

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA
IMPLEMENTACIÓN EN COMUNIDAD WAYÚU DEL DEPARTAMENTO DE LA
GUAJIRA

CRISTIAN FABIAN BENITEZ MUÑOZ
MICHAEL ORLANDO MONTAÑEZ LEAL
NELSON DAVID HIGUERA URIBE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA
2021

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO PARA
IMPLEMENTACIÓN EN COMUNIDAD WAYÚU DEL DEPARTAMENTO DE LA
GUAJIRA

CRISTIAN FABIAN BENITEZ MUÑOZ
MICHAEL ORLANDO MONTAÑEZ LEAL
NELSON DAVID HIGUERA URIBE

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO

JOHANN BARRAGÁN GÓMEZ
DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA
2021

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, nos gustaría agradecer a Dios, por todas sus bendiciones en este proyecto. También queremos agradecer a nuestros padres y demás familiares que apoyaron de una u otra forma a la culminación de este capítulo de nuestras vidas. A su vez deseamos agradecer encarecidamente a nuestro director, el profesor Johann Barragán por su enseñanza y guía durante el desarrollo de este proyecto. A nuestros evaluadores Camilo Moncada y Sebastián Roa por su dedicación, aportes y valoración de nuestro proyecto de grado.

A nuestros queridos amigos queremos agradecerles por haber sido un gran soporte durante este proceso de crecimiento profesional. También queremos agradecer a la fundación Wayúuda, por su acompañamiento e interés en la finalización de este proyecto. A los profesores de la facultad por su dedicación y aporte en nuestra formación profesional.

Firmas de aprobación:

Johann Barragán Gómez
Director de proyecto de grado

Sebastián Roa Prada
Evaluador de proyecto de grado

Camilo Enrique Moncada Guayazán
Evaluador de proyecto de grado

Bucaramanga, Santander, Colombia 2021

TABLA DE CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	14
1.1	DESCRIPCIÓN BREVE DEL PROBLEMA	14
1.2	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	14
2.0	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GENERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.0	ESTADO DEL ARTE	18
4.0	MARCO TEÓRICO	21
4.1	HIDROPONÍA	21
4.2	TIPOS DE SISTEMAS HIDROPÓNICOS	22
4.2.1	FLUJO Y REFLUJO (EBB & FLOW)	22
4.2.2	PELÍCULA DE NUTRIENTES O NFT (NUTRIENT FILM TECHNIQUE)	23
4.2.3	SISTEMAS POR GOTEO (DRIP SYSTEMS)	23
4.3	LEGUMBRES	24
4.4	INFORMACIÓN NUTRICIONAL DEL FRIJOL CABECITA NEGRA	25
4.5	VARIABLES DE INTERÉS	25
4.5.1	POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)	25
4.5.2	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)	26
4.5.3	NIVEL DE AGUA DEL TANQUE DE DOSIFICADO	26
4.5.4	HUMEDAD DEL SUSTRATO	27
4.6	PLC SIEMENS LOGO V8	27
4.7	SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	27
4.8	VISIÓN ARTIFICIAL	28
4.9	SUBSISTEMAS PRINCIPALES DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PLANTEADO	28
4.9.1	SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN	28
4.9.2	TANQUE DE DOSIFICACIÓN DE NUTRIENTES	28
4.9.3	ZONA DE CULTIVO DE PLANTAS	29
4.9.4	SUBSISTEMA DE CONTROL	29
4.9.5	SUBSISTEMA ENERGÉTICO	29
5.0	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	30

5.1 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA	30
5.2 SELECCIÓN DE LA ESPECIE DE LEGUMINOSA.....	31
5.3 EXPERIMENTO 1 – GERMINACIÓN DE FRÍJOL CAUPÍ.....	32
5.4 ESTRATEGIA HIDROPÓNICA.....	33
5.5 PROPUESTA Y BOSQUEJO GENERAL DEL SISTEMA HIDROPÓNICO .	34
5.5.1 FUNCIONES DEL SISTEMA HIDROPÓNICO	34
5.5.2 BOSQUEJO GENERAL DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PLANTEADO	35
5.6 DIMENSIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO	35
5.7 SELECCIÓN DE COMPONENTES	36
5.7.1 SENSOR DE pH.....	36
5.7.2 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	37
5.7.3 SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO	38
5.7.4 BOMBA HIDRÁULICA.....	39
5.7.5 SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDO	47
5.7.6 MOTOR DEL MEZCLADOR.....	48
5.7.7 CONTROLADOR.....	57
5.8 DISEÑO DEL SISTEMA HIDROPÓNICO.....	58
5.8.1 DISEÑO CAD DEL SISTEMA.....	58
5.8.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA DE LA ZONA DE CULTIVO	62
5.8.3 PLANOS DEL SISTEMA HIDROPÓNICO	69
5.8.4 DIAGRAMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO DEL SISTEMA	70
5.8.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	70
5.9 EXPERIMENTO 2 - VISIÓN ARTIFICIAL	72
5.9.1 RESULTADOS EXPERIMENTO 2	74
5.9.2 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 2.....	80
5.10 IMPLEMENTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.....	81
5.10.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	86
5.11.2 RESULTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN EN SANTANDER	89
5.11.3 MANUAL DE USUARIO DEL PROTOTIPO	92
5.11 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO	93

6.0 CONCLUSIONES	97
7.0 BIBLIOGRAFÍA	99
8.0 ANEXOS	102
8.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA GUAJIRA	102
8.2 EXPERIMENTO 1 – GERMINACIÓN DE FRÍJOL CAUPÍ	114
8.2.1 INTRODUCCIÓN.....	114
8.2.2 LISTA DE MATERIALES.....	115
8.2.3 PROCEDIMIENTO	115
8.2.4 RESULTADOS EXPERIMENTO 1	118
8.2.5 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 1	123
8.3 DIMENSIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO	124
8.4 TABLAS CARACTERÍSTICAS DE SENSORES Y COMPONENTES	127
8.5 DIMENSIONES DE TANQUES PLÁSTICOS	130
8.6 DATOS ADICIONALES DE LA SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	131
8.7 PLANOS DEL SISTEMA HIDROPÓNICO	133
8.8 EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO EN SANTANDER.....	138
8.9 MANUAL DE USUARIO.....	141
8.10 CÓDIGO DE VISIÓN ARTIFICIAL.....	155
8.11 ALGORITMO DEL CÓDIGO DE VISIÓN ARTIFICIAL.....	166
8.12 CÓDIGO QUE GRAFICA LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE VISIÓN ARTIFICIAL	172
8.13 EXPERIMENTO 2 - VISIÓN ARTIFICIAL	183
8.13.1 INTRODUCCIÓN.....	183
8.13.2 LISTA DE MATERIALES.....	183
8.13.3 METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO	184
8.13.4 PROCEDIMIENTO	187
8.13.5 RESULTADOS EXPERIMENTO 2	193
8.13.6 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 2.....	198
8.14 CÓDIGO DEL LOGO USADO EN LA IMPLEMENTACIÓN EN SANTANDER	199
8.15 RECURSOS	200

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tasa de mortalidad por desnutrición en menores de cinco años por entidad territorial de residencia, Colombia,	16
Figura 2. Diagrama de bloques general de un sistema hidropónico automatizado	19
Figura 3. Dispositivos de entrada y salida del PLC de un sistema hidropónico.....	19
Figura 4. Arquitectura simplificada de la red IoT hidropónica desarrollada en la universidad de Madeira	20
Figura 5. Boceto general de un sistema hidropónico automatizado con NFT realizado en el Real Instituto de tecnología de Estocolmo	20
Figura 6. Esquemático general de un sistema hidropónico tradicional tipo Deep Water	21
Figura 7. Bosquejo de un sistema Ebb and flow	23
Figura 8. Esquemático general de un sistema hidropónico de riego por goteo	24
Figura 9. Diagrama resumen de la metodología	30
Figura 10. Boceto general del sistema hidropónico automatizado planteado con tubo PVC como recipiente en la zona de cultivo.....	35
Figura 11. Vista lateral del sistema de tuberías.....	40
Figura 12. Sección 1 de la tubería	41
Figura 13. Sección 2 de la tubería	42
Figura 14. Sección 3 de la tubería	42
Figura 15. Sección 4 de la tubería	43
Figura 16. Sección 5 de la tubería	43
Figura 17. Números de potencia de agitadores según el número de Reynolds	49
Figura 18. Configuración estándar de un sistema de mezclado.....	51
Figura 19. Interfaz de la aplicación de mezclado de Comsol	53
Figura 20. Vista en perspectiva del sistema hidropónico automatizado en La Guajira	59
Figura 21. Vista en perspectiva del sistema hidropónico automatizado en Santander	59
Figura 22. Subsistema correspondiente al tanque de dosificado y bomba centrífuga	60
Figura 23. PLC y transmisores de pH y conductividad eléctrica	61
Figura 24. Subsistema eléctrico.....	61
Figura 25. Sistema de desalinización basado en ósmosis inversa.....	62
Figura 26. Dimensiones del tubo de cultivo en vista frontal y superior	63
Figura 27. Malla del tubo de cultivo.....	64
Figura 28. Simulación de esfuerzos de Von Mises en el tubo de cultivo	64
Figura 29. Simulación de desplazamiento del tubo de cultivo	65
Figura 30. Malla en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander.....	67
Figura 31. Simulación de esfuerzos de Von Mises en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander	68

Figura 32. Simulación de desplazamiento en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander	69
Figura 33. Diagrama eléctrico del sistema	70
Figura 34. Variables experimento 2	73
Figura 35. Altura de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	75
Figura 36. Altura de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	75
Figura 37. Altura promedio de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	76
Figura 38. Altura promedio de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	76
Figura 39. Área de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo.....	77
Figura 40. Área de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo.....	77
Figura 41. Área promedio de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	78
Figura 42. Área promedio de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	78
Figura 43. Variables de entrada y de respuesta de la implementación en Santander	81
Figura 44. Procesos de la guía GEMMA usados en la estrategia de automatización	82
Figura 45. Descripción gráfica de las dimensiones de las ecuaciones de vaciado	83
Figura 46. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Up	85
Figura 47. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Down.....	86
Figura 48. HMI del sistema	88
Figura 49. Seguimiento en tiempo real de las variables análogas en la HMI	88
Figura 50. Crecimiento de las plantas en Santander para evaluación de altura.....	91
Figura 51. Comparación del crecimiento de las plantas del experimento 2 vs la implementación en Santander.....	92
Figura 52. Bloques de programa de la simulación del sistema en TIA Portal	95
Figura 53. Programación de la interfaz de la simulación en WinCC.....	95
Figura 54. Interfaz de la simulación del sistema hidropónico automatizado.....	96
Figura 55. Resultados de la simulación del sistema hidropónico en La Guajira representados en la interfaz.....	97
Figura 56. Clasificación cromática del clima [2]	102
Figura 57. Mapa del clima de La Guajira [2].....	103
Figura 58. Mapa de la temperatura de La Guajira [2].....	104
Figura 59. Mapa de las precipitaciones anuales de La Guajira [2].....	105
Figura 60. Gráfica de la temperatura y las precipitaciones en el municipio de Maicao [2].....	105
Figura 61. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (1) [3].....	107
Figura 62. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (2) [3].....	108
Figura 63. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (3) [3].....	109
Figura 64. Mapa del número de días con lluvia anuales en La Guajira [2].....	110
Figura 65. Mapa de la velocidad media anual de los vientos en La Guajira [2]....	111
Figura 66. Mapa de la humedad relativa media anual en La Guajira [2]	112

Figura 67. Promedio de la evaporación y las horas de brillo solar mensuales en Riohacha [4].....	112
Figura 68. Mapa de la evaporación anual en La Guajira [2].....	113
Figura 69. Mapa de las horas de brillo solar diarias en La Guajira [2].....	113
Figura 70. Bandeja de cultivo.....	115
Figura 71. Frijoles caupí cabecita negra	115
Figura 72. Esferas de hidrogel	116
Figura 73. Sección destinada al control lista para el proceso de siembra.....	116
Figura 74. Semillas sembradas en una de las secciones destinadas al control ...	117
Figura 75. Soluciones salinas con sus correspondientes porcentajes de salinidad	117
Figura 76. Bandeja de cultivo con las semillas ya sembradas en los tres diferentes tipos de sustrato.....	118
Figura 77. Bandeja A, regada con solución al 1.5% de salinidad, 72 horas después de la siembra	118
Figura 78. Bandeja B, regada con solución al 2.3% de salinidad, 72 horas después de la siembra	119
Figura 79. Bandeja C, regada con solución al 3.5% de salinidad, 72 horas después de la siembra	119
Figura 80. Bandeja A, regada con solución al 1.5% de salinidad, 120 horas después de la siembra	120
Figura 81. Bandeja B, regada con solución al 2.3% de salinidad, 120 horas después de la siembra	120
Figura 82. Bandeja C, regada con solución al 3.5% de salinidad, 120 horas después de la siembra	120
Figura 83. Muestra 1 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	121
Figura 84. Muestra 2 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	121
Figura 85. Muestra 3 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	122
Figura 86. Muestra 4 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	122
Figura 87. Muestra 5 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	122
Figura 88. Muestra 6 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	123
Figura 89. Muestra 7 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra).....	123
Figura 90. Dimensiones de tanques Eternit	131
Figura 91. Convergencia de malla de la simulación de esfuerzos máximos de Von Mises en la estructura de soporte	133
Figura 92. Plano del agitador	134
Figura 93. Plano del acople entre el eje del agitador y el eje del motor	135

Figura 94. Estructura de soporte de contenedores de sustancias a dosificar y del motor del agitador	136
Figura 95. Plano de las dimensiones de la zona de cultivo en Santander.....	137
Figura 96. Diagrama de tuberías de la implementación en Santander.....	138
Figura 97. Vista en perspectiva de la implementación del sistema hidropónico en Santander	138
Figura 98. Circuito eléctrico del sistema.....	139
Figura 99. Tanque de dosificado con las bombas peristálticas y motor del agitador	139
Figura 100. Semillas de frijol guajiro cosechado	140
Figura 101. Vainas de frijol producidas por el sistema hidropónico.....	140
Figura 102. Variables experimento 2	184
Figura 103. Diseño CAD base registro fotográfico experimento 2.....	187
Figura 104. Procedimiento de pesaje de la sal	188
Figura 105. Medición de los cc de soluciones nutritivas C1	189
Figura 106. Medición de los cc de soluciones nutritivas C2	189
Figura 107. Sustratos usados en el experimento	190
Figura 108. Total de frijoles sembrados	190
Figura 109. Toma de fotografías	191
Figura 110. Fotos tomadas en cada día de evaluación del experimento.....	191
Figura 111. Altura de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	193
Figura 112. Altura de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	193
Figura 113. Altura promedio de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	194
Figura 114. Altura promedio de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	194
Figura 115. Área de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	195
Figura 116. Área de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	195
Figura 117. Área promedio de las plantas de fríjol 1 a través del tiempo	196
Figura 118. Área promedio de las plantas de fríjol 2 a través del tiempo	196

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información nutricional del frijol cabecita negra.....	25
Tabla 2. Selección del sensor de pH.....	37
Tabla 3. Selección del sensor de conductividad eléctrica	38
Tabla 4. Selección del sensor de humedad en el suelo	39
Tabla 5. Parámetros involucrados en el cálculo de la potencia de la bomba principal	41
Tabla 6. Coeficientes de pérdidas de accesorios.....	44
Tabla 7. Selección de la bomba.....	47
Tabla 8. Características de la bomba seleccionada.....	47
Tabla 9. Selección de sensor de nivel de líquido	48
Tabla 10. Energía consumida según geometría del agitador	53
Tabla 11. Características requeridas para el mezclado	55
Tabla 12. Selección del motor del mezclador.....	56
Tabla 13. Características del motor seleccionado.....	57
Tabla 14. Selección del controlador	58
Tabla 15. Descripción de la malla del tubo de cultivo.....	63
Tabla 16. Descripción de la malla de la estructura de soporte de los tubos de cultivo	66
Tabla 17. Consumo eléctrico en La Guajira	71
Tabla 18. Dimensionamiento de las baterías	71
Tabla 19. Dimensionamiento del controlador de carga	72
Tabla 20. Configuración tratamientos experimento 2.....	73
Tabla 21. Nomenclatura de las ecuaciones de vaciado del tanque.....	83
Tabla 22. Comprobación del modelo matemático del vaciado del tanque.....	84
Tabla 23. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Up	85
Tabla 24. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Down.....	85
Tabla 25. Tabla de consumo eléctrico real.....	89
Tabla 26. Agua consumida en un riego.....	90
Tabla 27. Agua consumida en el tubo de cultivo de 6 pulgadas de diámetro.....	90
Tabla 28. Agua consumida en el tubo de cultivo de 8 pulgadas de diámetro.....	90
Tabla 29. Nomenclatura de las ecuaciones del comportamiento real de las variables de interés	93
Tabla 30. Datos del frijol Caupí.....	124
Tabla 31. Producción de frijol Caupí	125
Tabla 32. Porción de frijol por comida.....	125
Tabla 33. Consumo de agua del sistema	125
Tabla 34. Pérdidas por evapotranspiración del sistema.....	126
Tabla 35. Características sensores de pH (Vistrónica)	127
Tabla 36. Características sensores de pH (Atlas Scientific).....	127
Tabla 37. Características sensores de pH (Hanna Instrument).....	127
Tabla 38. Características cámaras.....	128
Tabla 39. Características de las bombas consideradas.....	128
Tabla 40. Características sensores de nivel de líquido (Pepperl + Fuchs).....	128

Tabla 41. Características sensores de nivel de líquido (Electronilab)	129
Tabla 42. Características sensores de nivel de líquido (Electrónicas AFG)	129
Tabla 43. Características sensores de conductividad eléctrica (Atlas Scientific) ..	130
Tabla 44. Características controladores.....	130
Tabla 45. Propiedades del PVC.....	132
Tabla 46. Propiedades del cedro americano.....	132
Tabla 47. Convergencia de malla de la simulación de esfuerzos máximos de Von Mises en la estructura de soporte	133
Tabla 48. Configuración tratamientos experimento 2.....	185
Tabla 49. Recursos	200

1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN BREVE DEL PROBLEMA

El departamento de La Guajira, en Colombia, presenta condiciones geográficas que dificultan la producción agrícola, esto desencadena serios problemas de escasez de alimentos. La Guajira se caracteriza por poseer una población rural dispersa y un atraso histórico considerable en las condiciones sanitarias y en el acceso al agua potable. Esta problemática genera el fallecimiento de una gran cantidad de niños de la etnia Wayúu, hoy en día motivo de preocupación nacional. Así mismo, esta región del país no cuenta con acceso, ni disponibilidad constante a suficientes alimentos de calidad y en condiciones adecuadas para el consumo humano, necesarias para llevar una dieta saludable. Como principal prueba de esta cruda realidad social y económica, se encuentra una cifra arrojada y declarada como “una barbarie” según el magistrado de la corte constitucional Alberto Rojas Ríos, y es que desde hace ocho años y hasta la fecha (15 de octubre 2018), 4770 menores dejaron sus vidas en hospitales y rancherías por motivos de desnutrición.[1]

Como parte de la solución a esta problemática, se plantea el desarrollo de un sistema hidropónico automatizado y autosustentable, capaz de sensar y controlar variables de interés, principalmente el pH del agua, la conductividad eléctrica y la humedad relativa, con el fin de complementar la dieta alimenticia de algunos habitantes de la comunidad indígena, conformada por aproximadamente 120 personas, principalmente adultos mayores y niños, que son los más afectados por la desnutrición en esta zona del país.

El sistema hidropónico requiere ser controlado de manera automática para evitar la mayoría de las responsabilidades que representan este tipo de sistemas a los habitantes de la comunidad y que la obtención de alimentos de calidad se logre de forma eficiente.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto consiste en el desarrollo de un sistema automatizado de hidroponía implementado en una comunidad indígena de una ranchería en La Guajira, Colombia; debido a las condiciones ambientales de esta zona geográfica, que dificultan las prácticas agrícolas sustentables, y a su muy limitado acceso a recursos hídricos, son bastante comunes los problemas de salud en las comunidades indígenas que habitan la región, siendo los niños los mayores afectados por esta situación. El proyecto permite brindar una solución a la comunidad, de forma que puedan tener acceso a alimentos saludables como frutas

y/o vegetales de una manera sostenible y que pueda cubrir parcialmente las necesidades de consumo local.

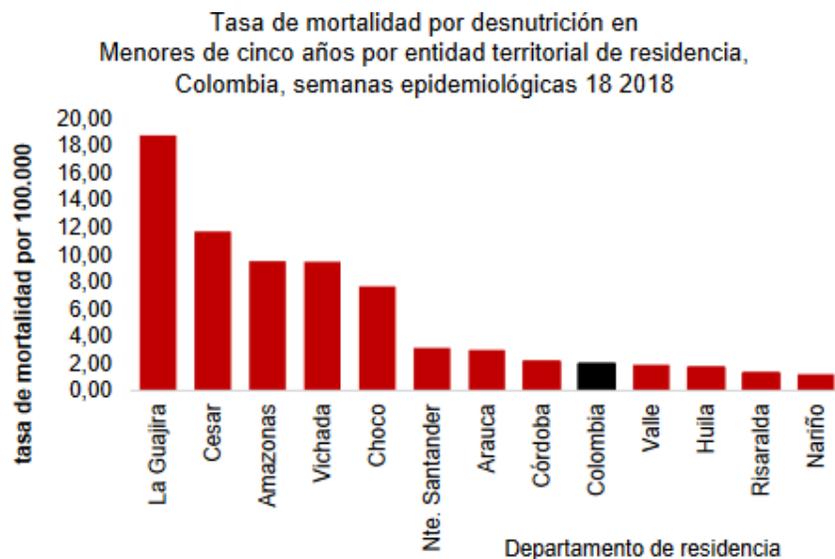
Los sistemas hidropónicos, además de tener la ventaja de no usar tierra como sustrato (hecho que es muy útil debido a las propiedades áridas del terreno en La Guajira), presentan un mayor crecimiento de las plantas con respecto a un sistema de cultivo convencional.[2]

El sistema hidropónico estará automatizado, midiendo variables de interés y controlando dichas variables para que el cultivo se desarrolle de forma óptima y eficiente. Este sistema será alimentado energéticamente de un panel solar, dado que, en la región, específicamente en las zonas rurales, no se cuenta con una garantía de suministro energético constante y la región de la “Alta Guajira” donde se ubica el proyecto es una de las regiones con mayor potencial energético en el país y el mundo por su alta radiación solar y gran cantidad de horas de sol al día.

El proyecto sigue el cumplimiento de algunos objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU; se desarrolla directamente el segundo ODS, el cual consiste en poner fin al hambre y conseguir seguridad alimentaria; también se desarrollan indirectamente los demás ODS (Objetivos de desarrollo sostenible) como lo son el 3(Salud y bienestar), el 7(Energía asequible y no contaminante) y el 11(Ciudades y comunidades sostenibles).[3]

Se hace especial énfasis en el segundo ODS de la ONU, el cual consiste en acabar con el hambre y la desnutrición para el año 2030 y asegurar el acceso de alimentos para todas las personas, especialmente a los niños, asegurando así una buena alimentación durante todo el año. Esta labor es de vital importancia ya que desafortunadamente el hambre y la desnutrición aún son un obstáculo que superar para el desarrollo de los países que enfrentan esta situación. Como evidencia de esta problemática, en Colombia y más específicamente en el departamento de La Guajira se muestra una gráfica en la cual se observa que este departamento presenta la mayor tasa de mortalidad para menores de cinco años.

Figura 1. Tasa de mortalidad por desnutrición en menores de cinco años por entidad territorial de residencia, Colombia,



Fuente: INS. (2018). Informe de Evento Desnutrición Aguda Moderada Y Severa En Menores De Cinco Años. Boletín Epidemiológico Semanal. <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/BoletinEpidemiologico/2018%20Bolet%C3%ADn%20epidemiol%C3%B3gico%20semana%2018.pdf>

2.0 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema hidropónico automatizado funcional para una ranchería del departamento de La Guajira.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar especies de leguminosas con características fisiológicas tolerantes a condiciones climáticas similares a las presentes en La Guajira.
- Diseñar la infraestructura eléctrica, electrónica y mecánica del sistema hidropónico, contemplando los requerimientos del cultivo, el gasto energético y las condiciones ambientales.
- Diseñar las estrategias de automatización y control correspondientes a las variables de interés en el proceso hidropónico.
- Implementar un prototipo hidropónico automatizado en un ambiente con condiciones similares a las presentadas en La Guajira.
- Implementar una simulación del sistema hidropónico automatizado para observar el comportamiento del sistema ante perturbaciones en las condiciones iniciales del mismo.

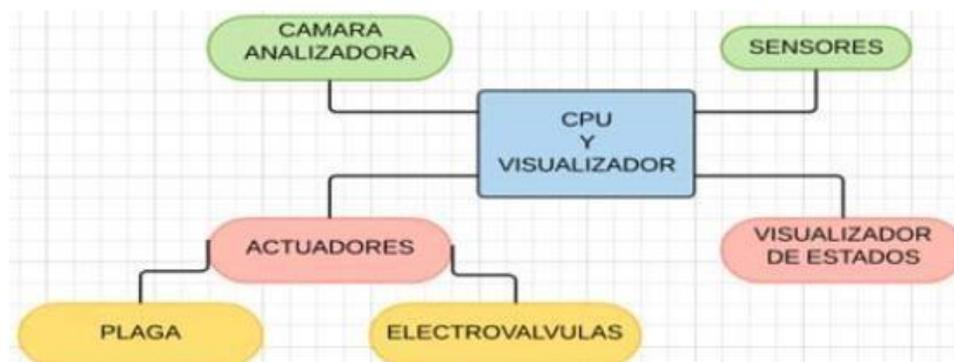
3.0 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, los sistemas hidropónicos están adquiriendo una mayor relevancia en el tema de cultivos a nivel mundial, esto ha permitido que se desarrollen diferentes estudios sobre cómo automatizar este proceso, ya que a pesar de sus múltiples ventajas, requiere de una especial atención por parte de aquel que se embarque en sistemas de este tipo; esto debido a la cantidad de consideraciones que se deben tener en cuenta, como los niveles de pH (potencial de hidrógeno), CE (conductividad eléctrica), OD (oxígeno disuelto), temperatura, tiempos de riego, etc.

Los investigadores Palande, Zaheer y George de la Escuela de Ingeniería y Ciencias de la Computación de California publicaron, en una conferencia realizada en 2017, un artículo acerca de un sistema hidropónico automatizado sin depender de las condiciones climáticas externas. Ellos usaron el sistema de cultivo por raíz flotante, donde se vuelve necesario implementar un método de oxigenación del agua, para lo cual se utiliza una bomba de aire. Esta propuesta plantea una forma de comunicación entre el sistema físico y el usuario a través de una red IoT, la cual permite controlar y monitorear las variables que afectan el cultivo, en este caso, conductividad eléctrica, pH, temperatura del agua y del aire, humedad y luminosidad. Para comunicarse con los sensores y actuadores del sistema se utilizan dos microcontroladores Arduino. Adicionalmente, se emplea una Raspberry Pi que comunica el sistema con un servidor.[4]

Posteriormente, los investigadores James, Collazos, Arce y Chauca de la Universidad Nacional del Callao en Perú, desarrollaron un sistema hidropónico automatizado similar al presentado anteriormente, pero con la diferencia de que este es autosostenible energéticamente, gracias a la implementación de un sistema de panel solar. Al igual que en la publicación mencionada previamente, se lleva a cabo un sistema de raíz flotante considerando las variables: temperatura, humedad, luminosidad, CO₂, pH y conductividad eléctrica, la cual se mantiene en el valor deseado a partir de la adición de nutrientes, si presenta un valor bajo, o de agua, si hay una alta conductividad. Se emplean dos sustancias reguladoras de pH y dos soluciones nutritivas, una compuesta por los elementos mayores o vitales para la planta y otra por los elementos menores.[5]

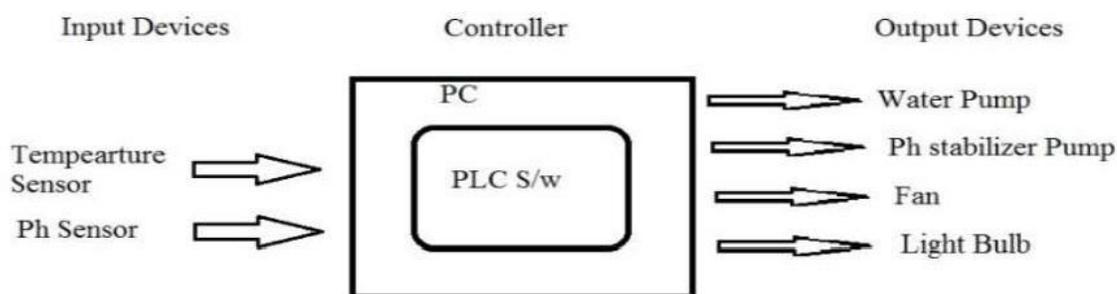
Figura 2. Diagrama de bloques general de un sistema hidropónico automatizado



Fuente: Jaimes, Collazos, Arce, & Chauca, (2019) Hydroponic System with Automated Hydrolysis Using Renewable Energy Self-Sustainable

Así mismo, en el año 2016, los estudiantes Borole, Porkharkar, Bastade y Surwase, asistidos por la profesora Nivedita Wagh, desarrollaron un sistema hidropónico automatizado basado en PLC, esto se logra gracias al conocimiento de los requerimientos para el desarrollo de sistemas de este tipo, entre los cuales están mantener el pH y la conductividad eléctrica en rangos aceptables, además de asegurar niveles óptimos de temperatura y aireación. Una vez se conocen estos requerimientos, los cuales pueden entenderse como parámetros, se puede comenzar con el desarrollo de un sistema de automatización con sus respectivas variables a controlar, que según el estudio realizado por los autores de este proyecto son: pH, humedad, conductividad eléctrica del agua y concentración de nutrientes en el agua.[6]

Figura 3. Dispositivos de entrada y salida del PLC de un sistema hidropónico

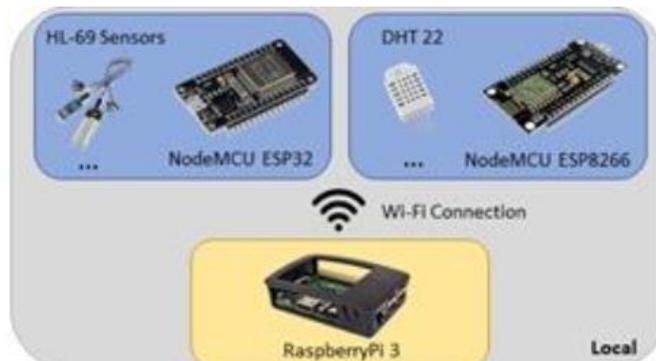


Fuente: Wagh, Vijendra, Bastade & Priyanka (2016) PLC based Automated Hydroponic System

En el año 2019, se llevó a cabo una investigación en la Universidad de Madeira, en la cual se estudiaron y desarrollaron algoritmos para lograr una circulación eficiente del agua de los cultivos hidropónicos y reducir su consumo energético. Para ello, se planteó un sistema hidropónico con medición y control de las variables de interés en tiempo real mediante una red de comunicación IoT; el sistema implementó un microcontrolador Raspberry Pi usando un algoritmo de retroalimentación para controlar el flujo de agua dependiendo de las necesidades de humedad del cultivo.[7] Este control es un aspecto diferenciador en comparación con otros

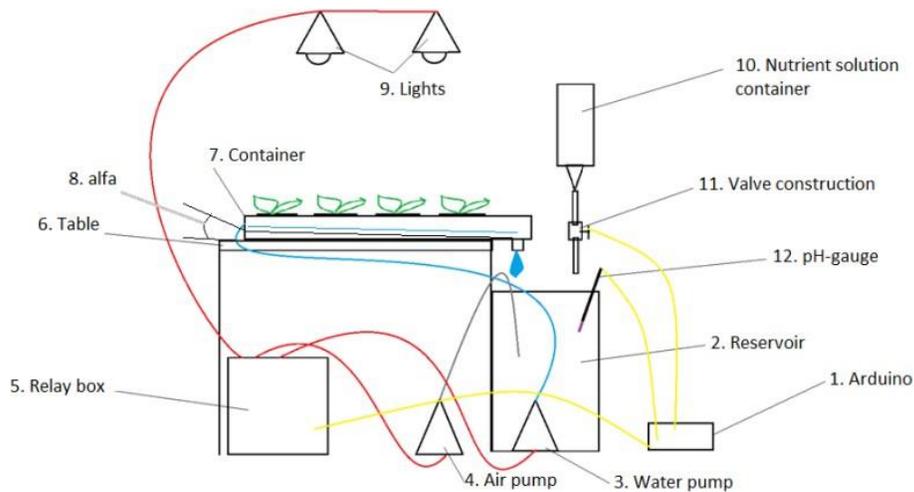
cultivos NFT (Nutrient Film Technique) más tradicionales, como el desarrollado por Adin Suta y Karl-Filip Selander en el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo en el año 2017; este plantea un flujo de agua determinado por intervalos de tiempo definidos y se enfoca, principalmente, en asegurar una alta calidad del agua con nutrientes a partir del uso de dos soluciones nutritivas diferentes y dos sustancias reguladoras de pH suministradas basándose en el control PID del pH y la conductividad eléctrica mediante un microcontrolador; esta última variable es calculada a partir de la medición de la resistencia del agua. [8]

Figura 4. Arquitectura simplificada de la red IoT hidropónica desarrollada en la universidad de Madeira



Fuente: Ramos, Nobrega, Baras, & Gomes (2019) Experimental NFT hydroponics system with lower energy consumption

Figura 5. Boceto general de un sistema hidropónico automatizado con NFT realizado en el Real Instituto de tecnología de Estocolmo

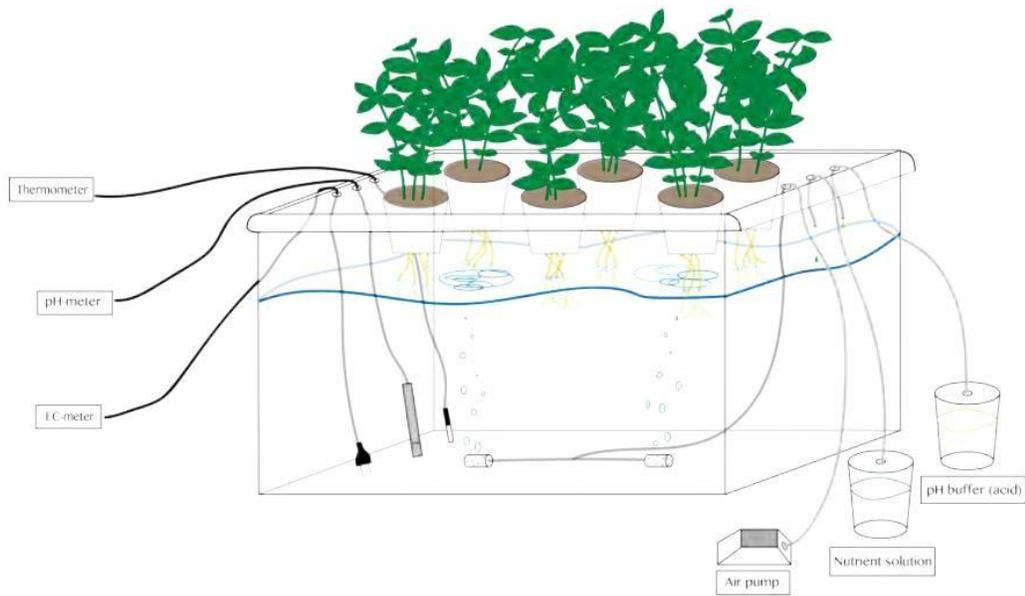


Fuente: Selander (2017) Automated Greenhouse

Años después, se desarrolló un sistema hidropónico automatizado en la misma institución, el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, por un grupo de estudiantes de ingeniería mecánica. En este se llevó a cabo un sistema hidropónico de tipo DWC (Deep Water Culture; figura 5), donde se usó un microcontrolador Arduino Uno para controlar el nivel del agua, pH, conductividad eléctrica del medio

y oxígeno disuelto, y se tuvo en cuenta la temperatura del agua; para regular estos parámetros se utilizó un sensor de temperatura, un sensor de pH y un sensor de conductividad eléctrica. Como actuadores se usaron dos bombas peristálticas, una para la sustancia reguladora de pH y otra para solución de nutrientes, además de una bomba de aire para la oxigenación del agua. Mediante un módulo Wi-Fi conectado al microcontrolador se realizó el envío de datos del sistema para su almacenamiento y posterior análisis.[9]

Figura 6. Esquemático general de un sistema hidropónico tradicional tipo Deep Water



Fuente: Ortner (2019) Automated Hydroponic system

4.0 MARCO TEÓRICO

4.1 HIDROPONÍA

Es un sistema de producción agrícola que prescinde del uso de la tierra como fuente de nutrientes, obteniendo los elementos requeridos por las plantas exclusivamente del agua.

La palabra hidroponía proviene del griego *hydro*, que significa agua, y *ponos*, que significa trabajo. Las primeras versiones de este tipo de cultivos datan de hace miles de años, naciendo de la mano de las civilizaciones babilónica y china. Con el pasar del tiempo se han realizado avances en torno a esta forma de agricultura; en el año 1600, el belga Jan van Helmont demostró que las plantas obtienen nutrientes a partir del agua, y en ese mismo siglo, el científico irlandés Robert Boyle realizó experimentos de crecimiento de plantas en pequeños contenedores de agua.

Pero fueron los alemanes Julius von Sachs y Wilhelm Knop quienes le dieron paso a la hidroponía moderna, al demostrar la factibilidad del crecimiento de las plantas en una solución nutritiva. Posteriormente, William Frederick Gericke le dio un nombre a este tipo de cultivos y llevó a cabo el primer experimento comercial a gran escala de cultivo hidropónico de diferentes vegetales.

Los cultivos hidropónicos destacan con respecto a los cultivos convencionales, por obtener productos de alta calidad en un tiempo reducido y con una óptima distribución de los recursos; esto se debe a que las raíces de las plantas no presentan impedimentos físicos ni nutricionales para su adecuado crecimiento, como podrían ser los problemas de compactación, baja infiltración o condiciones de anaerobiosis. Adicionalmente, los sistemas hidropónicos minimizan las pérdidas de agua, ya que esta es suministrada en las cantidades necesarias, al igual que los nutrientes requeridos por las plantas.

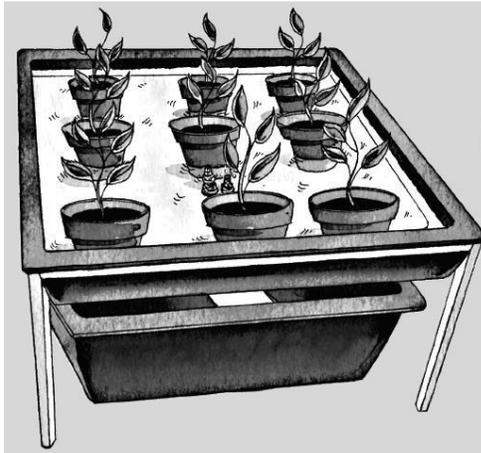
En general, los cultivos hidropónicos requieren una menor aplicación de plaguicidas que los cultivos tradicionales, además de no necesitar un espacio tan amplio. Sin embargo, presenta algunas desventajas, como lo es el elevado costo inicial en sistemas con un alto control de las variables que pueden afectar el crecimiento de las plantas. También se requieren conocimientos de fisiología y nutrición de las plantas, ya que los desbalances nutricionales causan un efecto inmediato en el cultivo.[10][11][12]

4.2 TIPOS DE SISTEMAS HIDROPÓNICOS

4.2.1 FLUJO Y REFLUJO (EBB & FLOW)

En sistemas de este tipo las plantas suelen situarse en contenedores con sus raíces apoyadas en un medio para su crecimiento, los contenedores se ubican en una bandeja ubicada sobre un reservorio de solución de nutrientes, esto quiere decir que la gravedad realizará parte de trabajo. Se ubica una bomba en el reservorio conectada a la bandeja, la bomba se enciende llenando la bandeja, cuando esta se apaga el agua regresa nuevamente al reservorio. Se incorpora un sistema de sobreflujo en la bandeja para poder controlar la profundidad a la cual estarán los contenedores de las plantas, cuando el agua llegue hasta cierto punto delimitado por el sistema de sobreflujo el agua caerá al reservorio. el ciclo de riego es controlado por medio de un temporizador, donde los ciclos tienen intervalos de 30 a 45 minutos, aunque estos tiempos cambian de un sistema a otro. Este tipo de sistemas son muy buenos ya que permiten la oxigenación del agua con solución de nutrientes.

Figura 7. Bosquejo de un sistema Ebb and flow



Fuente Gchydro (2016) 4 types of hydroponics

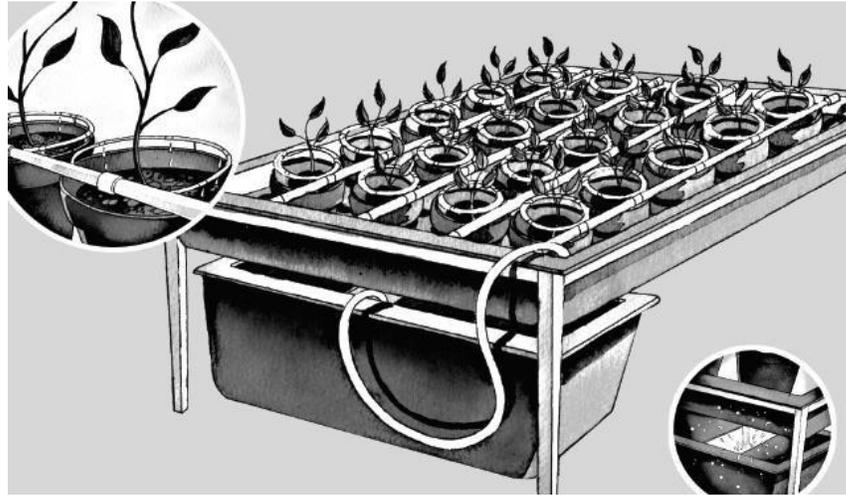
4.2.2 PELÍCULA DE NUTRIENTES O NFT (NUTRIENT FILM TECHNIQUE)

Son el método más utilizado con fines comerciales, las raíces de las plantas se ubican en un pequeño canal superficial con una entrada de luz limitada, donde la solución de nutrientes circula constantemente, fluyendo por las raíces durante las 24 horas del día. Esta técnica recibe su nombre para hacer énfasis en la poca profundidad del flujo de nutrientes que pasa por las raíces, lo cual es vital para asegurar la correcta oxigenación del sistema.

4.2.3 SISTEMAS POR GOTEO (DRIP SYSTEMS)

Este sistema provee una aireación total ya que, a diferencia de otros sistemas, las raíces de las plantas a cultivar nunca se encuentran completamente sumergidas, pero nunca se secan por completo. Los sistemas por goteo también empujan oxígeno hacia abajo con el agua que brota de los goteros. El funcionamiento es simple: Un reservorio lleno de agua con nutrientes cuenta con una bomba conectada a diferentes tuberías para poder llegar a más plantas y sobre cada planta se ubica un gotero, el agua con solución de nutrientes gotea en la base de cada planta, hidratando a través del sustrato y llegando hasta la raíz de la planta; finalmente el exceso de agua es drenado al reservorio o como agua no reutilizable, depende del sistema, es importante mencionar que se debe tener un buen manejo de tiempos de goteo, ya que es fundamental que las plantas no se lleguen a inundar o a secar.

Figura 8. Esquemático general de un sistema hidropónico de riego por goteo



Fuente Gchydro (2016) 4 types of hydroponics

4.3 LEGUMBRES

Las legumbres son el fruto de las plantas denominadas leguminosas y pertenecen a la familia “Fabaceae” o “Leguminosae”. Se cree que se originaron hace 90 millones de años aproximadamente y son el tercer grupo de plantas más numeroso del planeta.

Una de las características destacables que posee este vegetal es su capacidad de fijación biológica del nitrógeno, gracias a su relación simbiótica con las bacterias conocidas como rizobios; este hecho favorece la nutrición de las leguminosas y, por tanto, su crecimiento.

Las legumbres se consumen en todo el planeta, proporcionan una considerable cantidad de micronutrientes y carbohidratos y son una excelente fuente de proteínas y aminoácidos. Al tener un bajo contenido graso y debido a la acción de sus esteroides, se ha comprobado su eficiencia para mantener bajos niveles de colesterol LDL y reducir la presión arterial. Son estas características nutricionales las que las vuelven una buena opción para apoyar la alimentación de las personas en una región donde no son poco comunes las deficiencias alimenticias.

Cabe mencionar que las legumbres no incluyen los cultivos que se cosechan verdes (por ejemplo, guisantes verdes, judías verdes), ya que estos se clasifican como hortalizas.[13]

4.4 INFORMACIÓN NUTRICIONAL DEL FRIJOL CABECITA NEGRA

A continuación, se muestra una tabla con la información nutricional del frijol cabecita negra, así como los minerales, vitaminas y carbohidratos. [14]

Tabla 1. Información nutricional del frijol cabecita negra

Frijol caupí (100 g)	Análisis proximal de alimentos	Energía (Kcal)	Humedad (g)	Proteína (g)	Lípidos (g)
		325	12,8	21,6	2,1
	Minerales	Calcio (mg)	Hierro (mg)	Fósforo (mg)	
		81	5,7	396	
	Vitaminas hidrosolubles	Tiamina (mg)	Riboflavina (mg)	Niacina (mg)	Vitamina C (mg)
		0,73	0	1,8	3
	Carbohidratos	Fibra bruta (g)			
		3,9			

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

4.5 VARIABLES DE INTERÉS

Los cultivos hidropónicos propician el desarrollo de las plantas brindándoles los nutrientes y elementos que estas requieren con una mayor precisión que en un cultivo tradicional. Para lograrlo es necesario controlar ciertas variables que pueden afectar en gran medida el crecimiento de las especies vegetales.

4.5.1 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

La escala de pH se utiliza para determinar la acidez o la alcalinidad del agua, en concreto se habla de pH como la concentración de iones de hidrógeno [H⁺] en el agua. Si el pH disminuye se tiene que el agua se hace más ácida y si por el contrario aumenta, el agua se torna básica. El valor de esta variable es crítico para el sistema ya que las variaciones en la escala de pH son un factor de crecimiento en las plantas, debido a la influencia que tiene sobre la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, si un cultivo presenta un pH de tipo básico, es decir con valores superiores a 7 en la escala de pH, ciertos elementos necesarios para la nutrición de la planta pueden llegar a bloquearse y no estar disponibles para el crecimiento de la planta. [15]

Para sensar esta variable se utiliza un sensor de pH, el cual consta de dos electrodos conectados a un instrumento con la capacidad de medir diferencial de

potencial en el rango de los milivolts. Al momento de introducir los electrodos en alguna disolución se genera una diferencia de potencial que varía en función del pH, finalmente se lee esta diferencia de potencial y se expresa como una lectura de pH. [16]

4.5.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material para permitir el flujo de corriente eléctrica donde la unidad según el sistema internacional es el Siemens sobre metro (S/m). La conductividad eléctrica nos permite conocer el nivel de salinidad de agua. Esta variable será medida en el tanque de dosificado ya que es el lugar donde se prepara la mezcla de agua con la solución de nutrientes la cual altera el valor de salinidad en el agua que se refleja en el cambio del valor de la conductividad eléctrica.

La CE será medida con un sensor que envía la información al PLC el cual determina si se encuentra en el rango de trabajo y actúa con base en dicha medida.

4.5.3 NIVEL DE AGUA DEL TANQUE DE DOSIFICADO

Para asegurar el flujo de agua requerido por la zona de cultivo, es necesario contemplar, dentro de las variables principales, el nivel del líquido en el interior del tanque de dosificado, en el cual se realiza el almacenamiento y acondicionamiento del agua. El sensado de esta variable debe contribuir con el proceso de mezcla de las diferentes sustancias involucradas en el sistema hidropónico, permitiendo la adición de nutrientes y soluciones reguladoras de pH en las proporciones adecuadas considerando el volumen de agua en el que se realizará su disolución. Adicionalmente, este sistema de sensado debe indicar si el nivel del tanque se encuentra en valores críticos, dándole paso a las acciones pertinentes para solucionar cada situación.

Entre los elementos para sensar el nivel de agua del tanque en cuestión, destacan los sensores de presión hidrostática; sensores ultrasónicos y sensores capacitivos. Los primeros permiten determinar la variable deseada de manera indirecta, a partir de la medición de la presión producto del volumen de agua que yace sobre el sensor, por ello se deben instalar en la parte inferior del tanque. A diferencia de los segundos, los cuales deben ubicarse en la parte superior, y su principio de funcionamiento consiste en la transmisión de ondas de sonido y en la medición del intervalo de tiempo que estas demoran en chocar contra la superficie del agua y regresar nuevamente al dispositivo. Ambos métodos permiten la medición continua del nivel de líquido dentro del tanque de dosificado. En el caso de los sensores capacitivos, no se obtiene un dato analógico, sino que se sensa la presencia o no de agua en distintos puntos del tanque. [17]

4.5.4 HUMEDAD DEL SUSTRATO

La humedad del sustrato consiste en la cantidad de agua disponible en un determinado volumen de sustrato. Esta variable determina si las plantas requieren un nuevo ciclo de riego, siendo fundamental evitar niveles críticos de la misma para lograr un crecimiento saludable del cultivo. Para realizar la medición de la humedad del sustrato, se considera el uso de sensores capacitivos de humedad o tensiómetros. Estos últimos determinan la tensión existente en el medio circundante a las raíces, la cual debe ser superada por las plantas para poder alimentarse y depende de las características del suelo y del volumen de agua almacenada en este. Mientras que con el método capacitivo se determina la humedad del suelo a partir de los cambios en la permitividad eléctrica del sustrato.[18][19][20]

4.6 PLC SIEMENS LOGO V8

El autómata más pequeño que fabrica Siemens, diseñado y utilizado para realizar automatizaciones para pequeñas aplicaciones industriales, lo que lo hace muy económico para su compra, aunque parezca pequeño, posee grandes características en cuanto a hardware y software, en el uso de las entradas y salidas. Entre las características principales del PLC Siemens Logo 8, el último que hay a la fecha, destacan que posee 8 entradas (que van referenciadas a la fuente de alimentación) y 4 salidas (que pueden ser por relé o transistor), que puede encontrarse con pantalla LCD o sin ella y puede conectarse a través de una red ethernet.[21]

4.7 SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

La implementación final del sistema hidropónico contempla el hecho de llevarse a cabo en una región desconectada de la red eléctrica nacional. Por tal motivo, es necesario optar por otras fuentes de energía que, en lo preferible, no requieran una inversión económica continua; que aprovechen las características de la región y sean amigables con el medio ambiente.

