En el siguiente enlace se encuentra el comprimido .jar de la interfaz gráfica realizada

**<https://drive.google.com/file/d/1XCbpoceAqSXyUWyMh7sF->**

**[9fRflGGJbv9/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1XCbpoceAqSXyUWyMh7sF-9fRflGGJbv9/view?usp=sharing)**.

#### **10.4. Evaluación del desempeño del SEMANT considerando factores de interés como la autonomía, tiempo de recorrido, precisión del recorrido y cantidad de datos tomados**

### 10.4.1. Autonomía del SEMANT

En la Tabla 29 se observan los resultados de las pruebas de funcionamiento de la autonomía del SEMANT teniendo en cuenta horas de inicio y final en el proceso de carga y descarga de las baterías. Es importante resaltar que las pruebas se realizaron utilizando un valor constante de 50% PWM para cada uno de los motores.

**Tabla 29.** Tiempo de descarga y carga de las baterías.

Descarga			Carga		
Hora inicio	Hora final	Tiempo (min <sup>a</sup> )	Hora inicio	Hora final	Tiempo (min <sup>a</sup> )
08:13	10:36	143	12:27	14:47	140
08:34	11:04	150	12:55	15:20	145
08:20	10:34	134	14:36	16:48	132
07:55	10:04	129	13:56	16:14	138
08:25	10:43	138	14:22	16:43	139
08:11	10:27	136	12:10	14:31	141
08:40	10:51	131	13:05	15:22	138
08:31	10:43	132	12:43	14:59	139
08:44	10:59	135	14:10	16:32	142
08:56	11:01	125	14:14	16:35	141
Tiempo promedio (min <sup>a</sup> )		135.3	Tiempo promedio (min <sup>a</sup> )		139.5

**Nota.** <sup>a</sup>minutos.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 28 el SEMANT tiene una autonomía de 135 min, este valor puede aumentar implementando baterías con mayor capacidad de amperios-hora (Ah), permitiendo recorrer una mayor área del cultivo.

### 10.4.2. Tiempo de recorrido del SEMANT en el cultivo de tomate

Inicialmente se realizaron las pruebas con valores de PWM en intervalos de 10 (10, 20, 30, etc.) para examinar el desempeño del vehículo al momento de recorrer el cultivo, se observó que con valores iguales o inferiores a 30 los motores no contaban con la fuerza suficiente, impidiendo que el vehículo lograra desplazarse a través de la zanja, por otra parte, con valores iguales o superiores a 70 se obtenía un comportamiento erróneo en el movimiento debido a que se desplazaba a una

velocidad muy alta y, en consecuencia, el algoritmo de control no lograba corregir el rumbo del robot.

La Tabla 30 presenta los resultados del tiempo y velocidad aproximados utilizados por el vehículo para recorrer  $\frac{1}{4}$  de hectárea aplicando los valores de PWM con los que se obtuvo el desplazamiento correcto del vehículo.

**Tabla 30.** Tiempo y velocidad aproximado por el vehículo.

PWM (%)	Tiempo de recorrido (min <sup>a</sup> )	Velocidad promedio (m/s <sup>b</sup> )
35	603,67	0,06
40	513,59	0,08
45	445,64	0,093
50	368,21	0,113
55	333,44	0,125
60	298,68	0,139
65	240,21	0,17

**Nota.** <sup>a</sup>minutos, <sup>b</sup>metros sobre segundos.

#### 10.4.3. Tecnología para el transporte y almacenamiento de los datos medidos

La Tabla 31 contiene los resultados de las pruebas realizadas para la comparativa de la información en las dos bases de datos, se puede observar la cantidad de datos almacenados en la Raspberry Pi y en el servidor de la interfaz gráfica, detallando el error presente de acuerdo con la cantidad de información perdida durante la transmisión.

**Tabla 31.** Comparación de la información en las dos bases de datos.

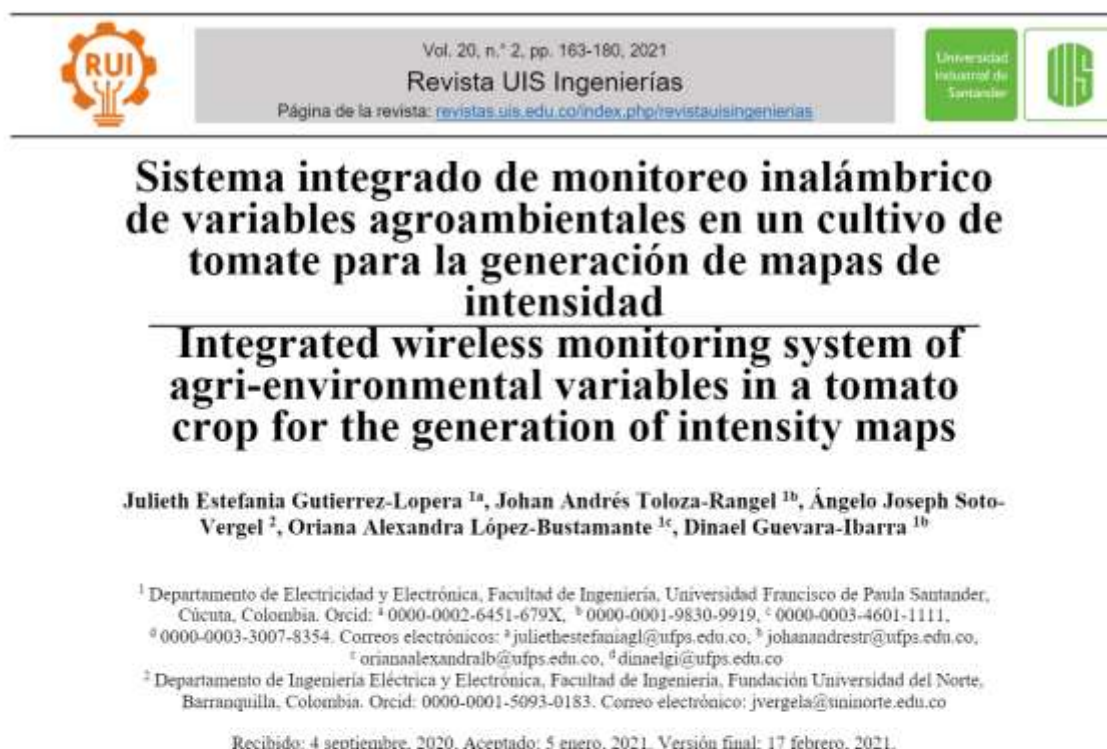
Número de Datos		Error (%)
Almacenamiento en la Raspberry Pi	Servidor interfaz	
306	306	0%
426	426	0%
396	396	0%
366	360	1.64%
354	348	1.69%
414	414	0%



## 10.5. Divulgación de los resultados obtenidos con la aplicación del SEMANT

### 10.5.1. Artículo publicado en revista científica

Se envió a la revista indexada en categoría B “UIS Ingenierías” el artículo titulado “Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad”, el cual fue aprobado y publicado en el Vol.20 Núm.2 (2021) con el DOI 10.18273/revuin.v20n2-2021014. En la Figura 36 se puede observar la primera página del artículo publicado.