Teniendo esto en cuenta junto con las condiciones climáticas presentes en La Guajira (Ver anexo 8.1) se consideran las opciones de usar un sistema eólico o fotovoltaico.

4.8 VISIÓN ARTIFICIAL

Este es un campo de la inteligencia artificial que por medio de diferentes técnicas logra obtener, procesar y analizar información proveniente de imágenes digitales, todo esto se logra gracias a la captación de imagen mediante ciertas cámaras, imagen que se trata con técnicas de procesamiento avanzado que permiten visualizar y de ser necesario intervenir en un proceso; esta disciplina abarca diferentes temas entre los cuales se encuentran la informática, óptica, la ingeniería mecánica y automatización industrial. Entre las aplicaciones de los sistemas de visión artificial se encuentran la inspección visual. Algunas de sus características principales son la capacidad de analizar el nivel de luz o color, detección de formas logrando todo esto sin tener ningún tipo de contacto físico con el material a examinar.[22]

4.9 SUBSISTEMAS PRINCIPALES DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PLANTEADO

El sistema hidropónico automatizado que se plantea y desarrolla en este proyecto, se puede dividir en los siguientes subsistemas:

4.9.1 SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN

En este subsistema se realiza un tratamiento al agua obtenida del tanque de almacenamiento, haciéndola fluir a través de diferentes filtros con el fin de reducir su salinidad y aumentar su potabilidad, para su posterior acondicionamiento en el tanque de dosificación de nutrientes.

4.9.2 TANQUE DE DOSIFICACIÓN DE NUTRIENTES

Está conformado por un tanque que recibe agua del tanque de almacenamiento. El líquido que ingresa a este subsistema debe estar libre de residuos sólidos y, para cumplir con los requerimientos del cultivo, debe poseer un pH óptimo (5,8 hasta 7,5 de potencial de hidrógeno) para el crecimiento de las plantas. Para controlar esta variable y la proporción adecuada de nutrientes, se recibe información por medio de tres tipos de sensores: de nivel; pH y conductividad eléctrica, y a partir de los datos obtenidos, se adicionan gracias al accionamiento de dos bombas peristálticas, las soluciones buffers de tipo Up y Down para controlar el pH.

Adicionalmente, este subsistema posee otras dos bombas peristálticas encargadas de suministrar las soluciones nutritivas concentradas, para formar una única solución líquida que es finalmente la que será llevada a la zona de cultivo de plantas

a través de una unidad de bombeo. En el caso que se presente una conductividad eléctrica elevada, se agrega agua al tanque de dosificado para disminuir dicho valor.

4.9.3 ZONA DE CULTIVO DE PLANTAS

Este subsistema está conformado por la estructura en donde crecen las plantas, incluyendo los contenedores o espacios destinados a la siembra y el sistema de distribución del agua con nutrientes proveniente de la bomba. En hidroponía, dependiendo de las plantas a sembrar y de las condiciones específicas de diseño, se pueden utilizar diferentes tipos de contenedores para el cultivo.

4.9.4 SUBSISTEMA DE CONTROL

Este subsistema está conformado principalmente por el PLC el cual se encarga de recibir las señales de los sensores, procesarlas y enviar una respuesta a los actuadores para poder controlar las variables de interés, el PLC a usar es el PLC LOGO Siemens el cual tendrá la programación lógica en KOP; el PLC estará ubicado en un lugar donde no permanezca expuesto a la radiación solar ni a las condiciones ambientales que puedan alterar la vida útil del hardware.

4.9.5 SUBSISTEMA ENERGÉTICO

Se define como subsistema energético al conjunto de elementos eléctricos que permiten el acople energético del prototipo propuesto a un generador de energía autónomo ya instalado en la zona de implementación en La Guajira. Para determinar los elementos adecuados a utilizar en este subsistema, se calcula la potencia eléctrica consumida; de este modo se determina la energía requerida y se dimensionan los componentes.

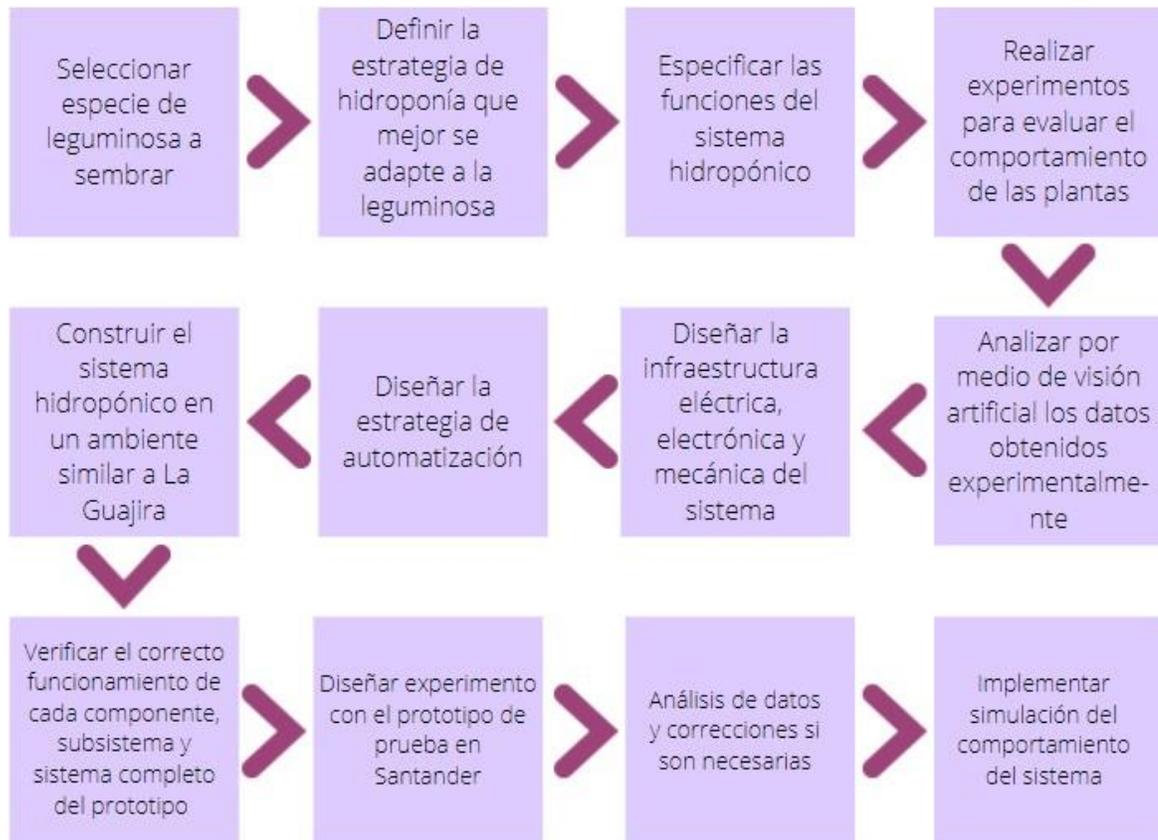
Para la implementación de la primera etapa del proyecto (en Santander) no se usará este subsistema. El suministro energético en esta etapa se obtendrá mediante la red eléctrica nacional, esto implica que el suministro de energía de corriente continua tiene que ser producto de una transformación de la misma.

5.0 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

5.1 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este proyecto se plantea una serie de actividades, las cuales se pueden resumir con el siguiente diagrama:

Figura 9. Diagrama resumen de la metodología



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Es importante destacar que el proyecto consta de dos etapas de implementación, la primera se lleva a cabo en el departamento de Santander, aquí se evalúan diferentes configuraciones del cultivo hidropónico considerando aspectos cruciales relacionados con la implementación final del sistema, como lo son: consumo hídrico y energético, porcentaje de germinación, calidad y cantidad de la producción, entre otros. Esto será respaldado por un diseño experimental que permitirá tener un mejor criterio a la hora de implementar el sistema en el departamento de La Guajira (entre los experimentos a realizar en esta primera etapa se encuentra el desarrollo de un sistema de visión artificial con el fin de supervisar y llevar un control del crecimiento de las plantas hasta su etapa de macollamiento), de esta forma se espera reducir

de manera significativa los riesgos relacionados con la productividad y aumentar el rendimiento del sistema al momento de su implementación en el departamento de La Guajira, que corresponde a la segunda etapa de implementación del proyecto, donde se ubicará finalmente.

5.2 SELECCIÓN DE LA ESPECIE DE LEGUMINOSA

La selección de las especies de leguminosa se realiza con base en la viabilidad de su siembra en cultivos hidropónicos y en sus características fisiológicas, tales como la tolerancia a la salinidad y a las altas temperaturas. Las especies seleccionadas deben ser capaces de desarrollarse en el ambiente en el cual se va a implementar finalmente el sistema hidropónico, es decir, un clima desértico.

Para ello se realiza una investigación sobre las plantas que se cultivan actualmente en el departamento de La Guajira, específicamente en las zonas desérticas; la investigación sobre la leguminosa a cosechar influye directamente en las personas que son beneficiarias de esta producción de alimento; por esto, además de consultar en bases de datos de ciencias agrícolas, también se considera importante la consulta con personas que han ido a comunidades indígenas en la zona de la media y alta Guajira. Por medio de esta investigación, se observó que el frijol guajiro, especie endémica de la región, es una buena fuente de proteína vegetal cultivada y consumida por los indígenas de la zona; por ello, éste y un frijol con características fisiológicas similares, el frijol caupí, se consideran adecuadas para darle continuidad a las siguientes etapas del proyecto. A partir de éstas, se define la estrategia de hidroponía que mejor se adapte a las plantas seleccionadas y que permita suplir en mayor medida la necesidad que se está atacando sin implicar un gasto considerable de recursos hídricos y/o energéticos.

Asociado a la investigación previamente mencionada, se lleva a cabo un experimento enfocado en la germinación de las leguminosas. Este corresponde a la primera etapa experimental del proyecto, la cual se realiza a pequeña escala y tiene como variable de salida el porcentaje de germinación de las semillas y como variables de entrada el tipo de sustrato y el porcentaje de salinidad del agua. Este experimento se realiza en bandejas de germinación con sustratos de prueba, que son: espuma, hidrogel y algodón. Los porcentajes de salinidad manejados son 1,5%, 2,3% y 3,5%, que han sido determinados por su cercanía a los porcentajes de salinidad encontrados en el agua de La Guajira.

5.3 EXPERIMENTO 1 – GERMINACIÓN DE FRÍJOL CAUPÍ

Este experimento se enfoca en la etapa inicial de crecimiento de la especie de fríjol mencionada, específicamente en la germinación, y tiene como finalidad observar el comportamiento de esta planta ante diferentes porcentajes de salinidad, determinando así la tolerancia de la planta hacia esta variable. Adicionalmente, se utilizan diversos tipos de sustrato para definir las características del suelo que favorecen en mayor medida al desarrollo temprano del fríjol, lo cual se decide a partir del porcentaje de germinación de las plantas y sus características físicas visibles. Los sustratos utilizados en este experimento no son sustratos convencionales de cultivos; se utilizan sustratos no convencionales con el fin de obtener un resultado de la germinación y cómo se ve afectada de acuerdo con las características físicas del sustrato como porosidad, capacidad de absorción, tamaño, etc.

Para observar el comportamiento de las plantas ante la salinidad se planea someterlas a 3 porcentajes diferentes de sal. Esto debido a que el agua disponible en diferentes comunidades indígenas de La Guajira que normalmente se obtiene de pozos, presenta salinidad. Por esto se definen porcentajes cercanos o inferiores al porcentaje de salinidad encontrada en el mar que varía de la zona, pero se aproxima a un 3.5%. Considerando esto se definen porcentajes de 1.5%, 2.3% y 3.5%.

El desarrollo en detalle de este experimento se encuentra en el anexo 8.2

Este experimento permitió concluir:

- Debido a la poca aireación, las semillas en el sustrato de espuma no mostraron un comportamiento positivo. Este sustrato, aunque presenta una alta capacidad de retención de humedad, no permite la renovación del aire alrededor de la semilla. Por otro lado, las esferas de hidrogel facilitaron la aireación de las semillas, pero la cantidad de agua absorbida por estas fue mínima debido a la concentración de sal perjudicando la germinación de las plantas.
- La capacidad de absorción de las esferas de hidrogel se vio limitada por la salinidad presente en el agua; en la sección destinada al control, este sustrato presentó una buena capacidad de retención de agua, contribuyendo en la germinación de los frijoles.
- El gran tamaño de las esferas de hidrogel, en comparación con la vía de drenaje del agua de riego, generó obstrucciones que provocaron el estancamiento del agua; esto permitió la proliferación de otras especies de seres vivos, como larvas de mosca, hongos y bacterias, y afectó negativamente el crecimiento de las plantas.

- El sustrato que presentó las mejores características fue el algodón, este permitió la aireación de las plantas sin dejar de suplir sus necesidades hídricas; evidenciándose una mayor cantidad de semillas con radícula visible en este tipo de sustrato. Aun así, el elevado porcentaje de salinidad impidió que las raíces se desarrollaran, lo cual detuvo el crecimiento de las plantas. Esto indica que una alta capacidad de retención de agua y una buena aireación son cruciales para asegurar el buen desarrollo de las leguminosas.
- Los valores de salinidad presentes en el agua de riego son muy elevados, imposibilitando el desarrollo de las plantas. Estos valores deben ser inferiores al 1.5% de salinidad para permitir que las leguminosas crezcan.

5.4 ESTRATEGIA HIDROPÓNICA

Para la elección de la estrategia hidropónica se escogió la modalidad *Ebb and Flow*, que quiere decir que la zona de cultivo se inunda hasta humedecer el sustrato con la mezcla de nutrientes y posteriormente drenar la zona de cultivo.

El frijol guajiro es una especie vegetal que crece en condiciones climáticas hostiles al habitar normalmente en una zona desértica. Esto quiere decir que en condiciones normales no está sometido constantemente a la presencia de agua; con el sistema *Ebb and Flow*, el suministro de agua es intermitente lo cual es adecuado para esta especie de frijol.

Considerando la disponibilidad energética que se puede obtener en una comunidad aislada mediante un sistema de energía renovable, entre menor sea el consumo eléctrico del sistema, más capacidad energética puede quedar aprovechable para otros usos de la comunidad. Este es otro de los motivos por los cuales la modalidad *Ebb and Flow* es adecuada, ya que es un sistema donde el mayor consumo de potencia (potencia consumida por la bomba y el mezclador) se realiza pocas horas a la semana.

La implementación de la modalidad *Ebb and Flow* se desarrolla mediante los tubos de cultivo donde se encuentran las plantas y el sustrato. Es ahí donde llega el agua con nutrientes e inunda los tubos el tiempo dado en el PLC. El agua es drenada lentamente por una tubería de salida para regresar al tanque de dosificado dejando la humedad necesaria para las plantas en el sustrato.

5.5 PROPUESTA Y BOSQUEJO GENERAL DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

5.5.1 FUNCIONES DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

Las funciones del sistema hidropónico automatizado son las siguientes:

- Ser estructura para el hábitat y ubicación de plantas teniendo en cuenta el terreno y condiciones climáticas de La Guajira.
- Producir un aproximado de 100 plantas en condiciones óptimas para el consumo humano.
- Acondicionar y transportar agua desde una fuente externa hasta un tanque de dosificado, adicionando en este los nutrientes requeridos por la zona de cultivo de vegetales.
- Administrar la energía eléctrica por los distintos dispositivos involucrados en el proceso.

El eje central del sistema hidropónico es el subsistema de dosificación de nutrientes y tratamiento del agua de cultivo, este consiste en un tanque de 1000 litros que es abastecido de agua por un tanque de almacenamiento cuando es requerido, es decir, cuando el nivel de agua está por debajo del nivel óptimo de trabajo. Por medio de un sensor de nivel se activa o desactiva una electroválvula para llenar el tanque; una vez se llena el tanque de dosificado se suministran las soluciones nutritivas requeridas por las plantas con base en el volumen de agua añadido.

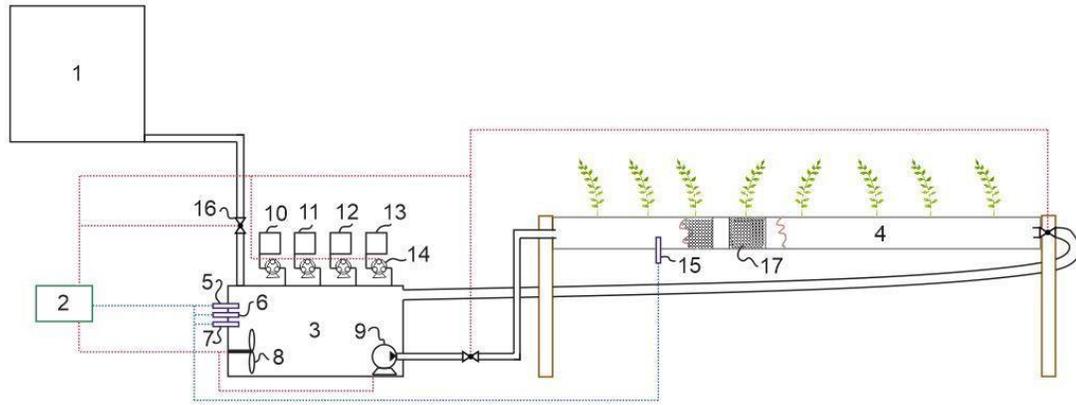
Posteriormente se lleva a cabo la regulación del pH y la conductividad eléctrica (CE) del agua en el tanque de dosificado, para esto se cuenta con un sensor de pH y un sensor de CE. Para regular el valor de pH se tienen dos bombas peristálticas, una para suministrar sustancia buffer tipo UP, para cuando los valores de pH se tornen inferiores a 5,8 o ácidos y una para suministrar sustancia buffer tipo DOWN, para cuando los valores de pH superen el valor de 7,5 o se vuelva alcalino.

En el caso del control de CE, ante valores altos (superiores a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), el sistema añade agua sin sales para reducir la conductividad eléctrica.

Después de realizar la adaptación del agua para las plantas, se llevará el agua desde el tanque de dosificado a la zona de cultivo por medio de una bomba, con esto se humedecen las plantas con la solución conformada por agua con un valor de pH deseado y concentración de nutrientes en proporciones correctas, es importante mencionar que no se debe humedecer en exceso las plantas ya que esto traería efectos no deseados para el cultivo, por este motivo, el sistema cuenta con sensores de humedad que ante valores altos de esta variable, no permite la realización del riego. Finalmente se repite este proceso dependiendo de los ciclos de riego necesarios.[23]

5.5.2 BOSQUEJO GENERAL DEL SISTEMA HIDROPÓNICO PLANTEADO

Figura 10. Boceto general del sistema hidropónico automatizado planteado con tubo PVC como recipiente en la zona de cultivo



- | | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1. Almacenamiento de agua | 6. Sensor de pH | 11. Tanque de buffer down | 16. Electroválvula |
| 2. Sistema de control | 7. Sensor de CE | 12. Tanque de solución A | 17. Sustrato |
| 3. Tanque de dosificado | 8. Mixer | 13. Tanque de solución B | |
| 4. Tubo de cultivo | 9. Bomba | 14. Bomba peristáltica | |
| 5. Sensor de nivel | 10. Tanque de buffer up | 15. Sensor de humedad | |

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.6 DIMENSIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO

El dimensionamiento del cultivo se realiza con base en las características propias del frijol Caupí cabecita negra y de la planta que lo produce, la cual posee similitudes con la planta de frijol guajiro. Estas características corresponden a datos aproximados de la producción y siembra de esta especie de leguminosa al implementar métodos tradicionales de agricultura. Cabe destacar que la frecuencia con la que se realiza la cosecha del frijol en un cultivo tradicional es de aproximadamente 3 a 4 meses mientras que, en un cultivo hidropónico, esta frecuencia puede verse reducida uno o dos meses dependiendo de la especie de frijol y las técnicas de hidroponía utilizadas. [24][25]

Para asegurarse que la comunidad tenga acceso a más de una comida por cosecha, se plantea una zona de cultivo, correspondiente a la sección en donde las plantas germinan y se desarrollan, conformada por tubos de PVC de 8 o 6 pulgadas de diámetro y 6 metros de largo. Cada tubo posee orificios en su parte superior destinados a contener las plantas; la distancia entre estos agujeros se define de acuerdo con la distancia recomendada de siembra entre semillas de frijol en los cultivos tradicionales. Se determina que la zona de cultivo tenga 8 tubos de siembra y teniendo en cuenta una capacidad de 10 plantas por tubo se tiene en total una capacidad de 80 plantas.

Para definir la capacidad volumétrica del tanque donde se prepara el agua apta para el cultivo, se realiza el cálculo del consumo máximo teórico que tendrá la zona de cultivo. Para esto, se tiene en cuenta que el agua requerida equivale, como mínimo, al porcentaje de agua que absorbe el sustrato dentro de los tubos, que es aproximadamente 70%; para alcanzar dicho valor se contempla un llenado del 50% del volumen sin sustrato de cada tubo.

El volumen de agua requerido en la zona de cultivo es de 0,825 m³ por lo cual es adecuado el uso de un tanque con capacidad de 1000 litros.

La anterior información suministrada sobre la cantidad de plantas y tubos de cultivo, así como la estimación de consumo de agua está soportada en datos y cálculos mostrados en el anexo 8.3.

5.7 SELECCIÓN DE COMPONENTES

Para definir los elementos a utilizar en el proyecto, se lleva a cabo un proceso de selección mediante criterios de utilidad planteados a partir de la aplicación de dichos elementos dentro del proyecto.

A continuación, se muestran las tablas de selección de componentes, donde se califica de 0 a 5 el rendimiento de cada elemento con respecto a los criterios planteados. Y según el peso de cada criterio, se realiza un promedio ponderado para determinar cuál o cuáles son las opciones más viables. Las características técnicas de cada componente se encuentran en el anexo 8.4.

5.7.1 SENSOR DE pH

El sensor de pH, al igual que el de conductividad eléctrica y el de humedad, debe poseer una esperanza de vida considerable y una frecuencia de recalibración baja, asegurando así un buen desempeño de su función sin necesidad de manipulación humana frecuente. Además de esto, debe poder trabajar bajo las condiciones ambientales del departamento de La Guajira.

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para este elemento.

Exactitud: Nos indica el probable error entre la medida y el valor verdadero, por lo que, entre más exactitud, mejor será el resultado. Este criterio será evaluado con una calificación de 0 a 5 donde 5 será la calificación para una exactitud realmente buena, con un error probable del orden de 10^{-3} sobre el valor real o menos.

Temperatura de trabajo: Es el rango de temperatura en el cual el sensor puede dar lecturas confiables. Si está dentro del rango de temperatura ambiente y algo superior al de la temperatura de La Guajira, que ronda en los 28,5 °C según el IDEAM, tendrá una calificación alta.[26]

Frecuencia de recalibración: Es la frecuencia o periodo de tiempo en el que se debe realizar una recalibración. Entre mayor sea este tiempo, mayor calificación tendrá. Se espera que un buen tiempo sea mayor a un año.

Esperanza de vida: Es el tiempo esperado que el sensor puede funcionar arrojando valores confiables. Entre mayor sea este tiempo, mayor calificación tendrá.

Precio: Según el costo de adquirir el sensor se define la calificación siendo los menores precios los que obtengan mayor calificación.

Uso industrial: Debido a que se necesita el uso constante del sensor sumergido en el tanque de agua, se necesita que el sensor sea robusto y de uso industrial, si es así tendrá una buena calificación.

Tabla 2. Selección del sensor de pH

Selección de sensor de pH									
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación							
		Consumer grade	Industrial	Spear Tip	Lab Grade	Mini Lab	SEN0161	SEN0169	AmpHel
Exactitud	10	5	5	5	5	5	3,8	3,8	3,8
Temperatura de trabajo	15	3,8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,2	3,8	5
Frecuencia de recalibración	20	3	3	3	3	3	1,5	1,5	1,5
Esperanza de vida	15	3,8	5	3,8	3,8	3,5	2	2	3,5
Precio	20	4,2	2,4	3	3,5	3,8	4,8	3,7	1,5
Uso industrial	20	5	5	5	5	5	2	5	5
Puntuación Total		4,08	4,07	4,01	4,11	4,12	2,97	3,29	3,26
Rango		3	4	5	2	1	8	6	7
¿Continúa?		Tal vez	No	No	Tal vez	Si	No	No	No

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.2 SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para este elemento.

Rango: Debido a que los sensores no comparten el mismo rango de medición, se prefiere los sensores que tengan un rango de medición cuyo límite inferior sea muy bajo, ya que se necesita la medición desde valores bajos, que serían ideales, hasta un valor alto de conductividad, debido a las propiedades del agua que se obtiene de la zona altas en salinidad. Entre más amplio sea el rango tendrá una calificación más alta.

Los demás criterios: temperatura de trabajo, frecuencia de recalibración, esperanza de vida, precio y uso industrial, tienen las mismas definiciones usadas para el sensor de pH.

Tabla 3. Selección del sensor de conductividad eléctrica

Selección de sensor de CE					
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación			
		Conductivity Probe K 1.0	Conductivity Probe K 10	Mini E.C. Probe K 1.0	Conductivity Probe K 0.1
Rango	10	4,8	3,8	4,8	4,2
Temperatura de trabajo	15	4,8	4,8	4,8	4,8
Frecuencia de recalibración	20	5	5	5	5
Esperanza de vida	15	5	5	5	5
Precio	20	2,8	2	3	2
Uso industrial	20	5	5	5	5
Puntuación Total		4,51	4,25	4,55	4,29
Rango		2	4	1	3
¿Continua?		No	No	Sí	No

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.3 SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para este elemento.

Alimentación: Se contempla este como un criterio de selección ya que de no entrar entre los valores de voltaje de alimentación que se predisponen para alimentación de los sensores, si el consumo de voltaje de alimentación se encuentra entre los valores definidos en el diagrama eléctrico obtendrá mayor calificación.

Manejo de dato analógico y digital: Debido a que algunos sensores manejan valor de alto y bajo únicamente se debe contemplar que el sensor tenga capacidad para lectura de dato analógico con el fin de saber el porcentaje de humedad presenta el sustrato y de este modo realizar el riego de la zona de cultivo si el sustrato la planta, si el sensor presenta capacidad de lectura análoga obtiene mayor calificación.

Resistencia a la corrosión: Debido al ambiente en el que se va a ubicar el sistema final se necesita de un sensor con resistencia al deterioro generado por distintos factores del entorno en el que se trabaja, si el sensor está fabricado en un material resistente tendrá mayor calificación.

Precio: Según el costo de adquirir el sensor se define la calificación siendo los menores precios los que obtengan mayor calificación.

Tabla 4. Selección del sensor de humedad en el suelo

Selección de sensor de humedad en el suelo				
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación		
		Sensor de humedad de suelo con sonda YL69	Sensor de humedad del suelo resistente a corrosión HD-38	Sensor industrial de humedad SHT10
Alimentación	15	4,5	4,5	4,3
Manejo de dato digital	15	5	5	0
Manejo de dato análogo	15	5	5	5
Precio	30	4,5	4	3
Resistencia a la corrosión	25	3,8	4,8	5
Puntuación Total		4,475	4,575	3,545
Rango		2	1	3
¿Continua?		No	Sí	No

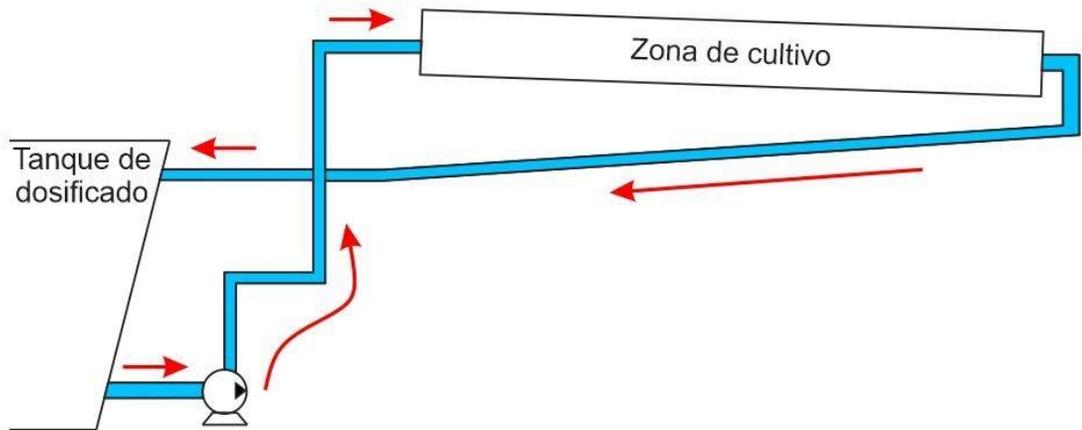
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.4 BOMBA HIDRÁULICA

Para llevar a cabo el proceso de selección de la bomba, se definieron los requerimientos mínimos de este elemento con base en las dimensiones y características de la tubería necesaria para movilizar el agua desde el tanque de dosificado hasta la zona de cultivo; estas dimensiones se obtuvieron a partir del tamaño y la distribución espacial de los contenedores de las plantas.

En la siguiente imagen se puede apreciar un boceto general del sistema de tuberías.

Figura 11. Vista lateral del sistema de tuberías



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Asumiendo un tiempo de 20 minutos para el llenado del volumen previamente definido de los contenedores de cultivo ($0,825 \text{ m}^3$ en total), se realizan los cálculos necesarios para determinar el caudal mínimo de la bomba.

Ecuación 1. Cálculo del caudal mínimo

$$Q_{\text{mín}} = \frac{V}{t}$$
$$Q_{\text{mín}} = 0,6875 \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right]$$

Teniendo en cuenta este caudal, se definen los parámetros presentes en la tabla 5, se hallan las pérdidas mayores y menores del sistema de tuberías, y se calcula la potencia necesaria para que el fluido sea desplazado desde la bomba hasta el final de la primera sección de la tubería; dicho final corresponde al punto en el cual el caudal inicial se ve reducido a la mitad.

Tabla 5. Parámetros involucrados en el cálculo de la potencia de la bomba principal

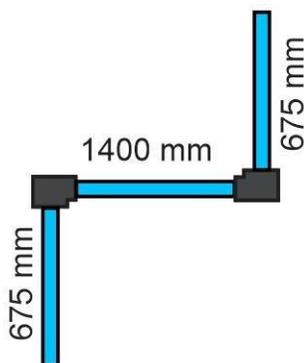
Variable	Nombre	Valor	Unidades
T	Temperatura	30	°C
μ	Viscosidad Dinámica	0,000798	Pa * s
ρ	Densidad	996	$\frac{Kg}{m^3}$
ν	Viscosidad Cinemática	8,012E-07	$\frac{m^2}{s}$
g	Gravedad	9,81	$\frac{m}{s^2}$
Q	Caudal	0,0006875	$\frac{m^3}{s}$
D	Diámetro	0,0166	m
ϵ	Rugosidad	0,0000015	m
A	Área transversal circular	0,00021642	m ²
V	Velocidad promedio	3,17663009	$\frac{m}{s}$
Re	Número de Reynolds	65815,9539	-

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Los valores correspondientes al caudal, la velocidad promedio y el número de Reynolds, así como las variables que dependen de estos, se ven modificados al cambiar la sección de la tubería sobre la cual se está trabajando, ya que cada una presenta un flujo volumétrico diferente. La tubería posee ½ in de diámetro nominal y tiene un diámetro interior promedio equivalente a 16,6 mm. [27]

En total la tubería es dividida en cinco secciones; cada una con características diferentes. La primera sección posee dos codos, presenta una longitud de 2,75 m y es la única que posee un tramo normal al suelo, el cual equivale a 1,35 m.

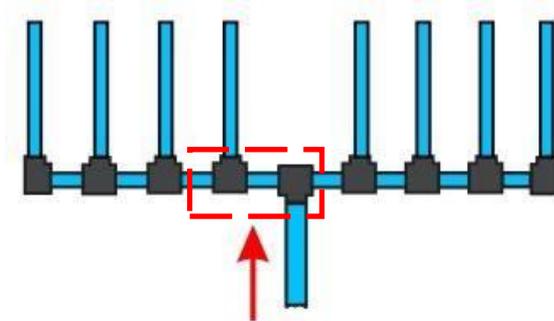
Figura 12. Sección 1 de la tubería



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

La segunda sección tiene una longitud de 0,8 m y posee dos accesorios tipo te de 90°. En esta el caudal equivale a la mitad del caudal entregado por la bomba.

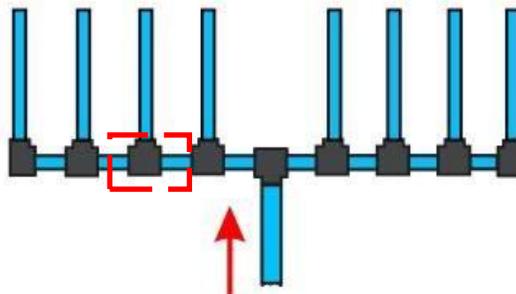
Figura 13. Sección 2 de la tubería



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

La tercera sección presenta un caudal equivalente a $\frac{3}{8}$ del caudal otorgado por la bomba y, al igual que la cuarta sección, tiene una longitud de 1,6 m y un accesorio tipo te de 90°.

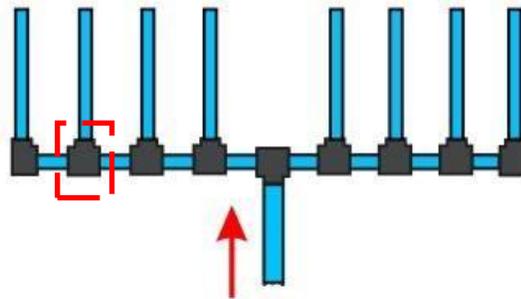
Figura 14. Sección 3 de la tubería



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

La cuarta sección presenta las mismas características físicas de la anterior, pero su caudal equivale a $\frac{1}{4}$ del caudal entregado por la bomba.

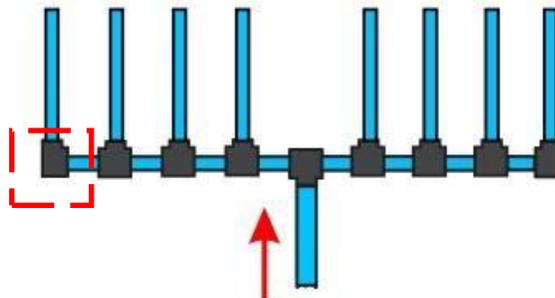
Figura 15. Sección 4 de la tubería



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Y la última sección posee la misma longitud que la anterior, un caudal equivalente a 1/8 del caudal entregado por la bomba y un codo.

Figura 16. Sección 5 de la tubería



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Teniendo definidas las características de cada sección, se procede a calcular las pérdidas mayores (h_L) y las pérdidas menores (h_M) de cada una de estas. Para ello se determinan el factor de fricción (f) a partir de la ecuación de Colebrook, ya que es una de las variables necesarias para realizar el cálculo de pérdidas mayores.

Los valores correspondientes a la rugosidad del material (ϵ), en este caso PVC, el diámetro hidráulico (D) y el número de Reynolds (Re), son necesarios para calcular el factor de fricción. Este se obtiene por medio de un proceso iterativo realizado a partir de la ecuación 2.

Ecuación 2. Ecuación de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 * \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

Los resultados de este proceso son los factores de fricción (f) de cada sección:

$$f_1 = 0,02004086$$

$$f_2 = 0,02323732$$

$$f_3 = 0,02481671$$

$$f_4 = 0,02734433$$

$$f_5 = 0,03266738$$

Posteriormente, se realiza el cálculo de pérdidas mayores (h_L) por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach. Para esto, además de los factores de fricción (f), se utilizan los valores de la longitud de la tubería (L), el diámetro hidráulico (D), la velocidad promedio (v) y la aceleración gravitacional, los cuales fueron descritos previamente.

Ecuación 3. Ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

A partir de la ecuación 3, se obtienen los siguientes valores de pérdidas mayores:

$$h_{L1} = 1,7076 [m]$$

$$h_{L2} = 0,4949 [m]$$

$$h_{L3} = 0,2973 [m]$$

$$h_{L4} = 0,1456 [m]$$

$$h_{L5} = 0,0435 [m]$$

Luego se realiza el cálculo de pérdidas menores (h_M) utilizando la ecuación 4, para ello se contemplan los coeficientes de pérdidas (K) correspondientes a cada uno de los accesorios implementados en el sistema de tuberías, los cuales se encuentran en la tabla 15. Estos datos corresponden a una tubería de PVC de ½ in de diámetro.[28]

Tabla 6. Coeficientes de pérdidas de accesorios

Tubería de PVC de 1/2"	
Accesorio	Coefficiente
Codo regular de 90°	2
Te (flujo de línea)	0,9
Te (flujo de rama)	2,4

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Ecuación 4. Ecuación de pérdidas por accesorios

$$h_M = K * \frac{v^2}{2 * g}$$

A partir de la ecuación previa se obtienen las pérdidas menores de las cinco secciones de la tubería:

$$h_{M_1} = 2,0573 [m]$$

$$h_{M_2} = 0,4243 [m]$$

$$h_{M_3} = 0,0651 [m]$$

$$h_{M_4} = 0,0289 [m]$$

$$h_{M_5} = 0,0161 [m]$$

Una vez se tienen estos cálculos, se obtienen los valores de pérdidas totales de cada sección (h_s) por medio de la ecuación 5, la cual emplea las pérdidas halladas previamente y la diferencia de altura (h) entre el principio y el final de la sección.

Ecuación 5. Cálculo de pérdidas totales

$$h_s = h_L + h_M + h$$

$$h_{s_1} = 5,1148 [m]$$

$$h_{s_2} = 0,9193 [m]$$

$$h_{s_3} = 0,3624 [m]$$

$$h_{s_4} = 0,1745 [m]$$

$$h_{s_5} = 0,0596 [m]$$

Finalmente, a partir de la ecuación 6, se calcula la potencia necesaria para desplazar el fluido en cada sección. Para ello se emplean los valores de pérdidas totales (h_s) y caudal (Q) correspondientes, dependiendo de la sección sobre la cual se está trabajando, además de la densidad del fluido y la aceleración gravitacional, que permanecen constantes en todo el sistema y sus valores son indicados en la tabla 5.

Ecuación 6. Cálculo de potencia hidráulica por sección

$$W = \rho * Q * g * h_T$$

$$W_1 = 34,3584 [W]$$

$$W_2 = 3,08762 [W]$$

$$W_3 = 0,91300 [W]$$

$$W_4 = 0,29312 [W]$$

$$W_5 = 0,05001 [W]$$

A partir de este proceso, se obtiene la potencia mínima requerida por el sistema para impulsar el fluido a través de la tubería utilizando la ecuación 7.

Ecuación 7. Cálculo de la potencia hidráulica mínima del sistema

$$\dot{W}_T = \dot{W}_1 + 2 * (\dot{W}_2 + \dot{W}_3 + \dot{W}_4 + \dot{W}_5)$$

$$W_T = 43,9461 [W]$$

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para la bomba. Todas las bombas consideradas en esta selección tienen un rango de temperaturas de trabajo que les permite operar con normalidad en la región donde se lleva a cabo la implementación final del sistema y poseen tanto una potencia mayor a la calculada como una cabeza superior al equivalente de altura resultante del cálculo de las pérdidas totales en las tuberías.

Caudal: Entre más caudal posea la bomba al trabajar en condiciones de pérdidas similares a las calculadas, mayor será su calificación. Un menor tiempo de trabajo puede incidir positivamente en el consumo energético del elemento, requiriendo menos energía.

Según los cálculos, para llenar dicha zona en un lapso de tiempo de 20 minutos se requiere un caudal de 0,68 L/s, aproximadamente; si el caudal de la bomba es cercano o muy superior a este valor tendrá buena calificación.

Alimentación DC: Si la bomba contemplada en el proceso de selección puede ser alimentada por corriente directa, esta obtiene una calificación positiva en este criterio. Esto se debe a que no requieren de un elemento adicional que transforme la energía almacenada en las baterías en corriente alterna, reduciendo así tanto las pérdidas de energía como el costo.

Consumo eléctrico: Debido a que el sistema es alimentado por la energía proveniente de un sistema generador autónomo de energía renovable, la cual depende de las características climatológicas de la zona, es importante reducir o limitar el consumo eléctrico. Por esta razón, en el proceso de selección se consideró que entre menor fuera el consumo eléctrico del elemento, mayor calificación obtendría.

Costo: Según el costo de adquisición de la bomba se define la calificación de este criterio, siendo los menores precios los que obtienen mayor calificación.

Tabla 7. Selección de la bomba

Selección de bomba								
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación						
		Barnes BE 1 5-1 HF	Pedrollo PKm 60	Barnes CE 1 2-1	Aqua Pak AP-5XP-1127	Pedrollo PQm60	Taifu QB60-DC	BLDC DC80E-1280
Caudal	30	2,5	3	5	2,8	3	2,3	3,5
Alimentación DC	5	1	1	1	1	1	5	5
Consumo eléctrico	40	3,5	2,8	2	2,3	2,8	4,5	5
Costo	25	5	4,1	3,5	4,8	4,3	2,8	3,3
Puntuación Total		3,45	3,095	3,225	3,01	3,145	3,44	4,125
Rango		2	6	4	7	5	3	1
¿Continua?		Tal vez	No	No	No	No	Tal vez	Si

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

A partir de esta selección, se concluye que la bomba BLDC presenta características más afines a los requerimientos del proyecto. En la siguiente tabla se encuentran sus características principales.

Tabla 8. Características de la bomba seleccionada

Parámetro		BLDC DC80E-1280
Nombre	Unidad	
Caudal máximo	L/min	77
Temperatura máxima	°C	100
Cabeza	m	11
Potencia consumida	W	120,0
Potencia entregada	W	48,9
Eficiencia	-	0,41
Caudal (H = 7 m)	L/min	43
Precio	COP	\$503.600

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.5 SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDO

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para este elemento.

Temperatura de trabajo: Es el rango de temperatura en el cual el sensor puede dar lecturas confiables. Si está dentro del rango de temperatura ambiente y algo superior al de la temperatura de La Guajira tendrá una calificación alta.

Tipo de funcionamiento: El principio físico que usa el sensor en la detección del fenómeno y la forma en que es representada esta señal tendrá repercusión en la

facilidad o adaptabilidad del sensor en el sistema. Si funciona con un método no intrusivo, genera un beneficio en cuanto al montaje en el sistema; si es mecánico puede generar un desgaste más rápido. Si la señal de datos es binaria (1 o 0) o si es análoga. Estos factores de funcionamiento determinan que tan conveniente sea el uso en el sistema.

Precio: Según el costo de adquirir el sensor se define la calificación siendo los menores precios los que obtengan mayor calificación.

Uso industrial: Debido a que se necesita el uso constante del sensor en el tanque de agua, se necesita que el sensor sea robusto ante las condiciones, si es así tendrá una buena calificación.

Tabla 9. Selección de sensor de nivel de líquido

Selección de sensor de Nivel de líquido						
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación				
		Liquid Level SwitchOptomax DigitalLLC200D3SH-LLPK1	Sensor ultrasónico UB1000-18GM75-I-V15	Sensor ultrasónico UMB800-18H40-I-2M-FA	Sensor Detector De Nivel Capacitivo Sin Contacto Xkc-y25-v	Sensor De Nivel Interruptor Flotador Acero Inoxidable Doble
Temperatura de trabajo	20	4	4,5	4,5	4	4
Tipo de funcionamiento	25	4	5	5	4,5	3,5
Precio	30	3,5	1,4	1	4,8	4
Uso industrial	25	3,9	5	5	4	4,2
Puntuación Total		3,825	3,82	3,7	4,365	3,925
Rango		3	4	5	1	2
¿Continúa?		No	No	No	Sí	Tal vez

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.6 MOTOR DEL MEZCLADOR

Para calcular los parámetros del motor del mezclador se parte de la ecuación para determinar la potencia necesaria en el mezclado. En el libro *Manual del mezclado industrial*[29] se encuentra una fórmula para determinar esta potencia relacionando la densidad del fluido, la velocidad del mezclador, el diámetro del mezclador y el número de potencia; este último es un factor similar al coeficiente de arrastre ya que depende de la geometría del agitador del mezclador y los Reynolds. La ecuación mencionada es la siguiente:

$$P = C_d \rho N^3 D^5$$

Donde:

P = Potencia del mezclador en watts.

C_d = Número de potencia (adimensional).

ρ = densidad del fluido en Kg/m³.

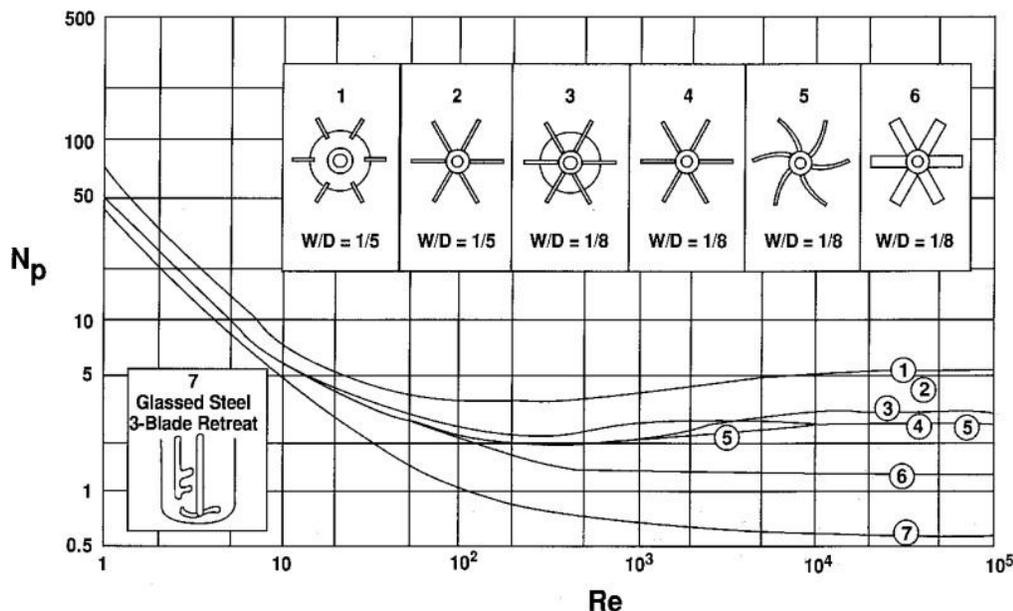
N = Velocidad angular del agitador en rev/s.

D = Diámetro del agitador en metros.

La densidad del fluido a mezclar equivale a la del agua; durante el proceso de mezclado se adiciona al agua químicos para controlar el pH y los nutrientes, pero estos químicos se adicionan en proporciones muy pequeñas lo que permite despreciar estas densidades y evaluar propiamente la densidad del agua. La densidad del agua depende de la temperatura, que en la región de La Guajira en donde se realiza la implementación del sistema hidropónico presenta una media anual superior a los 28 °C (ver condiciones climáticas en anexo 8.1). Según la información de la tabla de agua saturada del libro *Mecánica de fluidos* [30], la densidad del agua a 30°C es de 996 Kg/m³ y su viscosidad dinámica es 0,000798 kg/m-s.

El número de potencia como se mencionó antes es un coeficiente que depende de la geometría del agitador en aspectos como el alto de las aspas, el número de aspas, el ángulo de inclinación de dichas aspas, el diámetro del agitador y su altura con respecto al fondo del tanque. Estos aspectos forman una función del valor del número de potencia que se observa a través del cambio de Reynolds del fluido como variable independiente. Para obtener el valor del número de potencia con estos factores mencionados se pueden deducir ecuaciones a partir de curvas ya creadas a través de pruebas experimentales. Por esto, para elegir el número de potencia correspondiente al contexto del sistema hidropónico se visualiza la siguiente imagen donde se muestra el comportamiento de este número de potencia respecto a la variación de los Reynolds:

Figura 17. Números de potencia de agitadores según el número de Reynolds



Fuente P. Edward, A. Victor, S. Kresta (2024) Handbook of industrial mixing

Se observa en la figura 17 que las curvas del número de potencia a razón de los Reynolds tienden a un valor constante en el régimen turbulento con un alto número de Reynolds. Por esta razón, se calcula los Reynolds del agua a mezclar:

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido; se supone una velocidad de 100 rpm y un diámetro de 35 cm. Se reemplazan los valores y se obtienen los Reynolds:

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \rightarrow Re = \frac{(996 \text{ Kg}/\text{m}^3)(100 \text{ rev}/\text{s})(0,35 \text{ m})^2}{0,000798 \text{ Kg}/\text{m} - \text{s}} \rightarrow Re = 254824,6$$

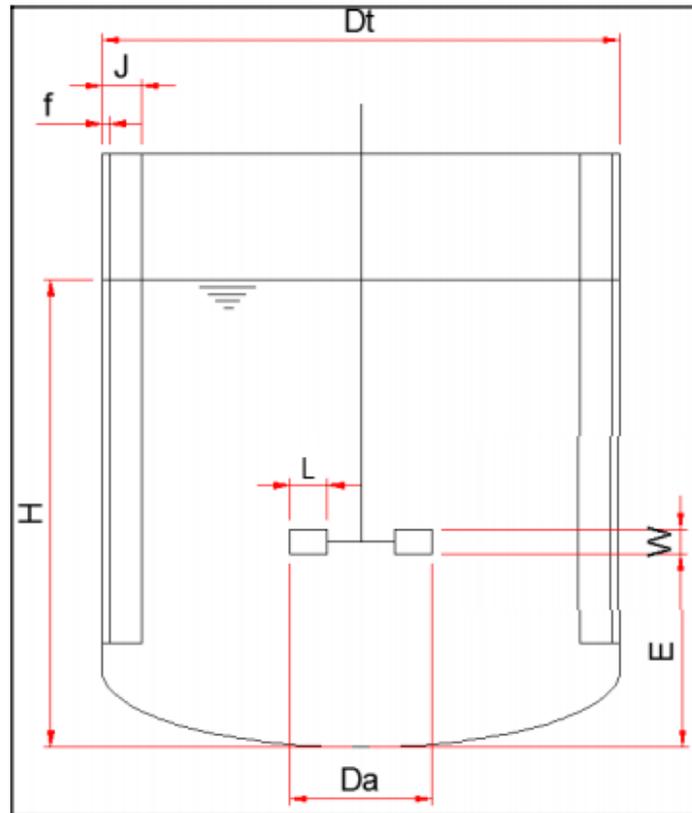
Como la viscosidad cinemática del agua es muy baja, así se varíe la velocidad del agitador y el diámetro del mismo, a menos que se incrementen de forma exagerada estos valores, los Reynolds se mantendrán en un valor alto donde el número de potencia tiende a ser constante.

Para determinar la forma o tipo de mezclador según la lógica se escogería el mezclador con menor número de potencia que según la figura 17 corresponde a los mezcladores 6 y 7 o incluso usar mezcladores con formas más hidrodinámicas en forma de hélice o las llamadas *hydrofoil*. Pero el consumo energético no depende solamente de la potencia instantánea consumida, también hay que tener en cuenta el tiempo en que el motor estará en funcionamiento para conocer el consumo a lo largo del tiempo o tiempo de mezclado.

Para esto se realizan diferentes simulaciones con el software *Comsol* que usando una librería del programa llamada *mixer* se puede tener una noción de cuál será el tiempo de mezclado.

Para la simulación se define la geometría del tanque. Se usa un tanque de un metro cubico de capacidad con dimensiones mostradas en el anexo 8.5 que para la simulación se usan medidas aproximadas de las reales con 1 metro de diámetro y 1 metro de altura. Se ingresa también la viscosidad dinámica del fluido, su densidad y la velocidad a la cual estará sometido el mezclador. Una vez se han ingresado los datos anteriores, se selecciona el tipo de mezclador y se configura su geometría.

Figura 18. Configuración estándar de un sistema de mezclado



Fuente U. Vladimir (2013) Diseño y cálculo de un agitador de fluidos

Las proporciones geométricas para un sistema estándar de mezclado según las distancias nombradas en la figura 18 son [31] :

$$\frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{3} \qquad \frac{E}{D_A} = 1 \qquad \frac{H}{D_T} = 1$$

$$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{5} \qquad \frac{J}{D_T} = \frac{1}{12} \qquad \frac{L}{D_A} = \frac{1}{4}$$

Donde:

D_A = Diámetro del agitador.

D_T = Diámetro del tanque.

E = Altura del agitador con respecto al fondo del tanque.

H = Altura del líquido.

W = Ancho de las aspas del agitador

J = Ancho de la placa deflectora o *baffle*.

L = Longitud del aspa.

Con las proporciones geométricas estándar de un sistema de mezclado ya conocidas se calculan las dimensiones del agitador con las aproximaciones de las dimensiones del tanque a utilizar de 1m de alto y 1 metro de diámetro:

El diámetro del agitador es el diámetro del círculo que se forma desde el centro del eje como origen hasta el extremo del aspa.

$$\begin{aligned} \frac{D_A}{D_T} = \frac{1}{3} &\rightarrow \frac{D_A}{1\text{ m}} = \frac{1}{3} &\rightarrow D_A = 0,33\text{ m} \\ \frac{E}{D_A} = 1 &\rightarrow E = D_A &\rightarrow E = 0,33\text{ m} \\ \frac{H}{D_T} = 1 &\rightarrow H = D_T &\rightarrow H = 1\text{ m} \\ \frac{W}{D_A} = \frac{1}{5} &\rightarrow \frac{W}{0,33\text{ m}} = \frac{1}{5} &\rightarrow W = 0,066\text{ m} \\ \frac{L}{D_A} = \frac{1}{4} &\rightarrow \frac{L}{0,33\text{ m}} = \frac{1}{4} &\rightarrow L = 0,0825\text{ m} \end{aligned}$$

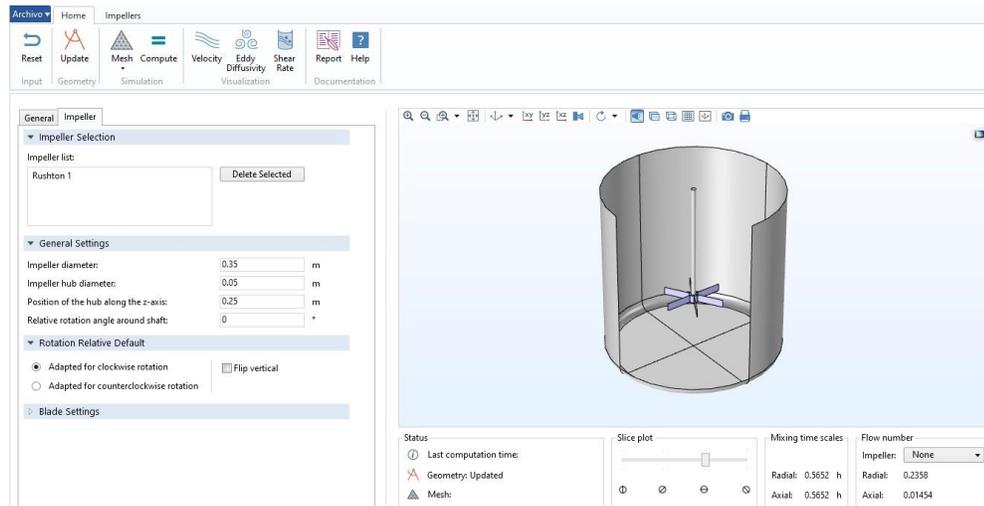
Cabe aclarar que de acuerdo a que el tanque a usar en la implementación es un tanque de almacenamiento de agua plástico comercial, este tanque no es un cilindro regular por lo que no se considera el uso de placas deflectoras o *baffles*. Otro aspecto a considerar es la medida de la longitud del aspa L que solo es usado para agitadores Rushton o de disco como el mostrado en la figura 18; para los agitadores que no son de disco, la longitud del aspa es igual al diámetro del agitador.

El número de potencia como se ve en la figura 17 se ve que disminuye si se usa un ancho de aspa menor. En lugar de usar $W = D_A/5$ se usa $W = D_A/8$ y se baja considerablemente el valor del número de potencia. Por esto se calcula de nuevo el valor del ancho del aspa:

$$\frac{W}{D_A} = \frac{1}{5} \rightarrow \frac{W}{0,33\text{ m}} = \frac{1}{8} \rightarrow W = 0,04125\text{ m}$$

Teniendo en cuenta las medidas calculadas para dimensionar los componentes del mezclador se ingresan estos datos en el software mencionado *Comsol* y se prueban diferentes geometrías de agitadores y cómo influyen en el tiempo de mezclado y la potencia requerida:

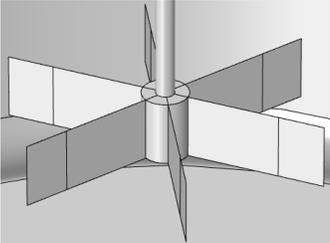
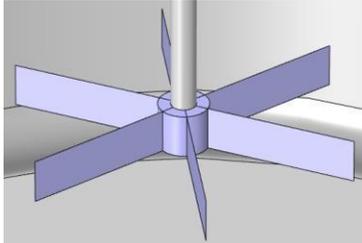
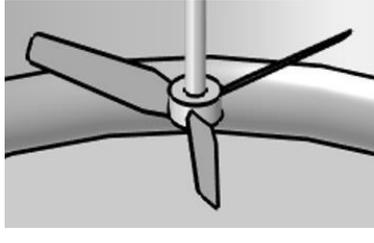
Figura 19. Interfaz de la aplicación de mezclado de Comsol

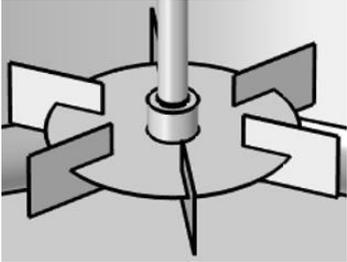
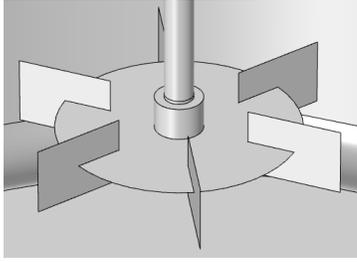
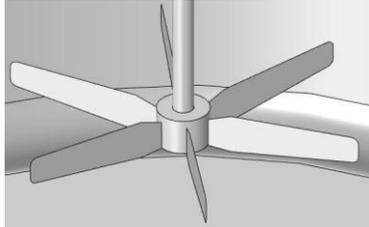


Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

A continuación, se muestran los resultados de diferentes opciones que se tuvieron en cuenta para la selección del agitador con diferentes velocidades:

Tabla 10. Energía consumida según geometría del agitador

Opción 1:	Opción 2:	Opción 3:
		
<p>Agitador de flujo radial $W = D_A/5$ Velocidad del agitador: 128 rpm $C_d = 5,2$ Potencia = 264,1 W Tiempo de mezclado = 0,3751 horas Energía: 99,0663417 Wh</p>	<p>Agitador de flujo radial $W = D_A/8$ Velocidad del agitador: 100 rpm $C_d = 3,7$ Potencia = 89,6 W Tiempo de mezclado = 0,5652 horas Energía: 50,64 Wh</p>	<p>Agitador de flujo axial de aspas a 45° de inclinación Velocidad del agitador: 128 rpm $C_d = 1,3$ Potencia = 66,02 W Tiempo de mezclado = 1,5314 horas Energía: 101,11 Wh</p>

Opción 4:	Opción 5:	Opción 6:
 <p>Agitador de flujo radial de disco $W = D_A/5$ Velocidad del agitador: 128 rpm $C_d = 5,2$ Potencia = 264,1 W Tiempo de mezclado = 0,3855 horas Energía: 101,81 Wh</p>	 <p>Agitador de flujo radial de disco $W = D_A/5$ Velocidad del agitador: 180 rpm $C_d = 5,2$ Potencia = 734,4575 W Tiempo de mezclado = 0,3855 horas Energía: 283,13 Wh</p>	 <p>Agitador de flujo radial de aspas a 45° de inclinación Velocidad del agitador: 128 rpm $C_d = 1,3$ Potencia = 187,92 W Tiempo de mezclado = 0,7338 horas Energía: 138,64 Wh</p>

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

De la tabla 10 se selecciona la opción 2 por ser la opción que consume menos energía para realizar el mezclado de las opciones evaluadas.

La potencia fue calculada de la siguiente manera:

$$P = C_d \rho N^3 D^5 \rightarrow P = (3,7) (996 \text{ Kg}/\text{m}^3) (100 \text{ rev}/\text{s})^3 (0,35 \text{ m})^5 \rightarrow P = 89,6 \text{ W}$$

La energía es calculada en watts hora y es calculada multiplicando la potencia del agitador con las horas de uso.

$$Ene = P * t \rightarrow Ene = (89,6 \text{ w})(0,5652 \text{ h}) \rightarrow Ene = 50,64 \text{ w h}$$

Como ya se tiene la potencia mecánica, se calcula el torque mínimo necesario que debe tener el motor dividiendo la potencia en la velocidad angular:

$$r = \frac{P}{w} \rightarrow r = \frac{89,6 \text{ w}}{10,47 \text{ rad}/\text{s}} \rightarrow r = 8,55 \text{ Nm}$$

La potencia calculada anteriormente es la potencia mecánica que requiere el agitador para realizar el proceso de mezclado, ahora se calcula la potencia eléctrica que consume el motor que transmite el movimiento al agitador. Para esto se tiene en cuenta una eficiencia de 65% que es una eficiencia bastante común en

motorreductores comerciales. También se aumenta la potencia un 30% por diferentes pérdidas no contempladas como las generadas por fricción:

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta} \times 1,3 \rightarrow P_{elec} = \frac{89,6 \text{ w}}{0,65} \times 1,3 \rightarrow P_{elec} = 179,21 \text{ W}$$

Con la opción 2 seleccionada en la geometría del agitador en la tabla 10 y los parámetros como potencia eléctrica y torque calculados se crea la siguiente tabla de requerimientos para este agitador con diferentes velocidades teniendo en cuenta la variedad de motores en el mercado:

Tabla 11. Características requeridas para el mezclado

CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS			
Nombre	Velocidad de trabajo	Valor	Unidad
Potencia mínima consumida	a 100 rpm y $C_d = 3,7$	180	W
		0,241	HP
Potencia mínima consumida	a 120 rpm y $C_d = 3,7$	310	W
		0,416	HP
Potencia mínima consumida	a 160 rpm y $C_d = 3,7$	734	W
		0,984	HP
Torque mínimo	a 100 rpm y $C_d = 3,7$	8,55	Nm
Torque mínimo	a 120 rpm y $C_d = 3,7$	12,32	Nm
Torque mínimo	a 160 rpm y $C_d = 3,7$	21,90	Nm

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Como las velocidades que se evaluaron para realizar el mezclado se encuentran en un rango entre 100 y 200 rpm se decide usar un motorreductor para conseguir estas bajas velocidades.

En el mercado se puede encontrar diferentes opciones que pueden satisfacer los requerimientos de diseño. Por esto se hace una tabla de selección con diferentes motoredutores encontrados en el mercado. Las características individuales de los motores investigados se encuentran en el anexo 8.4.

Definición de los criterios de selección:

- Potencia consumida (W): La potencia eléctrica del motorreductor tiene que ser mayor a la potencia necesitada. En la tabla 11 se encuentra la información de la potencia mínima requerida y en el anexo 8.4 se muestra la potencia de cada motorreductor. Teniendo en cuenta estos datos, si la potencia del motor no supera la mínima necesaria entonces se calificará con un valor bajo; de lo contrario, si cumple con la potencia mínima se le asigna un valor alto.

- Torque: Es importante que el torque máximo que entrega el motorreductor esté por encima del torque mínimo calculado. De lo contrario el motorreductor puede presentar fallas en el funcionamiento. Por esto, con el torque mínimo necesario mostrado en la tabla 11 y los torques máximos de cada motor mostrados en el anexo 8.4 se califica con un valor alto si satisface el torque mínimo; de lo contrario se califica con un valor bajo.
- Alimentación DC: Debido a que el sistema de alimentación energético que se usa para proveer de energía eléctrica al sistema ofrece una salida de corriente directa, para evitar la compra de componentes de inversión de corriente se prioriza los motorreductores que consumen corriente directa con una alta calificación. De lo contrario se califica con un puntaje bajo.
- Precio: Se califican con altos puntajes a los motorreductores con un precio menor y lo contrario a los que presenten precios más elevados

Tabla 12. Selección del motor del mezclador

Selección de motor del mezclador								
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación						
		EXH - 51K60GN	EXH- 51K90GU	41K30GN	PBS90N250- 234 RR25	PBS90N250- 234 RR30	PBS90N120- 232 RR30	NORD sinfin corona
Alimentación DC	10	1	1	1	5	5	5	1
Potencia eléctrica mínima	40	1	1	1	5	5	1	1
Torque	30	1	5	1	4	5	5	1
Costo	20	4	3,7	4,4	4,4	4,4	5	1
Puntuación Total		1,6	2,74	1,68	4,58	4,88	3,4	1
Rango		6	4	5	2	1	3	7
¿Continua?		No	No	No	Tal vez	Si	No	No

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

De acuerdo a los cálculos realizados y la selección de diferentes motoredutores se decide utilizar el motorreductor PBS90N250-234 RR30 cuyas características se muestran a continuación:

Tabla 13. Características del motor seleccionado

PBS90N250-234 RR30		
Nombre	Valor	Unidad
Voltaje	24	VDC
Corriente con carga	16,00	A
Potencia de salida	250	W
Potencia consumida	384	W
Eficiencia	0,65	-
Torque	15,7	N.m
Diámetro de eje	15	mm
longitud del eje	34,5	mm
Velocidad de salida	100	rpm
Precio	\$325.500	COP

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.7.7 CONTROLADOR

A continuación, se describen los criterios de selección planteados para este elemento.

Memoria: El controlador debe ser capaz de almacenar el programa almacenado. También una capacidad de memoria volátil que permita procesar toda la información necesaria sin retrasos en la ejecución. Por esto, si el controlador posee una amplia capacidad de memoria ROM y RAM tendrá buena calificación.

Rango del voltaje de alimentación: El criterio tendrá una buena calificación si el voltaje de alimentación tiene un rango amplio y es un voltaje estándar en la automatización (12v, 24v)

Entradas y salidas: Entre más entradas y salidas tenga el controlador tendrá una mayor calificación, esto considerando evitar el uso de algún módulo de expansión por la cantidad de sensores y actuadores que tendrá el sistema.

Robustez: Se define con buena calificación si el controlador tiene características que le permita tener resistencias ante el ambiente que estará expuesto; también si posee con protecciones internas contra fallas eléctricas.

Costo: Según el costo de adquirir el sensor se define la calificación siendo los menores precios los que obtengan mayor calificación.

Tabla 14. Selección del controlador

Selección de Controlador				
Criterios de selección	Peso [%]	Calificación		
		PLC LOGO!	Raspberry Pi 4	Arduino MEGA2560
Memoria	10	3,5	4,5	4
Rango del voltaje de alimentación	20	3,8	3,8	3
# Entradas y salidas (Análogicas y digitales)	15	3,5	4,5	4
Robustez	30	5	3	3
Costo	25	4	4,5	4,8
Puntuación Total		4,135	3,91	3,7
Rango		1	2	3
¿Continua?		Si	No	No

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.8 DISEÑO DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

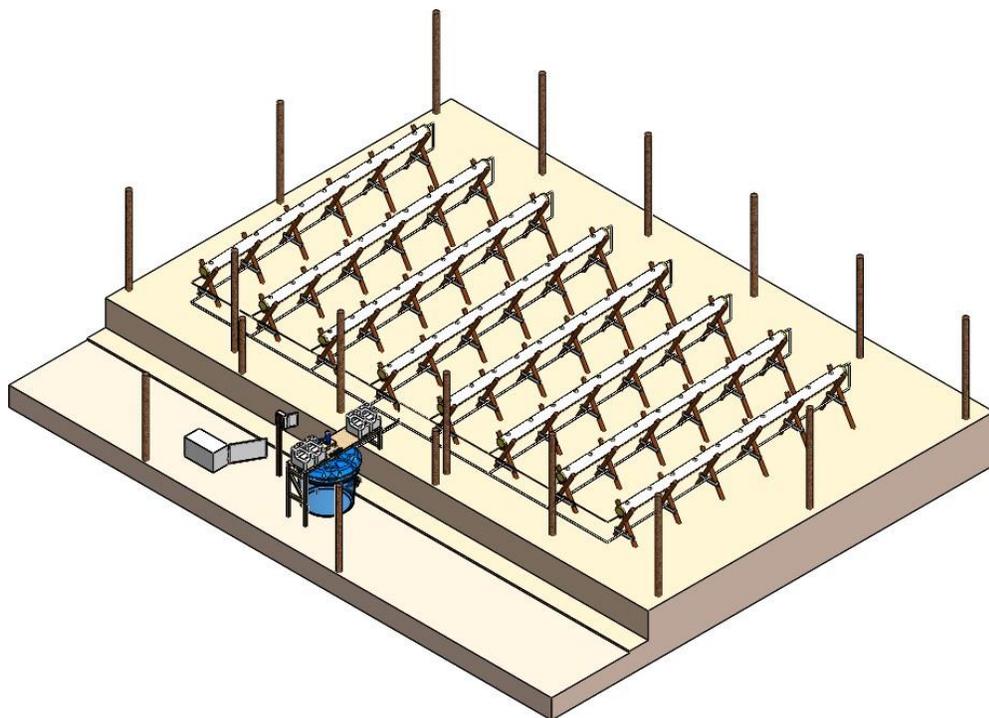
5.8.1 DISEÑO CAD DEL SISTEMA

A continuación, se presenta el diseño CAD del sistema hidropónico automatizado a instalar en el departamento de La Guajira contemplando todos los subsistemas que lo conforman, los cuales son: la zona de cultivo, el subsistema de acondicionamiento del agua, el subsistema eléctrico, el subsistema de riego y el subsistema de control.

La zona de cultivo está conformada por ocho tubos de PVC, cada uno con capacidad de albergar diez plantas. Este subsistema posee una inclinación cercana a 3° con respecto al suelo para asegurar que el agua que ingresa al mismo regresa al tanque de dosificado del cual proviene. Sin embargo, el vaciado de los tubos de PVC no debe ser inmediato, por ello se implementa una válvula a la salida de este subsistema, de tal manera que reduzca el flujo de retorno al tanque de dosificado.

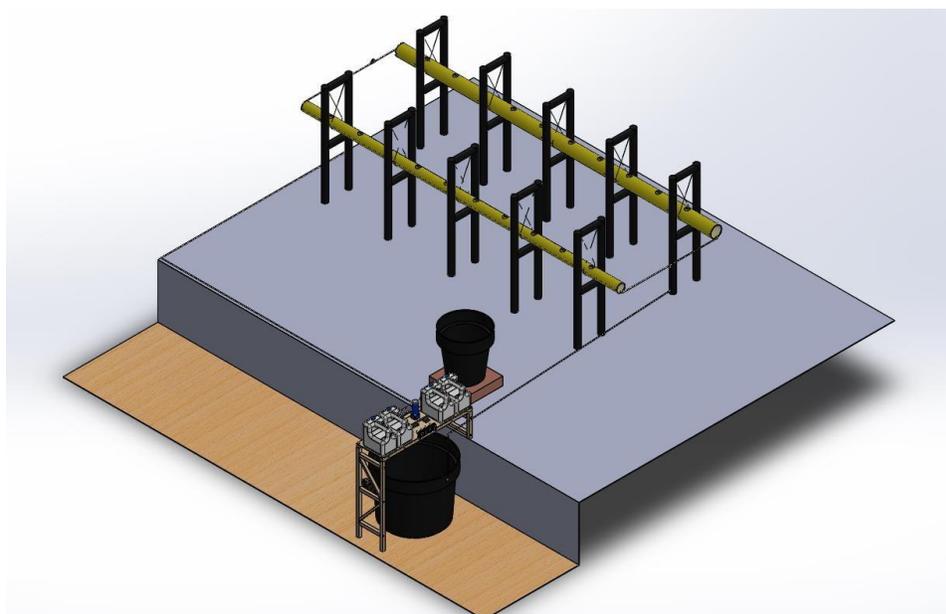
En el subsistema que contempla el tanque de dosificado se realiza la mezcla del agua proveniente del sistema de desalinización con las soluciones nutritivas y sustancias reguladoras de pH almacenadas en la parte superior del tanque de dosificado. Estos compuestos son añadidos al agua, por medio de bombas peristálticas, en las cantidades necesarias para regular sus características a partir de la información obtenida por el sensor de pH y el sensor de conductividad eléctrica, ambos dispuestos en la pared interior del tanque de dosificado.

Figura 20. Vista en perspectiva del sistema hidropónico automatizado en La Guajira



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 21. Vista en perspectiva del sistema hidropónico automatizado en Santander

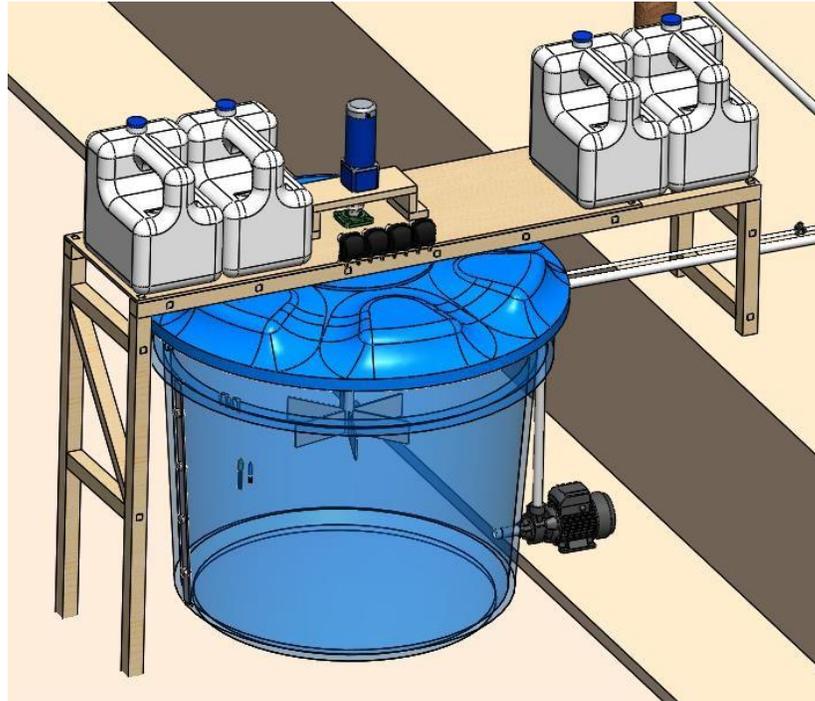


Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Para propiciar la homogeneidad de la mezcla y asegurar la correcta medición de las características del agua con nutrientes a enviar a la zona de cultivo, se implementa

un mezclador en la parte superior del tanque, tal como se aprecia en la figura 22. [32]

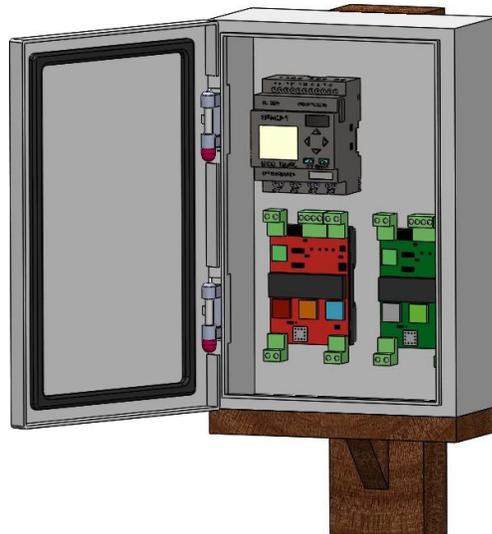
Figura 22. Subsistema correspondiente al tanque de dosificado y bomba centrífuga



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

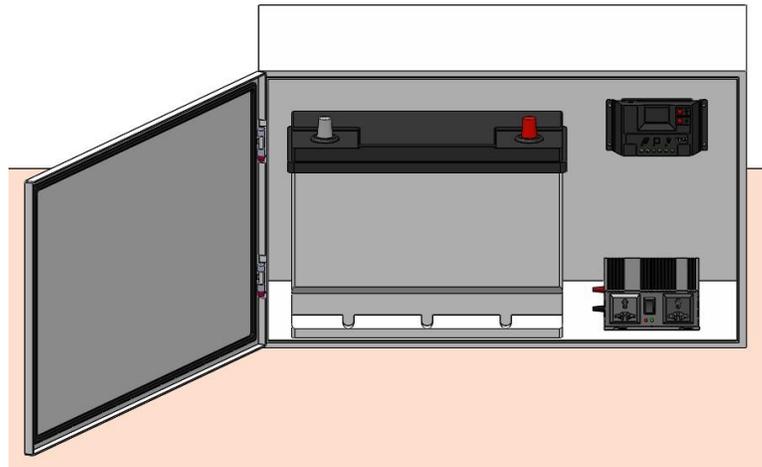
En la figura 23 se presenta el PLC encargado de controlar el sistema hidropónico y los transmisores correspondientes a los sensores de pH y conductividad eléctrica. Estos tres elementos se instalan dentro de un contenedor metálico que los protege del medio. De igual manera, los elementos que conforman el subsistema eléctrico: el inversor, el regulador de carga y la batería, se ubican dentro de una caja de protección eléctrica; esto se puede observar en la figura 24.

Figura 23. PLC y transmisores de pH y conductividad eléctrica



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

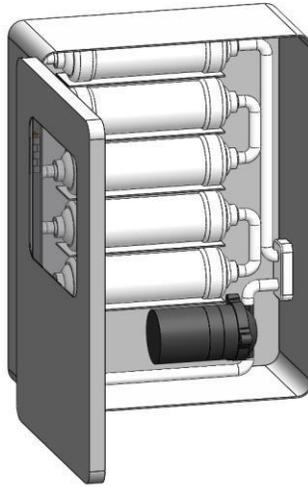
Figura 24. Subsistema eléctrico



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

En cuanto al proceso de desalinización, imprescindible debido a las características que posee el agua presente en la comunidad Wayúu, se plantea un sistema de desalinización por ósmosis inversa, el cual está conformado por una serie de filtros encargados de eliminar partículas sólidas y sustancias orgánicas del agua. Adicionalmente, el sistema cuenta con membranas de ósmosis inversa, las cuales eliminan las bacterias y las sales disueltas; para realizar esta etapa es fundamental que el agua ingrese con una presión superior a la atmosférica, haciendo necesario el uso de una bomba. En la figura 25 se puede apreciar una representación gráfica del sistema en cuestión.

Figura 25. Sistema de desalinización basado en ósmosis inversa



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

5.8.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA DE LA ZONA DE CULTIVO

Para evaluar la viabilidad de la estructura diseñada para soportar los contenedores de cultivo, así como los tubos destinados a cumplir esta función, se realiza un análisis estático de ambos elementos.

Los cálculos para determinar la fuerza aplicada en la simulación, las propiedades de los materiales y el proceso de convergencia de malla, con el cual se evaluó el comportamiento de los esfuerzos máximos de Von Mises resultantes al refinar el mallado, se encuentran en el anexo 8.6.

En el caso de los tubos de cultivo, se contempló el peso del sustrato contenido dentro de estos y de un volumen de agua igual al volumen interno total de los tubos de 8 in de diámetro; esta es una situación extraordinaria, ya que la zona de cultivo nunca se llenará de agua en su totalidad.

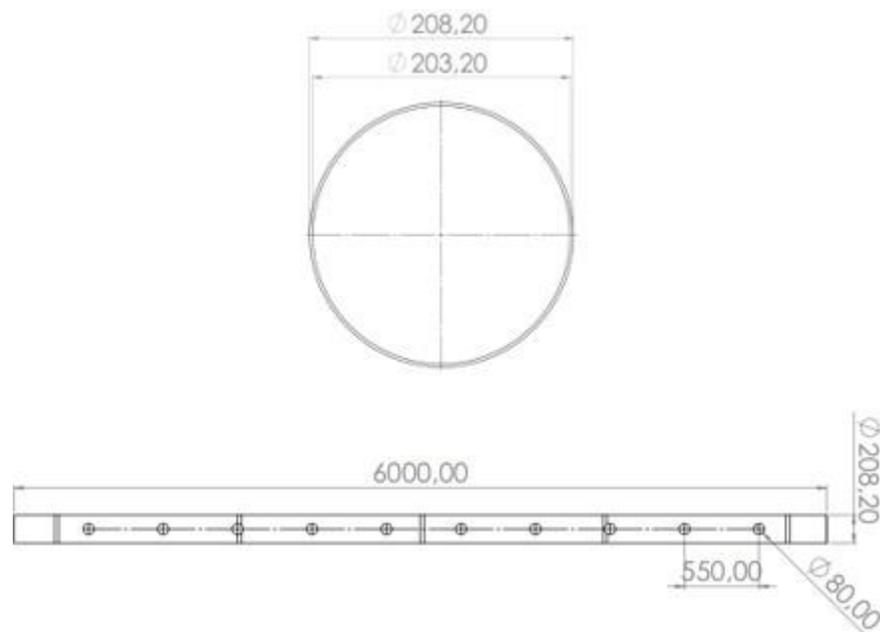
Las propiedades de la malla correspondiente al tubo de cultivo (figura 27), conformada por elementos triangulares, se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 15. Descripción de la malla del tubo de cultivo

Puntos jacobianos para malla de alta calidad	4 Puntos
Tamaño de elementos	20 mm
Tolerancia	1 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	118798
Número total de elementos	59353
Cociente máximo de aspecto	32,564
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	2,11
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	1,92
Porcentaje de elementos distorsionados	0

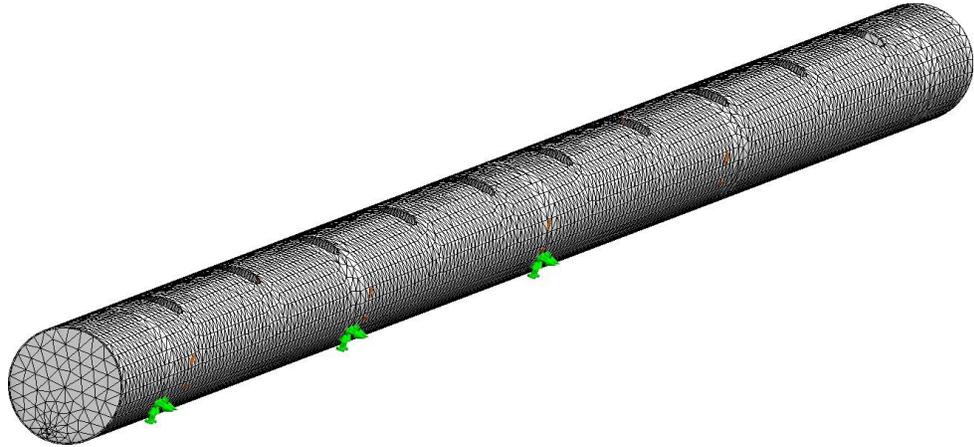
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 26. Dimensiones del tubo de cultivo en vista frontal y superior



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

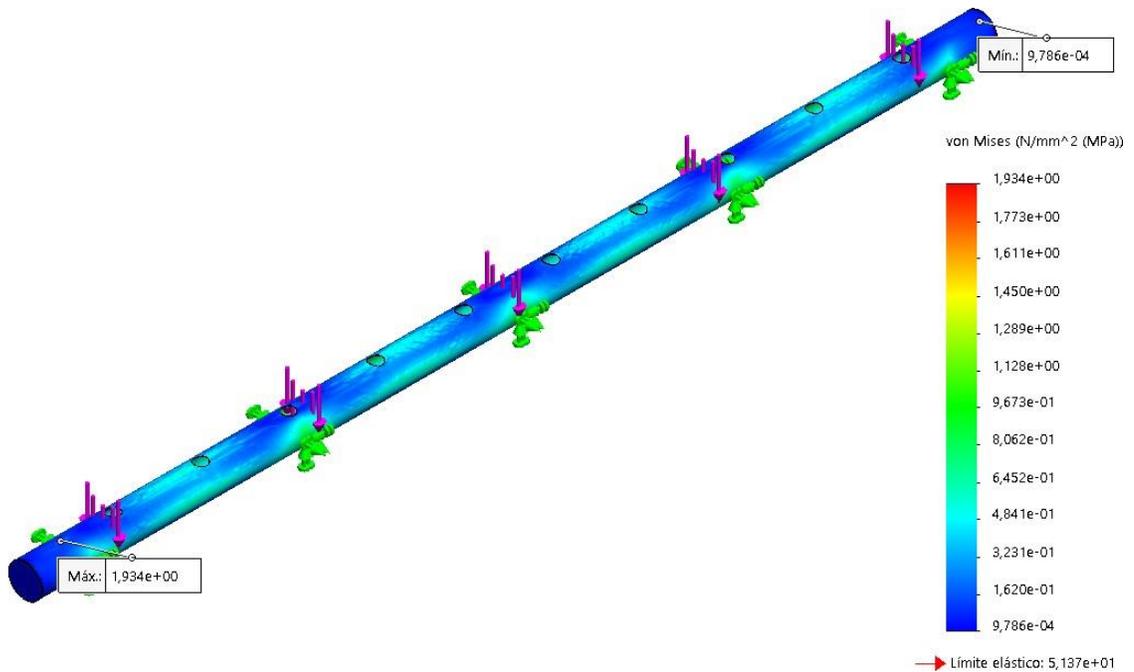
Figura 27. Malla del tubo de cultivo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Al realizar el proceso de mallado, definir sujeciones en las áreas de contacto en las cuales el tubo reposa sobre las estructuras que lo soportan y distribuir el peso contemplado (20173,134 N) a lo largo de la cara inferior interna del tubo, se obtienen valores de esfuerzos máximos de Von Mises equivalentes a 1,934 MPa, los cuales son bastante inferiores al límite elástico del material de 51,37 MPa.

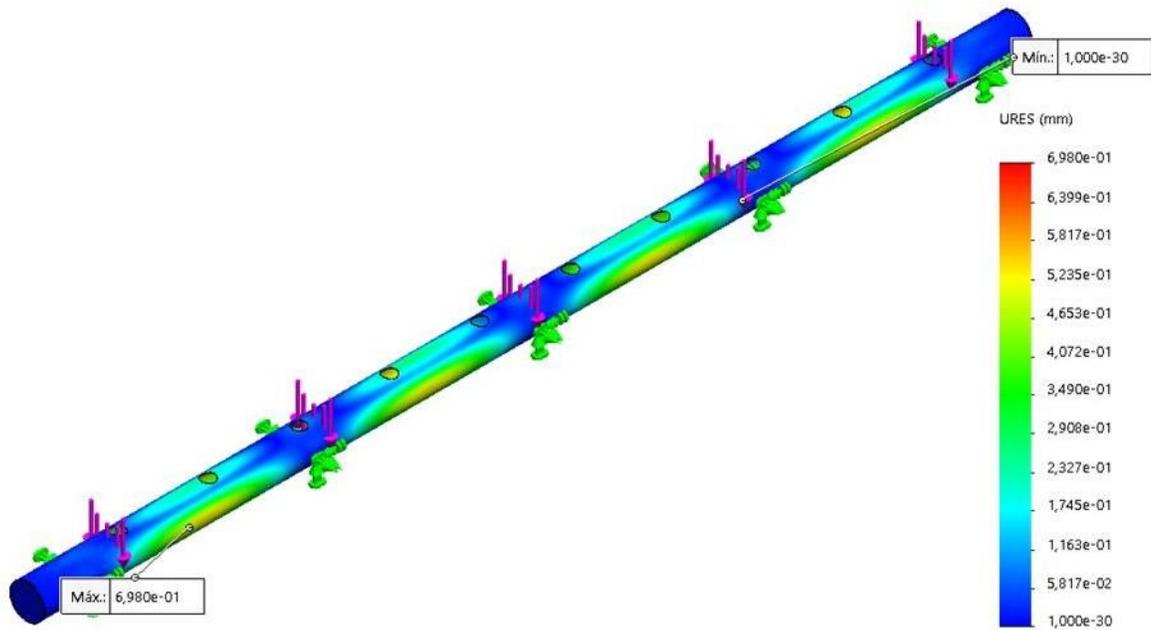
Figura 28. Simulación de esfuerzos de Von Mises en el tubo de cultivo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Al verificar los desplazamientos ligados a la deformación del tubo de cultivo al ser sometido a la carga en cuestión, se aprecia que las zonas donde los efectos de flexión son más notorios corresponden a los puntos intermedios entre una estructura de soporte y otra. Aún así, cabe destacar que dichos efectos son casi despreciables, observándose variaciones máximas de 0,698 mm.

Figura 29. Simulación de desplazamiento del tubo de cultivo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Posterior al análisis de los contenedores de cultivo, se procede a realizar el mismo proceso con la estructura de soporte. Esta se somete al peso previamente calculado, dividido en los cinco soportes que posee cada contenedor y concentrado en las áreas en donde se sujetan los alambres encargados de sostener el tubo de cultivo.

Las propiedades de la malla de elementos triangulares correspondiente a este análisis (figura 30) se pueden apreciar en la siguiente tabla:

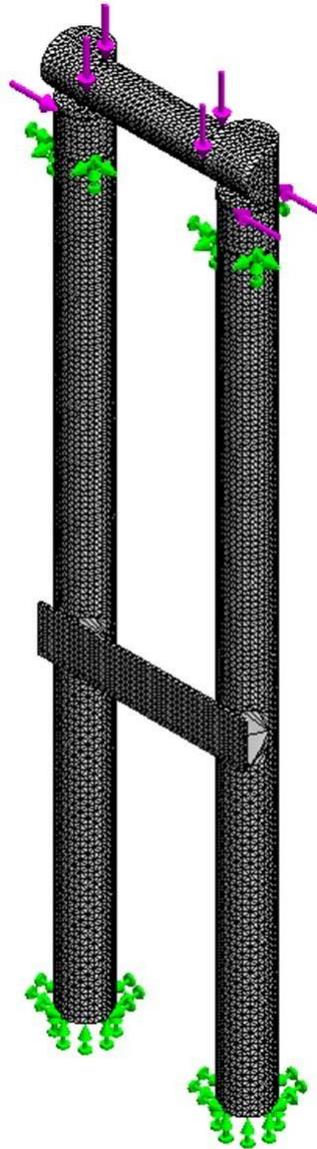
Tabla 16. Descripción de la malla de la estructura de soporte de los tubos de cultivo

Puntos jacobianos para malla de alta calidad	4 Puntos
Tamaño de elementos	16 mm
Tolerancia	0,8 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	87117
Número total de elementos	56214
Cociente máximo de aspecto	8,4913
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99,2
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

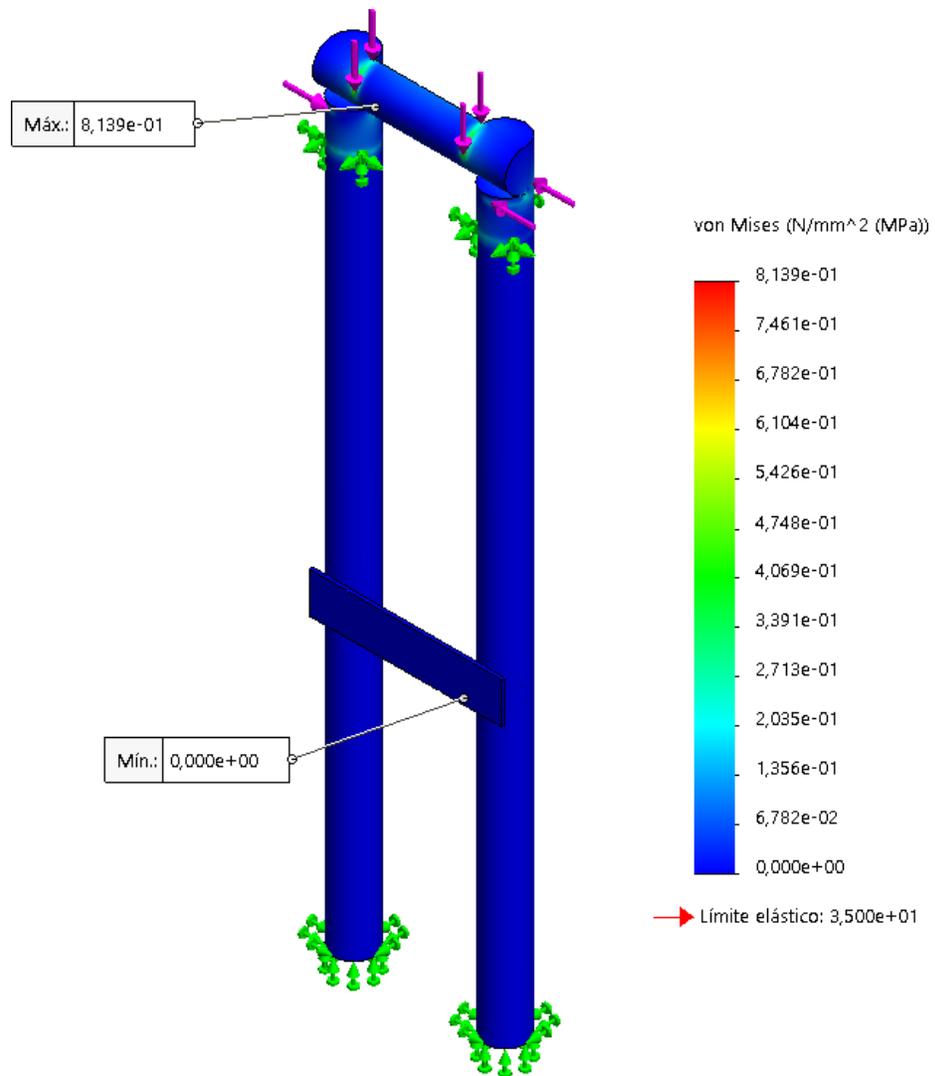
Finalmente, se observa que ante enmallados con elementos de un tamaño inferior o igual a 16 mm (enmallado definido por proceso de convergencia de malla presente en el anexo 8.6) el valor máximo de los esfuerzos de Von Mises tiende a estabilizarse en un punto cercano a 0,8 MPa. Dicho valor es inferior al límite elástico del material definido para llevar a cabo la simulación, que equivale a 35 MPa; así mismo, se observan desplazamientos máximos despreciables de 0,02 mm, concluyendo que el diseño planteado soporta la carga sin inconvenientes.

Figura 30. Malla en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander



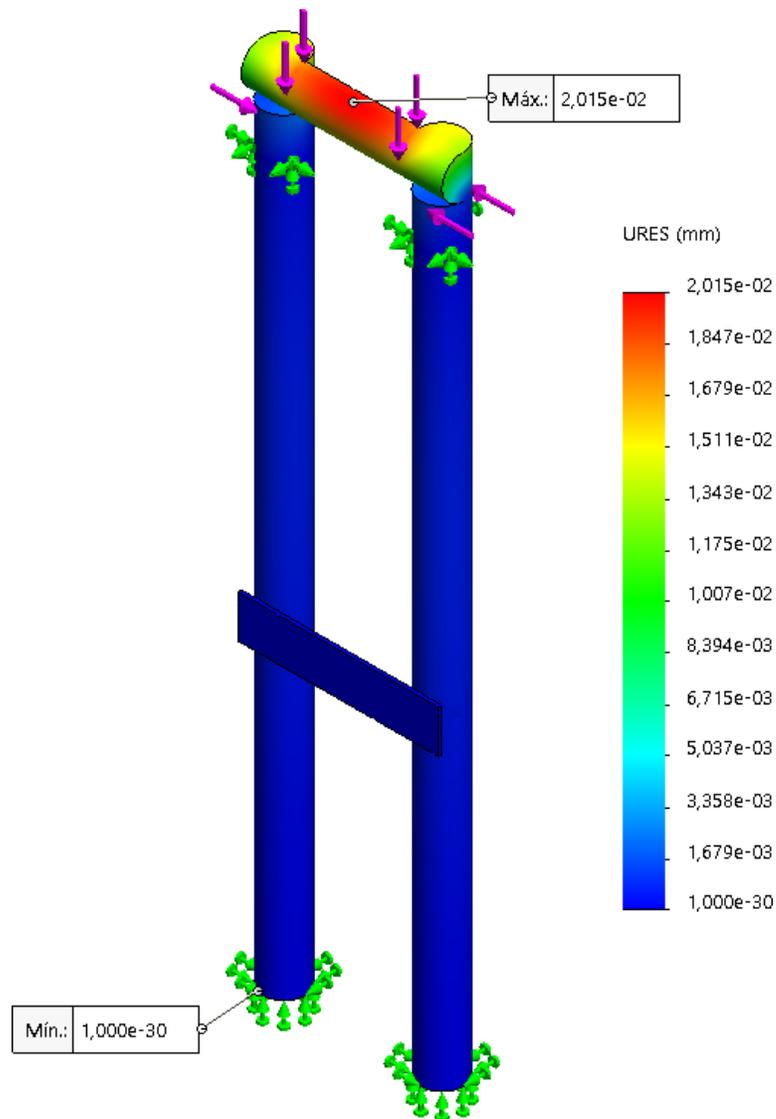
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 31. Simulación de esfuerzos de Von Mises en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 32. Simulación de desplazamiento en la estructura de soporte de los tubos de cultivo en la implementación en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

5.8.3 PLANOS DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

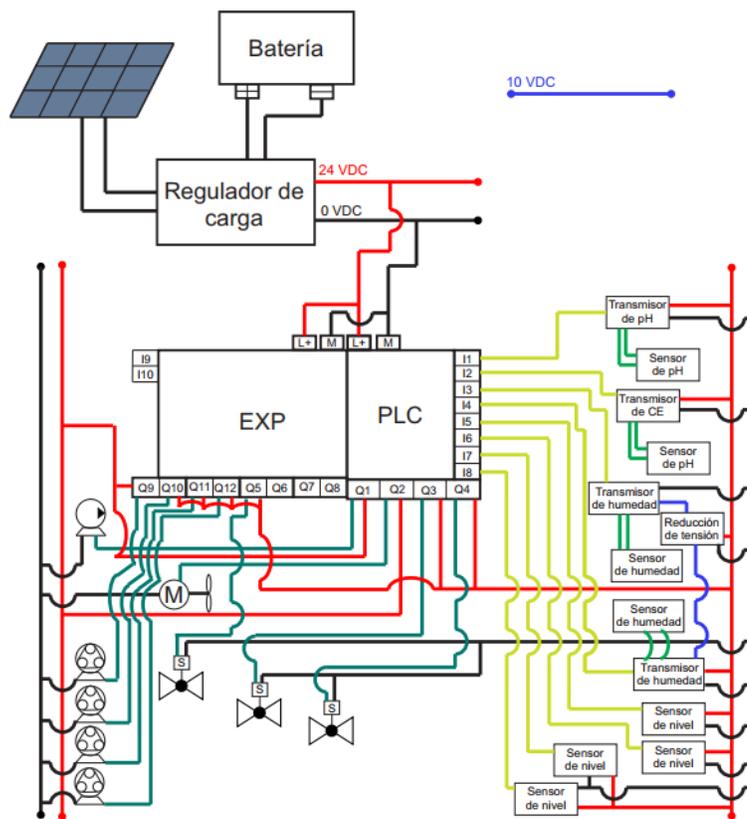
Los planos del sistema hidropónico planteado tales como los correspondientes al agitador, las dimensiones de la zona de cultivo, la estructura que soporta los tanques de sustancias a dosificar y las medidas del acople entre el eje del agitador y el eje del motor. Estos planos junto con el diagrama de tuberías del sistema se encuentran en el anexo 8.7.