**Figura 36.** Artículo publicado en la revista UIS.

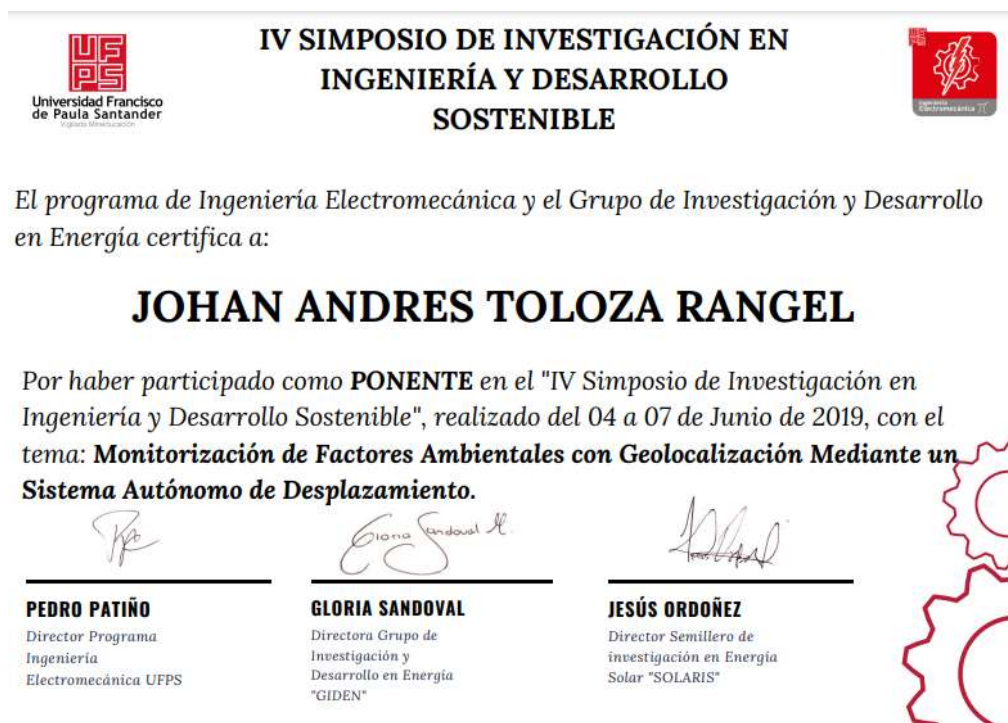
Por otra parte, se realizó un artículo de revisión titulado “Vehículos terrestres no tripulados, sus aplicaciones y tecnologías de implementación”, este fue enviado a la revista “Ingeniare de Barranquilla – Colombia” y se encuentra en proceso de revisión según el último correo enviado por parte del editor de la revista, como se observa en la Figura 37.



**Figura 37.** Correo del editor de la Revista Ingeniare.

### 10.5.2. Participación en eventos de carácter científico y/o académico

Se participó en el “IV SIMPOSIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE” el cual se realizó en la Universidad Francisco de Paula Santander, el proyecto se presentó con el título de “Monitorización de factores ambientales con geolocalización mediante un sistema autónomo de desplazamiento”. En la Figura 38 se puede observar el certificado de participación.



**Figura 38.** Certificado de participación simposio.

Se participó en el evento “LA RED COLOMBIANA DE SEMILLETOS DE INVESTIGACIÓN REDCOLSI – NODO NORTE DE SANTANDER” como ponente, el cual se realizó en Pamplona – Norte de Santander. En la Figura 39 se puede observar el certificado de participación.



**Figura 39.** Certificado de participación REDCOLSI.

Se participó en el evento “7th INTERNATIONAL WEEK OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION” como ponente en modalidad PÓSTER, el cual se realizó virtual por medio de la plataforma Google Meet. El proyecto se presentó con el nombre “Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales para la generación de mapas de intensidad”, se enfocó en la construcción del sistema de medición y la visualización de los datos en la interfaz gráfica. En la Figura 40 y 41 se pueden observar los certificados de participación.



**Figura 40.** Certificado de participación Julieth.



**Figura 41.** Certificado de participación Johan.

Por otro lado, se participó en el evento "III ENCUENTRO INTERINSTITUCIONAL DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN" que se desarrolló en el marco de la "VI SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN" como ponencia en modalidad PÓSTER, el cual se realizó en la Universidad Francisco de Paula Santander. El

proyecto se presentó con el nombre “Sistema integrado de desplazamiento entre zanjas basado en sistemas embebidos”, el cual se enfocó en el primer modelo del proyecto. En la Figura 42 se puede observar el certificado de participación.



**Figura 42.** Certificado de participación Julieth.

### 10.5.3. Socialización de los resultados del proyecto con la comunidad académica de la Universidad Francisco de Paula Santander

Se realizó una video conferencia por la plataforma Google Meet con estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica donde se socializaron los resultados obtenidos en el proyecto. En los siguientes enlaces se puede observar la grabación de la conferencia y el listado de los estudiantes que participaron en la video conferencia.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1St03Fq3IU\\_YZtC5623jINxjZoLNGrPetpvSk2vBRapg/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1St03Fq3IU_YZtC5623jINxjZoLNGrPetpvSk2vBRapg/edit?usp=sharing)

<https://drive.google.com/file/d/1Gcfm4bm2UJdKRqMFOPWL-bKST9DALx5A/view?usp=sharing>.

## CONCLUSIONES

El proyecto presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales para la generación de mapas de intensidad, para ello el UGV se desplaza a través de las zanjas de un cultivo con el objetivo que el sistema de medición recolecte y envíe 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 empleando los datos de geolocalización. 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 y realizar un análisis posterior de los datos para la toma de decisiones.

De acuerdo con la información de la Tabla 27, adaptar a un UGV el sistema de medición diseñado y construido resulta 82% más económico en comparación a utilizarlo mediante 10 nodos distribuidos por el cultivo, debido a que el vehículo permite que el sistema realice un recorrido a través de las zanjas para tomar las mediciones, logrando un mayor rango de cobertura.

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 similar y observar las condiciones ambientales en las que se encuentra, haciendo de éste un prototipo de gran utilidad para el sector agrícola.



De acuerdo con la información de la Tabla 30 la tecnología LoRa implementada presenta resultados satisfactorios, debido a que se obtuvo un error inferior al 5%. Por lo tanto, se garantiza un funcionamiento óptimo en la transmisión de información a través del SEMANT en el campo de la agricultura, especialmente en los cultivos de tomate, esto se debe principalmente a que el entorno ambiental carece de elementos que perturben la comunicación de nodos con la que cuenta esta tecnología y las distancias presentes no superan el rango recomendado.

Entre los aspectos considerados para futuras mejoras se encuentra construir la interfaz gráfica con resolución adaptable al equipo, debido a que el prototipo desarrollado cuenta con una resolución fija de 927x662 pixeles, dificultando su manejo en pantallas que tengan un tamaño inferior.

Por otra parte, se propone añadir una cámara al SEMANT encargada de tomar imágenes de la tierra de cultivo, con el objetivo de clasificar el terreno teniendo en cuenta la cantidad de materia orgánica que contiene implementando inteligencia artificial, permitiendo que el agricultor tenga más información acerca del estado de la siembra.

Así mismo, otra propuesta es la implementación de cámaras junto con algoritmos de procesamiento de imágenes para optimizar el desplazamiento del UGV a través de la zanja, cabe resaltar que para ello se requiere de mayor procesamiento de datos, por lo tanto, se necesita de un microprocesador de mejores características que permita cumplir con las funciones requeridas por el sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Silva, D. Baker, A. Shepherd, C. Jenane, and S. Miranda da Cruz, *Agroindustrias para el desarrollo*, vol. 24, no. 2. 1998.
- [2] República de Colombia - Departamento Nacional de Planeación, *Plan nacional de desarrollo 2018-2022: pacto por la equidad*. 2018, p. 861.
- [3] CORPOICA, “Misión para la transformación del campo diagnóstico,” pp. 1–71, 2015.
- [4] D. F. Villanueva-Mejía, “Estudios sobre la Bioeconomía como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia,” *Estud. sobre la Bioeconomía como fuente nuevas Ind. basadas en el Cap. Nat. Colomb.*, pp. 1–49, 2018.
- [5] DNP, “Estudio de la dirección de seguimiento y evaluación de políticas públicas,” *Ria*, vol. 48, p. 116, 2016, [Online]. Available: [https://mrv.dnp.gov.co/Documentos de Interes/Perdida\\_y\\_Desperdicio\\_de\\_Alimentos\\_en\\_colombia.pdf](https://mrv.dnp.gov.co/Documentos de Interes/Perdida_y_Desperdicio_de_Alimentos_en_colombia.pdf).
- [6] C. M. Burbano Labrador, “Sistema de monitoreo de gases de efecto invernadero de económica implementación,” vol. 147, pp. 11–40, 2016.
- [7] J. Gómez, S. Castaño, T. Mercado, J. García, and A. Fernández, “Sistema de internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de cultivos protegidos internet,” 2017, doi: <https://doi.org/10.21897/23460466.1101>.
- [8] D. Lambertucci and A. Rueda Coll, “Comparación de modelos geo-espaciales para datos de rendimiento en lotes de cultivos,” pp. 1–37, 2017.
- [9] C. L. González, J. C. S. Peña, R. B. Abreu, F. O. F. Peña, F. M. Pérez, and J. Lorenzo, “System for the automatic generation of yield mapping with application in precision farming | Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precision,” *Idesia*, vol. 29, no. 1, pp. 59–70, 2011.



- [10] C. Ju and H. Il Son, "Evaluation of haptic feedback in the performance of a teleoperated unmanned ground vehicle in an obstacle avoidance scenario," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–180, 2019, doi: 10.1007/s12555-017-0721-y.
- [11] J. E. García López, J. Chavez Chavez, and A. K. Jurado Sánchez, "Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión," *2017 IEEE Mex. Humanit. Technol. Conf. MHTC 2017*, pp. 109–116, 2017, doi: 10.1109/MHTC.2017.7926186.
- [12] Á. H. Alarcón López, G. Arias Vargas, C. J. Díaz Ortiz, and J. D. Sotto Vergara, "Sistema de control automático de variables climáticas para optimizar el rendimiento de cultivos bajo cubierta," *Ing. Solidar.*, vol. 14, no. 24, pp. 1–11, 2018, doi: 10.16925/in.v14i24.2158.
- [13] CONANP, "Manual para la producción orgánica en áreas naturales," p. 20, 2009.
- [14] S. Best and I. Zamora, Eds., *Tecnologías aplicables en agricultura de precisión*. 2008.
- [15] R. Bostelman and E. Messina, "A-UGV capabilities recommended guide to autonomy levels," 2019.
- [16] P.-N. Nguyen-Huu and J. Titus, "Reliability and failure in unmanned ground vehicle (UGV)," *GRRC Tech. Rep.*, p. 5, 2009, [Online]. Available: [http://arc.engin.umich.edu/grrc/techreports/200901\\_ReliabilityUGV.pdf](http://arc.engin.umich.edu/grrc/techreports/200901_ReliabilityUGV.pdf).
- [17] EcuRed, "Humedad ambiental." [https://www.ecured.cu/Humedad\\_ambiental](https://www.ecured.cu/Humedad_ambiental) (accessed Dec. 01, 2019).
- [18] ElectroCrea, "Sensor de humedad de suelo." <https://electrocrea.com/products/sensor-de-humedad-de-suelo> (accessed Dec. 01, 2019).
- [19] M. J. Rosales-González, "Análisis básico sobre la posible variación de la precipitación y de

- la temperatura bajo la influencia del cambio climático en la ciudad de Quito,” Universidad Central Del Ecuador Facultad De Ciencias Administrativas, 2013.
- [20] M. Gómez-Ramírez, “Comparación de la temperatura mínima diaria registrada en la ciudad de Tlaxcala, durante el mes de diciembre del 2010 al 2015,” 2016, Accessed: Dec. 01, 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Gomez\\_Ramirez2/publication/331100900\\_Compendio\\_de\\_Investigacion/links/5c65cd2f299bf1d14cc75b5d/Compendio-de-Investigacion.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gomez_Ramirez2/publication/331100900_Compendio_de_Investigacion/links/5c65cd2f299bf1d14cc75b5d/Compendio-de-Investigacion.pdf).
- [21] “Modulo Sensor Humedad Dht11 Temperatura.” [https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-455256318-modulo-sensor-humedad-dht11-temperatura-0-50-grado-20-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-455256318-modulo-sensor-humedad-dht11-temperatura-0-50-grado-20-_JM?quantity=1) (accessed Dec. 01, 2019).
- [22] OXDEA, “Sensor de Temperatura Digital KY-028.” <https://www.oxdea.com.gt/shop/product/ky-028-sensor-de-temperatura-digital-ky-028-16431> (accessed Dec. 01, 2019).
- [23] I. García-Álvarez, O. García-Rodríguez, E. Borges-Chinea, A. Redondas-Marrero, J. J. Rodríguez-Franco, and R. D. García-Cabrera, “Análisis de la radiación solar ultravioleta en Tenerife como posible herramienta para el uso de tratamientos fotocatalíticos de oxidación avanzada en la depuración de aguas residuales,” Universidad de La Laguna, 2011.
- [24] W. Contreras, M. G. Galban, and S. B. Sepúlveda, “Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 23, p. 16, Mar. 2018, doi: 10.31908/19098367.3698.
- [25] “La radiación solar y su impacto en la agricultura - Software ERP Agrícola: Gestión integral de Ranchos Agrícolas.” <http://sistemaagricola.com.mx/blog/la-radiacion-solar/>