5.8.4 DIAGRAMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

El diagrama eléctrico muestra la relación del subsistema energético con el subsistema de control. La energía del sistema es suministrada de un sistema de paneles fotovoltaicos que necesita ser adaptada para el consumo, por esto la energía eléctrica proveniente del panel llega a un regulador de carga que es el dispositivo que distribuye la potencia a los elementos que lo requieran; este regulador está soportado con una batería que se encarga de asegurar una potencia lo más constante posible considerando que la entrega de tensión del panel no es regular. La salida del regulador de carga es a 24 VDC y sirve para alimentar los componentes que lo requieran como son el PLC y los sensores.

A continuación, se muestra el diagrama eléctrico general del sistema:

Figura 33. Diagrama eléctrico del sistema



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

5.8.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

A continuación, se presenta la tabla correspondiente al consumo eléctrico del sistema hidropónico a instalar en el departamento de La Guajira considerando los

valores reales obtenidos de los componentes en el prototipo implementado en Santander. A su vez, se adiciona el consumo teórico de la bomba del sistema de desalinización, el cual complementa al prototipo a implementar en La Guajira.

Tabla 17. Consumo eléctrico en La Guajira

CONSUMO ELÉCTRICO - LA GUAJIRA						
Elemento	Cant	Voltaje consumido (V)	Corriente consumida (A)	Potencia consumida (W)	Horas de trabajo	Energía diaria consumida (Wh)
Bomba centrífuga	1	24	3,6	86,4	0,117	10,1
Motor Mixer	1	24	1,8	43,2	0,667	28,8
PLC	1	24	0,022	0,535	24	12,84
Sensor	8	24	0,03	0,72	24	138,24
Bombas peristálticas	4	12	0,16	1,92	1,667	12,8
Bomba de diafragma*	1	24	1,0	24,0	2,000	48,0
TOTAL			6,612	156,775	52,450	250,765

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

A partir de estos datos, se realiza el dimensionamiento de las baterías a utilizar para almacenar la energía producida por el sistema fotovoltaico del sistema hidropónico. En este proceso se define un periodo de autonomía equivalente a 3 días, en los cuales el prototipo podrá trabajar sin requerir la alimentación de los paneles solares y asegurando una descarga inferior al 50% de la capacidad de las baterías, de modo que no se afecte en gran medida la esperanza de vida de estos elementos.

Tabla 18. Dimensionamiento de las baterías

DIMENSIONAMIENTO DE LAS BATERÍAS	
Voltaje DC del sistema (V)	24
Promedio de amperios hora por día (Ah)	10,4485333
Voltaje de las baterías (V)	12
Capacidad de la batería (Ah)	75
Días de autonomía (días)	3
Límite de descarga	0,5
No. de baterías en paralelo	1
No. de baterías en serie	2
Baterías totales	2

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Adicional a las baterías, el sistema requiere de un controlador de carga para regular la energía producida y almacenada. El dimensionamiento de este elemento se lleva

a cabo a partir de la multiplicación del número de paneles solares en paralelo, la corriente de cortocircuito de cada uno y un factor de seguridad de 1,25.

Tabla 19. Dimensionamiento del controlador de carga

DIMENSIONAMIENTO DEL CONTROLADOR DE CARGA	
Corriente de cortocircuito de un panel (A)	9,08
No. de paneles solares en paralelo	1
Corriente de cortocircuito de los paneles (A)	11,35

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

5.9 EXPERIMENTO 2 - VISIÓN ARTIFICIAL

Con el desarrollo del experimento se espera tener un análisis del comportamiento de las plantas, con el fin de evaluar el crecimiento de las mismas ante distintos factores y con base en la información obtenida realizar un protocolo de caracterización para el sistema hidropónico, seleccionando de este modo elementos cruciales para el sistema hidropónico final como lo son el sustrato en el cual se va a sembrar, el tipo de frijol a sembrar y volumen de riego, entre otros factores importantes para obtener los mejores resultados posibles. Para esto se tuvo en cuenta un diseño de experimentos donde se contemplan diferentes combinaciones o tratamientos para examinar dos tipos de frijol, en estas combinaciones se varían valores de salinidad, concentración de solución de nutrientes y volumen de riego, así mismo se utiliza más de un tipo de sustrato, estos factores serán interpretados como variables de entrada del sistema y como variable de salida se tiene el crecimiento de la planta. Este crecimiento se registra de manera fotográfica y posteriormente estas fotografías se procesan mediante un algoritmo de visión artificial el cual permite observar, graficar y comparar el crecimiento de los diferentes tratamientos.

Planteamiento del experimento:

Para iniciar con el experimento, primero se definen las variables de entrada del sistema. Se tienen como variables de entrada el tipo de frijol, el sustrato a emplear, el porcentaje de sal en agua, la concentración de nutrientes y el volumen de riego; se tiene que para cada tipo de frijol: *frijol caupí cabecita negra (frijol 1)* y *frijol guajiro (frijol 2)* se van a cambiar los estados de las variables restantes de entrada de la siguiente manera:

Figura 34. Variables experimento 2



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Es decir, que estas cuatro variables cuentan con diferentes posibilidades cada una: la variable Sustrato (T) en la cual se espera comparar cuál de los sustratos planteados muestra un mejor asentamiento para las raíces y una mayor absorción de líquido; respecto a la variable Porcentaje de sal en el agua (S) se desea observar en qué medida esta concentración dificulta el crecimiento o la velocidad del mismo en las plantas, también se encuentra la variable Concentración de nutrientes (N) con la que se desea observar si una concentración diferente a la recomendada por la FAO genera un mayor crecimiento por parte de la planta, y por último la variable Volumen de riego (H) nos permitirá observar cuanto es el consumo en volumen de agua necesario para lograr condiciones óptimas de crecimiento en las plantas. Una vez definidos estos valores se procede con la configuración de los tratamientos resultantes, este resultado que se obtiene de multiplicar el número de variables por el número de posibilidades de estas, a continuación, se presenta una tabla de los tratamientos para cada tipo de frijol:

Tabla 20. Configuración tratamientos experimento 2

N° Tratamiento	T	S	N	H	N° Tratamiento	T	S	N	H	N° Tratamiento	T	S	N	H
1	A	A	A	A	9	B	A	A	A	17	C	A	A	A
2	A	A	A	B	10	B	A	A	B	18	C	A	A	B
3	A	A	B	A	11	B	A	B	A	19	C	A	B	A
4	A	A	B	B	12	B	A	B	B	20	C	A	B	B
5	A	B	A	A	13	B	B	A	A	21	C	B	A	A
6	A	B	A	B	14	B	B	A	B	22	C	B	A	B
7	A	B	B	A	15	B	B	B	A	23	C	B	B	A
8	A	B	B	B	16	B	B	B	B	24	C	B	B	B

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

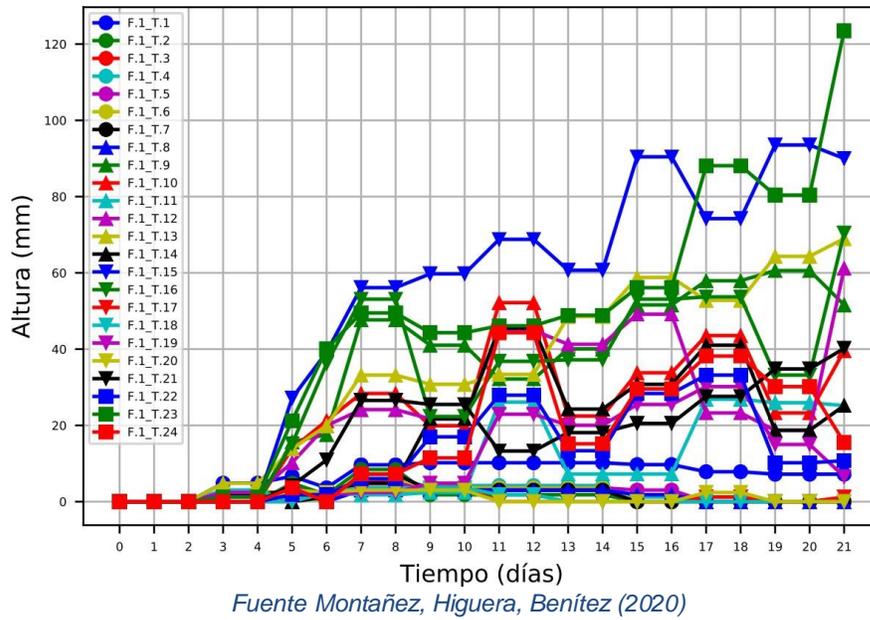
Teniendo en cuenta que cada uno de estos 24 tratamiento cuenta con 3 réplicas se obtiene un número total de 72 plantas sembradas para cada tipo de frijol, es decir que el resultado final es de 144 plantas sembradas, 72 de frijol caupí cabecita negra y 72 de frijol guajiro.

5.9.1 RESULTADOS EXPERIMENTO 2

Con el fin de realizar un mejor análisis de los resultados finales obtenidos durante el desarrollo del experimento se dividieron los resultados para observar el comportamiento de las plantas primero por altura y posteriormente por área. Estos datos se obtuvieron a partir del análisis, por medio de un algoritmo de visión artificial, de la base de datos conformada por la totalidad de fotos compiladas a lo largo del experimento.

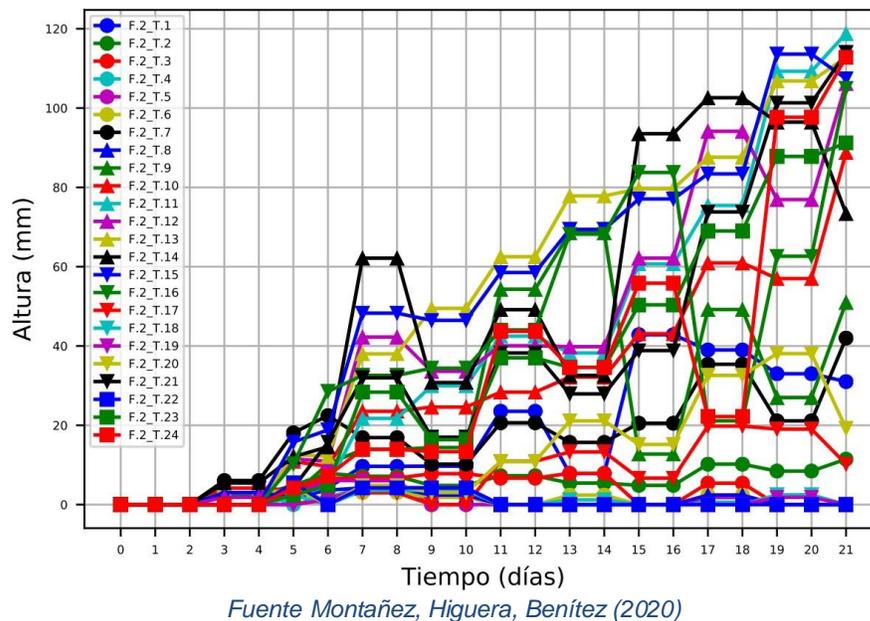
**Altura de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:**

Figura 35. Altura de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



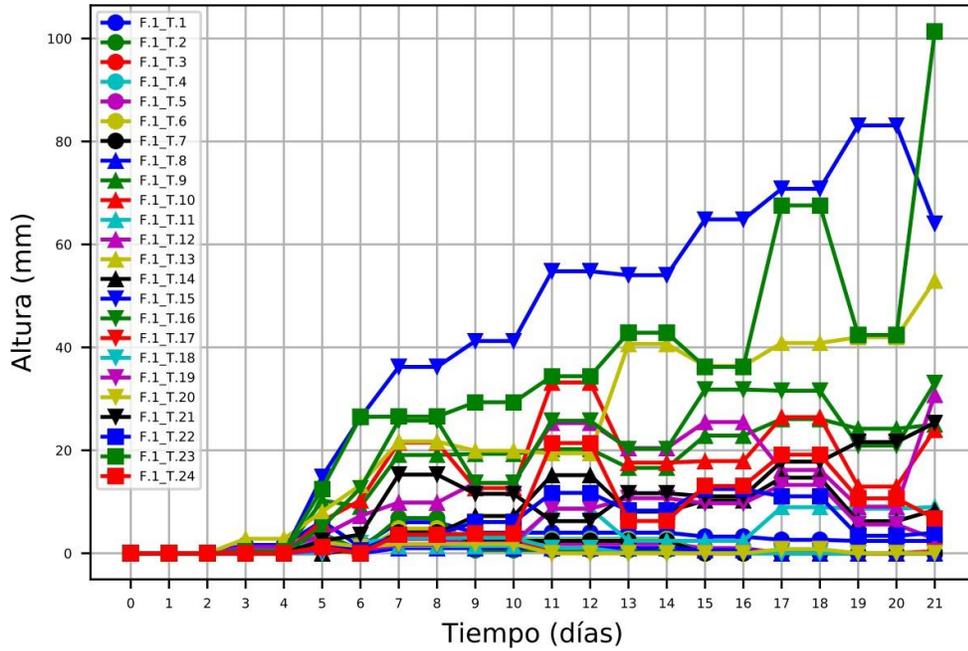
Erijol 2:

Figura 36. Altura de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



**Altura promedio de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:**

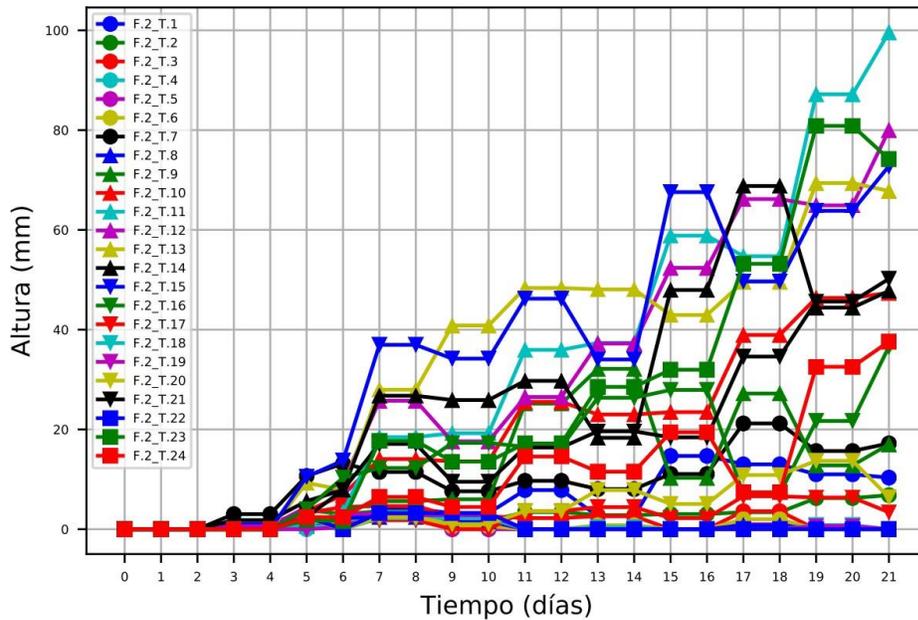
Figura 37. Altura promedio de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

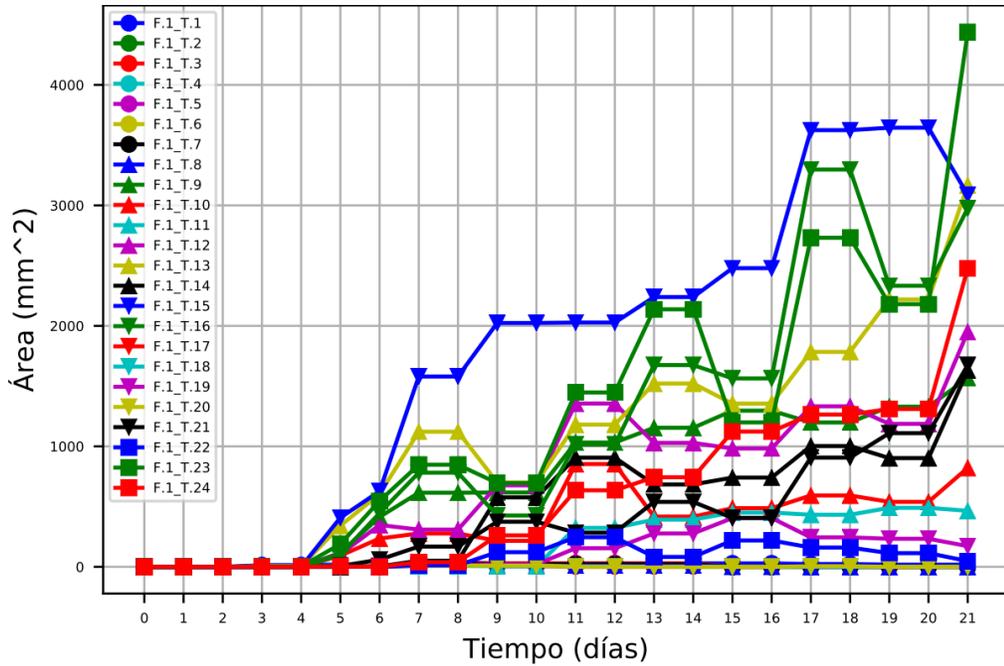
Figura 38. Altura promedio de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

**Área de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:**

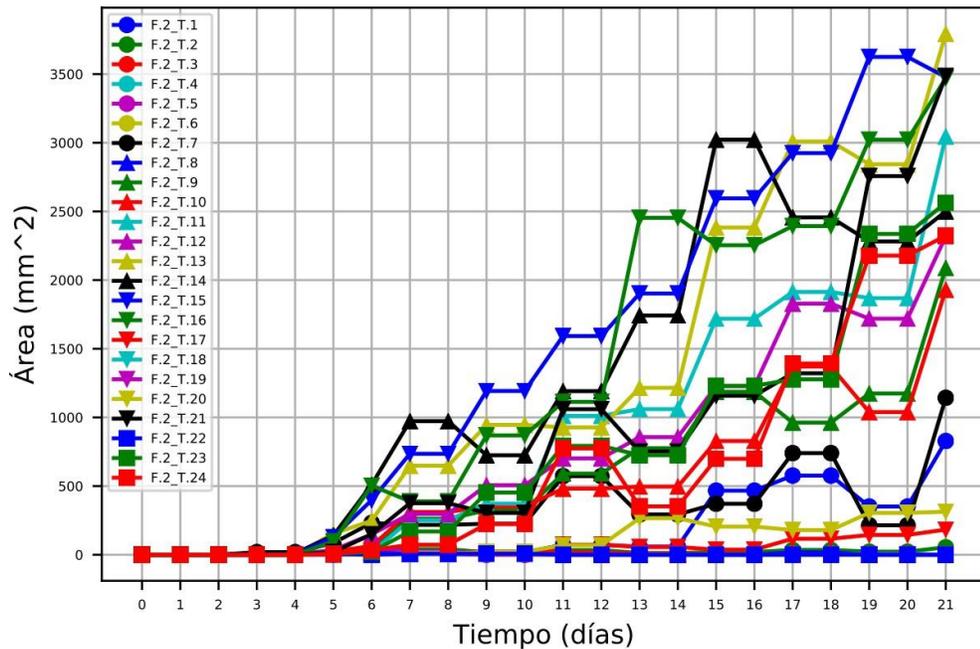
Figura 39. Área de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

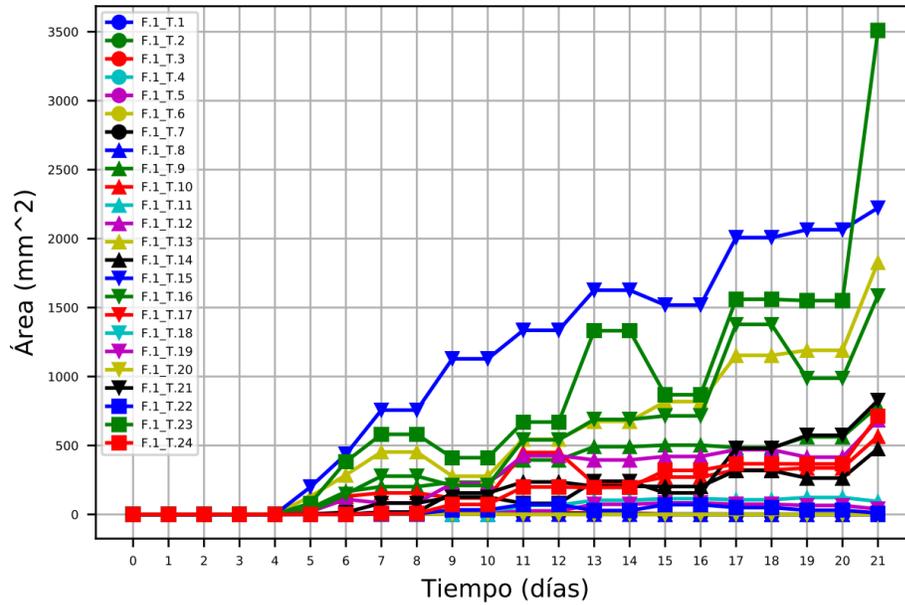
Figura 40. Área de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

**Área promedio de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:**

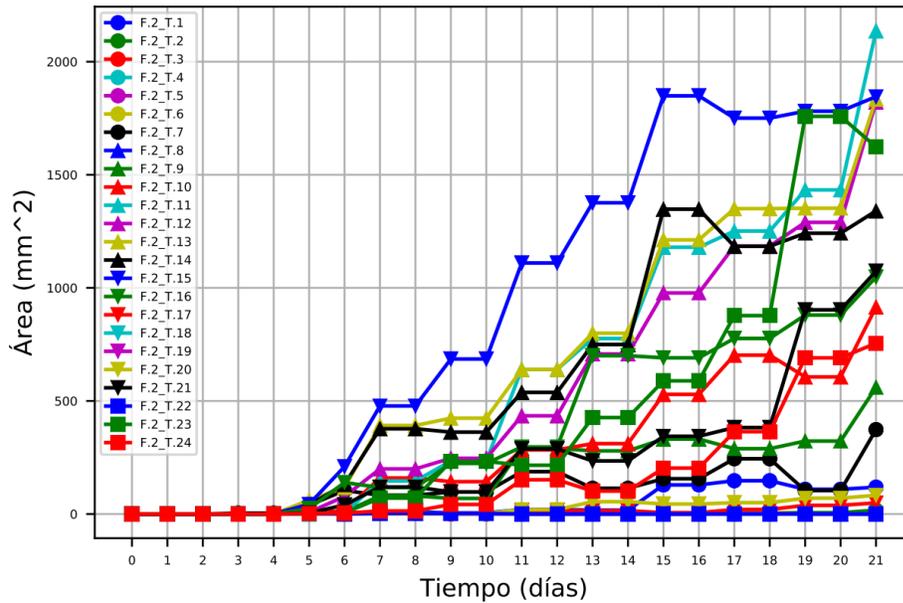
Figura 41. Área promedio de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

Figura 42. Área promedio de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Análisis

Entre los aspectos que se pueden destacar a simple vista en la mayoría de las gráficas presentadas es el hecho de que hubo una cantidad de tratamientos que no presentaron germinación, de aquí se puede obtener el primer dato relevante y es que se puede observar que el frijol que presentó un menor porcentaje de germinación es el frijol 1, es decir el frijol caupí cabecita negra. También es importante destacar que la cantidad de tratamientos que germinaron es superior en el frijol 2 (Frijol Guajiro) que en el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), esto en primera instancia se le atribuye a la variable de porcentaje de sal en agua; es decir, el frijol 2 al ser endémico de una zona del país donde la escasa agua que se consigue tiene un pequeño porcentaje de salinidad, desarrolló una resistencia superior a estas condiciones, dando como resultado un porcentaje de germinación superior en comparación al frijol 1.

Se observó que los tratamientos del 1 al 8 no presentaron muy buenos resultados en cuanto a porcentaje de germinación. El factor común y seguramente el motivo del mal rendimiento de este grupo de tratamientos es el uso de la arlita como sustrato, ya que este sustrato no brinda un buen espacio para el asentamiento de sus raíces y dificulta la absorción de agua por parte de la semilla. Así mismo se observó que, entre los tratamientos con mayor porcentaje de germinación y crecimiento, aquellos que destacaban correspondían a tratamientos en los cuales se aplicó una concentración de nutrientes diferente a la recomendada por la FAO, con lo cual podemos comenzar a sesgar cuales son las variables más determinantes en cuanto al crecimiento de las plantas.

No fueron perceptibles diferencias muy importantes entre los tratamientos cuya única diferencia era el volumen de riego, obteniendo como resultado que un volumen de riego elevado en un punto deja de ser necesario, puesto que se consume más agua y no se observan cambios importantes en cuanto al crecimiento de la planta.

Los tratamientos que más destacaron para el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), no solo por su volumen de crecimiento, sino por su velocidad y constancia en el tiempo inician con el tratamiento número 15, el cual consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 4 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo. El segundo mejor tratamiento a nivel general fue el tratamiento número 23, que consistía en: Coco como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Y el tercer mejor tratamiento fue el tratamiento número 13, que consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Los tratamientos que más destacaron para el frijol 2 (Frijol Guajiro), no solo por su volumen de crecimiento, sino por su velocidad y constancia en el tiempo inician con el tratamiento número 15, el cual consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje

de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 4 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo. El segundo mejor tratamiento a nivel general fue el tratamiento número 13, que consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Y el tercer mejor tratamiento fue el tratamiento número 11, que consistió en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de 0.4, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo.

5.9.2 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 2

- Se destaca la perlita como el mejor sustrato ya que en esta las plantas presentaron una mejor absorción de agua, mejor crecimiento y asentamiento de las raíces.
- A pesar de utilizar la proporción de nutrientes recomendada por la FAO, se pudo apreciar que existen otras configuraciones, tal como la utilizada en el experimento, que presentan un mejor resultado; evidenciándose de esta manera que la configuración idónea de nutrientes depende de las características de la especie de planta en crecimiento.
- El porcentaje de sal en agua demostró ser una variable de peso únicamente para el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), ya que en los tratamientos del frijol 2 (Frijol Guajiro) no se observó una diferencia considerable entre los tratamientos cuya única diferencia era el porcentaje de sal en agua. De esta manera se confirmó la resistencia a la salinidad propia del frijol guajiro.
- Se selecciona el tratamiento número 15 junto con el frijol 2 (Frijol Guajiro) como ganadores del experimento, debido a sus excelentes resultados finales y su comportamiento constante a lo largo del tiempo.

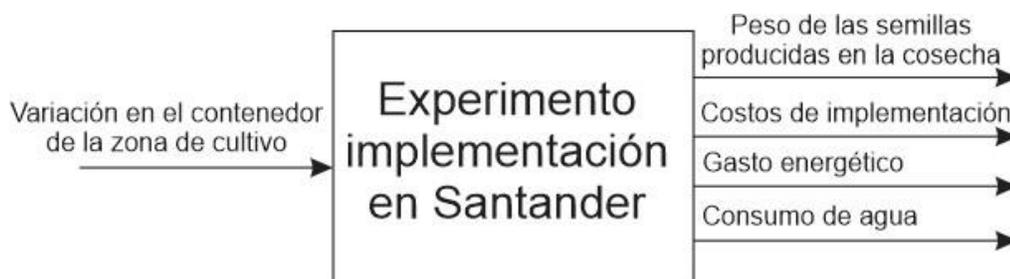
5.10 IMPLEMENTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER

La implementación en Santander corresponde a la última etapa experimental del proyecto, en la cual se implementan dos cultivos de frijol guajiro. Estos dos cultivos hidropónicos se diferencian uno del otro en la capacidad volumétrica para las raíces (espacio donde fluye el agua). Los contenedores para realizar esta implementación son dos tubos de 6 y 8 pulgadas de diámetro respectivamente.

Esta implementación contempla los subsistemas de la zona de cultivo, subsistema de control y el subsistema del tanque de dosificación de nutrientes. A su vez el crecimiento del cultivo se ve directamente afectado por: el nivel de pH del agua, que debe estar en un rango cercano al pH neutro; la conductividad eléctrica, que debe presentar un valor lo más bajo posible; la solución de nutrientes, que debe ser dosificada y mezclada en el agua; y el sustrato, que permite la fijación de las raíces y transporte de nutrientes.

El objetivo de esta implementación es medir la producción de cada cultivo (pesando las semillas producidas por los cultivos en una báscula digital) y de acuerdo a esta variable de salida, junto con los costos de implementación, el gasto energético medido y las exigencias de agua del cultivo, poder escoger el tipo de contenedor adecuado. Al mismo tiempo, el crecimiento de las plantas en esta etapa de implementación es registrado por medio de fotografías periódicas (semanales) a cuatro plantas muestra por cultivo que se analizan por medio de un algoritmo de visión artificial que permita llevar un registro del crecimiento de las plantas y poder comparar este crecimiento con los resultados obtenidos en el experimento 2.

Figura 43. Variables de entrada y de respuesta de la implementación en Santander

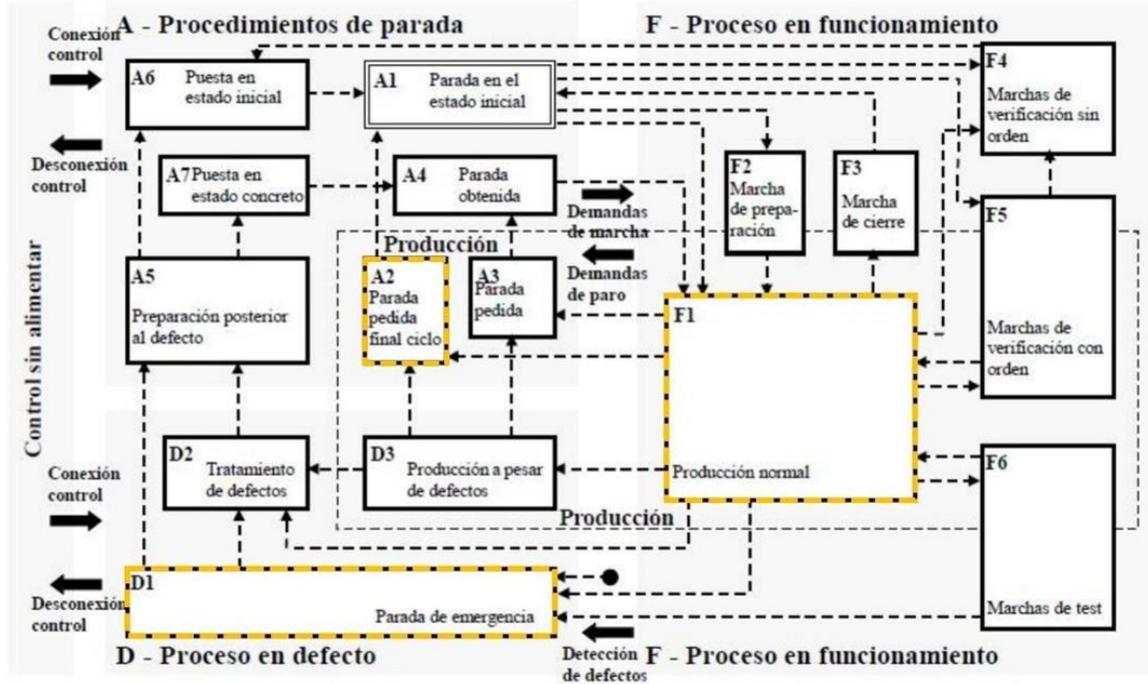


Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Para realizar la implementación del sistema hidropónico, tanto en Santander como en La Guajira, se desarrolla una estrategia de automatización abarcando tres de los modos de operación comprendidos dentro de la guía GEMMA. Estos corresponden a: producción normal, parada pedida al final de ciclo, en donde el sistema se mantiene en un estado de reposo hasta recibir una señal que lo ubique nuevamente en los procedimientos de funcionamiento, y parada de emergencia, que permite

detener de forma segura el sistema ante un fallo o previo a la realización de una actividad de mantenimiento.

Figura 44. Procesos de la guía GEMMA usados en la estrategia de automatización



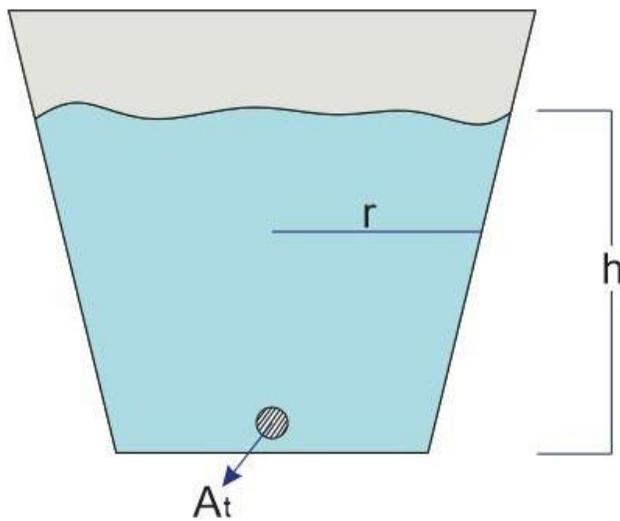
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

El modo de producción normal se divide en dos etapas: la etapa de llenado y acondicionamiento del agua y la etapa de riego. En la primera, se regulan las características del agua contenida dentro del tanque de dosificado; para ello, se determina el volumen de agua que ingresa al tanque en cuestión desde el tanque de almacenamiento de agua sin sales a partir del tiempo de apertura de la electroválvula que permite el paso de agua entre los contenedores por medio del siguiente cálculo.

Tabla 21. Nomenclatura de las ecuaciones de vaciado del tanque

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 45. Descripción gráfica de las dimensiones de las ecuaciones de vaciado



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

$$V = \pi * r^2 * h \qquad v = \sqrt{2 * g * h}$$

$$v = c * \sqrt{2 * g * \frac{V}{\pi * r^2}}$$

$$Q = v * A = \frac{dV}{dt} \quad \rightarrow \quad dV = -A * c * \sqrt{2 * g * \frac{V}{\pi * r^2}} dt$$

$$-\frac{1}{c * \sqrt{\frac{2 * g}{\pi * r^2}} * A_t} \int_{V_T}^V \frac{1}{\sqrt{V}} dV = \int_0^t dt \rightarrow -\frac{2 * \sqrt{V} - 2 * \sqrt{V_T}}{c * \sqrt{\frac{2 * g}{\pi * r^2}} * A_t} = t$$

$$V = \frac{(-c * \sqrt{\frac{2 * g}{\pi * r^2}} * A_t * t + 2 * \sqrt{V_T})^2}{4}$$

Después de este proceso, en donde A_t corresponde al área transversal del orificio de salida del tanque, V_T es el volumen total del tanque y c es un factor de pérdidas ocasionadas por la electroválvula equivalente a 0,1, se compara el modelo matemático con el sistema físico, realizando vaciados de diferente duración desde la capacidad máxima del tanque.

Tabla 22. Comprobación del modelo matemático del vaciado del tanque

Vaciado del tanque de almacenamiento de agua		
Tiempo (s)	Volumen real (L)	Volumen calculado (L)
100	5,11	5,132
200	9,62	9,734
300	13,72	13,807
400	17,53	17,352
500	20,61	20,367

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

El volumen calculado permite determinar el tiempo de trabajo de las bombas peristálticas encargadas de dosificar las soluciones nutritivas; para ello se tiene en cuenta el caudal de salida de las bombas y las proporciones de nutrientes previamente definidas a partir de los resultados del experimento 2.

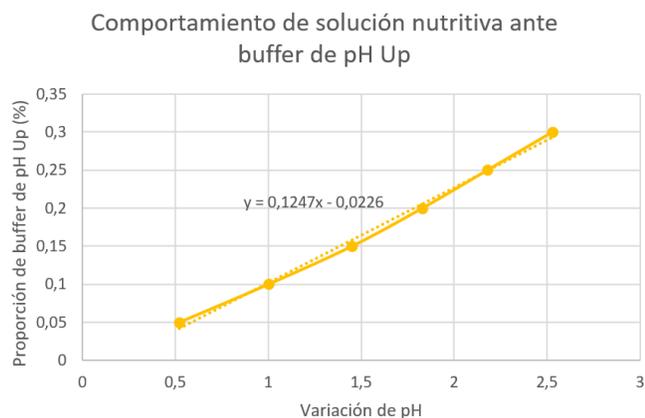
Posterior a la adición de los nutrientes, se regula el pH del agua contenida en el tanque de dosificado; para ello, se modeló el comportamiento del pH del agua con la proporción definida de soluciones nutritivas al agregarle diferentes volúmenes de buffers de pH. El resultado de ese proceso se evidencia en las figuras 46 y 47, que toman sus valores a partir de las tablas 23 y 24.

Tabla 23. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Up

pH	Variación de pH	Porcentaje de Buffer Up (%)
6,22		
6,74	0,52	0,05
7,22	1	0,1
7,67	1,45	0,15
8,05	1,83	0,2
8,4	2,18	0,25
8,75	2,53	0,3

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 46. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Up



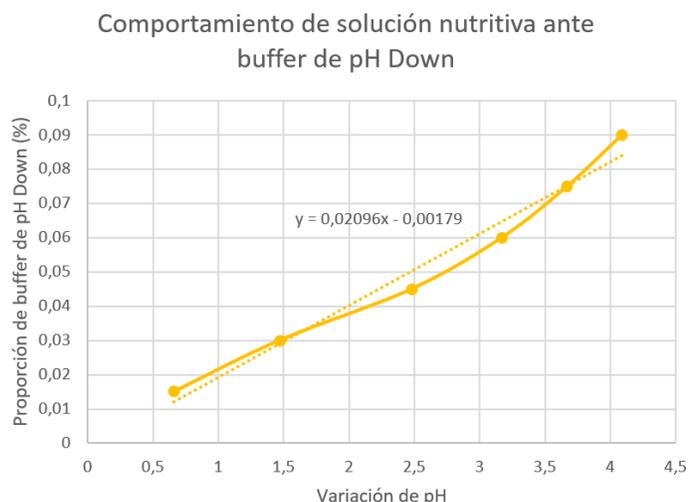
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Tabla 24. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Down

pH	Variación de pH	Porcentaje de Buffer Down (%)
6,23		
5,57	0,66	0,015
4,76	1,47	0,03
3,75	2,48	0,045
3,06	3,17	0,06
2,56	3,67	0,075
2,14	4,09	0,09

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 47. Comportamiento de solución nutritiva ante buffer de pH Down



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Teniendo las funciones que permiten conocer la proporción de buffer necesaria para modificar el pH de la solución de agua con nutrientes hasta que esta se encuentre en el rango adecuado de trabajo, se multiplica dicha proporción con el volumen de líquido dentro del tanque de dosificado. Finalmente, se calcula el tiempo de trabajo de las bombas peristálticas encargadas de dosificar las sustancias reguladoras del pH, a partir del volumen de buffer previamente determinado y el caudal de salida del elemento.

Las ecuaciones resultantes, tanto del proceso de vaciado del tanque de almacenamiento de agua sin sales, del cual se determina el tiempo de trabajo de las bombas dosificadoras de nutrientes, como de la regulación del pH dentro del tanque de dosificado, que define el tiempo de trabajo de las bombas dosificadoras de sustancias buffer, son traducidas a bloques de función propios del lenguaje de programación del PLC LOGO, los cuales se pueden apreciar, junto con la totalidad del código del controlador, en el anexo 8.14.

5.10.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Se realiza la verificación de cada componente del sistema hidropónico para luego verificar el funcionamiento de los subsistemas.

5.10.1.1 VERIFICACIÓN DE COMPONENTES

Para la verificación del PLC se energizó y comprobó que encendiera; se cargó con códigos sencillos de prueba para comprobar la correcta lectura de entradas y activación de los relés de salida.

La verificación del funcionamiento de los sensores se llevó a cabo al realizar correctamente la conexión entre los sensores y el PLC (también a los transmisores los sensores que lo requirieran). Se realizó la calibración de los sensores de pH y conductividad eléctrica y se visualizaron los valores en el PLC de todos los sensores y que estos valores fuesen coherentes.

Los actuadores se alimentaron individualmente a su tensión nominal y se verificó que funcionaran correctamente midiendo también su consumo eléctrico.

Respecto a los componentes que dan soporte a la estructura del sistema y a los componentes de tubería, se inspeccionaron visualmente y se comprobó que estuvieran en buen estado.

5.10.1.2 VERIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS

La verificación del subsistema de control se realizó al cargar el código de riego y comprobar que el conjunto de sensores y actuadores respondían acorde a la lógica definida realizando los riegos a los dos tubos de cultivo por separado cerciorándose que el agua de riego presente las propiedades definidas.

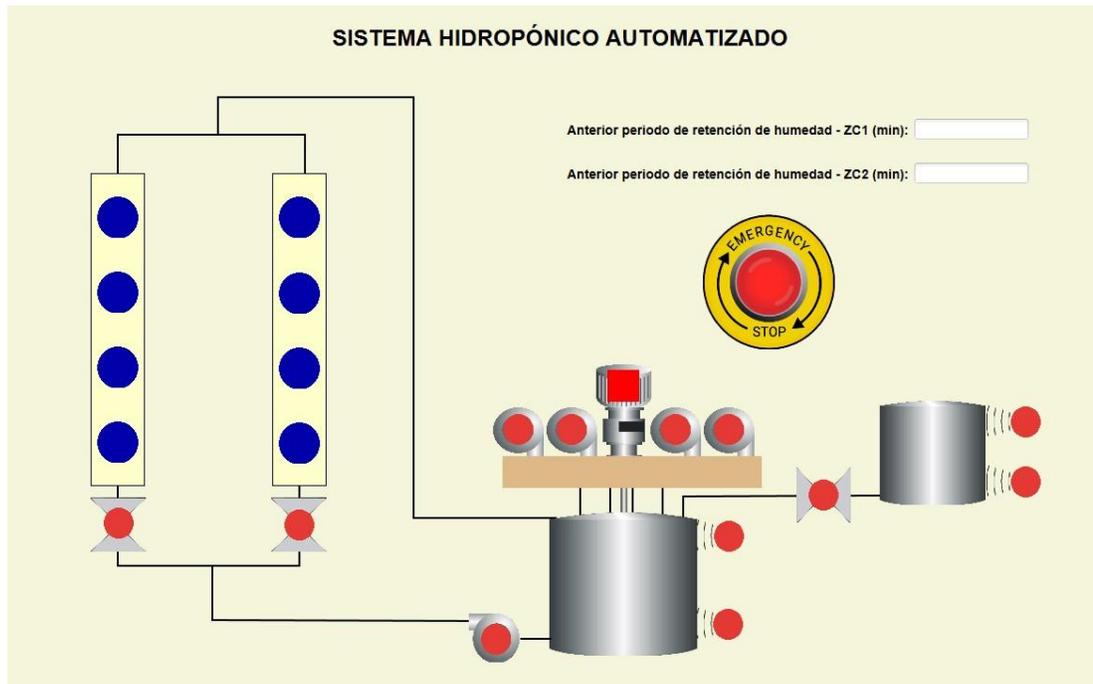
El subsistema de la zona de cultivo de plantas se verificó al inspeccionar los tubos de cultivo, así como la estructura que los sostiene para asegurarse que no se presenten fugas y que los tubos de cultivo presenten la inclinación necesaria para que el agua retorne por gravedad.

El subsistema correspondiente al tanque de dosificación de nutrientes se verificó al realizar una prueba de regulación de las propiedades del agua donde se llenó el tanque hasta el nivel de trabajo y, con base en el volumen de agua agregado, se verificó que las bombas peristálticas encargadas de suministrar los nutrientes dosificaran correctamente y el agitador entrara en funcionamiento antes de realizar el riego.

Se desarrolla una HMI con el fin de visualizar el comportamiento del sistema hidropónico de una forma más práctica y sencilla que permite conocer los valores de las variables de interés y el estado de los sensores y actuadores del sistema en tiempo real para que sea un complemento en el momento de verificar el funcionamiento de los subsistemas.

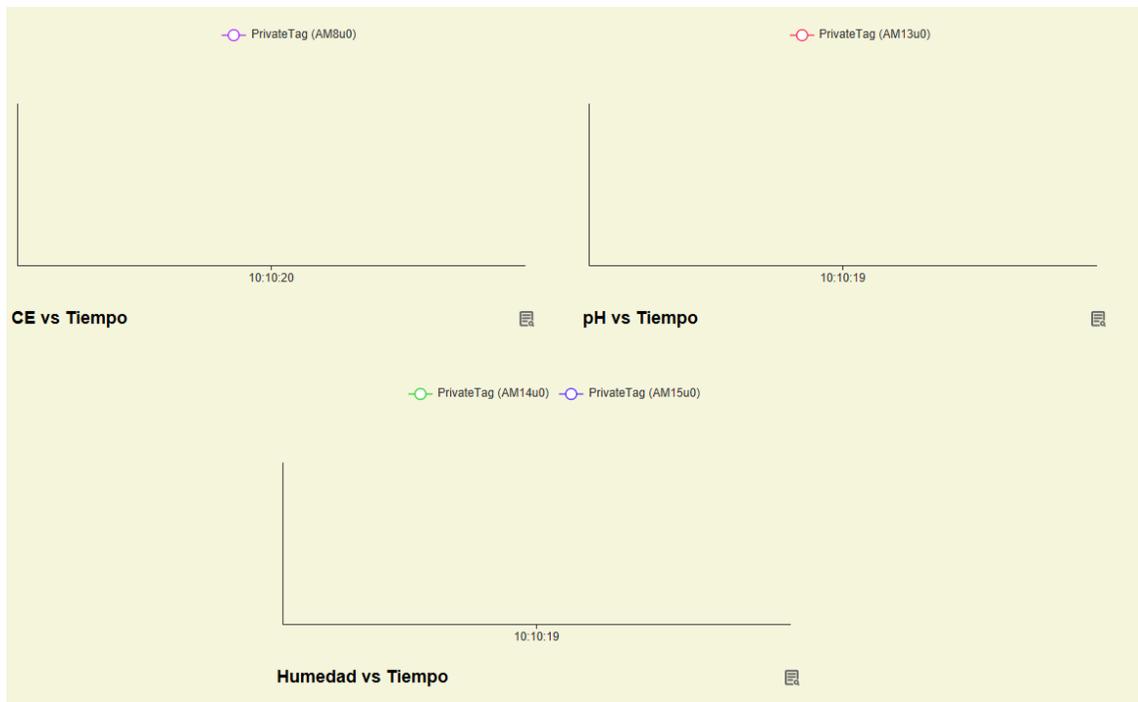
Esta interfaz, realizada con el software LOGO Web Editor (LWE), presenta representaciones de los diferentes elementos que conforman el sistema hidropónico y se puede apreciar en las siguientes imágenes:

Figura 48. HMI del sistema



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 49. Seguimiento en tiempo real de las variables análogas en la HMI



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

5.11.2 RESULTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN EN SANTANDER

Como variables de respuesta de esta implementación en Santander se encuentran: peso de las semillas producidas en la cosecha; costos de implementación; gasto energético y consumo de agua.

El peso promedio de cada una de las semillas producidas a las 9 semanas corresponde a 0,33 g en el cultivo sembrado en el tubo de 6 pulgadas de diámetro y 0,35 g en el cultivo sembrado en el tubo de 8 pulgadas de diámetro

Los costos de implementación de los cultivos de un tubo a otro difieren solamente en el costo del tubo, siendo el tubo de 8 pulgadas de diámetro más costoso que el de 6 pulgadas de diámetro, pudiendo evidenciarse tal hecho en el anexo 8.15.

El gasto energético del sistema se determinó midiendo la corriente consumida por cada uno de los elementos para calcular la potencia y energía consumida de acuerdo a su tiempo de trabajo diario.

Tabla 25. Tabla de consumo eléctrico real

CONSUMO ELÉCTRICO REAL						
Elemento	Cant	Voltaje consumido (V)	Corriente consumida (A)	Potencia consumida (W)	Horas de trabajo	Energía diaria consumida (Wh)
Bomba	1	24	3,6	86,4	0,117	10,1
Motor Mixer	1	24	1,8	43,2	0,667	28,8
PLC	1	24	0,022	0,535	24	12,84
Sensor	8	24	0,03	0,72	24	138,24
Bombas peristálticas	4	12	0,16	1,92	1,667	12,8
Electroválvula 1	1	24	0,2	4,8	0,067	0,3
Electroválvula 2	1	24	0,2	4,8	0,050	0,2
Electroválvula 3	1	24	0,2	4,8	0,167	0,8
TOTAL			6,212	147,175	50,733	204,125

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

La diferencia del consumo energético entre la implementación del cultivo en un tubo de 6 pulgadas de diámetro y otro de 8 pulgadas yace en los tiempos de trabajo de la bomba y la respectiva electroválvula de cada tubo, esto en términos energéticos significa que el cultivo con el tubo de 8 pulgadas de diámetro consume ligeramente más energía que el de 6.

El consumo de agua del sistema es producto de los riegos de la zona de cultivo con los cuales se realiza un llenado aproximado del 30% de su volumen total, se comprobó el consumo de agua del cultivo verificando las pérdidas de nivel dentro del tanque de dosificado. El volumen de agua requerido para realizar dicho proceso

es regulado por el tiempo de funcionamiento del sistema de bombeo, permitiendo alcanzar valores de humedad en el sustrato superiores al 70%.

El consumo de agua de la zona de cultivo, tal como se mencionó anteriormente, se determinó por medio de la diferencia del nivel en el tanque de dosificado antes de realizar un riego y después de la etapa de retorno del agua; dicha diferencia se tradujo en términos del volumen a partir de la geometría del tanque, calculando de esta manera las pérdidas resultantes del proceso en cuestión.

A continuación, se pueden apreciar los datos de consumo de agua recolectados:

Tabla 26. Agua consumida en un riego

Volumen de Riego (L)	Diferencia de altura (m)	Volumen Consumido (L)
180	0,025	27,74

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Para determinar la diferencia entre el consumo de agua del tubo de cultivo de menor diámetro con respecto al de mayor diámetro se realizaron riegos individuales de cada uno, inspeccionando el proceso desde la entrada del agua hasta su retorno al tanque de dosificado y, al igual que en la determinación del consumo general, identificando el volumen del líquido consumido a partir de la diferencia del nivel del tanque entre el final y el principio del proceso.

Los datos del consumo de agua en los tubos de menor y mayor diámetro pueden observarse en las tablas 22 y 23, respectivamente.

Tabla 27. Agua consumida en el tubo de cultivo de 6 pulgadas de diámetro

Volumen de Riego (L)	Diferencia de altura (m)	Volumen Consumido (L)
75	0,011	12,23

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Tabla 28. Agua consumida en el tubo de cultivo de 8 pulgadas de diámetro

Volumen de Riego (L)	Diferencia de altura (m)	Volumen Consumido (L)
105	0,013	14,45

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

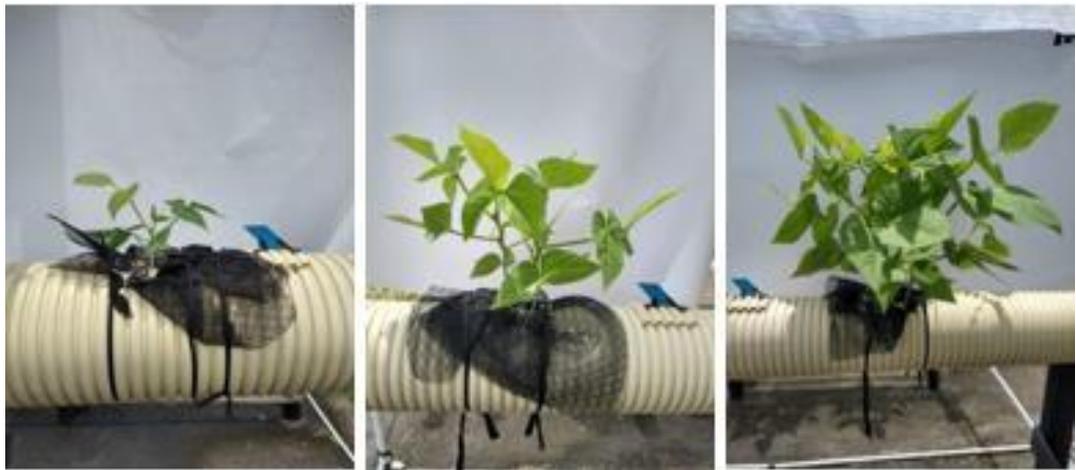
Analizando los datos obtenidos de los resultados de la implementación del sistema hidropónico en Santander se puede afirmar que la producción de frijol entre un cultivo y otro no varía considerablemente y teniendo en cuenta que el cultivo realizado en el tubo de 8 pulgadas de diámetro representa un costo más elevado tanto en una inversión inicial en el costo de implementación (precio del tubo) como en el costo o gasto energético (mayor consumo energético) y de agua a lo largo del tiempo. Por esta razón se concluye que el sistema hidropónico automatizado puede

realizar sus funciones y alcances correctamente en el tubo de 6 pulgadas de diámetro.

En el anexo 8.8 se presenta evidencia fotográfica del sistema hidropónico automatizado funcional implementado en el departamento de Santander.

Durante los primeros 21 días posteriores a la siembra de los frijoles se realizó la comparación del desarrollo de las plantas, con respecto al desarrollo del tratamiento ganador del experimento 2, a partir de la variación promedio de su altura. Para esto se realizó un proceso semanal de adquisición de fotos de las plantas y se procesaron las imágenes obtenidas por medio del algoritmo de visión artificial.

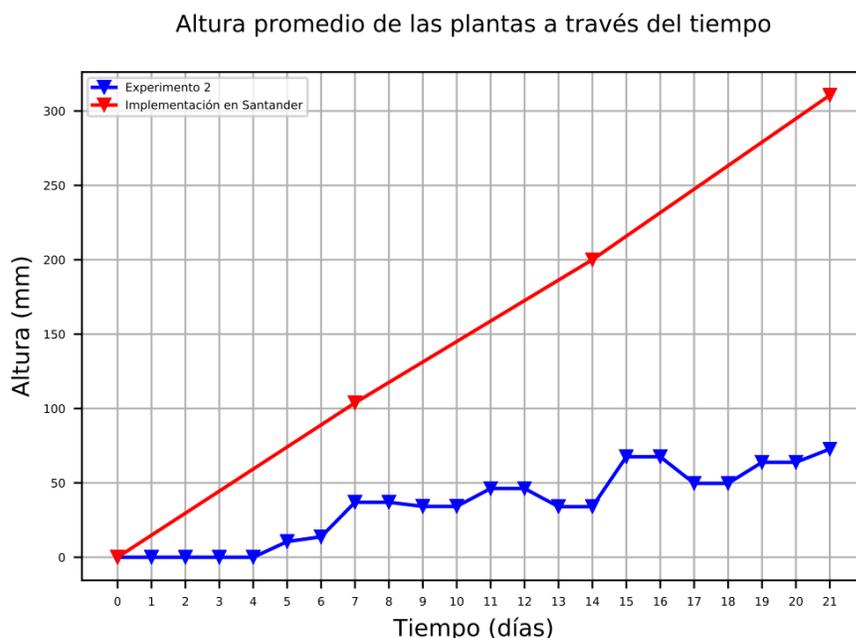
Figura 50. Crecimiento de las plantas en Santander para evaluación de altura



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

A continuación, se puede apreciar el resultado obtenido del proceso previamente mencionado; evidenciándose un desarrollo similar de las plantas expuestas a un ambiente con condiciones más hostiles con respecto a las plantas sembradas en el experimento 2.

Figura 51. Comparación del crecimiento de las plantas del experimento 2 vs la implementación en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

A partir de estos resultados se concluye que las variables reguladas con base en los factores definidos en el experimento 2 son idóneas para esta aplicación y con este tipo de frijol; siendo características primarias junto con factores ligados a las condiciones no evidenciadas en el transcurso del experimento 2, tales como una alta radicación solar, un mayor espacio radicular y la ausencia de traslados de las plantas.

5.11.3 MANUAL DE USUARIO DEL PROTOTIPO

El sistema hidropónico automatizado se implementará en la comunidad Wayúu de Majayütpana, siendo vital para su correcto funcionamiento seguir las pautas presentes en el manual de usuario del anexo 8.9.

5.11 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO

Se realiza una simulación del sistema hidropónico automatizado con el fin de observar con mayor facilidad los procesos que se llevan a cabo dentro del sistema para conocer con anticipación el comportamiento de éste y poder tomar decisiones del dimensionamiento y la lógica general del sistema antes de ser implementado.

Esta simulación se lleva a cabo con el software TIA Portal y WinCC, en donde se realiza la traducción del código del PLC (módulo lógico LOGO) del sistema hidropónico y se contemplan características y acciones propias del comportamiento real del prototipo evidenciado en la implementación del sistema en el departamento de Santander. Esto se logra por medio de ecuaciones del comportamiento de las distintas variables relevantes del sistema tales como pH, CE y humedad relativa en función del tiempo.

Para obtener dichas ecuaciones se realizan distintas pruebas del comportamiento del sistema ante los diferentes eventos a los que se puede enfrentar; uno de ellos bajo situaciones forzadas para lograr trasladar el sistema a dichas eventualidades, que corresponde a la disminución del pH del agua presente en el tanque de dosificado por medio de la adición de la solución buffer down hasta que dicha variable saliera del rango de trabajo, para posteriormente observar cómo se comporta el sistema durante la regulación de pH, registrando los valores de las variables y su cambio través del tiempo. Esta situación sucede en el sistema en un tiempo dado, pero el esperar que ocurra naturalmente representa un tiempo de espera indeterminado.

Por otra parte, se consideran situaciones no forzadas para obtener dichas ecuaciones, tales como: el registro de las variables durante la etapa de riego, el reabastecimiento de agua en el tanque de dosificado y la adición de nutrientes. De los planteamientos anteriormente mencionados se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Tabla 29. Nomenclatura de las ecuaciones del comportamiento real de las variables de interés

Nomenclatura de las ecuaciones	
pH	Potencial de hidrógeno
CE	Conductividad eléctrica
H	Porcentaje de humedad
CT	Cantidad de tubos de cultivo
t	Tiempo en segundos

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

- Ecuaciones correspondientes al comportamiento de las variables durante el proceso de reabastecimiento de agua y suministro de nutrientes:

Comportamiento del pH

$$pH(t) = 0,0000288 * t^2 - 0,005832 * t + pH_{ini}$$

Comportamiento de la CE entre 0 y 40 segundos

$$CE(t) = -0,1091 * t^2 - 8,0786 * t + CE_{ini}$$

Comportamiento de la CE entre 40 y 80 segundos

$$CE(t) = -0,0039 * t^2 - 0,5468 * t + CE_{40s}$$

- Ecuaciones correspondientes al comportamiento de las variables durante el proceso de regulación de pH:

Comportamiento del pH durante regulación de pH bajo o alto:

$$pH(t) = 6,65 + (pH_{ini} - 6,65) * e^{(-t/30)}$$

Comportamiento de la CE durante regulación de pH bajo:

$$CE(t) = CE_{ini} + (6,65 - pH_{ini}) * 70 - (6,65 - pH_{ini}) * 70 * e^{(-t/30)}$$

Comportamiento de la CE durante regulación de pH bajo:

$$CE(t) = CE_{ini} + (-6,65 + pH_{ini}) * 70 - (-6,65 + pH_{ini}) * 70 * e^{(-t/30)}$$

- Ecuaciones correspondientes al comportamiento de las variables durante el proceso de riego:

Comportamiento de la humedad durante el riego:

$$H(t) = 100 * \frac{H_{ini}}{H_{max}} * e^{(-t/30)} - 100 * e^{(-t/30)}$$

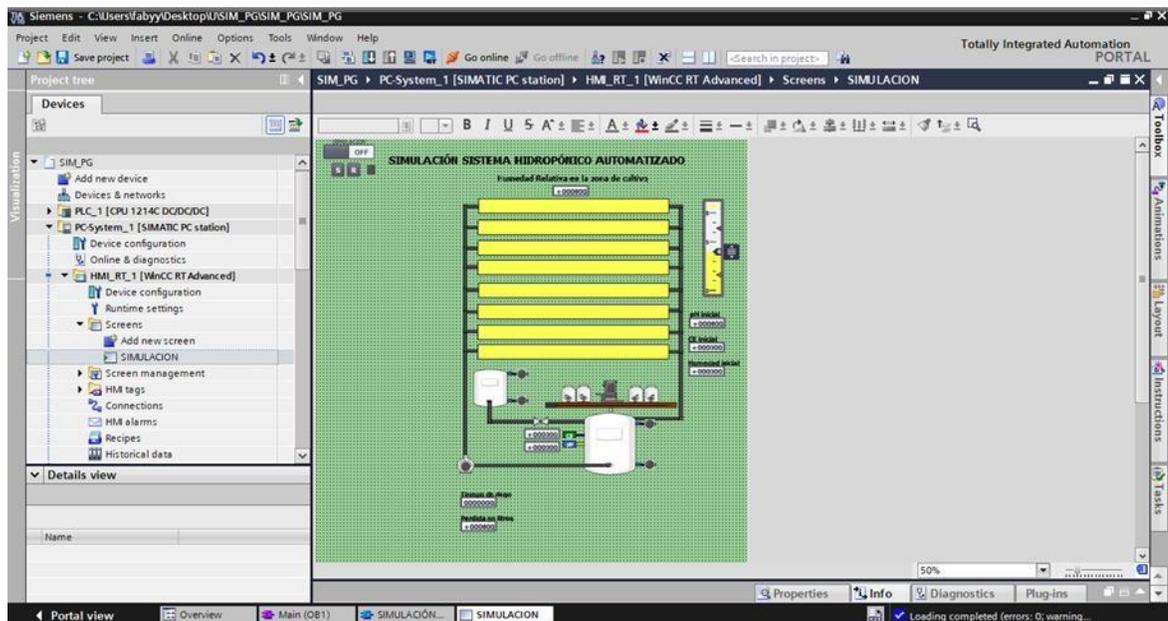
Una vez se tienen las ecuaciones que describen el comportamiento de las variables del sistema se procede a ingresarlas al código del PLC traducido en TIA Portal para su posterior enlace al sistema final diseñado en WinCC donde se visualiza finalmente la simulación.

Figura 52. Bloques de programa de la simulación del sistema en TIA Portal



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 53. Programación de la interfaz de la simulación en WinCC

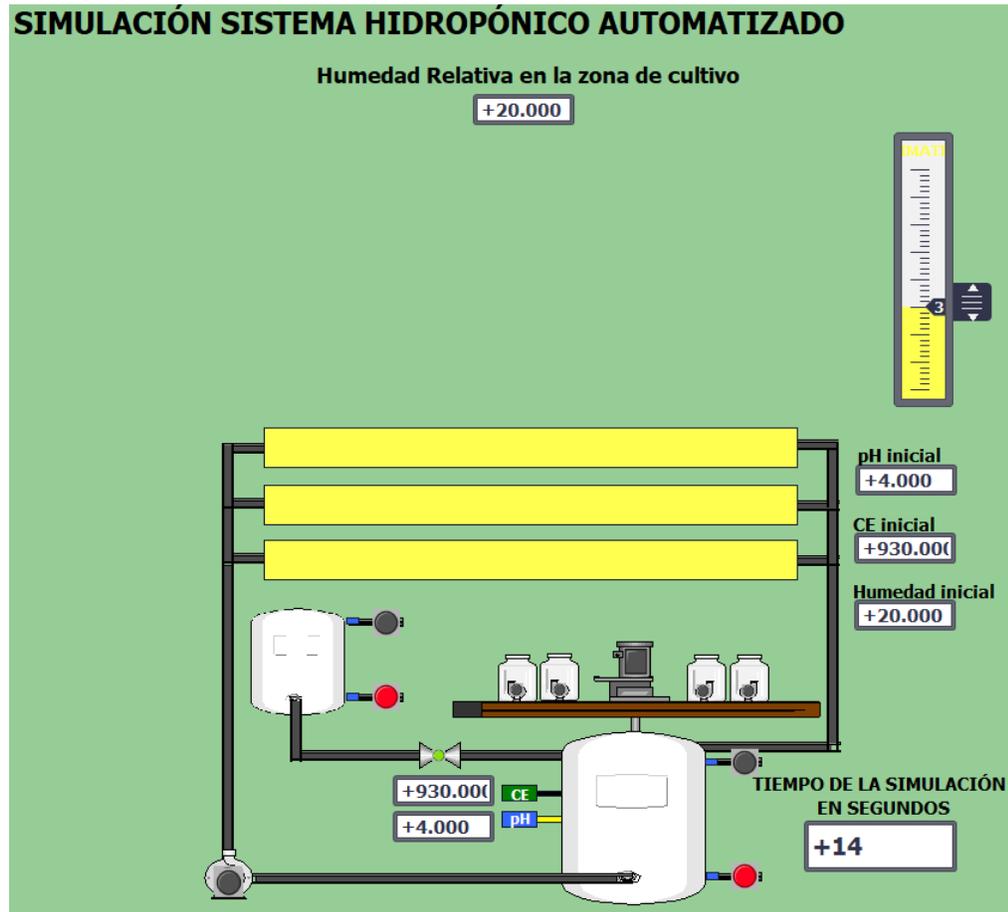


Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

A partir de la interacción con la interfaz gráfica creada es posible modificar el tamaño de la zona de cultivo, observando variaciones en el tiempo de llenado, el pH y el porcentaje de humedad de la zona de cultivo. Adicional a esto, la simulación permite visualizar el estado tanto de sensores y actuadores ante el comportamiento de las

variables, permitiendo entender de una mejor manera como se comporta el sistema ante las distintas situaciones planteadas. Así mismo es posible visualizar el tiempo desde que inicia la simulación para apreciar de una mejor manera como cambian las variables y en que instantes de tiempo.

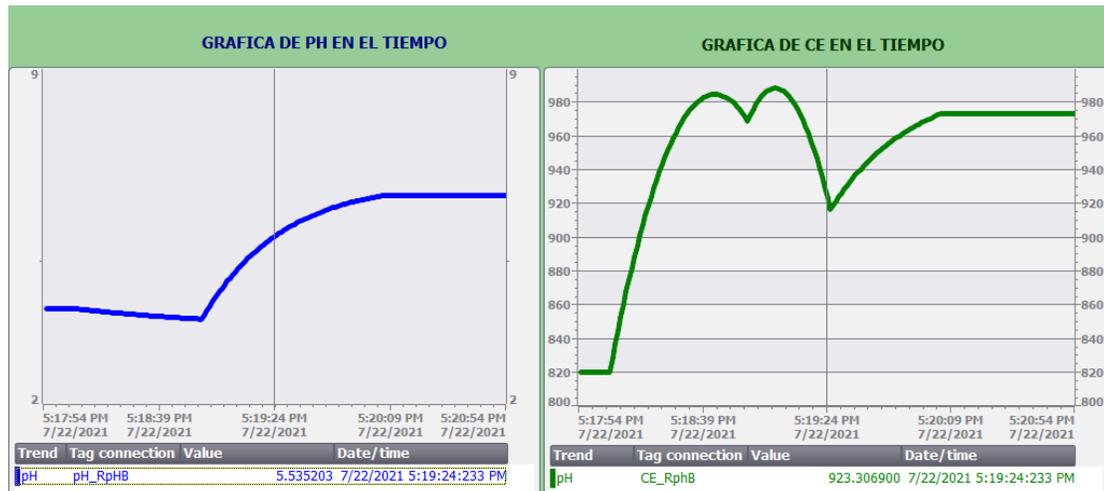
Figura 54. Interfaz de la simulación del sistema hidropónico automatizado



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Así mismo, la simulación cuenta con un apartado o sección para la visualización de las variables más relevantes del sistema (pH y CE) y su comportamiento a lo largo del tiempo; esto con el fin de comparar y determinar los factores o eventos de cambio que alteran dichas variables y de qué manera lo hacen.

Figura 55. Resultados de la simulación del sistema hidropónico en La Guajira representados en la interfaz



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

6.0 CONCLUSIONES

- Se desarrolló un algoritmo de visión artificial para comparar múltiples combinaciones de variables determinantes en el crecimiento de las plantas, demostrando ser un método eficaz al momento de determinar las necesidades de la especie vegetal y los valores que deben poseer las variables para obtener los mejores resultados de crecimiento posibles.
- La aplicación de la mecatrónica permitió desarrollar un sistema idóneo para producir alimento vegetal en ambientes desérticos con un consumo muy bajo de agua y capaz de adaptarse a un sistema energético aislado.
- La visión artificial puede usarse como herramienta de medición del crecimiento de plantas y resulta muy útil cuando se está trabajando con una gran cantidad de información. Durante el experimento 2 de este proyecto se procesaban más de 400 fotos diarias para medir la altura y área de los frijoles de forma rápida y precisa.
- Durante la etapa de implementación en Santander del proyecto se evidenció la necesidad de llevar a cabo un control de plagas en el cultivo sembrado, utilizando pesticidas naturales con el fin de reducir los factores químicos presentes tanto en las plantas como en sus frutos.
- El sistema hidropónico automatizado asegura que las características del agua de riego y la humedad del sustrato se mantengan dentro de un rango aceptable para la especie vegetal sembrada, reduciendo la posibilidad de

generar estrés en las plantas y minimizando la probabilidad de errores en la regulación de las variables al no depender del factor humano. Los beneficios de esta estandarización se pudieron apreciar en el crecimiento acelerado del cultivo.

- La técnica hidropónica implementada, así como los valores correspondientes a las variables fundamentales establecidas, demostraron ser viables en el cultivo de frijol guajiro, evidenciándose una reducción en el periodo de crecimiento de las plantas en comparación con la agricultura tradicional. Siendo este tiempo, con las técnicas implementadas, equivalente a dos meses desde la siembra hasta la etapa de producción y cosecha; mientras que, en cultivos tradicionales, comprende periodos de hasta tres meses.
- Se aprecia la ventaja de utilizar un controlador robusto como lo es el módulo lógico LOGO debido a su resistencia a las condiciones ambientales hostiles propias de la zona donde finalmente se ubica el sistema hidropónico. Este hecho favorece la vida útil del subsistema de control y reduce la necesidad de intervenciones en el apartado de automatización del sistema.
- Aunque el sistema hidropónico se encarga de todo el proceso de cultivo posterior a la siembra de la semilla y previo a la cosecha de forma autónoma, es importante llevar a cabo los procedimientos descritos en el manual de usuario para asegurar unas condiciones óptimas de trabajo que favorezcan el adecuado desarrollo de las plantas. De lo contrario, se puede incurrir en deficiencias nutricionales del cultivo, riegos insuficientes y/o reducción de la esperanza de vida de los componentes que conforman el prototipo.
- Se evidencian las ventajas del desarrollo por etapas del proyecto en distintos diseños experimentales. Debido a que la temática abordada en el transcurso del proyecto representó una exigencia en investigación, esta metodología fue clave para llevar a cabo un desarrollo organizado del proyecto.
- El prototipo puede operar como un sistema hidropónico modular con unas pocas modificaciones en su lógica programable, logrando albergar una mayor cantidad de plantas. Cada módulo correspondería a una zona de cultivo, siendo separada cada zona por medio de una electroválvula. Los riegos llevados a cabo por el sistema en cuestión tendrían que contemplar un periodo de espera concordante con el tiempo de retorno del agua al tanque de dosificado; siendo cada módulo regado de forma independiente respetando el periodo mencionado entre un riego y otro.

7.0 BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Guerrero, “‘4.770 niños muertos en La Guajira es una barbarie’: Corte | El Heraldo,” pp. 1–8, 2018.
- [2] J. Murcia and L. Chacón, “Diseño De Un Sistema Automático De Cultivo Hidropónico Oara Forraje Verde,” 2018.
- [3] ONU, “¿ Qué Son Los Objetivos De Desarrollo ¿Cuál Es La Función Del Pnud?,” pp. 1–3, 2018, [Online]. Available: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>.
- [4] V. Palande, A. Zaheer, and K. George, “Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 129, pp. 482–488, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.03.028.
- [5] F. Jaimes, B. Collazos, E. Arce, and M. Chauca, “Hydroponic System with Automated Hydrolysis Using Renewable Energy Self-Sustainable,” *MATEC Web Conf.*, vol. 256, p. 02012, 2019, doi: 10.1051/matecconf/201925602012.
- [6] N. Wagh Vijendra Pokharkar Assistant Professor and A. Bastade Priyanka Surwase, “PLC based Automated Hydroponic System,” *IJSTE-International J. Sci. Technol. Eng. J*, vol. 2, no. 10, pp. 995–999, 2016, [Online]. Available: www.ijste.org.
- [7] C. Ramos, L. Nobrega, K. Baras, and L. Gomes, “Experimental NFT hydroponics system with lower energy consumption,” *Proc. 2019 5th Exp. Int. Conf. exp.at 2019*, vol. 500, pp. 102–106, 2019, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876479.
- [8] K. Selander, “Automated Greenhouse,” 2017.
- [9] J. Ortner, “Automated Hydroponic system,” 2019.
- [10] Hidroponia.org, “Historia de la Hidroponia,” 2020. <https://hidroponia.org.mx/index.php/historia-de-la-hidroponia>.
- [11] Hidroponia.org, “¿Sabías que?...Hidroponia una fabrica de plantas,” 2020. <https://hidroponia.org.mx/index.php/sabias-que-hidroponia-una-fabrica-de->

plantas.

- [12] J. C. Gilsanz, "HIDROPONIA," 2007.
- [13] FAO, *Legumbres, semillas nutritivas para un futuro sostenible*. 2016.
- [14] ICBF, *Tabla de Composición de Alimentos Colombianos (TCAC)*. Bogotá, 2015.
- [15] M. Á. Álamo, "Importancia del pH en la Agricultura," 2016, pp. 5–7.
- [16] T. L. Brown, J. H. Eugene LeMay, B. E. Bursten, and J. R. Burdge, *Química: La ciencia central*. 2004.
- [17] Omega, "Medición de nivel," 2020. <https://es.omega.com/section/medicion-de-nivel.html>.
- [18] G. Sela, "Tensiómetros," 2020. <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/tensiometers-1>.
- [19] Irrrometer, "Fundamentos de la humedad del suelo," 2020. <https://www.irrometer.com/basicssp.html>.
- [20] D. G. Martínez, "Diseño de Sensores de Humedad de Suelo Basados en Técnicas de Flectometría de la Frecuencia (FDR)," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, 2016.
- [21] Siemens, "¿ Qué es un Siemens LOGO!?", 2014. .
- [22] Omron *et al.*, *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. 2012.
- [23] Gchydro, "4 Types of hydroponics," pp. 1–2, 2016.
- [24] ASPROMOR, *Manual de cultivo de frijol caupi*. 2012.
- [25] F. Torres and M. Berrú, *Frijol caupi Manual de Manejo para producir Semilla*. .
- [26] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, "Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos," *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 48, 2012, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235->

91baee8c73fc%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee91.

- [27] PAVCO, "Manual Técnico Tubosistemas Presion PVC," p. 22, 2020.
- [28] F. White, *Mecanica de fluidos 5ta e.* 2004.
- [29] V. A. Atiemo-Obeng and R. V. Calabrese, *HANDBOOK OF INDUSTRIAL MIXING.* 2004.
- [30] J. M. Cimbala and Y. a. Cengel, "Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones," *McGrawHill*, 2006.
- [31] V. Castillo, "Diseño y Calculo de un Agitador de Fluidos," *Fac. Inginieria Dep. ingenieria mecánica*, 2013, [Online]. Available: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf.
- [32] Indostra, "Agitadores industriales," 2020. .
- [33] Y. Sifontes and V. E. Machado, "Alimentación y nutrición en situaciones de emergencia," 2000. <https://www.analesdenutricion.org.ve/ediciones/2000/1/art-10/>.

8.0 ANEXOS

8.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA GUAJIRA

El clima de este departamento es, principalmente, árido y seco, presentando altas temperaturas modificadas con la brisa marina y los vientos alisios del noreste que soplan durante la mayor parte del año. Las lluvias son escasas y se presentan generalmente en los meses de septiembre a noviembre, cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se desplaza hacia el norte. [1]

En la figura 2 se observa el clima de las regiones que conforman La Guajira; siendo Maicao, la zona objetivo, una de las más áridas del departamento, presentando climas cálidos desérticos, áridos y semiáridos según la clasificación Caldas Lang.

Figura 56. Clasificación cromática del clima [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

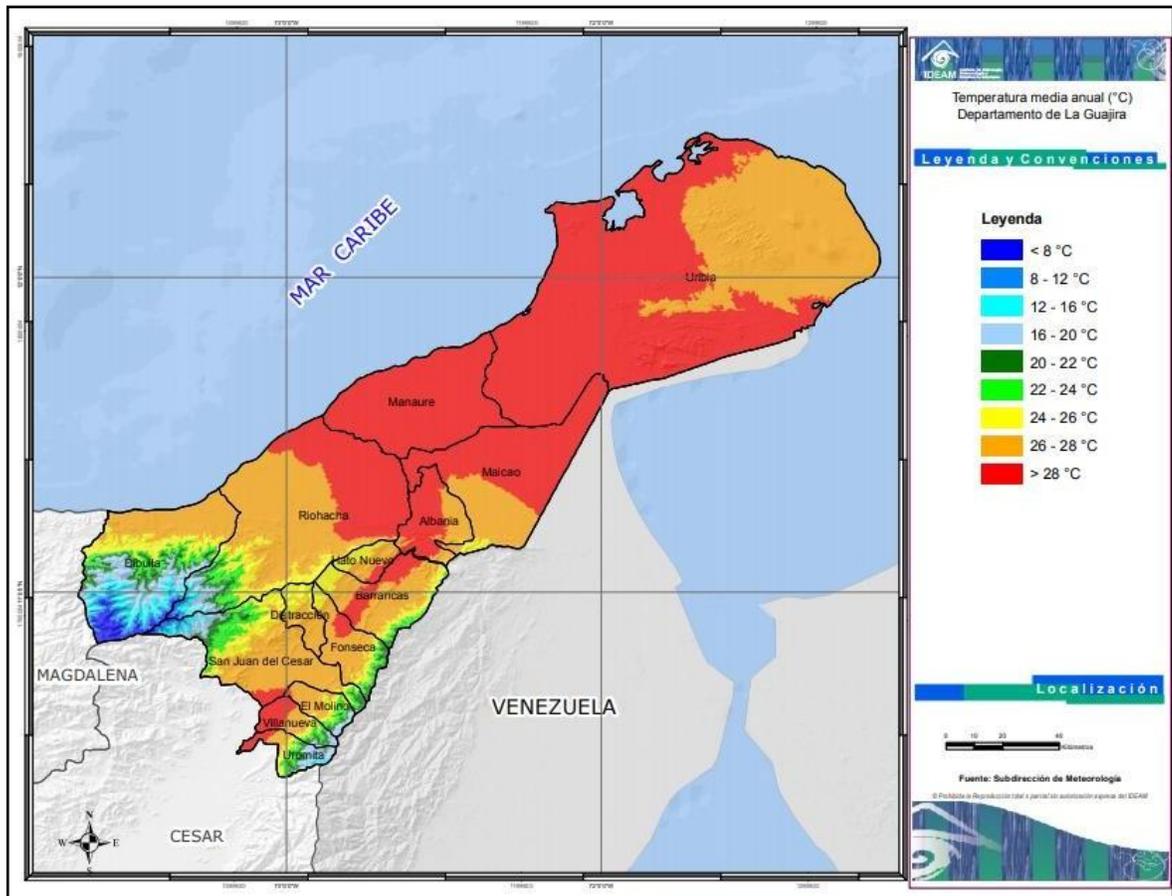
Figura 57. Mapa del clima de La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

La mayor parte del departamento de La Guajira presenta temperaturas superiores a 26°C; únicamente en la zona cercana a la Sierra Nevada de Santa Marta se aprecian bajas temperaturas, tal como se observa en la figura 3. La temperatura promedio anual del territorio de Maicao suele estar por encima de 26°C, presentando valores máximos de 34°C en los meses más cálidos, usualmente a mitad del año, y de 21.5°C en los más fríos.

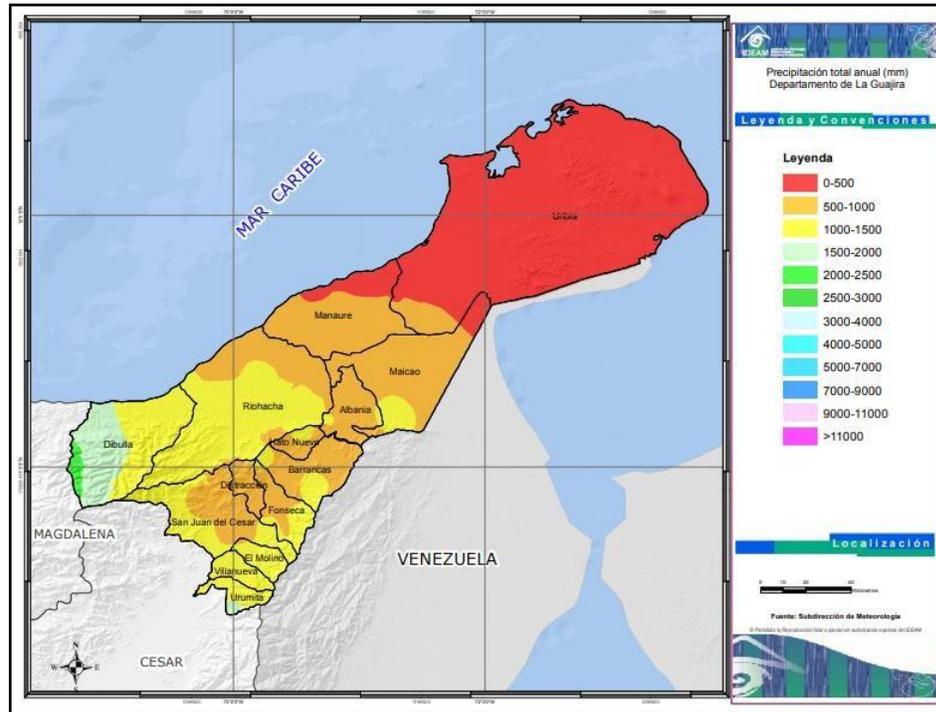
Figura 58. Mapa de la temperatura de La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

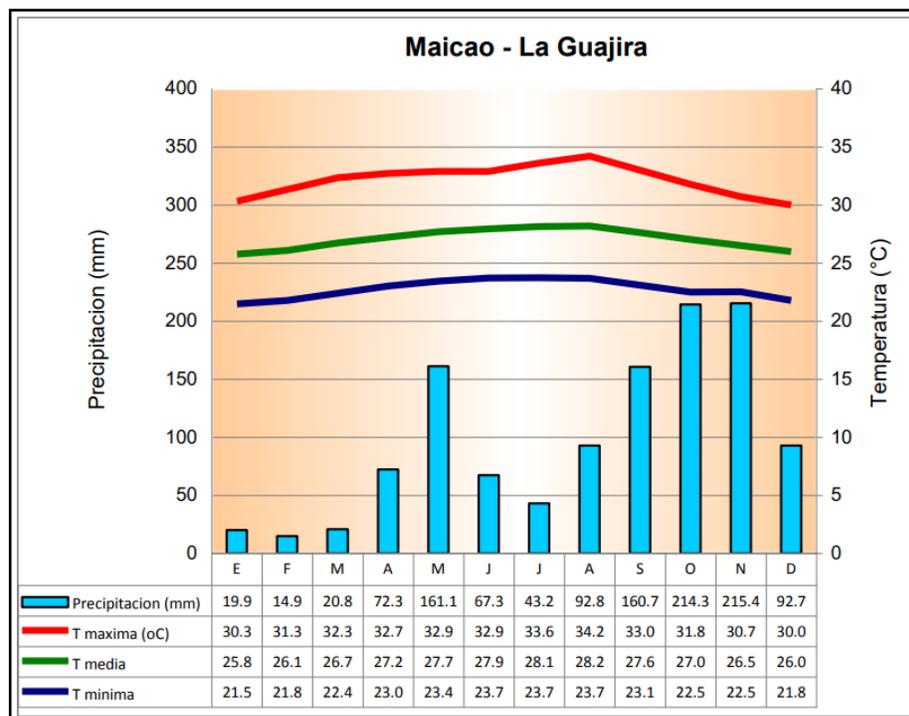
La Guajira es el departamento más seco de Colombia, registrando el menor volumen de precipitaciones del país. En el municipio de Maicao, las lluvias oscilan entre 500 a 1000 mm anuales. Tal como se aprecia en la figura 5, en los últimos meses del año se presenta la mayor cantidad de lluvias, llegando a valores de 200 mm mensuales; estas cifras contrastan con el promedio de las precipitaciones observadas a inicio de año, las cuales usualmente se mantienen por debajo de los 50 mm.

Figura 59. Mapa de las precipitaciones anuales de La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

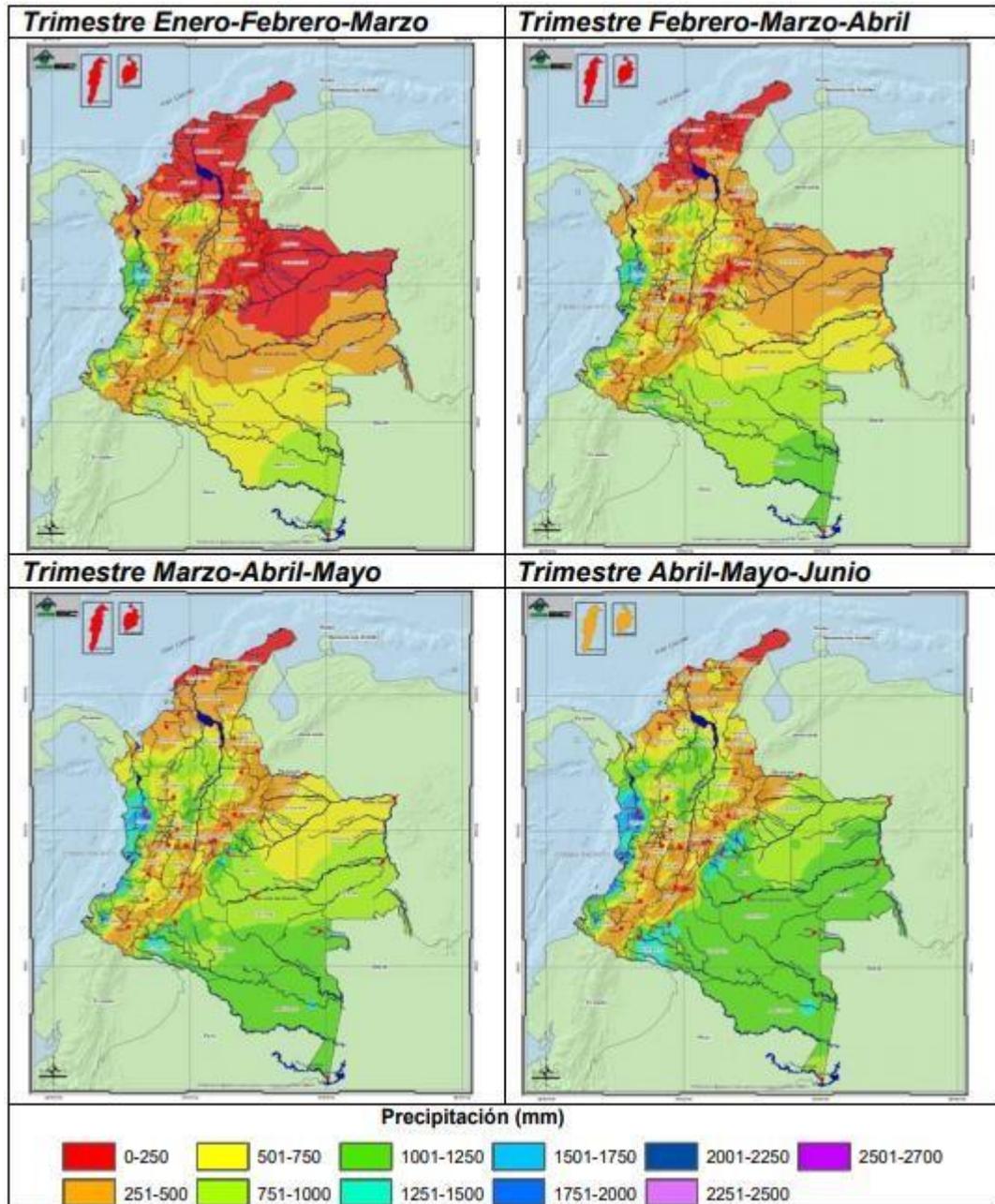
Figura 60. Gráfica de la temperatura y las precipitaciones en el municipio de Maicao [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

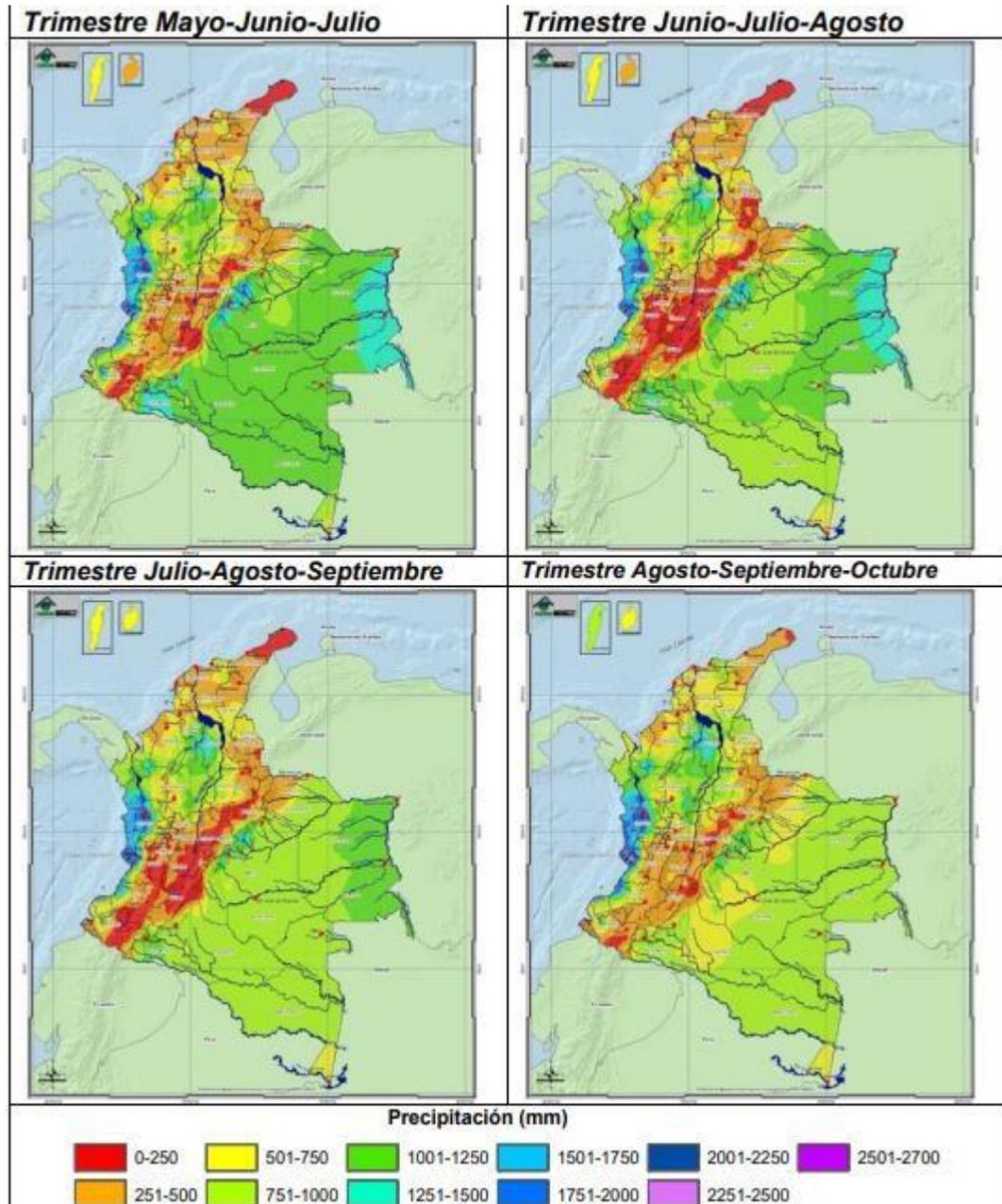
En el primer trimestre del año, La Guajira, al igual que toda la región Caribe colombiana, presenta su temporada más seca; esta situación mejora en el segundo trimestre, pero este departamento, con lluvias inferiores a los 250 mm (a lo largo del trimestre), sigue siendo la zona más seca del Caribe. En el siguiente trimestre, las lluvias decrecen moderadamente, para finalmente aumentar en los últimos meses del año, presentando sus valores más altos. Esta información se puede evidenciar de forma más detallada en los siguientes mapas:

Figura 61. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (1) [3]



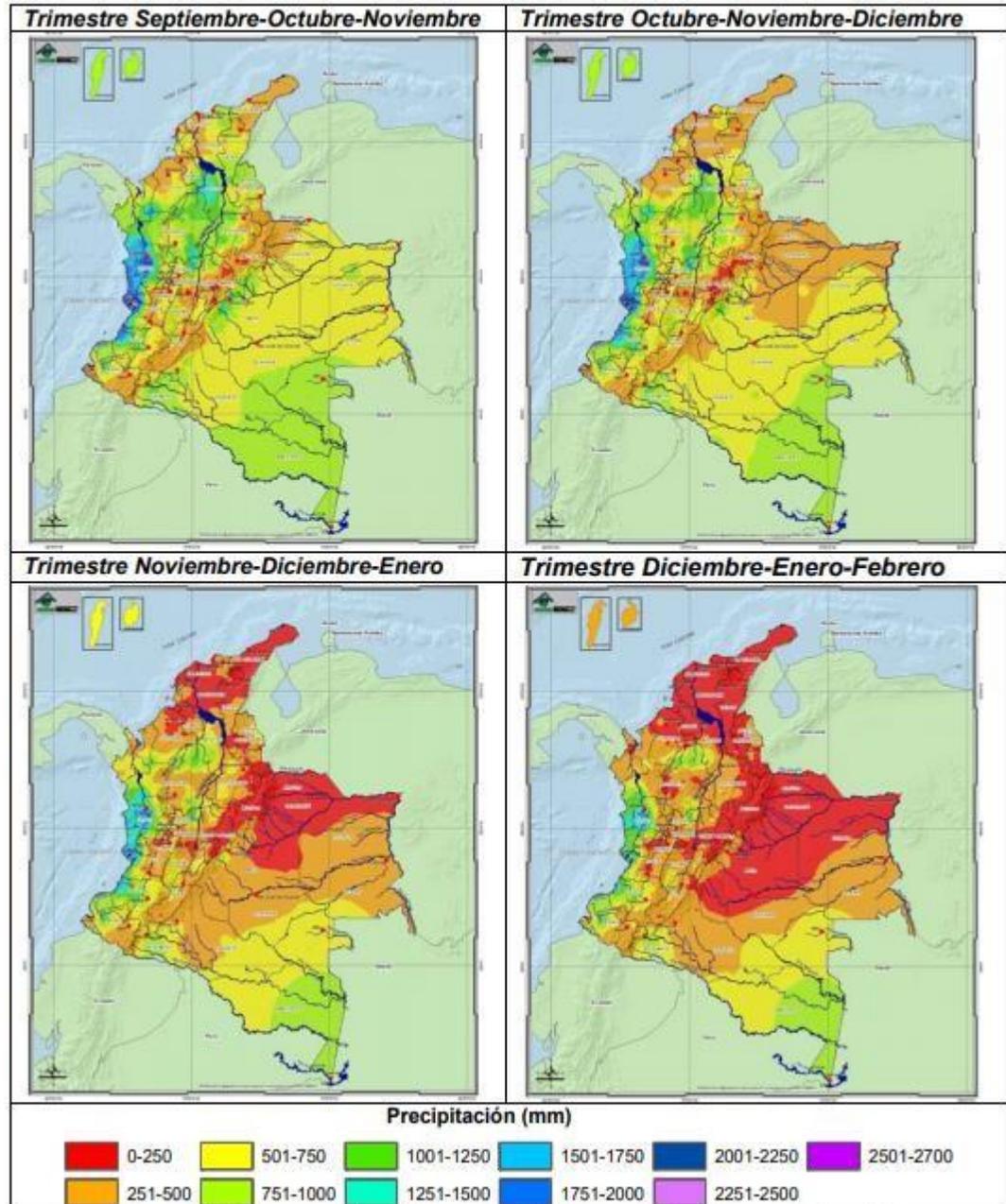
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 62. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (2) [3]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

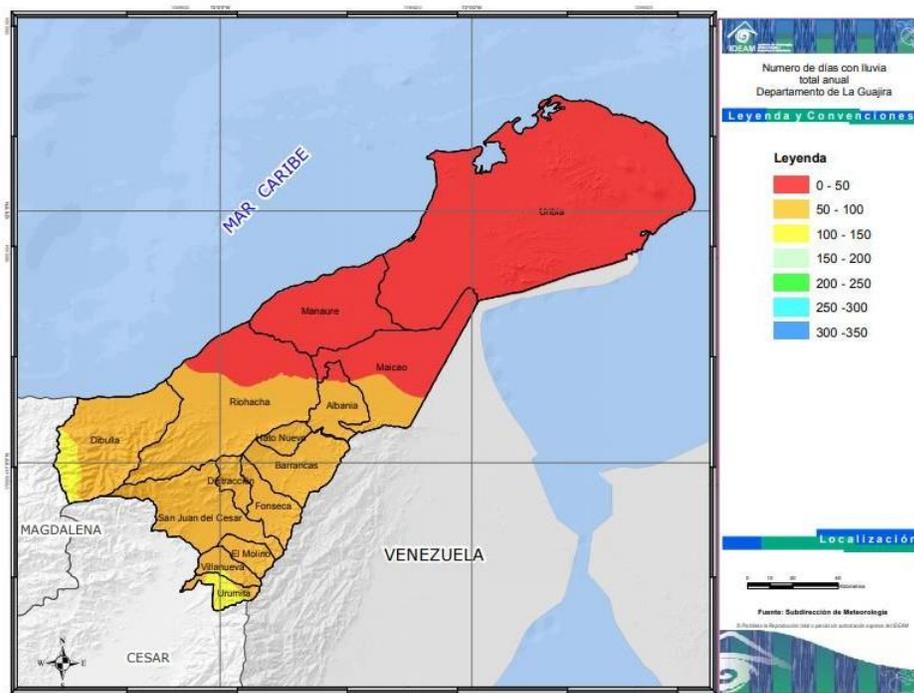
Figura 63. Mapa del comportamiento trimestral de las precipitaciones en Colombia (3) [3]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

En las zonas más áridas de La Guajira, el número total de días con lluvias no suele ser superior a 50, tal como se observa en la figura 9. El norte del territorio de Maicao, presenta dicho comportamiento; mientras que al sur se evidencia una mayor cantidad de lluvias.

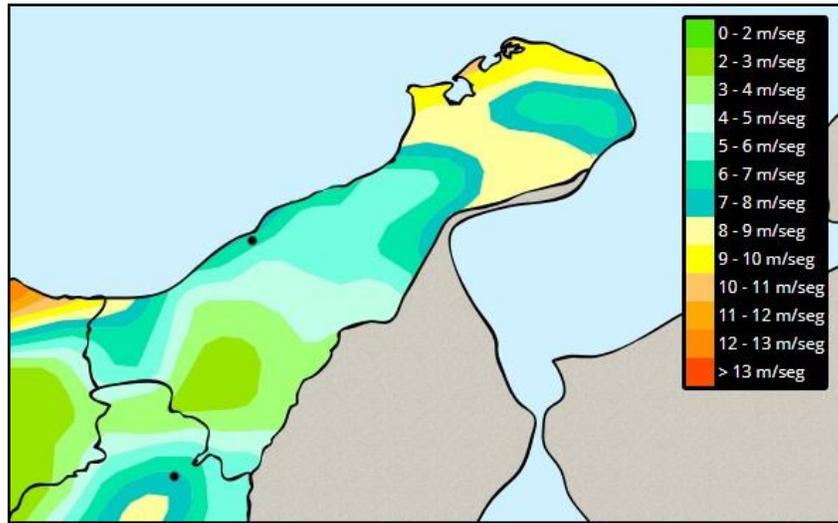
Figura 64. Mapa del número de días con lluvia anuales en La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

La Guajira, destaca con respecto a los otros departamentos del país por la intensidad de sus vientos, los cuales alcanzan velocidades máximas de 11 m/s en la zona norte. Usualmente, las temporadas de lluvia presentan vientos de bajas velocidades y las sequías llegan con fuertes vientos provenientes del noreste. [4] En el siguiente mapa se observa la velocidad media anual de los vientos de esta región.