- (accessed Dec. 01, 2019).
- [26] L. LAPIS Semiconductor Co., *UV Sensor with Voltage Output*. 2013, p. 8.
- [27] “Sensor de radiación ultravioleta con Arduino y UVM30A.” <https://polaridad.es/sensor-radiacion-ultravioleta-arduino-indice-uv-uvm30a-guva-s12sd/> (accessed Dec. 01, 2019).
- [28] N. Mechatronics, “Módulo ML8511 Detector UV.” <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/169-modulo-ml8511-detector-uv.html> (accessed Dec. 01, 2019).
- [29] Solectro, “Módulo sensor UV negro UVM-30 para Arduino.” <https://solectroshop.com/product-spa-1783-Modulo-sensor-UV-negro-UVM-30-para-Arduino.html> (accessed Dec. 01, 2019).
- [30] MakerElectronico, “Sensor de luz con fotoresistencia LDR.” <https://www.makerelectronico.com/producto/sensor-luz-fotoresistencia-ldr/> (accessed Dec. 01, 2019).
- [31] D. Alonso and I. De Historia, “La historia geográficamente integrada y los sistemas de información,” vol. 26, pp. 215–225, 2013.
- [32] KUBII, “Módulo GPS para Raspberry PI.” <https://www.kubii.es/tarjetas-de-extension/1922-modulo-gps-para-raspberry-pi-kubii-3272496007888.html> (accessed Dec. 01, 2019).
- [33] “Módulo GPS GY-NEO6MV2 para Arduino.” <https://www.e-ika.com/modulo-gps-gy-gps6mv2-para-arduino-2> (accessed Dec. 01, 2019).
- [34] D. C. Arias-Villamil and F. D. Barreto-Sánchez, “Sistema de conexión inalámbrico entre un brazalete myo y una prótesis de miembro superior por medio de bluetooth de baja energía,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.

- [35] D. Gutierrez, "Métodos de Desarrollo de Software," Jul. 2011.
- [36] W. V. Laguado, "Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019 " Un Norte Productivo Para Todos " Documento presentado para estudio y aprobación ante la Honorable Asamblea," p. 177, 2019.
- [37] Ministerio de agricultura, *Decreto 1449 de 1997*. 1977.
- [38] B. I. Ramos López, "Estimación del consumo de agua en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su interacción con el microclima del invernadero," Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR Oaxaca), 2012. Accessed: Jan. 04, 2021. [Online]. Available:  
[http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER\\_CIIDIROAX/203](http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/203).
- [39] E. C. ; Martin and C. Munoz, "Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? Item Type text; Book," College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ), 2017. Accessed: Jan. 04, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10150/625275>.
- [40] "Managing Light and CO<sub>2</sub> for Tomatoes in Protected Culture."  
<https://www.deruiterseeds.com/en-ca/resources/cultivation-insights/managing-light-and-co2-for-tomatoes-in-protected-culture.html> (accessed May 13, 2020).
- [41] H. Yamazaki *et al.*, "Live-imaging evaluation of the efficacy of elevated CO<sub>2</sub> concentration in a closed cultivation system for the improvement of bioproduction in tomato fruits," *Plant Biotechnol.*, vol. 32, no. 1, pp. 31–37, Mar. 2015, doi: 10.5511/plantbiotechnology.14.1210a.
- [42] A. Gomez-Zavaglia, J. C. Mejuto, and J. Simal-Gandara, "Mitigation of emerging

- implications of climate change on food production systems,” *Food Research International*, vol. 134. Elsevier Ltd, Aug. 01, 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109256.
- [43] Y. Ji, T. Li, M. Zhang, and S. Sha, “Design of CO<sub>2</sub> fertilizer optimizing control system on WSN,” *Nongye Jixie Xuebao/Transactions Chinese Soc. Agric. Mach.*, vol. 46, pp. 201–207, Dec. 2015, doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033.
- [44] A. Torres, “Manual de cultivo del tomate al aire libre,” Santiago, 2017.
- [45] S. Q. Yang, Z. Q. Yang, L. Wang, J. Li, M. Y. Zhang, and K. W. Li, “Effect of high humidity and high temperature interaction on photosynthetic characteristics of greenhouse tomato crops,” *Chinese J. Ecol.*, vol. 37, no. 1, pp. 57–63, 2018, doi: 10.13292/j.1000-4890.201801.007.
- [46] H. A. Ibrahim, M. A. A. Abdullah, N. M. K. Hassan, and H. S. El-Batran, “Effect of different level of solar ultra violet radiation on the vegetative growth, yield and quality of cherry tomatoes,” *Biosci. Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 2408–2415, 2018.
- [47] G. Fischer and C. P. Pérez-Rodríguez, “Efecto de la radiación solar en la calidad de los productos hortícolas,” in *Congreso Internacional de Hortalizas en el Trópico: la oleicultura Colombiana, nuevos retos para enfrentar los tratados de libre comercio*, Nov. 2012, pp. 1–15, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/256575856\\_Efecto\\_de\\_la\\_radiacion\\_solar\\_en\\_la\\_calidad\\_de\\_los\\_productos\\_horticolos](https://www.researchgate.net/publication/256575856_Efecto_de_la_radiacion_solar_en_la_calidad_de_los_productos_horticolos).
- [48] J. Zheng and W. Yang, “Design of a precision agriculture leakage seeding system based on wireless sensors,” *Int. J. Online Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 184–197, 2018, doi: 10.3991/ijoe.v14i05.8653.
- [49] A. D. Aggelopoulou, D. Bochtis, A. Koutsostathis, S. Fountas, T. A. Gemtos, and G. D.

- Nanos, “Flower spatial variability in an apple orchard,” in *Precision Agriculture 2009 - Papers Presented at the 7th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2009*, 2009, pp. 287–292.
- [50] R. K. Singh, M. Aernouts, M. De Meyer, M. Weyn, and R. Berkvens, “Leveraging LoRaWAN technology for precision agriculture in greenhouses,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 7. MDPI AG, Apr. 01, 2020, doi: 10.3390/s20071827.
- [51] A. Grunwald, M. Schaarschmidt, and C. Westerkamp, “LoRaWAN in a rural context: Use cases and opportunities for agricultural businesses,” in *24. ITG-Symposium on Mobile Communication - Technologies and Applications*, 2020, pp. 134–139.
- [52] O. Cárdenas, *Capítulo 6 Selección de instrumentos*. Mérida: ULA Rectorado, Talleres Gráficos Universitarios, 2010.
- [53] Radi, Murtiningrum, Ngadisih, F. S. Muzdrikah, M. S. Nuha, and F. A. Rizqi, “Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193),” Nov. 2018, doi: 10.1109/ICSTC.2018.8528624.
- [54] “Sensor de radiación ultravioleta con Arduino y UVM30A.” <https://polaridad.es/sensor-radiacion-ultravioleta-arduino-indice-uv-uvm30a-guva-s12sd/> (accessed Jun. 03, 2020).
- [55] “Appconwireless, Professional IoT solution, LoRa radio solution, LoRaWAN solution, Radio data module.” <https://www.appconwireless.com/> (accessed Jun. 03, 2020).
- [56] J. Ni, J. Hu, and C. Xiang, “A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, 2020, doi: 10.1177/0954407020912097.
- [57] A. Stager, H. G. Tanner, and E. E. Sparks, “Design and Construction of Unmanned Ground Vehicles for Sub-Canopy Plant Phenotyping,” Mar. 2019, Accessed: Jun. 16,