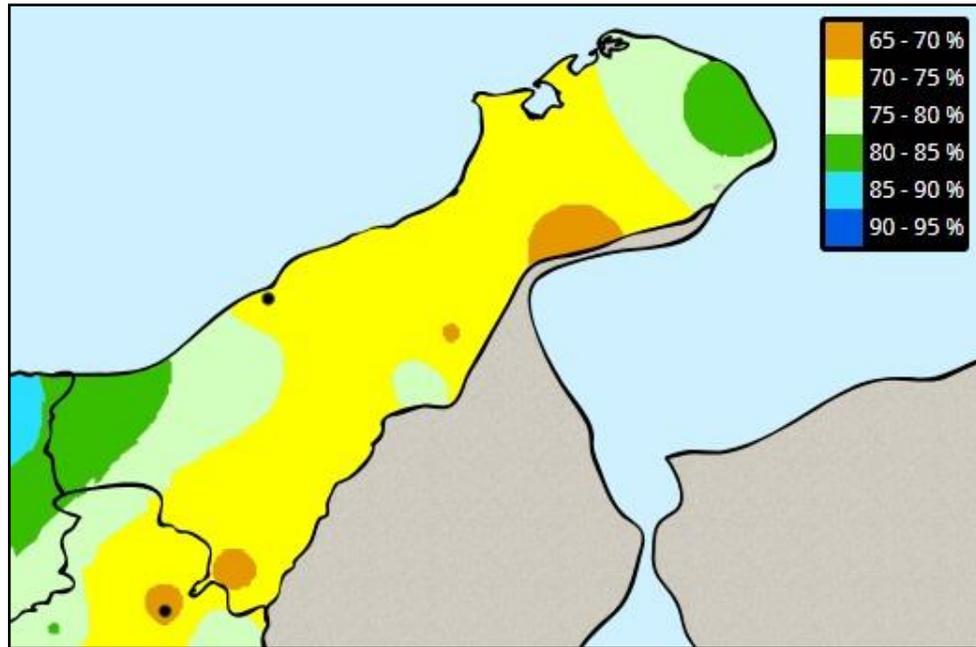
Figura 65. Mapa de la velocidad media anual de los vientos en La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

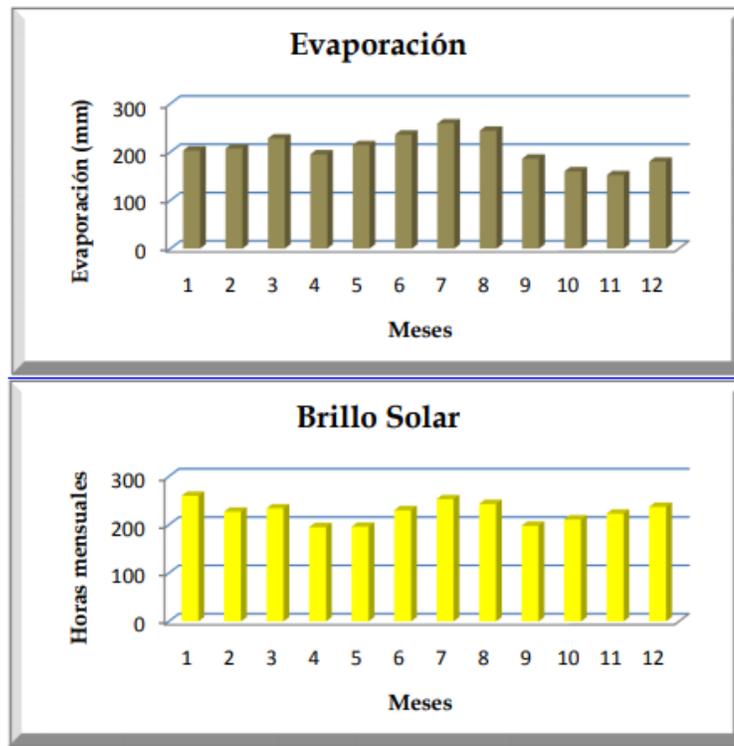
El promedio de la humedad relativa en la ciudad de Riohacha es de 72%, evidenciándose valores por debajo del 68% en épocas de sequía. En esta misma temporada, la evaporación y el brillo solar se encuentran en auge, este comportamiento se puede evidenciar en las gráficas representadas en la figura 12. [4]

Figura 66. Mapa de la humedad relativa media anual en La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

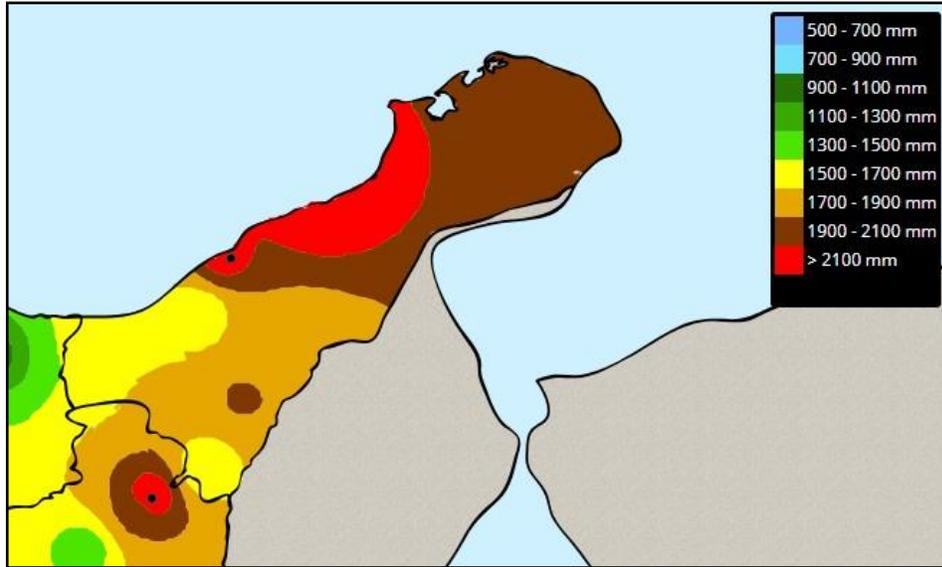
Figura 67. Promedio de la evaporación y las horas de brillo solar mensuales en Riohacha [4]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

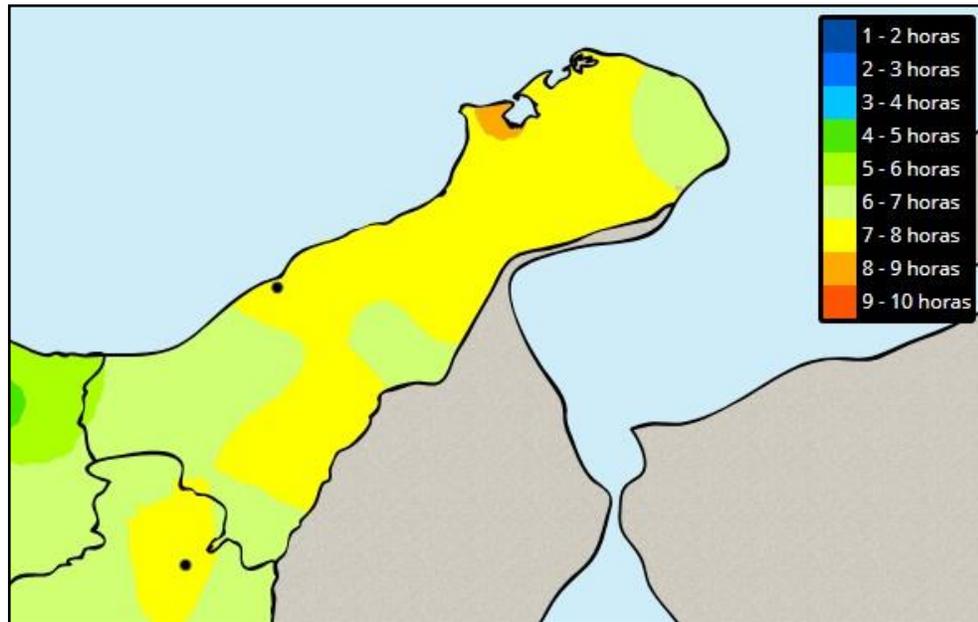
Tanto la evaporación como las horas de brillo solar presentan valores un poco inferiores en el municipio de Maicao si se comparan con los registrados en la capital del departamento. Aun así, estas variables siguen siendo elevadas con respecto al resto del país, observándose cifras entre 1700 a 2100 mm de agua evaporada anual y horas de brillo solar entre 6 a 8 horas diarias.

Figura 68. Mapa de la evaporación anual en La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 69. Mapa de las horas de brillo solar diarias en La Guajira [2]



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

BIBLIOGRAFÍA

1. TodaColombia. (2019). Clima Departamento de La Guajira. Recuperado de: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/la-guajira/clima.html>
2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Atlas Climatológico de Colombia. Recuperado de: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
3. Arango, C.; Dorado, J.; Guzmán D.; Ruiz, J. F. Climatología Trimestral de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
4. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano, Riohacha. Recuperado de: <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenRiohacha2.php>

8.2 EXPERIMENTO 1 – GERMINACIÓN DE FRÍJOL CAUPÍ

8.2.1 INTRODUCCIÓN

Este experimento se enfoca en la etapa inicial de crecimiento de la especie de frijol mencionada, específicamente en la germinación, y tiene como finalidad observar el comportamiento de esta planta ante diferentes porcentajes de salinidad, determinando así la tolerancia de la planta hacia esta variable. Adicionalmente, se utilizan diversos tipos de sustrato para definir las características del suelo que favorecen en mayor medida al desarrollo temprano del frijol, lo cual se decide a partir del porcentaje de germinación de las plantas y sus características físicas visibles. Los sustratos utilizados en este experimento no son sustratos convencionales de cultivos; se utilizan sustratos no convencionales con el fin de obtener un resultado de la germinación y cómo se ve afectada de acuerdo con las características físicas del sustrato como porosidad, capacidad de absorción, tamaño, etc.

Para observar el comportamiento de las plantas ante la salinidad se planea someterlas a 3 porcentajes diferentes de sal. Esto debido a que el agua disponible en diferentes comunidades indígenas de La Guajira que normalmente se obtiene de pozos, presenta salinidad. Por esto se definen porcentajes cercanos o inferiores al porcentaje de salinidad encontrada en el mar que varía de la zona, pero se aproxima a un 3.5%. Considerando esto se definen porcentajes de 1.5%, 2.3% y 3.5%.

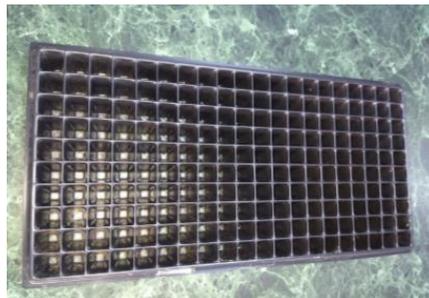
8.2.2 LISTA DE MATERIALES

- Sal marina
- Agua
- Frijoles
- Bandejas de cultivo
- Balanza digital
- Vasos de precipitado
- Esponja de cocina
- Algodón
- Hidrogel

8.2.3 PROCEDIMIENTO

Inicialmente, se llevó a cabo una selección o filtro de las semillas con mayor probabilidad de germinar, para ello se sembraron únicamente las semillas con una densidad superior a 997 Kg/m³. Este proceso se realizó embebiendo los frijoles en agua y retirar los frijoles que flotaran para dejar como semillas útiles aquellas que reposaran en el fondo del envase donde se embebieron. Posterior a esto, se realizó la siembra de los mismos en tres bandejas de germinación como la que se muestra a continuación.

Figura 70. Bandeja de cultivo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 71. Frijoles caupí cabecita negra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

En cada una de las bandejas se destinaron veinte espacios llenos de esferas de hidrogel para sembrar las semillas correspondientes al control del experimento, estas únicamente fueron regadas con agua sin sal para tener una referencia del comportamiento de las plantas a la salinidad.

Figura 72. Esferas de hidrogel



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 73. Sección destinada al control lista para el proceso de siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 74. Semillas sembradas en una de las secciones destinadas al control



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Para las demás semillas, se destinaron 96 espacios y se regaron con soluciones de agua con tres diferentes porcentajes de salinidad, 1.5%, 2.3% y 3.5%. Para realizar dichas soluciones se mezclaron 1.5 g, 2.3 g y 3.5 g de sal marina por cada 100 mL de agua.

Figura 75. Soluciones salinas con sus correspondientes porcentajes de salinidad



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

En cada bandeja se trabajó únicamente un porcentaje de salinidad y se utilizaron tres tipos de sustrato diferentes, algodón, esferas de hidrogel y esponja. Para ello se utilizaron 32 espacios por sustrato para la siembra de las semillas. Posterior a la siembra, se procedió a regar cada bandeja con la solución salina correspondiente y se recubrieron para evitar la exposición de las semillas a la luz.

Figura 76. Bandeja de cultivo con las semillas ya sembradas en los tres diferentes tipos de sustrato



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

8.2.4 RESULTADOS EXPERIMENTO 1

72 horas después de la siembra de las semillas, la sección destinada al control, regada con agua sin sales añadidas, se encuentra en etapa de germinación, evidenciándose ya la radícula en la mayoría de las plantas. Mientras que las semillas regadas con solución salina no presentan cambios visibles.

Figura 77. Bandeja A, regada con solución al 1.5% de salinidad, 72 horas después de la siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 78. Bandeja B, regada con solución al 2.3% de salinidad, 72 horas después de la siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 79. Bandeja C, regada con solución al 3.5% de salinidad, 72 horas después de la siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

A las 120 horas después de la siembra, emergieron 44 plantas de las 56 semillas de control; presentando un porcentaje de germinación de 78.57%. En el caso de las semillas de la bandeja A, en donde se llevó a cabo el riego con el 1.5% de salinidad, se observan siete plantas en su primera etapa de germinación, presentando una radícula visible. De esta cantidad, cinco de ellas fueron sembradas en algodón y dos en espuma.

Por otro lado, las semillas sembradas en las bandejas B y C, correspondientes al riego con el 2.3% y 3.5% de salinidad, respectivamente, no muestran signos de crecimiento. Y en la bandeja B, es posible apreciar dos semillas descompuestas, una de ellas con una coloración rojiza.

Figura 80. Bandeja A, regada con solución al 1.5% de salinidad, 120 horas después de la siembra



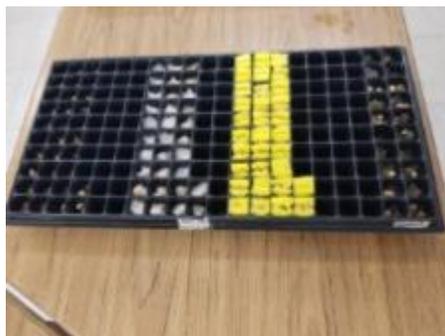
Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 81. Bandeja B, regada con solución al 2.3% de salinidad, 120 horas después de la siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 82. Bandeja C, regada con solución al 3.5% de salinidad, 120 horas después de la siembra



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Pasadas 168 horas de la siembra, ya es posible evidenciar los cotiledones de la mayoría de las plantas correspondientes al control; dicha sección presentó un porcentaje de germinación de 83.93%, correspondiente a 47 plantas de un total de 56. Pero las semillas regadas con solución salina no presentan cambios positivos en su desarrollo; por el contrario, se observa un aumento en la cantidad de semillas descompuestas.

Siete de los frijoles regados con solución salina al 1.5% evidencian un considerable grado de descomposición, presentando un olor fuerte y el crecimiento de otros seres vivos. Las mismas características se observan en dieciséis de las semillas regadas con solución salina al 2.3% y en dieciocho regadas al 3.5%.

En la bandeja A, nueve semillas presentaban una radícula visible, siete sembradas en algodón y dos en esponja, pero no se evidenció crecimiento alguno en las plantas que previamente habían presentado dicha raíz embrionaria. Mientras que en la bandeja B, únicamente tres semillas presentaban radícula y en la bandeja C ninguna.

Después de 264 horas de la siembra, se retiraron las plantas de las bandejas de cultivo y se procedió a medir su longitud.

Al realizar la medición, se observó que once de las plantas sembradas en el control (equivalente al 19.6% de las plantas regadas con agua sin sales añadidas) alcanzaron una longitud cercana a los 10 cm, contemplando dentro de este valor el largo del tallo y de las raíces. En estas plantas, a diferencia del resto de las leguminosas sembradas, es posible observar el estado de crecimiento temprano de las primeras hojas.

Figura 83. Muestra 1 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 84. Muestra 2 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 85. Muestra 3 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Por otro lado, 36 de las plantas sembradas en el control, el 64.3% del total de plantas sembradas en dicha sección, presentaron un crecimiento de 2 a 5 cm. En la mayoría de estas leguminosas es posible observar el cotiledón, plúmula y radícula.

Figura 86. Muestra 4 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 87. Muestra 5 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 88. Muestra 6 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Figura 89. Muestra 7 de leguminosa regada con agua sin sales añadidas (264 horas después de la siembra)



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

8.2.5 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 1

- Debido a la poca aireación, las semillas en el sustrato de espuma no mostraron un comportamiento positivo. Este sustrato, aunque presenta una alta capacidad de retención de humedad, no permite la renovación del aire alrededor de la semilla. Por otro lado, las esferas de hidrogel facilitaron la aireación de las semillas, pero la cantidad de agua absorbida por estas fue mínima debido a la concentración de sal perjudicando la germinación de las plantas.
- La capacidad de absorción de las esferas de hidrogel se vio limitada por la salinidad presente en el agua; en la sección destinada al control, este sustrato presentó una buena capacidad de retención de agua, contribuyendo en la germinación de los frijoles.

- El gran tamaño de las esferas de hidrogel, en comparación con la vía de drenaje del agua de riego, generó obstrucciones que provocaron el estancamiento del agua; esto permitió la proliferación de otras especies de seres vivos, como larvas de mosca, hongos y bacterias, y afectó negativamente el crecimiento de las plantas.
- El sustrato que presentó las mejores características fue el algodón, este permitió la aireación de las plantas sin dejar de suplir sus necesidades hídricas; evidenciándose una mayor cantidad de semillas con radícula visible en este tipo de sustrato. Aun así, el elevado porcentaje de salinidad impidió que las raíces se desarrollaran, lo cual detuvo el crecimiento de las plantas. Esto indica que una alta capacidad de retención de agua y una buena aireación son cruciales para asegurar el buen desarrollo de las leguminosas.
- Los valores de salinidad presentes en el agua de riego son muy elevados, imposibilitando el desarrollo de las plantas. Estos valores deben ser inferiores al 1.5% de salinidad para permitir que las leguminosas crezcan.

8.3 DIMENSIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO

El dimensionamiento del cultivo se realiza con base en las características propias del frijol Caupí cabecita negra y de la planta que lo produce, la cual posee similitudes con la planta de frijol guajiro. Estas características corresponden a datos aproximados de la producción y siembra de esta especie de leguminosa al implementar métodos tradicionales de agricultura. Cabe destacar que la frecuencia con la que se realiza la cosecha del frijol en un cultivo tradicional es de aproximadamente 3 a 4 meses, contemplando en este lapso de tiempo todo el proceso de desarrollo de la planta; mientras que, en un cultivo hidropónico, esta frecuencia puede verse reducida uno o dos meses dependiendo de la especie de frijol y las técnicas de hidroponía utilizadas. [24][25]

Tabla 30. Datos del frijol Caupí

DATOS: FRÍJOL CAUPÍ CABECITA NEGRA		
Nombre	Cantidad	Unidad
Vainas por planta	18	vainas/planta
Granos por vaina	14	granos/vaina
Masa del grano	0,24	g
Distancia de siembra	0,2	m
Espacio por planta	0,04	m ²

Fuente Arce, & Chauca. Manual de manejo de frijol Caupí para producir semilla

Tabla 31. Producción de frijol Caupí

PRODUCCIÓN POR PLANTA	
252	granos/planta
60,48	g/planta

Fuente Arce, & Chauca. Manual de manejo de frijol Caupí para producir semilla

Para dimensionar el sistema de acuerdo a las necesidades reales, se tiene en cuenta la cantidad de una porción de frijol como acompañante en una comida y se considera una población a beneficiar equivalente a 20 personas.[33]

Tabla 32. Porción de frijol por comida

Porción de frijol		
Nombre	Cantidad	Unidad
Porción	0,5	tazas
Masa por porción	30	g

Fuente Sifontes, Machado & Garófalo (2000) Alimentación y nutrición en situaciones de emergencia

De acuerdo a los datos presentes en las anteriores tablas, para proveerle una porción de frijol a cada individuo de la población previamente mencionada se necesitan 600 g de frijol; esto equivale a la producción por cosecha de 10 plantas. Teniendo esto en cuenta, se diseña un sistema que asegure que la comunidad tenga acceso a más de una comida por cosecha. Para ello, se plantea una zona de cultivo, correspondiente a la sección en donde las plantas germinan y se desarrollan, conformada por tubos de PVC de 8 o 6 pulgadas de diámetro y 6 metros de largo. Cada tubo posee orificios en su parte superior destinados a contener las plantas; la distancia entre estos agujeros se define de acuerdo a la distancia recomendada de siembra entre semillas de frijol en los cultivos tradicionales. Se determina que la zona de cultivo tenga 8 tubos de siembra y teniendo en cuenta una capacidad de 10 plantas por tubo se tiene en total una capacidad de 80 plantas.

Para definir la capacidad volumétrica del tanque donde se prepara el agua apta para el cultivo, se realiza el cálculo del consumo máximo teórico que tendrá la zona de cultivo. Para esto, se tiene en cuenta que el agua requerida equivale, como mínimo, al porcentaje de agua que absorbe el sustrato dentro de los tubos, que es aproximadamente 70%; para alcanzar dicho valor se contempla un llenado del 50% del volumen sin sustrato de cada tubo.

Tabla 33. Consumo de agua del sistema

VOLUMEN DE AGUA REQUERIDO POR EL SISTEMA		
Nombre	Cantidad	Unidad
Volumen de tubo	0,195	m ³
Volumen de sustrato por planta	0,004	m ³

Volumen de sustrato por tubo	0,04	m ³
Volumen libre por tubo	0,155	m ³
Volumen de agua por tubo	0,103	m ³
Volumen de agua en la zona de cultivo	0,825	m ³

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

El volumen de agua requerido en la zona de cultivo es de 0,825 m³ por lo cual es adecuado el uso de un tanque con capacidad de 1000 litros.

Como las condiciones climáticas de La Guajira presenta alta irradiancia solar, se calcula si es considerable la pérdida de agua por evapotranspiración, las áreas expuestas para el cálculo de la evapotranspiración se hacen con las áreas de los orificios que tiene cada planta en el tubo:

Tabla 34. Pérdidas por evapotranspiración del sistema

PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN				
		Nombre	Cantidad	Unidad
		Evapotranspiración anual mín. en la Alta Guajira	1600	L
		Evapotranspiración anual máx. en la Alta Guajira	1800	L
		Área expuesta por planta	0,0078	m ²
		Área expuesta por tubo	0,227	m ²
		Área expuesta en la zona de cultivo	1,82	m ²
Por tubo	Anual	Evapotranspiración mín.	0,364	m ³
		Evapotranspiración máx.	0,409	m ³
	Diaria	Evapotranspiración mín.	0,00099	m ³
		Evapotranspiración máx.	0,0011	m ³
Zona de cultivo	Anual	Evapotranspiración mín.	2,913	m ³
		Evapotranspiración máx.	3,27	m ³
	Diaria	Evapotranspiración mín.	0,0079	m ³
		Evapotranspiración máx.	0,0089	m ³

Fuente IDEAM (2020)

La evapotranspiración máxima en la zona de cultivo es de aproximadamente 9 litros por día, no es considerable para aumentar la capacidad del tanque de agua de 1000 litros, sin embargo, debido a la alta radiación solar, se cubrirá la zona de cultivo con una polisombra que disminuirá este impacto.

8.4 TABLAS CARACTERÍSTICAS DE SENSORES Y COMPONENTES

Tabla 35. Características sensores de pH (Vistrónica)

Características sensores de pH (Vistrónica)		
	Sensor de pH analógico para Arduino SEN0161	Sensor de pH analógico con electrodo industrial para Arduino SEN0169
range	0-14	0-14
Accuracy	0,1	0,1
Connector	Male BNC ad	Male BNC ad
Response time	≤ 2 min	≤ 2 min
Temperature range °C	1-80 °C	1-60 °C
Internal temperature sensor	No	No
Price	\$30	\$79

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 36. Características sensores de pH (Atlas Scientific)

Características sensores de pH (Atlas Scientific)					
	Consumer grade pH Probe	Industrial pH Probe	Spear Tip pH Probe	Lab grade pH Probe	Mini pH Probe
range	2-13	0-14	0-14	0-14	0-14
Accuracy	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Connector	Female SMA	Tinned leads	Male BNC	Male BNC	Female SMA
Resolution	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Response time	95% in 1s	95% in 1s	95% in 1s	95% in 1s	95% in 1s
Max pressure	100 PSI	100 PSI	100 PSI	100 PSI	100 PSI
Max depth	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m
Temperature range °C	1-60 °C	1-99 °C	1-99 °C	1-99 °C	1-99 °C
Cable length	1 m	3 m	1 m	1 m	0,89 m
Internal temperature sensor	No	Yes (PT-1000)	No	No	No
Time before recalibration	~1 year	~1 year	~1 year	~1 year	~1 year
Life expectancy	~2,5 years	~4 years	~2,5 years	~2,5 years	~2 years
Price	\$40	\$209	\$121	\$75	\$52

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 37. Características sensores de pH (Hanna Instrument)

Características sensores de pH (Hanna Instrument)	
Electrodo de pH AmpHel® de alta temperatura BNC+lead, 5 m	
range	0-14
Accuracy	0,1
Connector	Male BNC
Resolution	
Response time	≤ 2 min
Max pressure	87 PSI
Max depth	
Temperature range °C	0-100 °C
Cable length	5 m
Internal temperature sensor	Sí
Time before recalibration	
Life expectancy	~3 years
Price	\$390

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 38. Características cámaras

Características cámaras											
Cámara PTC06			Cámara OV7670			Cámara OV2640			Cámara uCAM - II		
Característica	Valor	Unidad	Característica	Valor	Unidad	Característica	Valor	Unidad	Característica	Valor	Unidad
Alimentación	5	Vcc	Alimentación	3,3	Vcc	Alimentación	3,3	Vcc	Alimentación	5	Vcc
Apertura focal	2,8		Apertura focal	1,8		Apertura focal	-		Apertura focal	2,6	
Field of View	64	°	Chief Ray Angle	25	°	Chief Ray Angle	25	°	Lens viewing angle	56, 76, 116 degrees	°
Módulo buffer	No		Módulo buffer	Si		Módulo buffer	No		Módulo buffer	Si	
Sensibilidad	-	V/Lux.sec	Sensibilidad	1,3	V/Lux.sec	Sensibilidad	0,6	V/Lux.sec	Sensibilidad	2,93	V/Lux.sec
Resolución	0,3	MPx	Resolución	0,3	MPx	Resolución	2	MPx	Resolución	0,3	MPx
Precio	93670	pesos	Precio	59800	pesos	Precio	44660	pesos	Precio	197320	pesos

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 39. Características de las bombas consideradas

Parámetro	Unidad	Bomba						
		Barnes BE 1 5-1 HF	Pedrollo PKm 60	Barnes CE 1 2-1	Aqua Pak AP-5XP-1127	Pedrollo PQm60	Taifu QB60-DC	BLDC DC80E-1280
Caudal máximo	L/min	30	40	121	35	38	35	77
Temperatura máxima	°C	40	60	70	60	90	60	100
Cabeza	m	35	38	14	34	40	30	11
Potencia consumida	W	539,0	605,0	645,7	635,0	605,0	370,0	120,0
Potencia entregada	W	373,0	373,0	186,5	373,0	373,0	48,9	48,9
Eficiencia	-	0,69	0,62	0,29	0,59	0,62	0,13	0,41
Caudal (H = 7 m)	L/min	30	37,5	120	33	37,5	28	43
Precio	COP	\$180.000	\$262.500	\$408.000	\$192.000	\$250.000	\$587.200	\$503.600

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 40. Características sensores de nivel de líquido (Pepperl + Fuchs)

Características sensores de nivel de líquido (PEPPERL+FUCHS)		
	Sensor ultrasónico UB1000-18GM75-I-V15	Sensor ultrasónico UMB800-18H40-I-2M-FA
Alimentación	10 - 30 VDC	10 - 30 VDC
Entrada de corriente	< 45 mA	< 15 mA
Conector	PUR 4 cables -Control por corriente	PUR 3 cables -Control por corriente
Rango de detección	70 - 1000 mm	70 - 800 mm
Rango de temperatura °C	-25°C - 85 °C	-25°C - 70 °C
Longitud del cable	2 m	2 m
Precio	\$ 1.129.737	\$ 3.032.247

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 41. Características sensores de nivel de líquido (Electronilab)

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 42. Características sensores de nivel de líquido (Electrónicas AFG)

Características sensores de nivel de líquido (Electrónicas AFG)			
Sensor Detector De Nivel Capacitivo Sin Contacto Xkc-y25-v		Sensor De Nivel Interruptor Flotador Acero Inoxidable Doble	
Alimentación	5-24 VDC	Alimentación	200 VDC máx
Entrada de corriente	5 mA	Entrada de corriente	3A máx
Conector	4 cables NPN	Conector	
		Presión máxima	100 PSI
Rango de detección	Cercano	Profundidad máxima	
Rango de temperatura °C	0°C - 100 °C	Rango de temperatura °C	0°C - 100 °C
Longitud del cable	2 m	Longitud del cable	0,3 m
Precio	\$ 33.650	Precio	\$ 42.000

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 43. Características sensores de conductividad eléctrica (Atlas Scientific)

Características sensores conductividad eléctrica				
	Conductivity Probe K 1.0	Conductivity Probe K 10	Mini E.C. Probe K 1.0	Conductivi
range	5 – 200,000 $\mu\text{S/cm}$	10 $\mu\text{S/cm}$ – 1 S/cm	5 – 200,000 $\mu\text{S/cm}$	
Accuracy	2%	2%	2%	
Connector	Male BNC	Male BNC	F	
Response time	90% in 1s	90% in 1s		
Max pressure	500 PSI	200		
Max depth	343 m			
Temperature range °C	1 – 110 °C			
Cable length				
Internal temperature sensor				
Time before recalibr				
Life ex				

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Tabla 44. Características controladores

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

8.5 DIMENSIONES DE TANQUES PLÁSTICOS

A continuación, se muestran las dimensiones de los tanques de agua Eternit:

Figura 90. Dimensiones de tanques Eternit

Volumen Bruto Litros	Dimensiones del tanque mm			Dimensiones de la tapa mm	
	D	D1	H	D2	H1
250	810	677	720	850	138
250 mini	932	815	443	989	124
500	931	758	934	975	170
1000	1.232	1.031	1.030	1.275	236
2000	1.520	1.220	1.550	1.585	280
6000	2.205	1.800	2.197	2.277	250
Agrotanque	932	815	443	-	-

Fuente Eternit (2016) Tanques Plásticos

8.6 DATOS ADICIONALES DE LA SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

A continuación, se presenta el cálculo del peso del sustrato y el agua en un tubo de cultivo.

$$m_{\text{Sustrato}} = \rho_{\text{Sustrato}} * V_{\text{Sustrato}}$$

$$m_{\text{Sustrato}} = 584,375 * (0,003 * 10)$$

$$m_{\text{Sustrato}} = 17,53 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{Agua}} = \rho_{\text{Agua}} * \pi * r^2 * d$$

$$m_{\text{Agua}} = 997 * \pi * 0,1016^2 * 6$$

$$m_{\text{Agua}} = 193,9863 \text{ Kg}$$

$$W_{\text{Total}} = W_{\text{Sustrato}} + W_{\text{Agua}}$$

$$W_{\text{Total}} = g * (m_{\text{Sustrato}} + m_{\text{Agua}})$$

$$W_{Total} = 2073,134 N$$

La fuerza calculada es distribuida uniformemente a lo largo de todo el tubo de PVC y se establecen cinco sujeciones correspondientes a las áreas en donde el contenedor es sostenido por la estructura de soporte. Las características del material del tubo se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 45. Propiedades del PVC

MATERIAL: PVC		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Módulo Elástico	2895,8	<i>MPa</i>
Coefficiente de Poisson	0,41	-
Densidad de Masa	1410	<i>Kg/m³</i>
Límite elástico	51,366	<i>MPa</i>
Límite de compresión	66,189	<i>MPa</i>

Fuente Harvel (2012) Physical Properties of PVC & CPVC Pipe

Las características propias del material de las estructuras de soporte se evidencian en la siguiente tabla; dicho material se seleccionó teniendo como primer criterio la disponibilidad o asequibilidad del mismo y como segundo criterio el comportamiento observado en la simulación de esfuerzos de Von Mises.

Tabla 46. Propiedades del cedro americano

MATERIAL: CEDRO AMERICANO		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Módulo Elástico	4850	<i>MPa</i>
Coefficiente de Poisson	0,4	-
Densidad de Masa	470	<i>Kg/m³</i>
Límite Elástico	35	<i>MPa</i>

Fuente A. Priscilla, M. Róger (2018) Propiedades de la madera de árboles de siete años de edad de dos poblaciones de Cedrela odorata plantadas en un sistema agroforestal

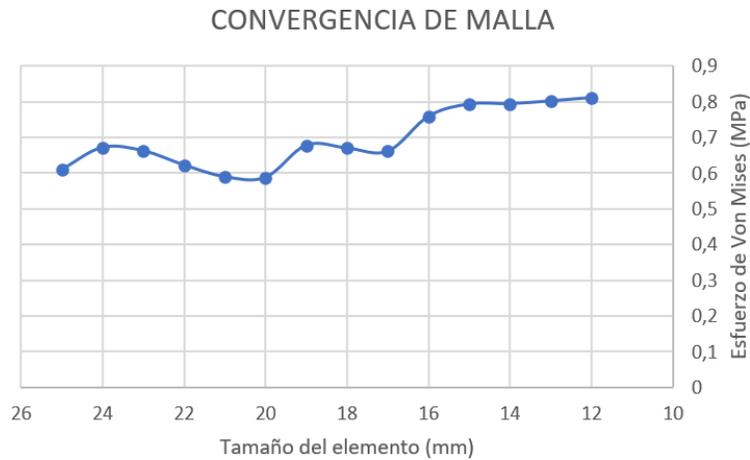
Durante el análisis, se lleva a cabo un proceso de convergencia de malla para definir el punto en el cual se estabiliza el valor máximo de los esfuerzos de Von Mises con base en las variaciones del tamaño del enmallado.

Tabla 47. Convergencia de malla de la simulación de esfuerzos máximos de Von Mises en la estructura de soporte

CONVERGENCIA DE MALLA	
Tamaño del elemento (mm)	Esfuerzo de Von Mises (MPa)
25	0,61
24	0,672
23	0,6626
22	0,6228
21	0,59
20	0,5883
19	0,6784
18	0,67
17	0,6612
16	0,7592
15	0,7933
14	0,7941
13	0,8017
12	0,8139

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

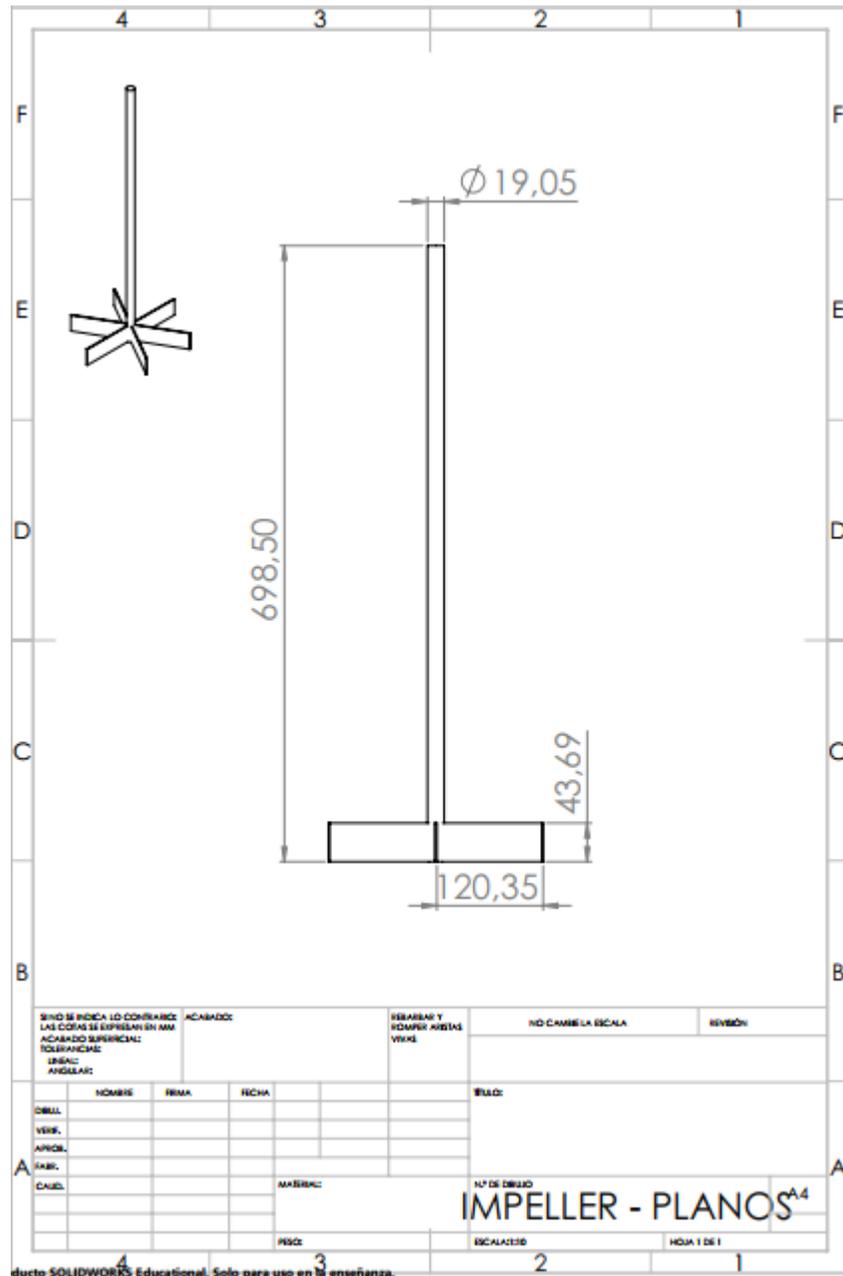
Figura 91. Convergencia de malla de la simulación de esfuerzos máximos de Von Mises en la estructura de soporte



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

8.7 PLANOS DEL SISTEMA HIDROPÓNICO

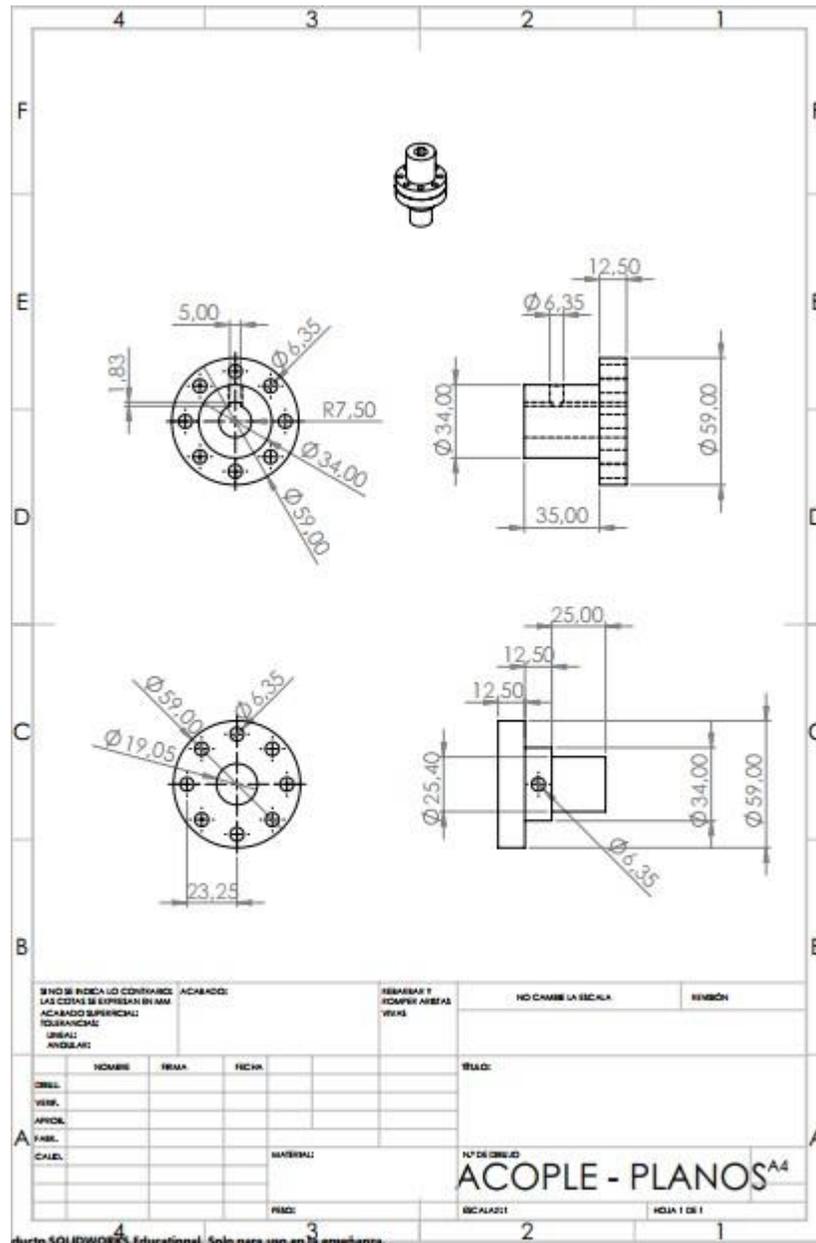
Figura 92. Plano del agitador



ducto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

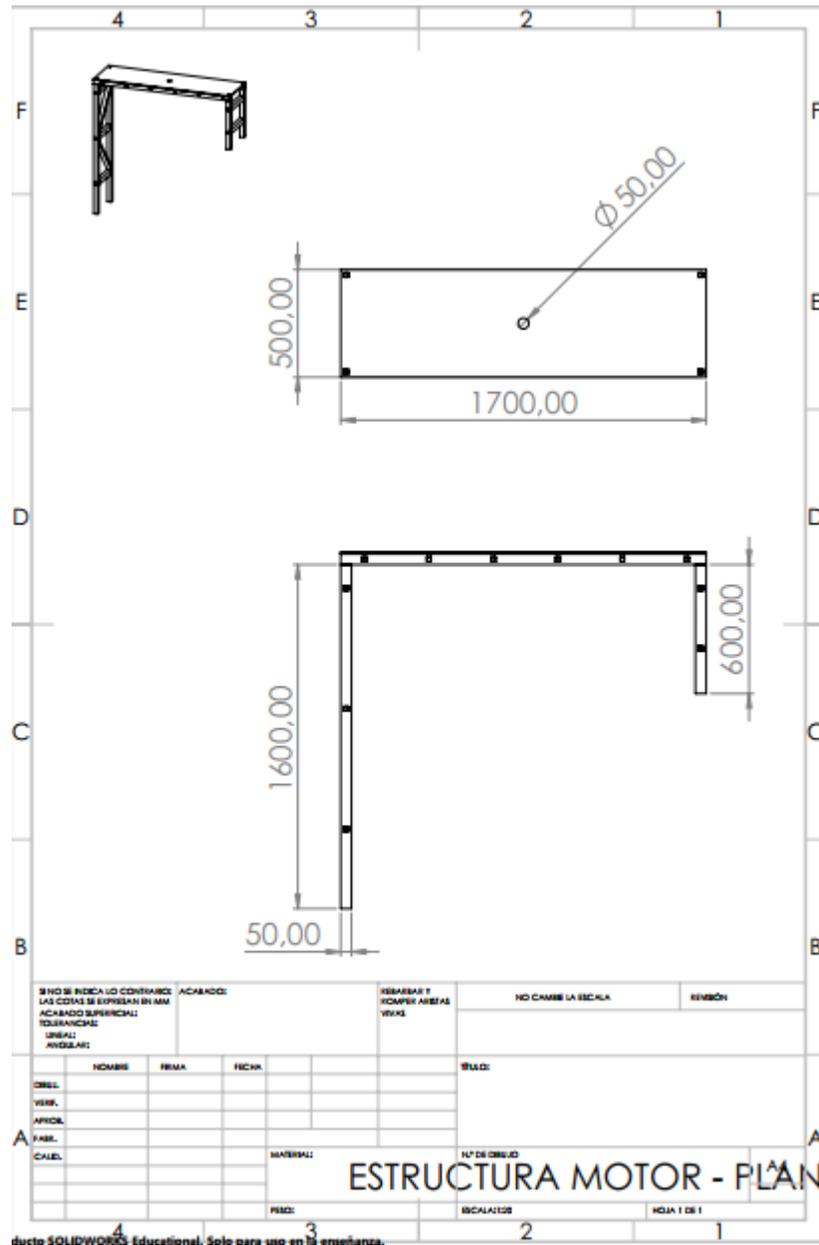
Figura 93. Plano del acople entre el eje del agitador y el eje del motor



ducto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

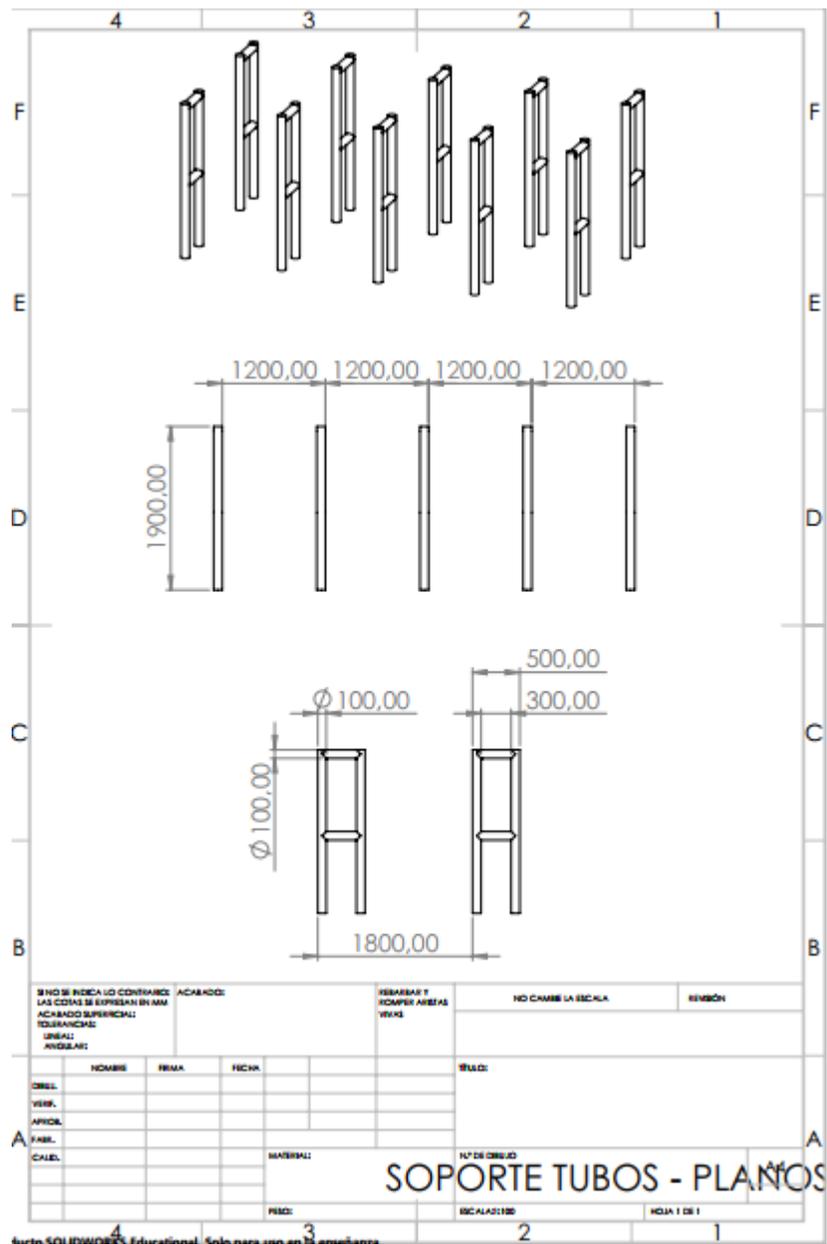
Figura 94. Estructura de soporte de contenedores de sustancias a dosificar y del motor del agitador



ducto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

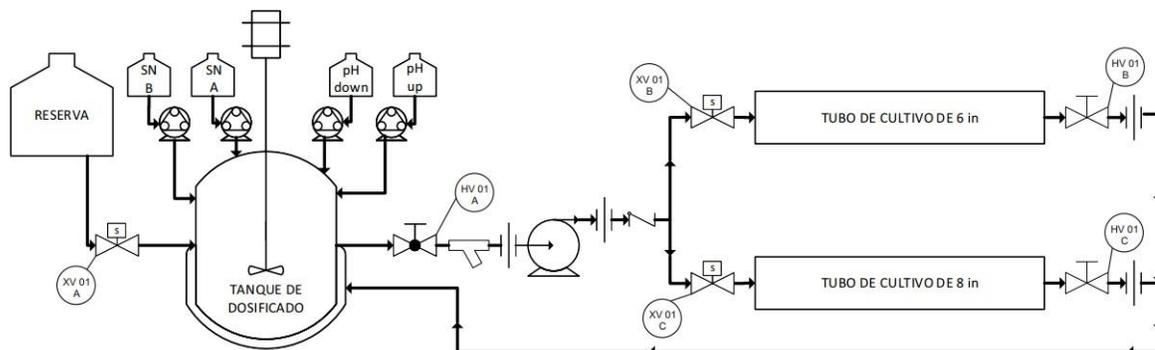
Figura 95. Plano de las dimensiones de la zona de cultivo en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Diagrama de tuberías del sistema implementado en Santander:

Figura 96. Diagrama de tuberías de la implementación en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

8.8 EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO EN SANTANDER

Figura 97. Vista en perspectiva de la implementación del sistema hidropónico en Santander



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 98. Circuito eléctrico del sistema



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 99. Tanque de dosificado con las bombas peristálticas y motor del agitador



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 100. Semillas de frijol guajiro cosechado



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

Figura 101. Vainas de frijol producidas por el sistema hidropónico



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)

8.9 MANUAL DE USUARIO



MANUAL DE USUARIO SISTEMA HIDROPÓNICO AUTOMATIZADO

Versión: 1.0

Fecha: 07/06/2021

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

ZONA DE CULTIVO Y SUBSISTEMA DE RIEGO

SUBSISTEMA DE CONTROL

SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

SUBSISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN DE AGUA

MONTAJE Y CONFIGURACIÓN

MONTAR LA ESTRUCTURA PARA SUJETAR LOS TUBOS DE CULTIVO.