2020. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1903.10608>.
- [58] P. Desai, H. E. Sevil, A. Dogan, and B. Huff, "Construction of an obstacle map and its realtime implementation on an Unmanned Ground Vehicle," in *2011 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, TePRA 2011*, 2011, pp. 139–144, doi: 10.1109/TEPRA.2011.5753496.
- [59] S. Zhu, G. Xiong, and H. CHen, "Unmanned ground vehicle control system design based on hybrid architecture," in *Proceedings of 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, ITAIC 2019*, May 2019, pp. 948–951, doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785436.
- [60] M. Ashraf and A. Khamis, "Design of robot wheels for rough terrain: A multi-criteria optimization approach," Mar. 2017, doi: 10.1109/RST.2016.7869861.
- [61] S. N. Young, E. Kayacan, and J. M. Peschel, "Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum," *Precis. Agric.*, vol. 20, no. 4, pp. 697–722, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11119-018-9601-6.
- [62] S. Harapanahalli, N. O. Mahony, G. V. Hernandez, S. Campbell, D. Riordan, and J. Walsh, "Autonomous navigation of mobile robots in factory environment," in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38, pp. 1524–1531, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.134.
- [63] K. Tanaka *et al.*, "Hardware and control design considerations for a monitoring system of autonomous mobile robots in extreme environment," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Aug. 2017, pp. 1412–1417, doi: 10.1109/AIM.2017.8014216.
- [64] K. Asadi *et al.*, "An integrated UGV-UAV system for construction site data collection," *Autom. Constr.*, vol. 112, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2019.103068.

- [65] A. Medina-Santiago, J. L. Camas-Anzueto, J. A. Vazquez-Feijoo, H. R. Hernández-De León, and R. Mota-Grajales, “Neural control system in obstacle avoidance in mobile robots using ultrasonic sensors,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 104–110, Feb. 2014, doi: 10.1016/S1665-6423(14)71610-4.
- [66] F. Furlán Colón, E. Rubio Espino, J. H. Sossa Azuela, and V. H. Ponce Ponce, “Navegación jerárquica de un robot humanoide usando redes de Petri y lógica difusa,” *Res. Comput. Sci.*, vol. 135, no. 1, pp. 207–220, Dec. 2017, doi: 10.13053/rcs-135-1-14.
- [67] H. Natori, K. Tokuyama, and M. Mukai, “Obstacle avoidance path generation method for mobile robot using varying search range,” *Artif. Life Robot.*, vol. 24, no. 3, pp. 285–290, Sep. 2019, doi: 10.1007/s10015-019-00532-2.
- [68] A. Yorozu and M. Takahashi, “Obstacle avoidance with translational and efficient rotational motion control considering movable gaps and footprint for autonomous mobile robot,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 14, no. 5, pp. 1352–1364, Oct. 2016, doi: 10.1007/s12555-014-0452-2.
- [69] M. E. Raffino, “Base de Datos - Concepto, tipos y ejemplos,” Jun. 24, 2020. <https://concepto.de/base-de-datos/> (accessed Feb. 04, 2021).
- [70] M. Rios, “¿Base de datos en la nube. Por qué es importante? - Plataforma Administrativa Web,” Mar. 03, 2020. <https://calipso.co/base-de-datos-en-la-nube/> (accessed Feb. 04, 2021).
- [71] “Base de datos : ¿qué tipos hay y cómo funciona conectada a un software?,” Jul. 09, 2019. <https://www.ticportal.es/glosario-tic/base-datos-database> (accessed Feb. 04, 2021).



## ANEXOS

## Anexo 1. Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de radiación UV

Tabla 32. Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo sensores de radiación UV.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	I1 <sup>a</sup>	I2 <sup>b</sup>	I3 <sup>c</sup>	I4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
I1	0	1	1	1	3	0.5
I2	0	0	0	0	0	0
I3	0	1	0	1	2	0.333
I4	0	1	0	0	1	0.167
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	I1	I2	I3	I4	Valor	Peso
I1	0	1	0	0	1	0.167
I2	0	0	0	0	0	0
I3	1	1	0	1	3	0.5
I4	1	1	0	0	2	0.333
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	I1	I2	I3	I4	Valor	Peso
I1	0	1	1	0	2	0.333
I2	0	0	1	0	1	0.167
I3	0	0	0	0	0	0
I4	1	1	1	0	3	0.5
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	I1	I2	I3	I4	Valor	Peso
I1	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	0
I4	1	1	1	0	3	1
<b>Suma</b>					3	1

Nota. <sup>a</sup>GROVE UV, <sup>b</sup>SI1145, <sup>c</sup>UVM-30A UV, <sup>d</sup>GYML8511.

**Anexo 2.** Matrices de coeficientes de énfasis sensores de humedad y temperatura del aire.

**Tabla 33.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de humedad y temperatura del aire.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.							
	<b>T1<sup>a</sup></b>	<b>T2<sup>b</sup></b>	<b>T3<sup>c</sup></b>	<b>T4<sup>d</sup></b>	<b>T5<sup>e</sup></b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>T1</b>	0	0	0	1	0	1	0.111
<b>T2</b>	1	0	0	1	0	2	0.222
<b>T3</b>	1	0	0	1	0	2	0.222
<b>T4</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T5</b>	1	1	1	1	0	4	0.444
<b>Suma</b>						9	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.							
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>T1</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T2</b>	1	0	1	1	0	3	0.333
<b>T3</b>	1	0	0	1	0	2	0.222
<b>T4</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T5</b>	1	1	1	1	0	4	0.444
<b>Suma</b>						9	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.							
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>T1</b>	0	0	1	0	1	2	0.2
<b>T2</b>	1	0	1	0	1	3	0.3
<b>T3</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T4</b>	1	1	1	0	1	4	0.4
<b>T5</b>	0	0	1	0	0	1	0.1
<b>Suma</b>						10	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.							
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>T1</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T2</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T3</b>	1	1	0	0	0	2	0.222
<b>T4</b>	1	1	1	0	0	3	0.333
<b>T5</b>	1	1	1	1	0	4	0.444
<b>Suma</b>						9	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A5.							
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>T1</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>T2</b>	1	0	1	0	0	2	0.222
<b>T3</b>	1	0	0	0	0	1	0.111
<b>T4</b>	1	1	1	0	1	4	0.444
<b>T5</b>	1	0	1	0	0	2	0.222
<b>Suma</b>						9	1

**Nota.** <sup>a</sup>AMT1001, <sup>b</sup>AM2301, <sup>c</sup>SHT10, <sup>d</sup>DHT11, <sup>e</sup>DHT22.

**Anexo 3.** Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de CO2.

**Tabla 34.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de CO2.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	<b>C1<sup>a</sup></b>	<b>C2<sup>b</sup></b>	<b>C3<sup>c</sup></b>	<b>C4<sup>d</sup></b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>C1</b>	0	1	0	0	1	0.2
<b>C2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>C3</b>	1	1	0	1	3	0.6
<b>C4</b>	0	1	0	0	1	0.2
<b>Suma</b>					5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>C1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>C2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>C3</b>	0	1	0	1	2	0.333
<b>C4</b>	0	1	0	0	1	0.167
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>C1</b>	0	0	1	1	2	0.286
<b>C2</b>	0	0	1	1	2	0.286
<b>C3</b>	1	0	0	1	2	0.286
<b>C4</b>	1	0	0	0	1	0.143
<b>Suma</b>					7	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>C1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>C2</b>	0	0	1	1	2	0.333
<b>C3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>C4</b>	0	0	1	0	1	0.167
<b>Suma</b>					6	1

**Nota.** <sup>a</sup>MQ135, <sup>b</sup>MG811, <sup>c</sup>MH-Z19B, <sup>d</sup>MH-Z14A.

**Anexo 4.** Matrices de coeficientes de énfasis para los sensores de humedad del suelo.

**Tabla 35.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los sensores de humedad del suelo.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	H1 <sup>a</sup>	H2 <sup>b</sup>	H3 <sup>c</sup>	H4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
H1	0	0	0	0	0	0
H2	1	0	0	1	2	0.4
H3	1	1	0	1	3	0.6
H4	0	0	0	0	0	0
<b>Suma</b>					5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	H1	H2	H3	H4	Valor	Peso
H1	0	1	1	1	3	0.5
H2	0	0	0	0	0	0
H3	0	1	0	0	1	0.167
H4	0	1	1	0	2	0.333
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	H1	H2	H3	H4	Valor	Peso
H1	0	1	0	0	1	0.2
H2	0	0	0	0	0	0
H3	1	1	0	1	3	0.6
H4	0	1	0	0	1	0.2
<b>Suma</b>					5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	H1	H2	H3	H4	Valor	Peso
H1	0	1	0	0	1	0.2
H2	0	0	0	0	0	0
H3	1	1	0	1	3	0.6
H4	0	1	0	0	1	0.2
<b>Suma</b>					5	1

**Nota.** <sup>a</sup>Sonda YL19, <sup>b</sup>Resistente a corrosión, <sup>c</sup>SKU: SEN0193, <sup>d</sup>SKU: SEN0114.

**Anexo 5.** Matrices de coeficientes de énfasis para los módulos GPS.

**Tabla 36.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los módulos GPS.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	<b>L1<sup>a</sup></b>	<b>L2<sup>b</sup></b>	<b>L3<sup>c</sup></b>	<b>L4<sup>d</sup></b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>L1</b>	0	1	1	0	2	0.4
<b>L2</b>	0	0	0	1	1	0.2
<b>L3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>L4</b>	1	0	1	0	2	0.4
	<b>Suma</b>				5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>L1</b>	0	1	1	1	3	0.6
<b>L2</b>	0	0	0	1	1	0.2
<b>L3</b>	0	0	0	1	1	0.2
<b>L4</b>	0	0	0	0	0	0
	<b>Suma</b>				5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>L1</b>	0	0	1	0	1	0.167
<b>L2</b>	1	0	1	0	2	0.333
<b>L3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>L4</b>	1	1	1	0	3	0.5
	<b>Suma</b>				6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>L1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>L2</b>	1	0	0	0	1	0.2
<b>L3</b>	1	1	0	0	2	0.4
<b>L4</b>	1	0	1	0	2	0.4
	<b>Suma</b>				5	1

**Nota.** <sup>a</sup>NEO-6M V2, <sup>b</sup>SIM808, <sup>c</sup>A7, <sup>d</sup>SIM868

**Anexo 6.** Matrices de coeficientes de énfasis para los módulos LoRa.

**Tabla 37.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los módulos LoRa.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	<b>W1<sup>a</sup></b>	<b>W2<sup>b</sup></b>	<b>W3<sup>c</sup></b>	<b>W4<sup>d</sup></b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>W1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>W2</b>	1	0	0	0	1	0.167
<b>W3</b>	1	1	0	1	3	0.5
<b>W4</b>	1	1	0	0	2	0.333
				<b>Suma</b>	6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>	<b>W4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>W1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>W2</b>	1	0	0	0	1	0.167
<b>W3</b>	1	1	0	0	2	0.333
<b>W4</b>	1	1	1	0	3	0.5
				<b>Suma</b>	6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>	<b>W4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>W1</b>	0	1	1	1	3	0.6
<b>W2</b>	0	0	0	1	1	0.2
<b>W3</b>	0	0	0	1	1	0.2
<b>W4</b>	0	0	0	0	0	0.0
				<b>Suma</b>	5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>	<b>W4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>W1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>W2</b>	1	0	0	0	1	0.167
<b>W3</b>	1	1	0	0	2	0.333
<b>W4</b>	1	1	1	0	3	0.5
				<b>Suma</b>	6	1

**Nota.** <sup>a</sup>6100AES, <sup>b</sup>611AES, <sup>c</sup>RF1276, <sup>d</sup>E22-400T22S.

**Anexo 7.** Matrices de coeficientes de énfasis para los microcontroladores.

**Tabla 38.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los microcontroladores.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	M1 <sup>a</sup>	M2 <sup>b</sup>	M3 <sup>c</sup>	M4 <sup>d</sup>	Valor	Peso
M1	0	1	1	1	3	0.5
M2	0	0	0	0	0	0
M3	0	1	0	1	2	0.333
M4	0	1	0	0	1	0.167
	<b>Suma</b>				6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	M1	M2	M3	M4	Valor	Peso
M1	0	0	0	0	0	0.0
M2	1	0	1	0	2	0.5
M3	0	0	0	0	0	0.0
M4	1	0	1	0	2	0.5
	<b>Suma</b>				4	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	M1	M2	M3	M4	Valor	Peso
M1	0	1	1	1	3	0.5
M2	0	0	0	1	1	0.167
M3	0	1	0	1	2	0.333
M4	0	0	0	0	0	0
	<b>Suma</b>				6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	M1	M2	M3	M4	Valor	Peso
M1	0	1	0	1	2	0.333
M2	0	0	0	1	1	0.167
M3	1	1	0	1	3	0.5
M4	0	0	0	0	0	0
	<b>Suma</b>				6	1

**Nota.** <sup>a</sup>Arduino Nano, <sup>b</sup>ESP32, <sup>c</sup>PIC 16F877, <sup>d</sup>EK-TM4C1294XL.

Anexo 8. Proceso 1: Algoritmo en el Arduino Nano.