UBICAR LOS TUBOS DE CULTIVO EN LA ESTRUCTURA.

UBICAR LOS TANQUES DE DOSIFICADO (1000 L) Y SUMINISTRO (250 L).

MONTAR LA ESTRUCTURA PARA UBICAR EL MOTOR DE MEZCLADO Y LAS BOMBAS PERISTÁLTICAS

INSTALAR EL CIRCUITO DE TUBERÍAS.

INSTALAR LOS ACTUADORES DEL SISTEMA.

INSTALAR LOS SENSORES DEL SISTEMA.

CABLEAR SENSORES Y ACTUADORES DEL SISTEMA.

ADECUACIÓN DE SUSTRATO Y SOLUCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

FUNCIONAMIENTO BÁSICO

SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA

SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AGUA

ZONA DE CULTIVO Y SUBSISTEMA DE RIEGO

SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

FUGAS EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y SALIDAS DE TUBOS DE CULTIVO.

INGRESO PARCIAL O INEXISTENTE DE AGUA DESDE EL TANQUE DE DOSIFICADO A LOS TUBOS DE CULTIVO.

INGRESO PARCIAL O INEXISTENTE DE AGUA DESDE LOS TUBOS DE CULTIVO AL TANQUE DE DOSIFICADO.

FALTA DE ALIMENTACIÓN EN LA CAJA ELÉCTRICA.

FALLA EN FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES.

PERFORACIÓN O FUGA EN LOS CONTENEDORES Y MANGUERAS DE LAS SOLUCIONES DE PH Y SOLUCIONES DE NUTRIENTES.

FALLA EN FUNCIONAMIENTO DE BOMBAS PERISTÁLTICAS O MOTOR DE MEZCLA.

INGRESO PARCIAL O INEXISTENTE DESDE EL FILTRO DE OSMOSIS INVERSA.

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

El propósito del sistema hidropónico automatizado en cuestión es, entre otros, permitir el cultivo de frijol sin depender de las condiciones o características del suelo, utilizando un material sustituto para cumplir las funciones correspondientes al soporte de las raíces y absorción del agua. Esta última es distribuida por medio de un circuito de tuberías que permite su recirculación, asegurando así el uso eficiente de los recursos hídricos.

El sistema está conformado por un subsistema de generación de energía, supliendo sus requerimientos energéticos a partir de la transformación de energía solar en energía eléctrica, un subsistema de desalinización del agua, permitiendo un mejor desarrollo de la materia vegetal, un subsistema de acondicionamiento del agua, en donde se adicionan los elementos necesarios para el adecuado crecimiento de las plantas, un subsistema de riego, destinado a la distribución del agua con nutrientes hacia la zona de cultivo, y un subsistema de control, el cual se encarga de darle las directrices de funcionamiento a los demás subsistemas.

El siguiente documento contiene la información necesaria para asegurar el adecuado funcionamiento del sistema hidropónico automatizado y mitigar los riesgos ligados a este.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Las actividades descritas a continuación tienen como objetivo prolongar la vida útil del sistema hidropónico automatizado y permitir su adecuado desempeño. Estas se encuentran agrupadas por la sección del sistema hidropónico en la cual se enfocan.

Zona de Cultivo y subsistema de riego

- **Verificación de la ausencia de fugas de agua, priorizando puntos críticos: válvulas, accesorios y salidas de tubos de cultivo.**

Frecuencia de realización: Una vez al mes.

Esta actividad debe realizarse durante el riego de la zona de cultivo, facilitando así la identificación de fugas de agua en las tuberías de ingreso y salida de dicha zona. En el caso de encontrar una zona húmeda en el suelo o una sección de la superficie externa del tanque o la tubería con presencia de agua, se debe identificar y sellar el punto desde donde está brotando el líquido. Para ello hay que limpiar la superficie húmeda identificada del sistema hidropónico y verificar la ubicación exacta del origen de la fuga. Posterior a esto, se debe proceder al ajuste de elementos y, de ser necesario, a la adición o cambio de la cinta de teflón en el caso de que el problema se presente en una de las uniones roscadas.

- **Inspección del correcto ingreso del agua a cada uno de los tubos de cultivo. No se requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada tres semanas.

Al momento del riego, se debe verificar que la bomba está trabajando adecuadamente, evidenciándose en la ausencia de vibraciones y ruidos anormales y en un flujo de agua constante en la entrada de la zona de cultivo.

- **Inspección del retorno paulatino del agua hasta el tanque de dosificado. No se requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada tres semanas.

Al momento del riego, se debe verificar que el agua que circula por los tubos de la zona de cultivo retorne adecuadamente al tanque dosificado, asegurando la ausencia de fugas o tapones en la tubería.

- **Limpieza de algas o residuos sólidos en los tubos de cultivo. No se requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada tres meses.

Se deben retirar los residuos y algas acumuladas en las salidas de los tubos de cultivo con ayuda de un cepillo, evitando así las obstrucciones de las vías de retorno y el estancamiento del agua.

- **Verificación de ausencia de obstrucciones o taponamientos de la válvula ubicada en la tubería de salida de la zona de cultivo.**

Frecuencia de realización: Una vez al mes.

Para realizar esta verificación, es necesario desmontar la sección de la tubería en donde se encuentra la válvula en cuestión, desenroscando la unión universal aguas abajo al elemento. Posteriormente, se debe retirar la válvula y remover los residuos que presente en su interior. Y, finalmente, se realiza el montaje de los elementos.

- **Verificación de ausencia de obstrucciones o taponamientos en las electroválvulas ubicadas en la tubería de entrada de la zona de cultivo.**

Frecuencia de realización: Una vez al mes.

Para realizar esta verificación, es necesario desmontar la sección de la tubería en donde se encuentra la electroválvula en cuestión, desacoplando el codo de ingreso al tubo de cultivo. Posteriormente, se debe retirar la electroválvula y remover el filtro que tiene, remover los residuos que presente en su interior. Y, finalmente, se realiza el montaje de los elementos.

- **Limpieza de filtro anterior a bomba.**

Frecuencia de realización: Una vez cada dos meses

Es importante verificar el estado del filtro previo a la bomba para asegurar el flujo adecuado de agua hacia la zona de cultivo; para ello se debe retirar el compartimento del filtro destinado a almacenar los residuos sólidos provenientes del tanque de dosificado. Luego de esto, hay que desechar los residuos almacenados, limpiar el compartimento y reintroducir el filtro.

Subsistema de control

- **Limpieza externa de la caja eléctrica y verificación de ausencia de humedad.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

Para realizar esta limpieza se recomienda desenergizar la caja con el fin de evitar cualquier inconveniente o corto, una vez desenergizada limpiar de manera superficial la caja eléctrica, revisando también que no entre ningún tipo de suciedad o líquido por el prensa cable.

- **Verificación del funcionamiento de los sensores de nivel y humedad.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

Por medio de los elementos indicadores propios de cada sensor, se debe verificar su funcionamiento. En el caso de los sensores de humedad, se comprueba que su alimentación eléctrica es adecuada al verificar que la luz LED presente en el módulo de transmisión esté encendida. Por otro lado, para determinar que los sensores de nivel están trabajando apropiadamente, se debe comprobar que esté encendida la luz LED ubicada en su parte trasera al encontrarse el nivel del agua dentro del tanque por encima de la posición del sensor.

- **Comprobación de la correcta transmisión y lectura de señales provenientes de los sensores del sistema. Requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

Comprobar el estado de los sensores y sus respectivas señales de entrada al PLC para verificar que se comporten correctamente, asegurando el funcionamiento adecuado del sistema.

- **Ajuste de conexiones del tablero de control. Requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

Realizar una revisión de las conexiones de las entradas y salidas del PLC, los transmisores, las borneras, la fuente de alimentación y el apartado eléctrico en general contenido en la caja eléctrica.

Subsistema de acondicionamiento del agua

- **Inspección del estado de las mangueras de dosificación de nutrientes y soluciones reguladoras de pH.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

En esta actividad se debe comprobar visualmente que las mangueras transparentes conectadas a las bombas peristálticas, encargadas de la dosificación de nutrientes y sustancias reguladoras de pH, no presenten ningún tipo de obstrucción o rotura; de modo que no se vea obstaculizado el acondicionamiento del agua de riego. En caso de encontrar una manguera rota, se debe reemplazar el elemento en cuestión o, si no se tiene disponible un repuesto, sellar la abertura con cinta mientras es adquirida la nueva manguera.

- **Revisión del funcionamiento de las bombas peristálticas.**

Frecuencia de realización: Cada mes.

En el momento de la dosificación de nutrientes, el cual se realiza justo después de la adición de agua al tanque de dosificado para recuperar el nivel perdido en el riego previo, se debe verificar que se activen las bombas peristálticas encargadas de suministrar las soluciones de nutrientes y que estos líquidos fluyan a través de las mangueras correspondientes.

- **Revisión del funcionamiento del motor de mezcla.**

Frecuencia de realización: Cada mes.

Durante el proceso de mezclado, proceso que sucede posterior a la dosificación de nutrientes, se debe verificar que el motor encienda e inicie la rotación sin quedar atascado o un movimiento demasiado lento o rápido y que mantenga un movimiento constante durante todo su tiempo de funcionamiento.

Subsistema de generación de energía

- **Limpieza de los paneles solares**

Frecuencia de realización: Una vez cada tres meses

Para realizar esta limpieza se recomienda desconectar y apartar el panel a una zona donde se pueda manipular con más libertad con el fin de evitar cualquier inconveniente. Una vez se desconecta se limpia con agua y jabón, teniendo en cuenta únicamente que cuando se finalice se debe utilizar agua suficiente para evitar que queden residuos de jabón y, finalmente, se deja secar completamente para conectar nuevamente.

- **Ajuste de conexiones del sistema fotovoltaico. Requiere personal técnico o especializado.**

Frecuencia de realización: Una vez cada cuatro meses

Realizar una revisión de las conexiones del sistema fotovoltaico, sus salidas a la caja eléctrica, las borneras, y el apartado eléctrico en general que se encuentra en el sistema fotovoltaico.

Subsistema de desalinización del agua

- **Inspección del estado de las mangueras y sistema de bombeo del sistema de desalinización.**

Frecuencia de realización: Cada mes

En esta actividad se debe comprobar visualmente que las mangueras encargadas de transportar el agua dentro del sistema de desalinización no presenten ningún tipo de perforación o fuga que pueda generar pérdidas o un mal funcionamiento del elemento; así mismo, verificar que la bomba incorporada en el sistema no tenga ningún comportamiento extraño, tales como vibraciones excesivas o ruidos anormales. En caso de encontrar algún desperfecto, se debe reemplazar el elemento en cuestión o, si no se tiene disponible un repuesto, sellar la abertura con cinta mientras es adquirida la nueva manguera.

- **Inspección del estado de los filtros del sistema de desalinización.**

Frecuencia de realización: Una vez cada tres meses

En esta actividad se debe comprobar visualmente que los filtros se encuentran en su lugar y no presentan fugas o alguna clase de obstrucción que perjudique tanto el paso como el tratamiento del agua. Es importante mencionar que los filtros tienen un tiempo definido de vida útil, motivo por el cual se recomienda realizar el cambio para evitar posibles afectaciones al filtro de osmosis inversa, así como un mal filtrado del agua, lo cual significa que se obtiene agua que no está en condiciones adecuadas, es por esto que en caso de encontrar algún desperfecto, se debe reemplazar el elemento en cuestión o, si no se tiene disponible un repuesto, sellar la abertura con cinta mientras es adquirida la nueva manguera.

MONTAJE Y CONFIGURACIÓN

Para la instalación del sistema hidropónico automatizado se debe seguir una serie de pasos que serán presentados a continuación:

1. Montar la estructura para sujetar los tubos de cultivo.

Para este paso, se debe contar con las estructuras diseñadas para soportar el peso de los tubos de cultivo, alambre y estar en una zona que cuente con algún otro tipo de apoyo como por ejemplo, postes o árboles. Una vez se cuenta con estos elementos se procede a la alineación de cada estructura y su sujeción por medio del alambre entre sí y al apoyo externo.

2. Ubicar los tubos de cultivo en la estructura.

Para este paso, se deben tener los tubos de cultivo debidamente perforados, una vez perforados se deben pasar una a una entre cada estructura y apoyándose con ayuda de alambre en cada estructura, finalizando con 5 puntos de apoyo para soportar el peso de tubos, sustrato, plantas y agua.

3. Ubicar los tanques de dosificado (1000 L) y suministro (250 L).

Para este paso, en caso de no existir un desnivel entre superficies se debe adaptar el terreno ya que se debe ubicar el tanque de dosificado (1000 L) a un nivel de altura inferior al de la zona de cultivo y del tanque de suministro (250L); esto con el fin de reducir la cantidad de bombas necesarias para el sistema, realizando el retorno de agua de la zona de cultivo, así como el llenado del tanque de dosificado por medio de gravedad.

4. Montar la estructura para ubicar el motor de mezclado y las bombas peristálticas.

Para este paso, se debe tener la estructura diseñada con base en la altura del tanque de dosificado (1000 L), se debe alinear el centro del tanque con el centro de la estructura ya que ahí se encuentra la perforación por donde se va a introducir y acoplar el impeller al motor de mezclado, también se verifica que el terreno donde se ubique la estructura sea estable.

5. Instalar el circuito de tuberías.

Para este paso, se tiende la tubería desde la salida del tanque hasta la bomba (entre estos dos puntos se ubica un filtro), posteriormente se tiende la tubería desde la bomba hasta la bifurcación de la tubería para los distintos tubos de la zona de cultivo, en este punto se instalan tanta tubería como accesorios y electroválvulas sean necesarias dependiendo de la cantidad de tubos en la zona de cultivo; en la salida de la zona de cultivo se tiende nuevamente tanta tubería como accesorios y válvulas se necesiten hasta el punto de convergencia que retorna el agua al tanque de dosificado por medio de gravedad.

6. Instalar los actuadores del sistema.

Para este paso, se debe contar con todos los actuadores del sistema y los elementos necesarios para su instalación, se indica la instalación de actuadores en el orden de funcionamiento de los mismos en el sistema, indicado esto, se inicia con el motor de mezclado, el cual se debe centrar en la estructura soporte de motor y bombas peristálticas, asegurando con tornillos el motor a la estructura, se instalan las cuatro bombas peristálticas con ayuda de pie amigos para asegurarlas a la estructura; se continúa con la instalación de la bomba, ubicándola después del filtro y tubería proveniente del tanque de dosificado con sus respectivos acoples, se instalan la cantidad de electroválvulas con sus respectivos accesorios por cada bifurcación con base en el número de tubos de cultivo. El eje del motor debe acoplarse a la chumacera junto con el eje del impeller. La chumacera debe ser de un material inoxidable o protegerse contra el óxido ya que estará expuesto a humedad constante.

7. Instalar los sensores del sistema.

Para este paso, se debe contar con todos los sensores del sistema y los elementos necesarios para su instalación, se indica la instalación de sensores en el orden de funcionamiento de los mismos en el sistema, indicado esto, se inicia con los sensores de pH y conductividad eléctrica (CE), de ahora en adelante se habla de ellos como uno solo ya que al ser sumergibles su proceso de instalación es idéntico. Primeramente, se forra la

conexión de sensor al cable con una capa de cinta aislante y una capa de cinta vulcanizada para evitar filtraciones de agua en los cables; una vez se tiene el cable protegido se asegura a la pared interna del tanque por medio de amarres plásticos. En cuanto a los sensores de nivel se acopla una base de riel omega tipo lamina perforada para introducir el sensor y ajustarlo con sus accesorios; los sensores finales vendrían siendo los sensores de humedad relativa, de ahora en adelante se habla de ellos como uno solo ya que al ser el mismo sensor su proceso de instalación es idéntico; se ubica la sonda dentro de una de las perforaciones del tubo de cultivo y se extiende el cable hasta una zona donde esté a salvo de salpicaduras de agua o cualquier entrada de algún otro contaminante externo.

8. Cablear sensores y actuadores del sistema.

Para este paso, se debe contar con todos los sensores y actuadores del sistema y los elementos necesarios para su instalación, para el caso de los sensores de pH y CE es necesario tender cable proveniente del tanque y realizar la conexión al respectivo transmisor, este proceso se repite con los sensores de humedad relativa ya que se necesita un proceso de acondicionamiento de señal también para estos ya que son los únicos sensores análogos. Continuando con los sensores de nivel, que son en su totalidad digitales, únicamente es necesario realizar la conexión de alimentación y señal del sensor; en el apartado de actuadores, la instalación solo consta de la alimentación de estos interrumpida por el relé del PLC para su funcionamiento de manera lógica. Como observación adicional, se debe tener en cuenta que la alimentación de las bombas peristálticas es a 10VDC en lugar de 24VDC como en el resto de elementos del sistema.

9. Llenar contenedores de sustrato y soluciones para el funcionamiento del sistema

En este apartado se fabrican macetas de malla para cada una de las perforaciones de los tubos de la zona de cultivo, contenedores donde se deben llenar de sustrato a ras del tubo, así mismo se deben llenar los contenedores de soluciones cada uno con su respectiva solución y finalmente, se llenan los tanques de dosificado (1000L) y suministro (250L).

FUNCIONAMIENTO BÁSICO

En este apartado se explica de una manera un poco más detallada el funcionamiento del sistema hidropónico automatizado, para esto se explicará el funcionamiento del sistema hidropónico automatizado dividido en los tres subsistemas principales para el funcionamiento, los cuales son: “Subsistema de

desalinización del agua”, “Zona de cultivo y Subsistema de riego” y “Subsistema de acondicionamiento de agua”.

Subsistema de desalinización del agua

El subsistema de desalinización de agua se encarga de adecuar (disminuir el porcentaje de salinidad de agua) y suministrar el agua obtenida del sistema de bombeo para su uso en el sistema hidropónico automatizado por medio de un filtro de osmosis inversa, y su funcionamiento consiste en la activación del filtro únicamente cuando el tanque de dosificado solicite agua debido a un nivel bajo, detectado por medio de la sensórica del sistema, entonces, se detecta un nivel de agua bajo, lo cual indica que se debe suministrar agua al tanque, en este momento se activa el filtro de osmosis inversa para purificar el agua con un alto porcentaje de salinidad obtenida y finalmente se bombea el agua ya con un nivel inferior de porcentaje de salinidad al tanque de dosificado, donde se inicia el funcionamiento del subsistema de acondicionamiento de agua.

Subsistema de acondicionamiento de agua

El subsistema de acondicionamiento de agua se encarga de controlar los valores de pH y CE y opera de la siguiente manera: Se miden los valores de pH y CE, si se inicia desde el punto de partido es muy probable que estos valores no indiquen condiciones óptimas para riego, en ese caso, el PLC se encarga de activar las bombas peristálticas que controlan el flujo de la solución requerida, bien sea sustancia buffer de pH positivo, sustancia buffer de pH negativo, solución de elementos mayores y solución de elementos menores. Una vez se suministran estas sustancias por medio de las bombas peristálticas y en las cantidades definidas por la lógica programada con base en los valores sensados, se realiza el proceso de mezclado con la activación del motor de mezclado por el tiempo definido en la lógica programada, una vez finaliza el proceso de mezclado se sensa nuevamente los valores de pH y CE para verificar que el agua se encuentre en condiciones óptimas de riego se procede a la etapa de riego, etapa que se explica en el apartado siguiente, correspondiente a la zona de cultivo y subsistema de riego.

Zona de cultivo y subsistema de riego

El proceso se inicia en el punto inmediatamente después al proceso de acondicionamiento de agua en el cual se suministraron y mezclaron las soluciones nutritivas y sustancias buffer al tanque de dosificado, el tanque de suministro se encuentra lleno, los tubos de cultivo cuentan con una semilla en cada contenedor de malla pero se encuentran secos; al momento de alimentar el sistema, el PLC debe esperar a que se llegue a horario de riego (horario definido con base en recomendaciones de riego de cultivos según la FAO) para hacer efectiva la programación. Una vez se llega a horario de riego, el PLC verifica por medio de los sensores de humedad relativa si es necesario un riego; entonces, según la lógica programada, si se debe realizar un riego inicia el funcionamiento del subsistema de acondicionamiento de agua (cuyo funcionamiento se explicó anteriormente), ya que es en este subsistema en el que se adecua el agua para poder realizar el riego. Una vez que el subsistema de acondicionamiento de agua indica que se tiene agua en condiciones óptimas para el riego se procede a activar la bomba y electroválvula

para permitir el acceso del agua a la zona de cultivo, proceso que tardará tanto tiempo como se haya definido en la lógica programada, una vez se detiene la bomba el agua que se encuentra en los tubos de cultivo regresa nuevamente al tanque de dosificado por gravedad, cuando retorne completamente, el sistema debe esperar el siguiente horario de riego para repetir el proceso descrito recientemente.

SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En este apartado se tocan posibles eventualidades que se puedan llegar a presentar en el sistema hidropónico automatizado y una guía para su solución total o parcial en caso que se necesite una intervención más profunda.

- **Fugas en válvulas, accesorios y salidas de tubos de cultivo.**

En caso de que se presente una fuga en alguna de las válvulas o accesorios de unión de tubería, se recomienda desacoplar el elemento, inspeccionar el motivo de la fuga. Dependiendo de la seriedad del origen de la fuga, los pasos a seguir son encintar con teflón el elemento y acoplarlo nuevamente o, como última solución, acoplar el elemento con un tapón provisional mientras se consigue el reemplazo de la pieza.

- **Ingreso parcial o inexistente de agua desde el tanque de dosificado a los tubos de cultivo.**

En caso de que se presente un ingreso incorrecto del agua a los tubos de cultivo, se recomienda realizar un seguimiento del recorrido del agua desde el tanque de dosificado hasta la entrada de los tubos de cultivo, donde se podrán encontrar inconvenientes en la bomba, tubería, accesorios y electroválvulas.

- En caso de que se observe un inconveniente en las electroválvulas, se recomienda verificar la conexión de estas, desacoplar y realizar una limpieza manual al filtro incorporado en la electroválvula y acoplarse nuevamente.
- En caso de que se observe un inconveniente en alguno de los accesorios, se recomienda desacoplar, realizar una limpieza manual y acoplarse nuevamente.
- En caso de que se observe un inconveniente en la bomba, se recomienda verificar la conexión de esta, desacoplar, realizar una limpieza manual al filtro previo a la bomba, realizar una limpieza a la bomba y realizar una prueba sin ingreso a los tubos de cultivo antes de acoplarse nuevamente.

- En caso de que se observe un inconveniente en la válvula de paso, se recomienda desacoplar, realizar una limpieza manual verificar el paso del agua y acoplarse nuevamente.

Para estos casos si se observa que los pasos recomendados no solucionan el problema se recomienda detener el sistema mientras se consigue el reemplazo del elemento.

- **Ingreso parcial o inexistente de agua desde los tubos de cultivo al tanque dosificado.**

En caso de que se presente una salida incorrecta del agua desde los tubos de cultivo al tanque de dosificado, se recomienda realizar un seguimiento del recorrido del agua desde la salida de los tubos hasta el tanque de dosificado donde se podrán encontrar inconvenientes en la válvula de paso, tubería y accesorios.

- En caso de que se observe un inconveniente en la válvula de paso, se recomienda desacoplar, realizar una limpieza manual verificar el paso del agua y acoplarse nuevamente.
- En caso de que se observe un inconveniente en alguno de los accesorios se recomienda desacoplar, realizar una limpieza manual y acoplarse nuevamente.

- **Falta de alimentación en la caja eléctrica.**

En caso de que se presente una situación como esta, se recomienda verificar la conexión de alimentación desde el sistema fotovoltaico, verificar que no se haya cortado ningún cable, verificar que el material particulado si permite el contacto entre conectores, verificar que no exista corrosión o sulfatación en los terminales y en caso de que se presente cualquier anomalía de este tipo, asegurar que esta desconectado y recablear los elementos necesarios.

- **Falla en funcionamiento de los sensores.**

En caso de que se presente una situación como esta, se recomienda verificar de manera visual por medio de las luces indicadoras de cada sensor que estén alimentados, verificar la conexión de alimentación de los sensores desde la fuente, verificar la conexión de señal de los sensores al PLC, verificar que no se haya cortado ningún cable, verificar que no exista material particulado que impida el contacto entre conectores, verificar que no exista corrosión o sulfatación en los terminales y en caso de que se presente

cualquier anomalía de este tipo, asegurar que está desenergizado y recablear los elementos necesarios.

Para estos casos si se observa que los pasos recomendados no solucionan el problema se recomienda detener el sistema mientras se consigue el reemplazo del elemento.

- **Perforación o fuga en los contenedores y mangueras de las soluciones de pH y soluciones de nutrientes.**

En caso de que se presente una fuga en alguno de los contenedores o mangueras que almacenan y transportan las soluciones de pH y nutrientes respectivamente se recomienda realizar un seguimiento del recorrido que pueden realizar las soluciones para identificar el origen de la fuga, en caso de que se observe una perforación o malformación en los elementos, se recomienda tapar de manera manual la fuga mientras se consigue y reemplaza el elemento.

- **Falla en funcionamiento de bombas peristálticas o motor de mezcla.**

En caso de que se presente una situación como esta, se recomienda verificar la conexión de alimentación de los actuadores desde las salidas de relé del PLC, verificar que no se haya cortado ningún cable, verificar que no exista material particulado que impida el contacto entre conectores, verificar que no exista corrosión o sulfatación en los terminales y en caso de que se presente cualquier anomalía de este tipo, asegurar que está desenergizado y recablear los elementos necesarios.

Para estos casos si se observa que los pasos recomendados no solucionan el problema se recomienda detener el sistema mientras se consigue el reemplazo del elemento.

- **Ingreso parcial o inexistente desde el filtro de osmosis inversa.**

En caso de que se presente una salida incorrecta del agua desde el subsistema de desalinización al tanque de dosificado, se recomienda realizar un seguimiento del recorrido del agua donde se podrán encontrar inconvenientes en la tubería, accesorios o en el peor de los casos, el filtro.

- En caso de que se observe un inconveniente en alguno de los accesorios se recomienda desacoplar, realizar una limpieza manual y acoplarse nuevamente.

- En caso de que se observe un inconveniente en el filtro, se recomienda desacoplar realizar una limpieza manual y acoplarse nuevamente.

8.10 CÓDIGO DE VISIÓN ARTIFICIAL

El código presentado está en lenguaje Python 3. Para ser puesto en práctica tiene que ser ejecutado en un computador con este lenguaje instalado. Puede ser ejecutado desde cualquier entorno de desarrollo integrado (IDE) compatible con el lenguaje como Spyder o PyCharm. Si no se cuenta con un IDE, puede ejecutarse desde el IDLE (Entorno de desarrollo y aprendizaje integrado) que se instala en el computador al instalar Python, para esto se debe copiar el código en un archivo de texto, guardarlo, cambiarle la extensión del archivo por “.py”, luego en opciones del archivo abrirlo por medio del IDLE. El programa contempla que las imágenes a analizar se encuentren en la misma carpeta y los archivos de texto de la información se guardan en las especificadas en el código, así como el nombre de estos.

El código correspondiente al análisis de visión artificial es el siguiente:

```
"""
```

Código visión artificial para determinar la altura de las plantas del experimento

Adicionalmente se calcula el área de verde que se detecta de las fotos

Creado por:

Michael Montañez

Nelson Higuera

Cristian Benitez

```
"""
```

```
import cv2 #Librería con funciones de visión artificial
```

```
import numpy as np #Librería con funciones matemáticas para matrices y vectores
```

```
dayExp = input('inserte el día del experimento: ') #Se le pide al usuario ingresar
manualmente el día del experimento
```

```
rojoBajo1 = np.array([100, 60, 20], np.uint8) #Se define el límite inferior del umbral azul a
detectar
```

```
rojoAlto1 = np.array([125, 255, 255], np.uint8) #Se define el límite superior del umbral azul
a detectar
```

```
verdeBajo = np.array([27, 67, 10], np.uint8) #Se define el límite superior del umbral azul a
detectar
```

```
verdeAlto = np.array([65, 255, 255], np.uint8) #Se define el límite superior del umbral azul
a detectar
```

```
for CaF in range(1,3): #Ciclo for que se repite 2 veces (2 frijoles)
```

```
    CaF = str(CaF) #Se convierte el indicador actual del frijol en str
```

```
    vTrs = [0]*27 #Se crea un vector para guardar las alturas de los tratamientos
```

```
    Atrat27 = [] #Se crea un vector para guardar las areas máximas de verde de los
tratamientos
```

```
    Apromtrat27 = [] #Se crea un vector para guardar las areas promedio de verde de
los tratamientos
```

```
    for CaT in range(1,28): #Ciclo for que se repite 27 veces (27 tratamientos)
```

```
        CaT = str(CaT) #Se convierte el indicador actual del tratamiento en str
```

```
        indT = int(CaT) #Se convierte el indicador actual del tratamiento en int
```

```
        hmaxrepGe = -99999999 #Se inicializa la variable que almacena la altura del
tratamiento
```

```
        AmaxrepGe = -99999999 #Se inicializa la variable que almacena el área
máxima del tratamiento
```

```
        promediosArea = [] #Se inicializa el vector que almacena las áreas promedio
del tratamiento
```

```
        areaspromtrat = [] #Se inicializa la variable que almacena el área promedio
del tratamiento
```

```

for CaR in range(1,5): #Ciclo for que se repite 4 veces (4 réplicas)
    CaR = str(CaR) #Se convierte el indicador actual de la réplica en str
    hmaxrep = -99999999 #Se inicializa la variable que almacena la altura
de la réplica
    areafotos = [] #Se inicializa la variable que almacena el área del
tratamiento
    for CaA in range(1,4): #Ciclo for que se repite 3 veces (3 ángulos
fotografiados)
        CaA = str(CaA) #Se convierte el indicador actual del ángulo en
str
        hg = 0 #Se inicializa la variable que guarda la altura de la
planta en una foto
        nameFigure = 'D'+dayExp+'F'+CaF+'T'+CaT+'R'+CaR+'A'+CaA
#Con los strg indicadores se arma el nombre de la foto a leer
        print(nameFigure) #Se imprime en la consola el nombre
actual de la foto analizada
        frame =
cv2.imread(nameFigure+'.jpg',cv2.IMREAD_UNCHANGED) #La imagen leída se guarda en
frame
        frameHSV = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV) #Se
cambia el formato de BGR a HSV y se guarda la nueva imagen en frameHSV
        maskverde = cv2.inRange(frameHSV, verdeBajo, verdeAlto)
#Se crea una imagen aparte siendo la máscara de un canal del sesgo de verde
        maskvis = cv2.bitwise_and(frame, frame, mask= maskverde)
#Se crea una máscara de 3 canales de la máscara anterior

        maskRed = cv2.inRange(frameHSV, rojoBajo1, rojoAlto1) #Se
crea una imagen aparte siendo la máscara de un canal del sesgo de azul
        maskRedvis = cv2.bitwise_and(frame, frame, mask=
maskRed) #Se crea una máscara de 3 canales de la máscara anterior

```

```
contornosPat,_ = cv2.findContours(maskRed,  
cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE) #Se identifican los contornos de la  
mascara azul
```

```
for pt in contornosPat: #Ciclo for que se repite analizando  
todos los contornos detectados
```

```
areap = cv2.contourArea(pt) #Se obtiene el área del  
contorno
```

```
pixelMayorGeR = 99999999 #Se crea la variable que  
almacena la posición y del pixel más alto en la foto
```

```
pixelMenorGeR = -99999999 #Se crea la variable que  
almacena la posición y del pixel más bajo en la foto
```

```
if areap > 10000: #Solo deja pasar un area  
considerable para evitar contornos ruido
```

```
pixelMayorR = 99999999 #Se crea la variable  
que almacena la posición y del pixel más alto en el contorno
```

```
pixelMenorR = -99999999 #Se crea la variable  
que almacena la posición y del pixel más alto en el contorno
```

```
pixelyR = int(pt[ptt,0,1]) #Se lee la  
posición y de todos los pixeles de todos los puntos del contorno
```

```
if pixelyR < pixelMayorR: #Se compara  
la posición y de cada punto para comparar cual está mas alto en la foto
```

```
pixelMayorR = pixelyR #Si se  
cumple la condición, se actualiza el registro
```

```
if pixelyR > pixelMenorR: #Se compara  
la posición y de cada punto para comparar cual está mas bajo en la foto
```

```
pixelMenorR = pixelyR #Si se  
cumple la condición, se actualiza el registro
```

```
alturapixelR = pixelMenorR - pixelMayorR #Se  
calcula la diferencia entre el pixel mas alto y el mas bajo
```

```
if pixelMayorR < pixelMayorGeR: #Se compara  
si la posición mayor del pixel es la mas grande entre todos los contornos
```

```

pixelMayorGeR = pixelMayorR #Si se
cumple la condición, se actualiza el registro

if pixelMenorR > pixelMenorGeR: #Se compara
si la posición menor del pixel es la mas grande entre todos los contornos

pixelMenorGeR = pixelMenorR #Si se
cumple la condición, se actualiza el registro

alturapixelGeR = pixelMenorGeR -
pixelMayorGeR #Creo nuevamente la diferencia entre el pixel mas alto y el mas bajo

hRealP = 50 #Defino la altura real en mm de la
figura patrón

cv2.drawContours(maskRedvis,
[pt],0,(255,0,0),3) #Imprimo el contorno

contornos,_ = cv2.findContours(maskverde,
cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE) #Se identifican los contornos de la
planta

areafoto = [] #Se crea un vector para almacenar el area de los
contornos de la planta

for m in contornos: #Creo un ciclo analizando todos los
contornos

area = cv2.contourArea(m) #Calculo el area del contorno

pixelMayorGe = 99999999 #Se crea la variable que
almacena la posición y del pixel más alto en el contorno

pixelMenorGe = -99999999 #Se crea la variable que
almacena la posición y del pixel más bajo en el contorno

if area > 600: #Determino si el area supera un valor
específico

areafoto.append(area) #Se guarda en un vector el área
del contorno de la planta

pixelMayor = 99999999 #Defino un valor grande

pixelMenor = -99999999 #Defino un valor pequeño

for mm in range(int(m.shape[0])): #Creo un ciclo para
que se repita mm veces

```

```

del pixel en y de todo el contorno
valor menor registrado
registrado actualiza registro
mayor valor registrado
registrado actualiza registro
con el valor menor registrado
registrado actualiza registro
con el mayor valor registrado
registrado actualiza registro
guarda la altura en pixeles de la planta
mm la altura de un contorno de la planta
altura en mm de la planta
el contorno de la planta
try: #Si hay un caso en que el código no logre definir la
variable hg se prueba una rutina para corregir
linea
hg #Si la variable hg está declarada ejecuta la siguiente
hg = hg #Deja el valor de hg igual

```

```

except NameError: #Pregunta si la variable no ha sido
declarada
    hg = 0 #Asigna a la variable hg el valor de 0
if areafoto == []: #Pregunta si el vector de area de la planta
sigue vacio
    areafoto.append(0) #Asigna un valor de 0 al vector
else: #Si el vector tiene contenido ejecuta la siguiente linea
    areafoto = areafoto #Deja el valor del area igual
areafotov = np.array(areafoto) #Convierte la información del
vector de area en un array
area1angulo = np.sum(areafotov) #Se suman los elementos
del vector areafotov
areafotos.append(area1angulo) #La suma de las areas se
guardan como un unico elemento en areafotos
areamaxrep = max(areafotos) #Se determina el área máxima
areafotosv = np.array(areafotos) #Se convierte el vector en un
array
areaprom1re = (np.sum(areafotosv))/len(areafotosv) #Se
promedian las areas
if hg > hmaxrep: #Si la altura de la planta es mayor que la
registrada ejecuta la siguiente linea
    hmaxrep = hg #Actualiza registro
    areaspromtrat.append(areaprom1re) #El area promedio calculado
anteriormente se asigna a un nuevo vector
    areaspromtratv = np.array(areaspromtrat) #El vector se convierte en
un array
    areapromtrat = (np.sum(areaspromtratv))/len(areaspromtratv) #Se
calcula el promedio de los promedios de las areas
    if hmaxrep > hmaxrepGe: #Si el área de la planta es mayor que la
registrada ejecuta la siguiente linea
        hmaxrepGe = hmaxrep #Actualiza registro

```

```
        if areamaxrep > AmaxrepGe: #Si el área de la planta es menor que la
registrada ejecuta la siguiente linea
```

```
            AmaxrepGe = areamaxrep #Actualiza registro
```

```
        Apromtrat27.append(areapromtrat) #Finalmente el area promedio de cada
tratamiento se guarda en un vector
```

```
        Atrat27.append(AmaxrepGe) #El area máxima de verde de cada tratamiento
de cada tratamiento se guarda en un vector
```

```
        hTrat = hmaxrepGe #Se guardan las máximas alturas de los tratamientos en
un vector
```

```
        vTrs[indT-1] = hTrat #Se pasa la información de las alturas a un nuevo vector
el cual será leído después
```

```
"""
```

La siguiente rutina de código solo es la impresión de altura máxima, area máxima y área promedio en archivos txt

```
"""
```

```
    crst = 0
```

```
    for indve in vTrs:
```

```
        vTrs[crst] = str(indve)
```

```
        crst += 1
```

```
    if CaF == '1':
```

```
        ruta1 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F1.txt'
```

```
        archivotxt1 = open(ruta1,'w')
```

```
        for ki in range(0,len(vTrs)):
```

```
            archivotxt1.writelines(vTrs[ki])
```

```
            if ki < len(vTrs)-1:
```

```
                archivotxt1.writelines("\n")
```

```
        archivotxt1.seek(0)
```

```
        archivotxt1.close()
```

```

if CaF == '2':
    ruta2 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F2.txt'
    archivotxt2 = open(ruta2,'w')
    for ki in range(0,len(vTrs)):
        archivotxt2.writelines(vTrs[ki])
        if ki < len(vTrs)-1:
            archivotxt2.writelines("\n")
    archivotxt2.seek(0)
    archivotxt2.close()
crst2 = 0
for indve2 in Atrat27:
    Atrat27[crst2] = str(indve2)
    crst2 += 1
if CaF == '1':
    ruta12 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F1A.txt'
    archivotxt12 = open(ruta12,'w')
    for ki in range(0,len(Atrat27)):
        archivotxt12.writelines(Atrat27[ki])
        if ki < len(Atrat27)-1:
            archivotxt12.writelines("\n")
    archivotxt12.seek(0)
    archivotxt12.close()
if CaF == '2':

```

```

        ruta22 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F2A.txt'

        archivotxt22 = open(ruta22,'w')
        for ki in range(0,len(Atrat27)):
            archivotxt22.writelines(Atrat27[ki])
            if ki < len(Atrat27)-1:
                archivotxt22.writelines("\n")
        archivotxt22.seek(0)
        archivotxt22.close()

crst3 = 0
for indve2 in Apromtrat27:
    Apromtrat27[crst3] = str(indve2)
    crst3 += 1

if CaF == '1':
    ruta13 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F1AP.txt'

    archivotxt13 = open(ruta13,'w')
    for ki in range(0,len(Apromtrat27)):
        archivotxt13.writelines(Apromtrat27[ki])
        if ki < len(Apromtrat27)-1:
            archivotxt13.writelines("\n")
    archivotxt13.seek(0)
    archivotxt13.close()

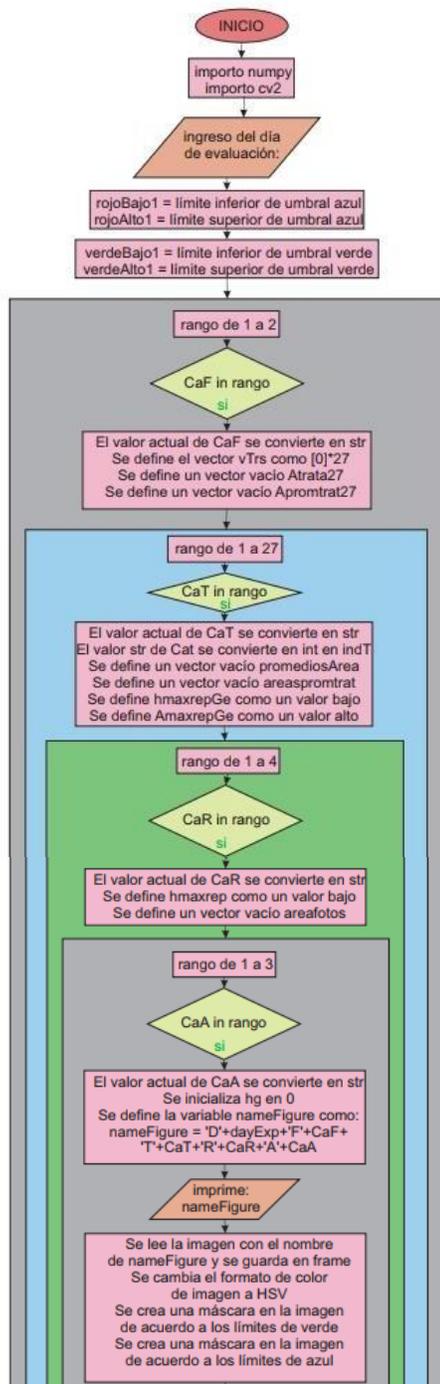
if CaF == '2':
    ruta23 = 'D:\DBOX\Dropbox\PROYECTO DE GRADO\Hidroponía\Visión
artificial\python plantas\pruebas\leer y escribir archivos\dombre fotos
azul\D'+dayExp+'F2AP.txt'