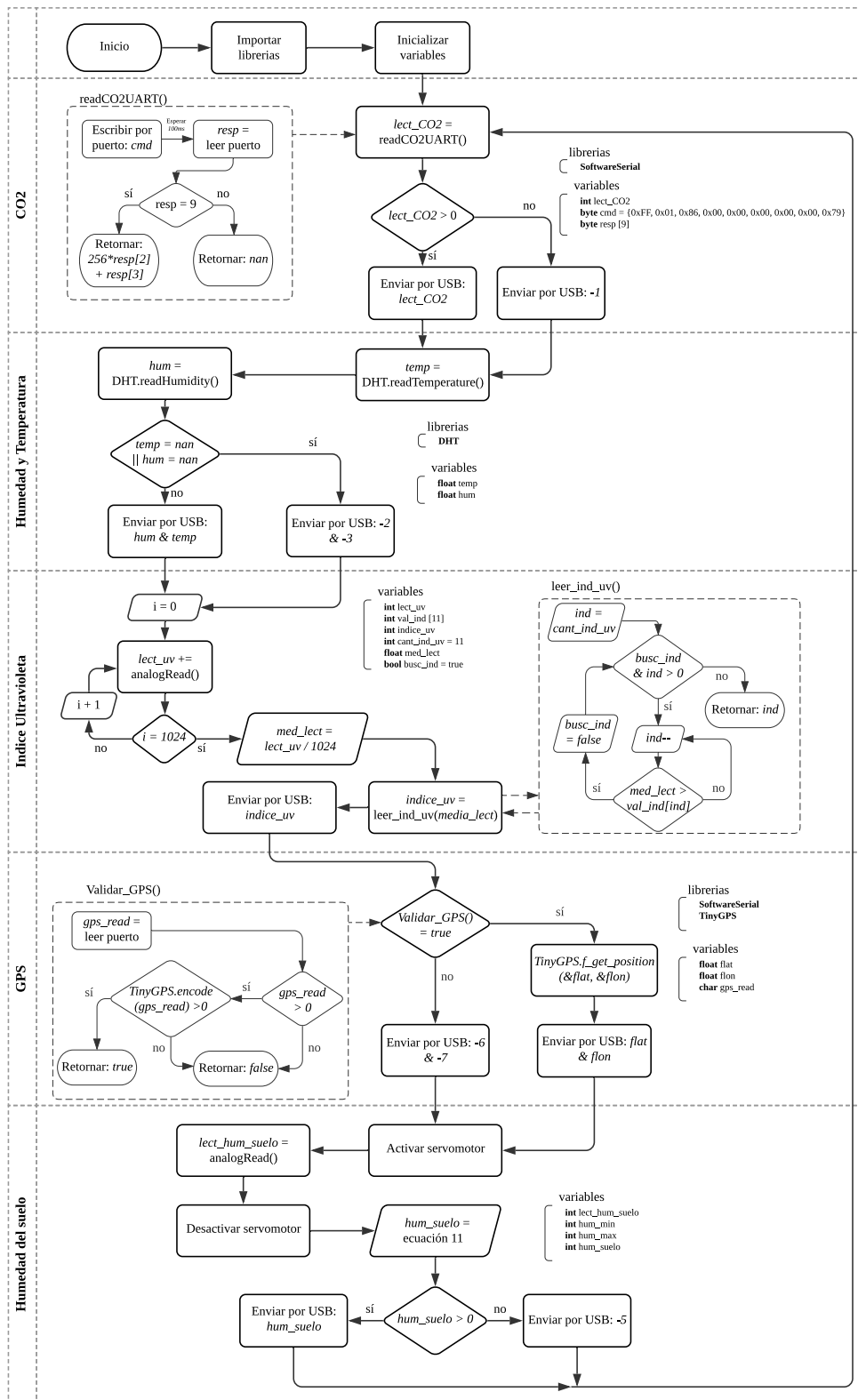
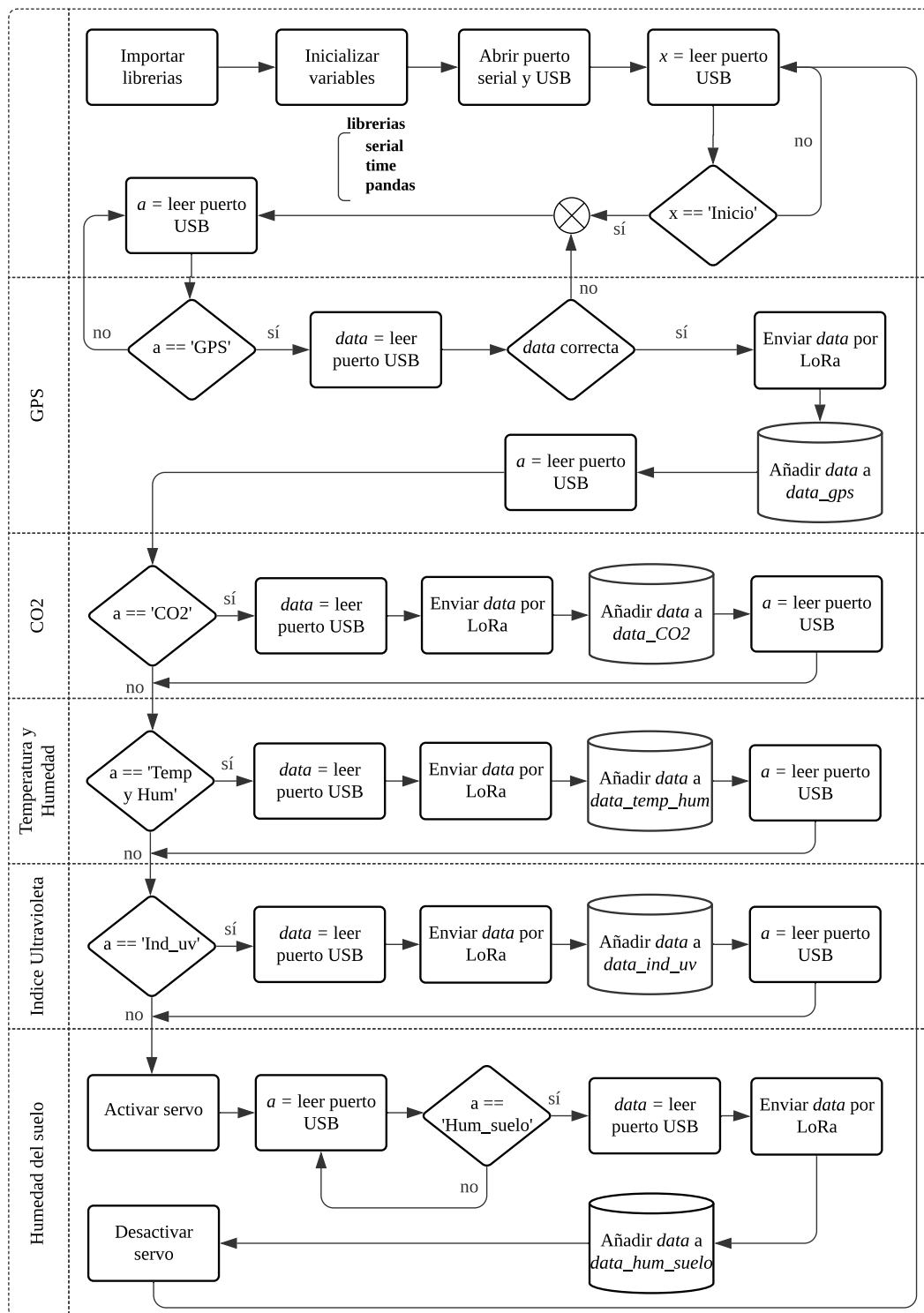


Figura 43. Proceso 1: Algoritmo en el Arduino Nano.



### Anexo 9. Proceso 2: Algoritmo en la Raspberry Pi.



**Figura 44.** Proceso 2: Algoritmo en la Raspberry Pi.

**Anexo 10.** Matrices de coeficientes de énfasis para los chasis de robot móvil.

**Tabla 39.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo de los chasis de robot móvil.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.							
	R1 <sup>a</sup>	R2 <sup>b</sup>	R3 <sup>c</sup>	R4 <sup>d</sup>	R5 <sup>e</sup>	Valor	Peso
R1	0	0	1	1	1	3	0.5
R2	0	0	1	1	1	3	0.5
R3	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suma</b>						6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.							
	R1	R2	R3	R4	R5	Valor	Peso
R1	0	1	1	1	1	4	0.4
R2	0	0	1	1	1	3	0.3
R3	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	1	0	0	1	0.1
R5	0	0	1	1	0	2	0.2
<b>Suma</b>						10	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.							
	R1	R2	R3	R4	R5	Valor	Peso
R1	0	1	1	1	1	4	0.5
R2	0	0	1	0	1	2	0.25
R3	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	1	0	1	2	0.25
R5	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suma</b>						8	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.							
	R1	R2	R3	R4	R5	Valor	Peso
R1	0	1	0	0	1	2	0.25
R2	0	0	0	0	0	0	0
R3	1	1	0	1	1	4	0.5
R4	0	1	0	0	1	2	0.25
R5	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suma</b>						8	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A5.							
	R1	R2	R3	R4	R5	Valor	Peso
R1	0	0	1	1	0	2	0.333
R2	0	0	1	1	0	2	0.333
R3	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0
R5	0	0	1	1	0	2	0.333
<b>Suma</b>						6	1

**Nota.** <sup>a</sup>KIT Y100, <sup>b</sup>T300, <sup>c</sup>Gazechimp, <sup>d</sup>Carro inteligente 6wd, <sup>e</sup>Robot móvil 80mm.

**Anexo 11.** Matrices de coeficientes de énfasis para el módulo puente H.

**Tabla 40.** Matrices de coeficientes de énfasis para cada atributo del módulo puente H.

Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A1.						
	<b>P1<sup>a</sup></b>	<b>P2<sup>b</sup></b>	<b>P3<sup>c</sup></b>	<b>P4<sup>d</sup></b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>P1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>P2</b>	1	0	0	0	1	0.2
<b>P3</b>	1	1	0	1	3	0.6
<b>P4</b>	1	0	0	0	1	0.2
<b>Suma</b>					5	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A2.						
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>P1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>P3</b>	0	1	0	0	1	0.167
<b>P4</b>	0	1	1	0	2	0.333
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A3.						
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>P1</b>	0	1	1	0	2	0.333
<b>P2</b>	0	0	1	0	1	0.167
<b>P3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>P4</b>	1	1	1	0	3	0.5
<b>Suma</b>					6	1
Matriz de coeficientes de énfasis para el Atributo A4.						
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
<b>P1</b>	0	1	1	1	3	0.5
<b>P2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>P3</b>	0	1	0	0	1	0.167
<b>P4</b>	0	1	1	0	2	0.333
<b>Suma</b>					6	1

**Nota.** <sup>a</sup>DUAL L9110S, <sup>b</sup>Controlador motor 2A, <sup>c</sup>L298N, <sup>d</sup>DUAL MX1919.

Anexo 12. Algoritmo del desplazamiento.

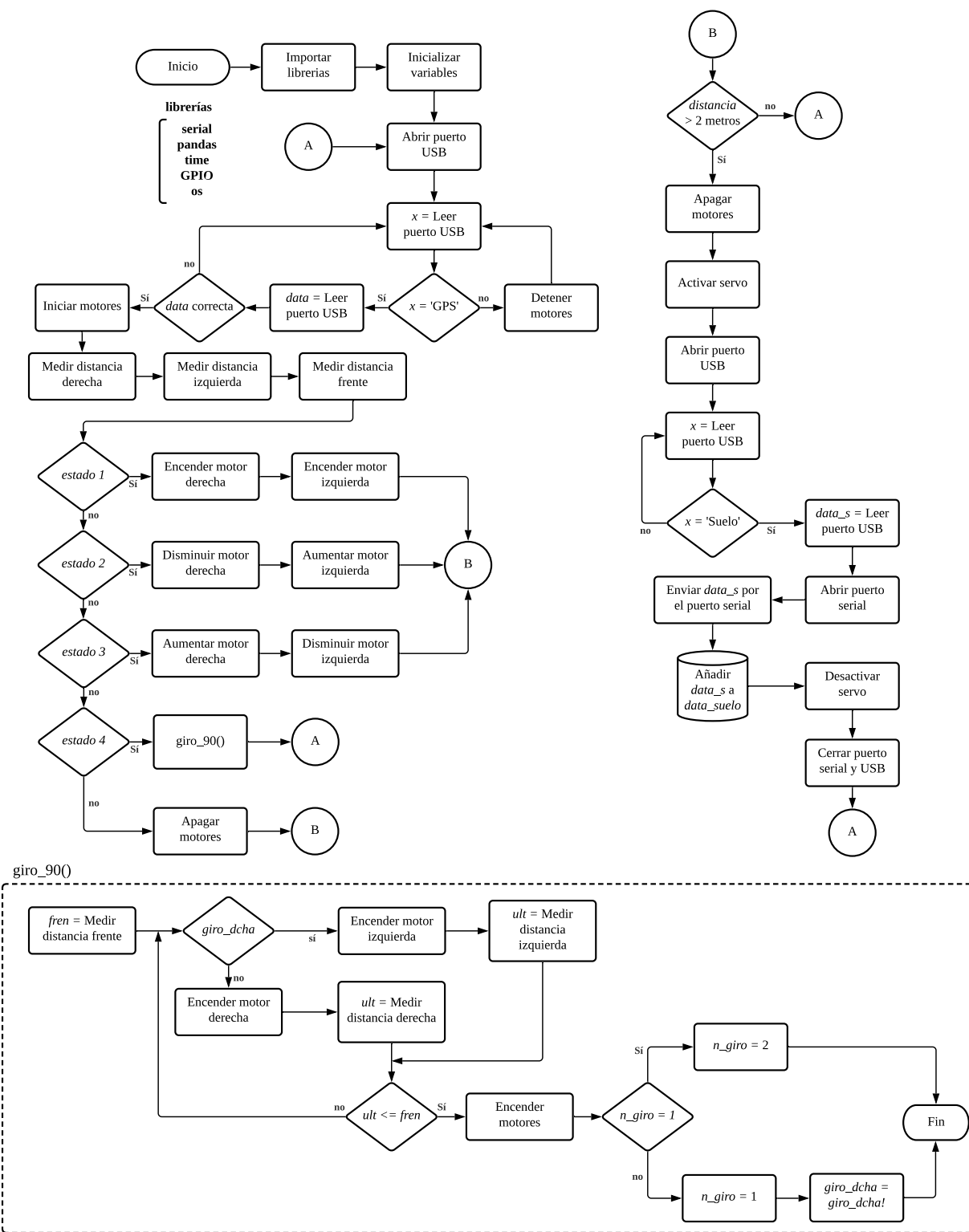


Figura 45. Algoritmo del desplazamiento.

### Anexo 13. Diseño de las ventanas de la interfaz para la visualización de datos.



**Figura 46.** Diseño de las ventanas para la visualización de datos.

### Anexo 14. Mapa de navegación de la Interfaz Gráfica.