```

```
archivotxt23 = open(ruta23,'w')
for ki in range(0,len(Apromtrat27)):
    archivotxt23.writelines(Apromtrat27[ki])
    if ki < len(Apromtrat27)-1:
        archivotxt23.writelines("\n")
archivotxt23.seek(0)
archivotxt23.close()
```

```
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

8.11 ALGORITMO DEL CÓDIGO DE VISIÓN ARTIFICIAL



En seguida comienza la ejecución del código, se importan las librerías numpy y cv2.

Se pide el ingreso del día de la foto.

Se definen los límites del umbral de los colores a detectar (azul para la figura patrón y verde para la planta); estos valores dependen del brillo, saturación e intensidad de los colores.

Se entra a un ciclo for para que se repita 2 veces, correspondiente a los dos tipos de frijol.

El valor de CaF (indicador en qué repetición del ciclo está; CaF = caracter de frijol) se convierte a 'string' para usarlo más adelante para formar el nombre de la foto.

Se definen vectores vacíos para guardar información adelante.

Se entra a un ciclo for que se repite 27 veces por los 27 tratamientos de experimento.

El valor de CaT (indicador en qué repetición del ciclo está; CaT = caracter de tratamiento) se convierte a 'string'.

Se definen vectores vacíos al igual que variables con valores grandes y pequeños para comparación.

Se entra a un ciclo for que se repite 4 veces por las cuatro réplicas de cada tratamiento.

El valor de CaR (indicador en qué repetición del ciclo está) se convierte a 'string' para usarlo más adelante para formar el nombre de la foto.

Se crea una variable con un valor bajo para comparación y un vector vacío para guardar datos del área de un tratamiento.

Se entra a un ciclo for que se repite 3 veces por las 3 fotos de cada réplica (3 ángulos).

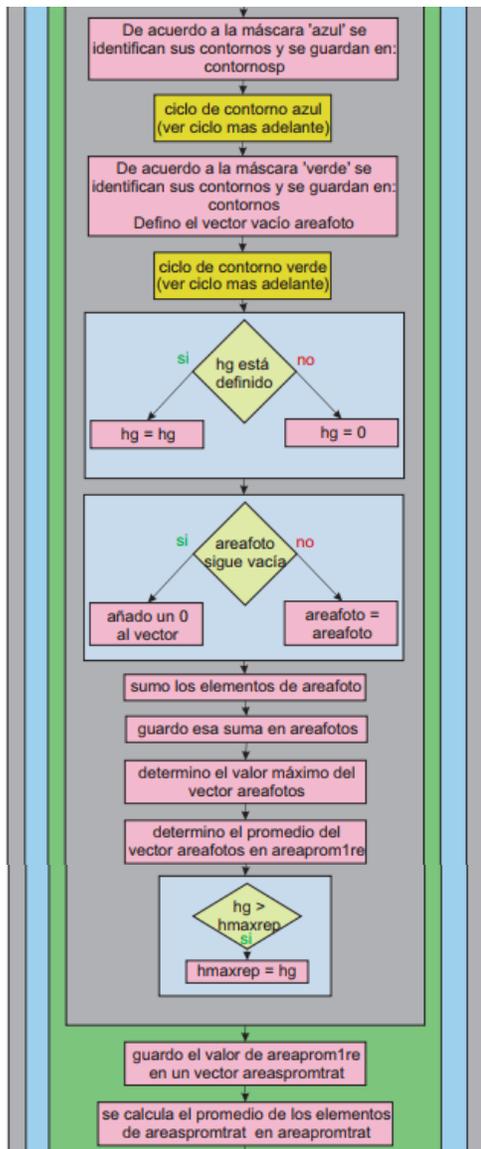
El valor de CaA (indicador en qué repetición del ciclo está) se convierte a 'string'.

Se inicializa la variable para la altura hg en cero.

Con los 'strings' indicadores de ciclo anteriores (CaF, CaT, CaR, CaR y el día del experimento ingresado) formando el nombre de la foto y se imprime.

Se lee la foto.

Se cambia el formato de color de RGB a HSV y se crea el sesgo de color en la imagen según los límites de umbral de color definidos anteriormente en forma de 'máscara'.



Determina el contorno de la figura patrón.

Entra al ciclo para procesar los datos de la figura patrón (adelante se explica).

Determina el contorno de las zonas verdes de la foto correspondiente a la planta y se crea un vector vacío para guardar información.

Entra al ciclo para procesar los datos de la planta (adelante se explica).

Se usan ciclos para determinar si las variables de altura de la planta (hg) y la variable del área están vacías (lo que significaría que no detectó planta) o no definidas y se le asignan un valor de 0 si es así para no generar error cuando se utilicen estas variables adelante.

Se crea un vector donde se almacena el área de 'verde' de cada ángulo fotografiado. Posteriormente se calcula cuál ha sido el área máxima registrada y el área promedio en las 3 fotografías.

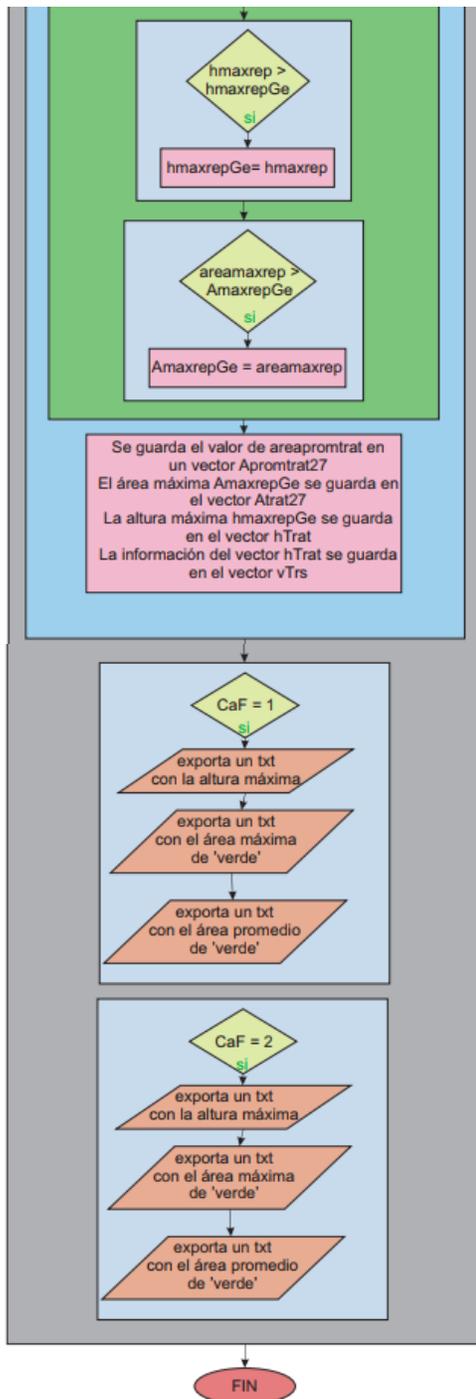
Se compara la altura máxima de la planta en cada una de los 3 ángulos fotografiados y se asigna a la variable hmaxrep (altura máxima de la réplica).

Se sale del ciclo for de los ángulos y se continúa en el ciclo for de las 4 réplicas

El área promedio de la réplica se guarda en un vector donde se guardan las áreas promedio de cada réplica del tratamiento.

Se calcula el promedio de las áreas promedio del vector para definir el área promedio del tratamiento (4 réplicas).

...



Se compara la altura máxima de la planta en cada una de las 4 réplicas y se asigna a la variable hmaxrepGe (altura máxima del tratamiento).

Se compara el área máxima de la planta en cada una de las 4 réplicas y se asigna a la variable areamaxrep (altura máxima del tratamiento).

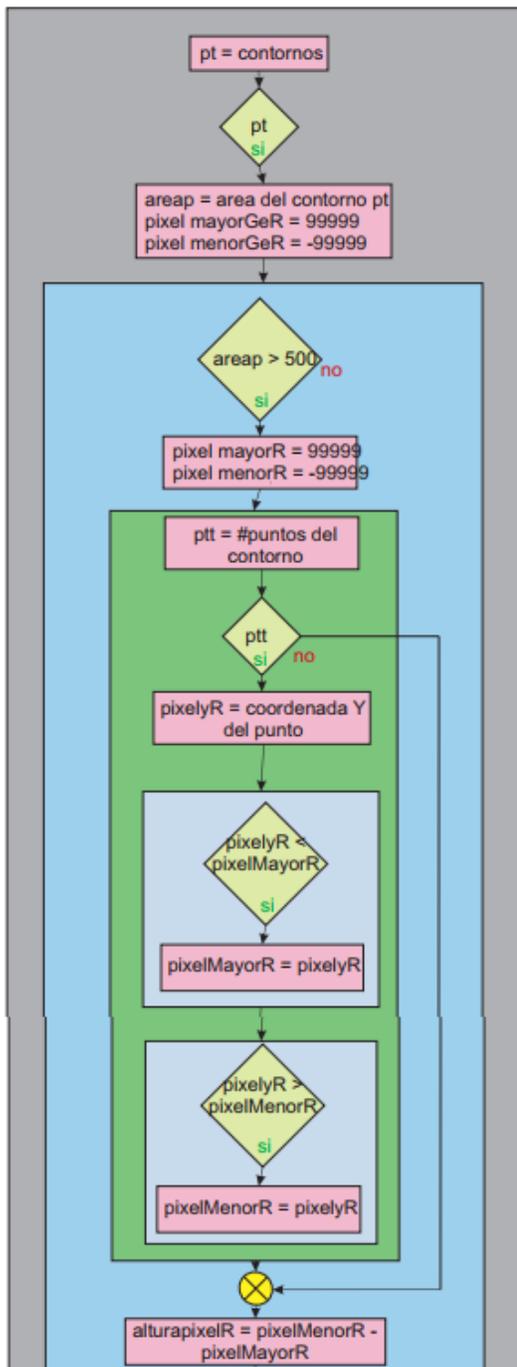
Se sale del ciclo for de las 4 réplicas y se continúa en el ciclo for de los 27 tratamientos.

Los valores de altura máxima, área promedio y área máxima del ciclo anterior se almacenan en vectores que tienen 27 espacios de longitud, lo que corresponden a los 27 tratamientos.

Se sale del ciclo for de los 27 tratamientos y se continúa en el ciclo for de los 2 frijoles.

Finalmente se toman los datos de los vectores de información de longitud 27 y se convierte el contenido de éstos a string para poder ser imprimidos en documentos txt dependiendo del frijol que se esté analizando. Como se tienen 3 vectores de información por frijol, al final se tienen 6 archivos txt exportados por día.

ciclo de contorno azul



Descripción del ciclo de datos del contorno azul mencionado anteriormente en el código principal:

Se define un ciclo for que se repita pt veces dentro de la matriz contornos, es decir, que se repita la cantidad de veces que corresponda a la cantidad de contornos detectados bajo el umbral de azul.

Se define la variable que almacena el área del contorno de la figura patrón y dos variables para usar como comparación más adelante son inicializadas.

Si el área del contorno supera un valor definido (el valor depende de la resolución de la imagen) se continúa el ciclo, si no supera el valor quiere decir que es ruido en la imagen.

Se definen dos variables más para comparación.

Se entra a un nuevo ciclo for que se repita ptt veces dentro de la matriz contornos, es decir, que se repita la cantidad de veces que corresponda a la cantidad de puntos del contorno.

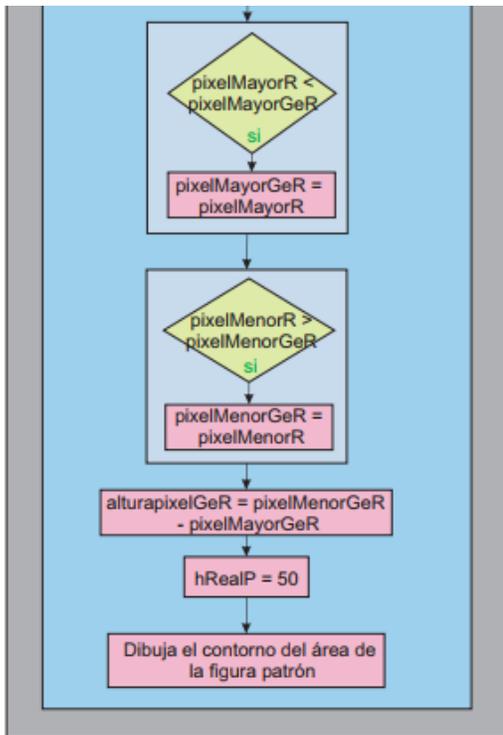
Si se está leyendo un punto del contorno se procede a continuar, si no se lee un punto del contorno, sale del ciclo actual y continúa con el código.

Se define una variable correspondiente a la posición en el eje Y del punto leído.

Se compara este valor de la posición con el pixel mayor registrado y si es así se actualiza el registro.

Se compara el valor de la posición con el pixel menor registrado y si es así se actualiza el registro.

Se sale del ciclo comparativo de la posición y de los puntos y se calcula la diferencia que corresponde a la altura en pixeles de la figura patrón.

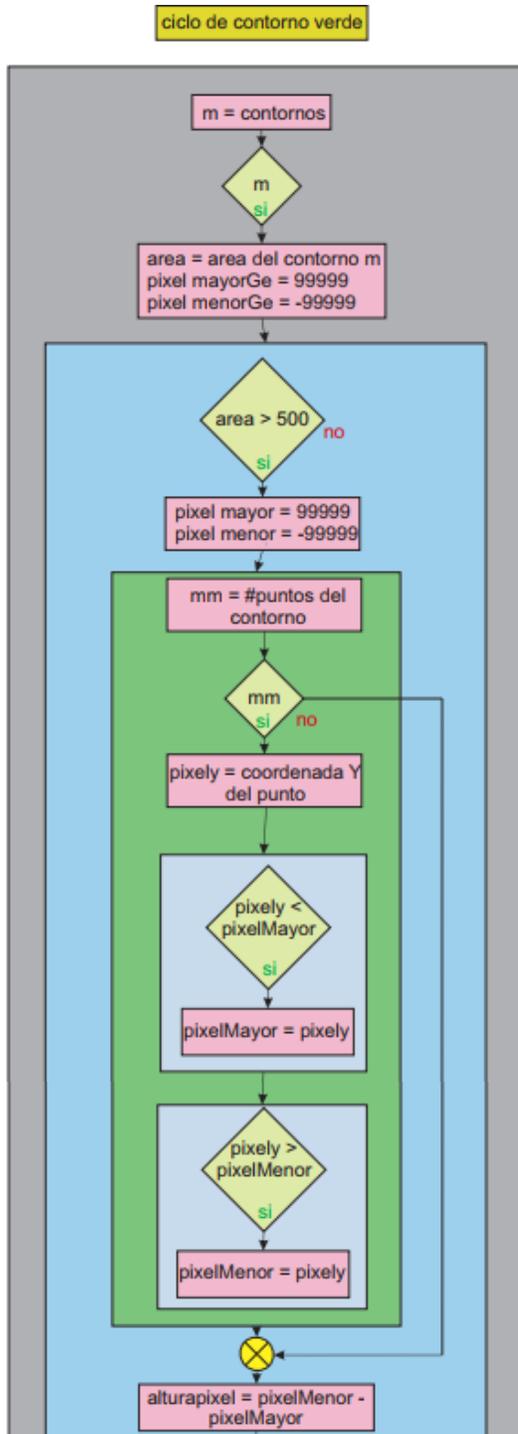


Se compara las posiciones de los puntos en altura de pixeles definidos anteriormente y se comparan con valores registrados dentro del ciclo de todos los contornos, esto para determinar el pixel mayor y menor de todos los contornos detectados, no solo de un contorno individual.

Se actualiza la altura en pixeles de todos los contornos en una sola y se guarda en una variable para compararla con la altura de la planta a analizar.

Se define el valor real de la figura patrón en mm.

Se dibuja en la imagen máscara azul el contorno o contornos detectados bajo los límites de umbral azul.



Descripción del ciclo de datos del contorno verde mencionado anteriormente en el código principal:

Se define un ciclo for que se repita m veces dentro de la matriz contornos, es decir, que se repita la cantidad de veces que corresponda a la cantidad de contornos detectados bajo el umbral de verde.

Se define la variable que almacena el área del contorno de las zonas verdes y dos variables para usar como comparación más adelante son inicializadas.

Si el área del contorno supera un valor definido (el valor depende de la resolución de la imagen) se continúa el ciclo, si no supera el valor quiere decir que es ruido en la imagen.

Se definen dos variables más para comparación.

Se entra a un nuevo ciclo for que se repita mm veces dentro de la matriz contornos, es decir, que se repita la cantidad de veces que corresponda a la cantidad de puntos del contorno.

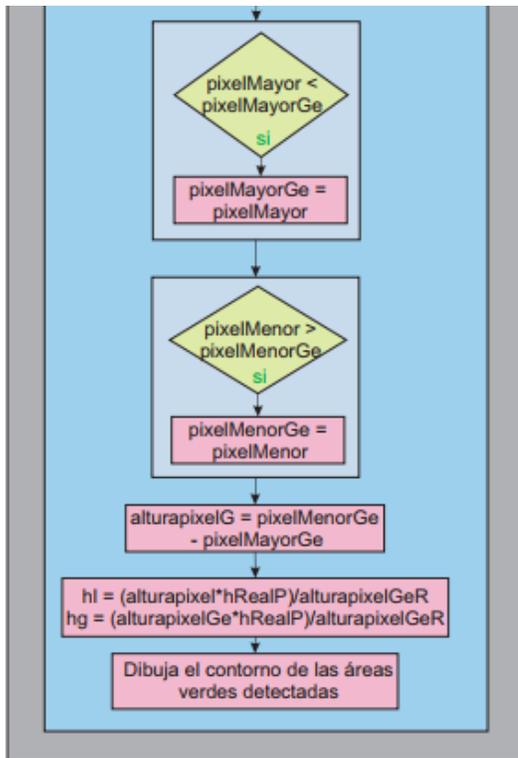
Si se está leyendo un punto del contorno se procede a continuar, si no se lee un punto del contorno, sale del ciclo actual y continúa con el código.

Se define una variable correspondiente a la posición en el eje Y del punto leído.

Se compara este valor de la posición con el pixel mayor registrado y si es así se actualiza el registro.

Se compara el valor de la posición con el pixel menor registrado y si es así se actualiza el registro.

Se sale del ciclo comparativo de la posición y de los puntos y se calcula la diferencia que corresponde a la altura en pixeles de la planta.



Se compara las posiciones de los puntos en altura de pixeles definidos anteriormente y se comparan con valores registrados dentro del ciclo de todos los contornos, esto para determinar el pixel mayor y menor de todos los contornos detectados, no solo de un contorno individual.

Se actualiza la altura en pixeles de todos los contornos en una sola y se guarda en una variable.

Se extrapola la altura en pixeles de los contornos a mm, la altura del contorno actual se guarda en hl y la de todos los contornos juntos, es decir, la planta completa se guarda en hg.

Se dibuja en la imagen máscara verde el contorno o contornos detectados bajo los límites de umbral verde.

8.12 CÓDIGO QUE GRAFICA LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE VISIÓN ARTIFICIAL

```
import matplotlib.pyplot as pyplot
```

```
# Recepción de los datos correspondientes a las alturas y áreas de las plantas
```

```
F1 = []
```

```
F2 = []
```

```
F1A = []
```

```
F2A = []
```

```
F1AP = []
```

```
F2AP = []
```

```
for i in range(1,18):
```

```
dia = str(i)
pathF1 = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F1.txt'
fileF1 = open(pathF1,'r')
F1_DX = fileF1.readlines()
fileF1.close()
pathF2 = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F2.txt'
fileF2 = open(pathF2,'r')
F2_DX = fileF2.readlines()
fileF2.close()
pathF1A = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F1A.txt'
fileF1A = open(pathF1A,'r')
F1A_DX = fileF1A.readlines()
fileF1A.close()
pathF2A = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F2A.txt'
fileF2A = open(pathF2A,'r')
F2A_DX = fileF2A.readlines()
fileF2A.close()
pathF1AP = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F1AP.txt'
fileF1AP = open(pathF1AP,'r')
F1AP_DX = fileF1AP.readlines()
fileF1AP.close()
pathF2AP = 'C:\\Users\\ndhu2\\OneDrive\\Desktop\\D' + dia + 'F2AP.txt'
fileF2AP = open(pathF2AP,'r')
F2AP_DX = fileF2AP.readlines()
fileF2A.close()
F1.append(F1_DX)
F2.append(F2_DX)
F1A.append(F1A_DX)
```

```

F2.append(F2_DX)
F1AP.append(F1AP_DX)
F2AP.append(F2AP_DX)

# Reestructuración de la información recibida
F1_Comp = []
F2_Comp = []
F1A_Comp = []
F2A_Comp = []
F1AP_Comp = []
F2AP_Comp = []
for i in range(17):
    F1_TratX = []
    F2_TratX = []
    F1A_TratX = []
    F2A_TratX = []
    F1AP_TratX = []
    F2AP_TratX = []
    for j in range(27):
        F1_TratX.append(float(F1[j][i].strip('\n')))
        F2_TratX.append(float(F2[j][i].strip('\n')))
        F1A_TratX.append(float(F1A[j][i].strip('\n')))
        F2A_TratX.append(float(F2A[j][i].strip('\n')))
        F1AP_TratX.append(float(F1AP[j][i].strip('\n')))
        F2AP_TratX.append(float(F2AP[j][i].strip('\n')))
    F1_Comp.append(F1_TratX)
    F2_Comp.append(F2_TratX)
    F1A_Comp.append(F1A_TratX)

```

```
F2A_Comp.append(F2A_TratX)
F1AP_Comp.append(F1AP_TratX)
F2AP_Comp.append(F2AP_TratX)
```

Gráfica de la altura de las plantas de la primera especie de frijol a través del tiempo

```
pyplot.ylabel('Altura (m)', fontsize=12)
```

```
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)
```

```
pyplot.title('Altura de las plantas de frijol 1 a través del tiempo\n', fontsize=14)
```

```
pyplot.plot(F1_Comp[0], 'bo-', label = 'F.1_T.1')
pyplot.plot(F1_Comp[1], 'go-', label = 'F.1_T.2')
pyplot.plot(F1_Comp[2], 'ro-', label = 'F.1_T.3')
pyplot.plot(F1_Comp[3], 'co-', label = 'F.1_T.4')
pyplot.plot(F1_Comp[4], 'mo-', label = 'F.1_T.5')
pyplot.plot(F1_Comp[5], 'yo-', label = 'F.1_T.6')
pyplot.plot(F1_Comp[6], 'ko-', label = 'F.1_T.7')
pyplot.plot(F1_Comp[7], 'b^-', label = 'F.1_T.8')
pyplot.plot(F1_Comp[8], 'g^-', label = 'F.1_T.9')
pyplot.plot(F1_Comp[9], 'r^-', label = 'F.1_T.10')
pyplot.plot(F1_Comp[10], 'c^-', label = 'F.1_T.11')
pyplot.plot(F1_Comp[11], 'm^-', label = 'F.1_T.12')
pyplot.plot(F1_Comp[12], 'y^-', label = 'F.1_T.13')
pyplot.plot(F1_Comp[13], 'k^-', label = 'F.1_T.14')
pyplot.plot(F1_Comp[14], 'bv-', label = 'F.1_T.15')
pyplot.plot(F1_Comp[15], 'gv-', label = 'F.1_T.16')
pyplot.plot(F1_Comp[16], 'rv-', label = 'F.1_T.17')
pyplot.plot(F1_Comp[17], 'cv-', label = 'F.1_T.18')
```

```

pyplot.plot(F1_Comp[18], 'mv-', label = 'F.1_T.19')
pyplot.plot(F1_Comp[19], 'yv-', label = 'F.1_T.20')
pyplot.plot(F1_Comp[20], 'kv-', label = 'F.1_T.21')
pyplot.plot(F1_Comp[21], 'bs-', label = 'F.1_T.22')
pyplot.plot(F1_Comp[22], 'gs-', label = 'F.1_T.23')
pyplot.plot(F1_Comp[23], 'rs-', label = 'F.1_T.24')
pyplot.plot(F1_Comp[24], 'cs-', label = 'F.1_T.25')
pyplot.plot(F1_Comp[25], 'ms-', label = 'F.1_T.26')
pyplot.plot(F1_Comp[26], 'ys-', label = 'F.1_T.27')

pyplot.legend()
pyplot.grid()
pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Altura_Frijol1.pdf')

# Gráfica de la altura de las plantas de la segunda especie de frijol a través del tiempo
pyplot.ylabel('Altura (m)', fontsize=12)
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)
pyplot.title('Altura de las plantas de frijol 2 a través del tiempo\n', fontsize=14)

pyplot.plot(F2_Comp[0], 'bo-', label = 'F.2_T.1')
pyplot.plot(F2_Comp[1], 'go-', label = 'F.2_T.2')
pyplot.plot(F2_Comp[2], 'ro-', label = 'F.2_T.3')
pyplot.plot(F2_Comp[3], 'co-', label = 'F.2_T.4')
pyplot.plot(F2_Comp[4], 'mo-', label = 'F.2_T.5')
pyplot.plot(F2_Comp[5], 'yo-', label = 'F.2_T.6')
pyplot.plot(F2_Comp[6], 'ko-', label = 'F.2_T.7')
pyplot.plot(F2_Comp[7], 'b^-', label = 'F.2_T.8')

```

```

pyplot.plot(F2_Comp[8], 'g^-', label = 'F.2_T.9')
pyplot.plot(F2_Comp[9], 'r^-', label = 'F.2_T.10')
pyplot.plot(F2_Comp[10], 'c^-', label = 'F.2_T.11')
pyplot.plot(F2_Comp[11], 'm^-', label = 'F.2_T.12')
pyplot.plot(F2_Comp[12], 'y^-', label = 'F.2_T.13')
pyplot.plot(F2_Comp[13], 'k^-', label = 'F.2_T.14')
pyplot.plot(F2_Comp[14], 'bv-', label = 'F.2_T.15')
pyplot.plot(F2_Comp[15], 'gv-', label = 'F.2_T.16')
pyplot.plot(F2_Comp[16], 'rv-', label = 'F.2_T.17')
pyplot.plot(F2_Comp[17], 'cv-', label = 'F.2_T.18')
pyplot.plot(F2_Comp[18], 'mv-', label = 'F.2_T.19')
pyplot.plot(F2_Comp[19], 'yv-', label = 'F.2_T.20')
pyplot.plot(F2_Comp[20], 'kv-', label = 'F.2_T.21')
pyplot.plot(F2_Comp[21], 'bs-', label = 'F.2_T.22')
pyplot.plot(F2_Comp[22], 'gs-', label = 'F.2_T.23')
pyplot.plot(F2_Comp[23], 'rs-', label = 'F.2_T.24')
pyplot.plot(F2_Comp[24], 'cs-', label = 'F.2_T.25')
pyplot.plot(F2_Comp[25], 'ms-', label = 'F.2_T.26')
pyplot.plot(F2_Comp[26], 'ys-', label = 'F.2_T.27')

pyplot.legend()
pyplot.grid()
pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Altura_Frijol2.pdf')

```

Gráfica del área mayor de las plantas de la primera especie de frijol a través del tiempo

```

pyplot.ylabel('Área (m^2)', fontsize=12)
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)

```

```
pyplot.title('Área mayor de las plantas de frijol 1 a través del tiempo\n', fontsize=14)
```

```
pyplot.plot(F1A_Comp[0], 'bo-', label = 'F.1_T.1')  
pyplot.plot(F1A_Comp[1], 'go-', label = 'F.1_T.2')  
pyplot.plot(F1A_Comp[2], 'ro-', label = 'F.1_T.3')  
pyplot.plot(F1A_Comp[3], 'co-', label = 'F.1_T.4')  
pyplot.plot(F1A_Comp[4], 'mo-', label = 'F.1_T.5')  
pyplot.plot(F1A_Comp[5], 'yo-', label = 'F.1_T.6')  
pyplot.plot(F1A_Comp[6], 'ko-', label = 'F.1_T.7')  
pyplot.plot(F1A_Comp[7], 'b^-', label = 'F.1_T.8')  
pyplot.plot(F1A_Comp[8], 'g^-', label = 'F.1_T.9')  
pyplot.plot(F1A_Comp[9], 'r^-', label = 'F.1_T.10')  
pyplot.plot(F1A_Comp[10], 'c^-', label = 'F.1_T.11')  
pyplot.plot(F1A_Comp[11], 'm^-', label = 'F.1_T.12')  
pyplot.plot(F1A_Comp[12], 'y^-', label = 'F.1_T.13')  
pyplot.plot(F1A_Comp[13], 'k^-', label = 'F.1_T.14')  
pyplot.plot(F1A_Comp[14], 'bv-', label = 'F.1_T.15')  
pyplot.plot(F1A_Comp[15], 'gv-', label = 'F.1_T.16')  
pyplot.plot(F1A_Comp[16], 'rv-', label = 'F.1_T.17')  
pyplot.plot(F1A_Comp[17], 'cv-', label = 'F.1_T.18')  
pyplot.plot(F1A_Comp[18], 'mv-', label = 'F.1_T.19')  
pyplot.plot(F1A_Comp[19], 'yv-', label = 'F.1_T.20')  
pyplot.plot(F1A_Comp[20], 'kv-', label = 'F.1_T.21')  
pyplot.plot(F1A_Comp[21], 'bs-', label = 'F.1_T.22')  
pyplot.plot(F1A_Comp[22], 'gs-', label = 'F.1_T.23')  
pyplot.plot(F1A_Comp[23], 'rs-', label = 'F.1_T.24')  
pyplot.plot(F1A_Comp[24], 'cs-', label = 'F.1_T.25')
```

```

pyplot.plot(F1A_Comp[25], 'ms-', label = 'F.1_T.26')
pyplot.plot(F1A_Comp[26], 'ys-', label = 'F.1_T.27')

pyplot.legend()
pyplot.grid()
pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Area_Frijol1.pdf')

# Gráfica del área mayor de las plantas de la segunda especie de frijol a través del tiempo
pyplot.ylabel('Área (m^2)', fontsize=12)
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)
pyplot.title('Área mayor de las plantas de frijol 2 a través del tiempo\\n', fontsize=14)

pyplot.plot(F2A_Comp[0], 'bo-', label = 'F.2_T.1')
pyplot.plot(F2A_Comp[1], 'go-', label = 'F.2_T.2')
pyplot.plot(F2A_Comp[2], 'ro-', label = 'F.2_T.3')
pyplot.plot(F2A_Comp[3], 'co-', label = 'F.2_T.4')
pyplot.plot(F2A_Comp[4], 'mo-', label = 'F.2_T.5')
pyplot.plot(F2A_Comp[5], 'yo-', label = 'F.2_T.6')
pyplot.plot(F2A_Comp[6], 'ko-', label = 'F.2_T.7')
pyplot.plot(F2A_Comp[7], 'b^-', label = 'F.2_T.8')
pyplot.plot(F2A_Comp[8], 'g^-', label = 'F.2_T.9')
pyplot.plot(F2A_Comp[9], 'r^-', label = 'F.2_T.10')
pyplot.plot(F2A_Comp[10], 'c^-', label = 'F.2_T.11')
pyplot.plot(F2A_Comp[11], 'm^-', label = 'F.2_T.12')
pyplot.plot(F2A_Comp[12], 'y^-', label = 'F.2_T.13')
pyplot.plot(F2A_Comp[13], 'k^-', label = 'F.2_T.14')
pyplot.plot(F2A_Comp[14], 'bv-', label = 'F.2_T.15')

```

```
pyplot.plot(F2A_Comp[15], 'gv-', label = 'F.2_T.16')
pyplot.plot(F2A_Comp[16], 'rv-', label = 'F.2_T.17')
pyplot.plot(F2A_Comp[17], 'cv-', label = 'F.2_T.18')
pyplot.plot(F2A_Comp[18], 'mv-', label = 'F.2_T.19')
pyplot.plot(F2A_Comp[19], 'yv-', label = 'F.2_T.20')
pyplot.plot(F2A_Comp[20], 'kv-', label = 'F.2_T.21')
pyplot.plot(F2A_Comp[21], 'bs-', label = 'F.2_T.22')
pyplot.plot(F2A_Comp[22], 'gs-', label = 'F.2_T.23')
pyplot.plot(F2A_Comp[23], 'rs-', label = 'F.2_T.24')
pyplot.plot(F2A_Comp[24], 'cs-', label = 'F.2_T.25')
pyplot.plot(F2A_Comp[25], 'ms-', label = 'F.2_T.26')
pyplot.plot(F2A_Comp[26], 'ys-', label = 'F.2_T.27')
```

```
pyplot.legend()
```

```
pyplot.grid()
```

```
pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Area_Frijol2.pdf')
```

```
# Gráfica del área promedio de las plantas de la primera especie de frijól a través del tiempo
```

```
pyplot.ylabel('Área (m2)', fontsize=12)
```

```
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)
```

```
pyplot.title('Área promedio de las plantas de frijól 1 a través del tiempo\n', fontsize=14)
```

```
pyplot.plot(F1AP_Comp[0], 'bo-', label = 'F.1_T.1')
```

```
pyplot.plot(F1AP_Comp[1], 'go-', label = 'F.1_T.2')
```

```
pyplot.plot(F1AP_Comp[2], 'ro-', label = 'F.1_T.3')
```

```
pyplot.plot(F1AP_Comp[3], 'co-', label = 'F.1_T.4')
```

```
pyplot.plot(F1AP_Comp[4], 'mo-', label = 'F.1_T.5')
pyplot.plot(F1AP_Comp[5], 'yo-', label = 'F.1_T.6')
pyplot.plot(F1AP_Comp[6], 'ko-', label = 'F.1_T.7')
pyplot.plot(F1AP_Comp[7], 'b^-', label = 'F.1_T.8')
pyplot.plot(F1AP_Comp[8], 'g^-', label = 'F.1_T.9')
pyplot.plot(F1AP_Comp[9], 'r^-', label = 'F.1_T.10')
pyplot.plot(F1AP_Comp[10], 'c^-', label = 'F.1_T.11')
pyplot.plot(F1AP_Comp[11], 'm^-', label = 'F.1_T.12')
pyplot.plot(F1AP_Comp[12], 'y^-', label = 'F.1_T.13')
pyplot.plot(F1AP_Comp[13], 'k^-', label = 'F.1_T.14')
pyplot.plot(F1AP_Comp[14], 'bv-', label = 'F.1_T.15')
pyplot.plot(F1AP_Comp[15], 'gv-', label = 'F.1_T.16')
pyplot.plot(F1AP_Comp[16], 'rv-', label = 'F.1_T.17')
pyplot.plot(F1AP_Comp[17], 'cv-', label = 'F.1_T.18')
pyplot.plot(F1AP_Comp[18], 'mv-', label = 'F.1_T.19')
pyplot.plot(F1AP_Comp[19], 'yv-', label = 'F.1_T.20')
pyplot.plot(F1AP_Comp[20], 'kv-', label = 'F.1_T.21')
pyplot.plot(F1AP_Comp[21], 'bs-', label = 'F.1_T.22')
pyplot.plot(F1AP_Comp[22], 'gs-', label = 'F.1_T.23')
pyplot.plot(F1AP_Comp[23], 'rs-', label = 'F.1_T.24')
pyplot.plot(F1AP_Comp[24], 'cs-', label = 'F.1_T.25')
pyplot.plot(F1AP_Comp[25], 'ms-', label = 'F.1_T.26')
pyplot.plot(F1AP_Comp[26], 'ys-', label = 'F.1_T.27')

pyplot.legend()
pyplot.grid()
pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Area_Promedio_Frijol1.pdf')
```

```
# Gráfica del área promedio de las plantas de la segunda especie de frijol a través del tiempo
```

```
pyplot.ylabel('Área (m2)', fontsize=12)
```

```
pyplot.xlabel('Tiempo (días)', fontsize=12)
```

```
pyplot.title('Área promedio de las plantas de frijol 2 a través del tiempo\n', fontsize=14)
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[0], 'bo-', label = 'F.2_T.1')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[1], 'go-', label = 'F.2_T.2')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[2], 'ro-', label = 'F.2_T.3')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[3], 'co-', label = 'F.2_T.4')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[4], 'mo-', label = 'F.2_T.5')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[5], 'yo-', label = 'F.2_T.6')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[6], 'ko-', label = 'F.2_T.7')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[7], 'b^-', label = 'F.2_T.8')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[8], 'g^-', label = 'F.2_T.9')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[9], 'r^-', label = 'F.2_T.10')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[10], 'c^-', label = 'F.2_T.11')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[11], 'm^-', label = 'F.2_T.12')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[12], 'y^-', label = 'F.2_T.13')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[13], 'k^-', label = 'F.2_T.14')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[14], 'bv-', label = 'F.2_T.15')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[15], 'gv-', label = 'F.2_T.16')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[16], 'rv-', label = 'F.2_T.17')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[17], 'cv-', label = 'F.2_T.18')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[18], 'mv-', label = 'F.2_T.19')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[19], 'yv-', label = 'F.2_T.20')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[20], 'kv-', label = 'F.2_T.21')
```

```
pyplot.plot(F2AP_Comp[21], 'bs-', label = 'F.2_T.22')
```

```

pyplot.plot(F2AP_Comp[22], 'gs-', label = 'F.2_T.23')
pyplot.plot(F2AP_Comp[23], 'rs-', label = 'F.2_T.24')
pyplot.plot(F2AP_Comp[24], 'cs-', label = 'F.2_T.25')
pyplot.plot(F2AP_Comp[25], 'ms-', label = 'F.2_T.26')
pyplot.plot(F2AP_Comp[26], 'ys-', label = 'F.2_T.27')

pyplot.legend()

pyplot.grid()

pyplot.savefig('C:\\Users\\OneDrive\\Desktop\\Area_Promedio_Frijol2.pdf')

```

8.13 EXPERIMENTO 2 - VISIÓN ARTIFICIAL

8.13.1 INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo del experimento se espera tener un análisis del comportamiento de las plantas, con el fin de evaluar el crecimiento de las mismas ante distintos factores y con base en la información obtenida realizar un protocolo de caracterización para el sistema hidropónico, seleccionando de este modo elementos cruciales para el sistema hidropónico final como lo son el sustrato en el cual se va a sembrar, el tipo de frijol a sembrar y volumen de riego, entre otros factores importantes para obtener los mejores resultados posibles. Para esto se tuvo en cuenta un diseño de experimentos donde se contemplan diferentes combinaciones o tratamientos para examinar dos tipos de frijol, en estas combinaciones se varían valores de salinidad, concentración de solución de nutrientes y volumen de riego, así mismo se utiliza más de un tipo de sustrato, estos factores serán interpretados como variables de entrada del sistema y como variable de salida se tiene el crecimiento de la planta. Este crecimiento se registra de manera fotográfica y posteriormente estas fotografías se procesan mediante un algoritmo de visión artificial el cual permite observar, graficar y comparar el crecimiento de los diferentes tratamientos.

8.13.2 LISTA DE MATERIALES

Entre los materiales necesarios para el desarrollo del experimento se encuentran:

- Componentes electrónicos y mecánicos del sistema:
 - Arduino MEGA 2560.

- Cámara FaceCam 1000X.
 - Módulo sensor de humedad del suelo Sonda YL69.
 - ServoMotor.
 - Estructura en madera para registro fotográfico.
- Elementos de siembra:
 - Vasos plásticos de 7 onzas.
 - Arlita.
 - Perlita.
 - Fibra de coco.
 - Nutriente hidropónico líquido (Elementos mayores).
 - Nutriente hidropónico líquido (Elementos menores).
 - Frijol cabecita negra.
 - Frijol guajiro.

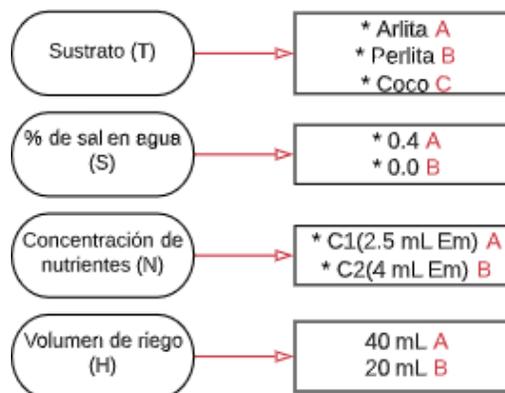
8.13.3 METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO

Para el desarrollo de este experimento se tendrán en cuenta los siguientes pasos:

Planteamiento del experimento:

Para iniciar con el experimento, primero se definen las variables de entrada del sistema. Se tienen como variables de entrada el tipo de frijol, el sustrato a emplear, el porcentaje de sal en agua, la concentración de nutrientes y el volumen de riego; se tiene que para cada tipo de frijol: *frijol caupí cabecita negra* y *frijol guajiro* se van a cambiar los estados de las variables restantes de entrada de la siguiente manera:

Figura 102. Variables experimento 2



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Es decir, que estas cuatro variables cuentan con diferentes posibilidades cada una: la variable Sustrato (T) en la cual se espera comparar cuál de los sustratos planteados muestra un mejor asentamiento para las raíces y una mayor absorción de líquido; respecto a la variable Porcentaje de sal en el agua (S) se desea observar en qué medida esta concentración dificulta el crecimiento o la velocidad del mismo en las plantas, también se encuentra la variable Concentración de nutrientes (N) con la que se desea observar si una concentración diferente a la recomendada por la FAO genera un mayor crecimiento por parte de la planta, y por último la variable Volumen de riego (H) nos permitirá observar cuanto es el consumo en volumen de agua necesario para lograr condiciones óptimas de crecimiento en las plantas. Una vez definidos estos valores se procede con la configuración de los tratamientos resultantes, este resultado que se obtiene de multiplicar el número de variables por el número de posibilidades de estas, a continuación, se presenta una tabla de los tratamientos para cada tipo de frijol:

Tabla 48. Configuración tratamientos experimento 2

N° Tratamiento	T	S	N	H	N° Tratamiento	T	S	N	H	N° Tratamiento	T	S	N	H
1	A	A	A	A	9	B	A	A	A	17	C	A	A	A
2	A	A	A	B	10	B	A	A	B	18	C	A	A	B
3	A	A	B	A	11	B	A	B	A	19	C	A	B	A
4	A	A	B	B	12	B	A	B	B	20	C	A	B	B
5	A	B	A	A	13	B	B	A	A	21	C	B	A	A
6	A	B	A	B	14	B	B	A	B	22	C	B	A	B
7	A	B	B	A	15	B	B	B	A	23	C	B	B	A
8	A	B	B	B	16	B	B	B	B	24	C	B	B	B

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Teniendo en cuenta que cada uno de estos 24 tratamiento cuenta con 3 réplicas se obtiene un número total de 72 plantas sembradas para cada tipo de frijol, es decir que el resultado final es de 144 plantas sembradas, 72 de frijol caupí cabecita negra y 72 de frijol guajiro.

Planteamiento de materiales para la siembra:

Una vez que tenemos la cantidad de plantas que se deben sembrar es necesario definir entonces las cantidades exactas de los materiales para la siembra, en este caso se deben contemplar la cantidad de contenedores la cual es igual a las plantas; para el desarrollo de este experimento se utiliza como contenedor, vasos plásticos desechables de aproximadamente 0.2 litros de capacidad, se contempla también llenar el contenedor en un 50 % de su capacidad con el sustrato, es decir 0.1 litros por cada contenedor, teniendo un total de 14,4 litros de sustrato para todos los

contenedores, lo cual se traduce como 4.8 litros de cada sustrato; en cada contenedor se ubicarán dos semillas del respectivo frijol.

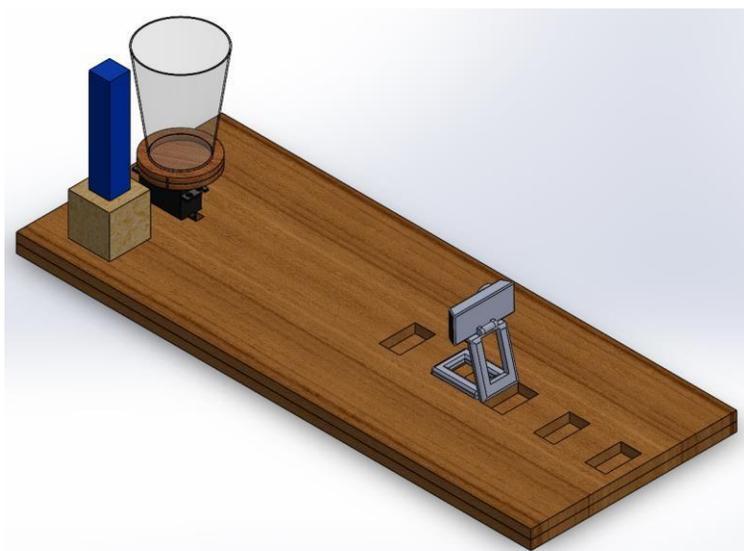
Posteriormente se procede con la preparación de las soluciones salinas como se especificó en la definición de variables, se preparan soluciones al 0.4 % y al 0 % de porcentajes de salinidad; por el trabajo previo realizado en el laboratorio CINBBYA conocemos la fórmula para la preparación de solución salina que consiste en que para obtener una solución salina al 1 % se mezcla 1 gramo de sal en 100 mL de agua; por ende para preparar mayor cantidad y facilitar la preparación de las soluciones en cuanto a la pequeña cantidad de sal necesaria se mezclan 4 gramos en un contenedor de 1 litro, para obtener así un litro de solución salina al 0.4 % y un contenedor con un litro de agua natural. Es importante mencionar que se deben preparar dos contenedores de cada una de las soluciones salinas ya que se necesitan una de cada una para cada concentración de nutrientes.

Una vez se tienen las soluciones salinas se procede con la preparación de la solución con la que finalmente se realiza el riego, para esto se contemplaron en la definición de variables la concentración uno (C1), cuya elaboración consiste en añadir a un litro de agua (que en el presente experimento será remplazado por un litro de solución salina de cada concentración de sal), 5 mL de solución de nutrientes de elementos mayores y 2.5 mL de solución de nutrientes de elementos menores. La concentración dos (C2) tiene la misma preparación, pero remplazando las proporciones de soluciones de nutrientes donde se encuentra que por cada litro de solución salina se suministran 5 mL de solución de nutrientes de elementos mayores y 4 mL de solución de nutrientes de elementos menores.

Diseño del sistema para registro fotográfico:

Para el proceso de diseño se tiene en cuenta que para cada réplica se deben tomar tres fotografías desde distintos ángulos para un mejor dimensionamiento del crecimiento de la planta, por este motivo se diseña un sistema de registro fotográfico para un solo contenedor por vez, en el cual se va a ubicar cada réplica para la toma de fotografías. Para eso se diseña una base rectangular de madera en la cual se ubica una base giratoria que por medio de un ServoMotor realiza una rotación del contenedor con la planta para lograr de este modo tres fotografías con una diferencia angular de 90° entre cada fotografía de la misma planta, adicional a esto se tiene junto a esta base giratoria ubicada una pieza de madera de un color específico denominada *figura patrón* (este concepto será aclarado más adelante en el documento), una vez ubicados los dos elementos anteriores en la base rectangular de madera se debe ubicar la cámara; a continuación se presenta un diagrama CAD del sistema de registro fotográfico individual:

Figura 103. Diseño CAD base registro fotográfico experimento 2



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Este proceso de registro fotográfico individual se realiza de manera semiautomática ya que el tiempo requerido para la toma de estas fotografías puede resultar bastante prolongado además de que esta tarea tiende a ser algo repetitiva y tediosa para realizarse totalmente manual.

Para esto se usa una cámara web externa para computador en este caso la FaceCam 1000X, con la cual se realizará el registro fotográfico, en cuanto a la toma y almacenamiento de las fotos se hará con un código en Python para tomar fotografías y guardarlas con el nombre correcto, dependiendo del día, frijol, tratamiento y número de réplica ingresado por el usuario para su posterior procesamiento, así mismo para controlar que los niveles de humedad sean correctos se hace uso de un módulo sensor de humedad del suelo Sonda YL69 para registrar el valor de humedad en algunas de las plantas. En el caso de la rotación de cada réplica se hará uso de un Arduino MEGA 2560, donde se realizará la programación en la IDE de Arduino para controlar la posición de un ServoMotor; finalmente las fotografías obtenidas en el experimento serán procesadas por medio del algoritmo de visión artificial.

8.13.4 PROCEDIMIENTO

Siembra y cuidado de las plantas:

Antes de empezar el proceso de siembra se tiene que realizar la preparación de las soluciones salinas a diferentes concentraciones, se muestra evidencia fotográfica del proceso más adelante. Para la fabricación de estas soluciones se tiene en cuenta que por cada cien mililitros de agua se debe añadir un gramo de sal de mar

para lograr una concentración de sal del 1 %, con base en esta relación se fabrican las soluciones salinas a concentración de 0.4 y 0 % teniendo en cuenta que en el presente experimento se utilizaron contenedores de 8 litros de solución salina, esto quiere decir, que para lograr una solución salina del 0% se deben dejar 8 litros de agua sin agregarle sal y para lograr una solución salina de 0,4% de concentración de sal en 8 litros de agua, se deben añadir 32 gramos de sal.

Figura 104. Procedimiento de pesaje de la sal



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Así mismo se preparan las soluciones nutritivas con las que finalmente se riegan las plantas, cada una de estas soluciones cuenta con una diferente proporción de elementos mayores y menores las cuales son: Concentración 1 o C1 con cinco centímetros cúbicos de nutriente hidropónico líquido de elementos mayores y dos punto cinco centímetros cúbicos de nutriente hidropónico líquido de elementos menores por litro de agua y la concentración 2 o C2 con cinco centímetros cúbicos de nutriente hidropónico líquido de elementos mayores y 4 centímetros cúbicos de nutriente hidropónico líquido de elementos menores por litro de agua. Nuevamente se tienen los contenedores de 8 litros donde se encuentran las soluciones salinas, y se deben preparar dos soluciones de nutrientes por cada solución salina, esto quiere decir que al final se tendrán 4 contenedores con distintas soluciones, para preparar la primera concentración de nutrientes o C1 se tienen en cuenta las proporciones mencionadas anteriormente, lo que quiere decir que para 8 litros de agua (en este caso solución salina), se suministran 40 centímetros cúbicos de elementos mayores y 20 centímetros cúbicos de elementos menores.

Figura 105. Medición de los cc de soluciones nutritivas C1



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Para preparar la segunda concentración de nutrientes o C2 se tienen en cuenta las proporciones mencionadas anteriormente, lo que quiere decir que para 8 litros de agua (en este caso solución salina), se suministran 40 centímetros cúbicos de elementos mayores y 32 centímetros cúbicos de elementos menores.

Figura 106. Medición de los cc de soluciones nutritivas C2



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Para la siembra de las plantas se va a llenar cada contenedor, que en el caso de este experimento son vasos plásticos de 7 onzas de capacidad, esto debido a que el experimento se realiza en las primeras semanas de crecimiento de la planta y no se requiere de un gran espacio para el crecimiento de las raíces; estos

contenedores se llenan entre un 60 y 80 % de su capacidad con el respectivo sustrato para cada tratamiento, es decir se llenaron los contenedores con aproximadamente 100 mililitros de sustratos, se hace una hendidura en el sustrato para ubicar dos semillas (esto con el fin de tener un margen de error ya que una de ellas podría no crecer) a un centímetro de profundidad aproximadamente.

Figura 107. Sustratos usados en el experimento



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Cada planta debe estar correctamente marcada con su tratamiento, tipo de frijol y número de réplica para evitar confusiones posteriormente. Una vez realizada la siembra se inicia el proceso de riego y registro fotográfico de cada planta día por medio, durante 21 días.

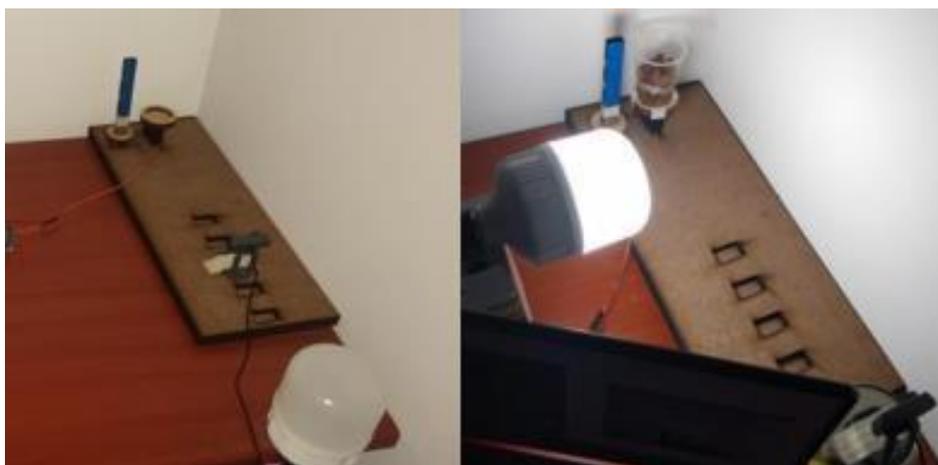
Figura 108. Total de frijoles sembrados



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

A continuación, se presenta evidencia fotográfica de la base utilizada para el registro fotográfico en una primera posición e iluminación que fue modificada para facilitar el análisis del algoritmo de inteligencia artificial:

Figura 109. Toma de fotografías

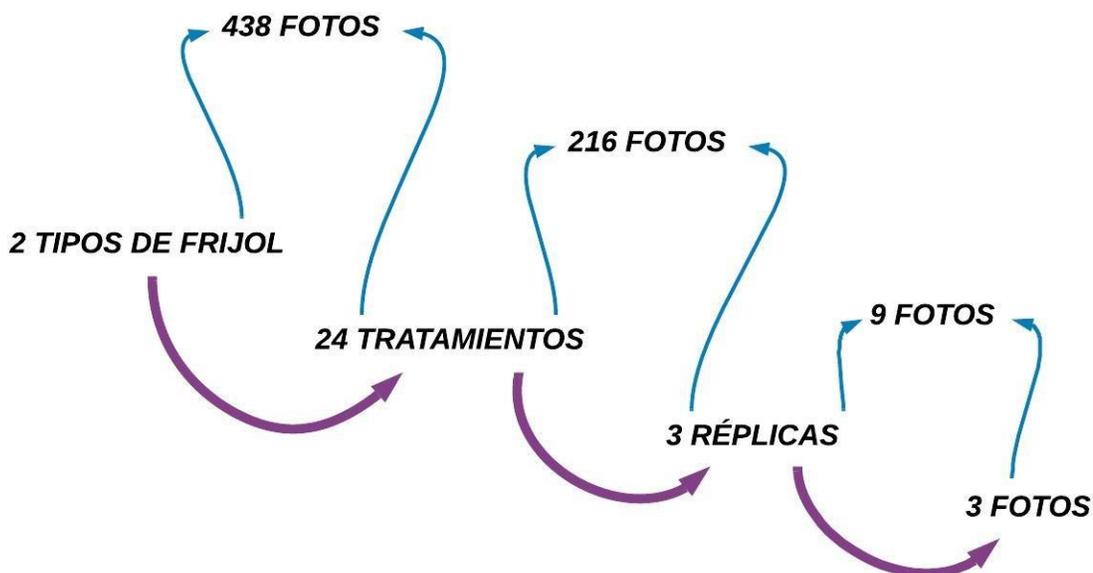


Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Procesamiento de los datos:

Las fotografías obtenidas del mecanismo son analizadas con la ayuda de un algoritmo de visión artificial, el cual lee las 432 fotos diarias que se registran del experimento.

Figura 110. Fotos tomadas en cada día de evaluación del experimento



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

El algoritmo lee cada imagen y determina la altura máxima de la planta, esto se logra con funciones de visión artificial de la librería de fuente abierta *OpenCV* que

permiten sesgar secciones de interés en la fotografía, definiendo un umbral de color dependiendo de las condiciones de luz y ambiente donde se tomarán las fotos; en este caso se definen dos umbrales de color de interés: el color azul, que es de interés ya que la figura patrón (objeto azul de altura fija conocida) será usada para extrapolar la altura real de la planta y es un color que no existe en el ambiente del experimento, y el color verde, ya que es el color de la planta y es el utilizado para aislarla del resto de la imagen.

Una vez se aíslan la figura patrón y la planta, se procede a calcular la propiedad de interés, que es la altura de la planta; analizando la figura patrón se guarda la altura en pixeles de esta pieza y, con la información de su altura real en milímetros, se extrapola la altura de la planta a milímetros también. Este proceso requiere que se analicen todos los posibles contornos de verde que hay en la imagen, ya que la planta no necesariamente debe estar conformada por un solo contorno, este caso se menciona como la posibilidad de que una sección del tallo o una hoja que no presente el color verde esperado y presente un color distinto, como marrón u otro, interfiera en el análisis de altura y separe dos áreas de la planta, por esto el código contempla la posibilidad de múltiples contornos y analiza todos los que presenten el color deseado.

Adicionalmente, el análisis por visión artificial implementado elimina la posibilidad de que se filtre un "falso positivo", es decir que un dato, un pixel o una zona de la foto con el color deseado que en realidad sea ruido o información falsa ajena a la planta sea tomado como verdadero. Esto se logra restringiendo el tamaño del área del contorno detectado, es decir, si el área es muy pequeña significa que es insignificante para la medición o es ruido en la imagen. Al final se determina el píxel más alto y bajo de los contornos válidos de la planta y se calcula la altura de pixeles a milímetros como se mencionó anteriormente. Esto se realiza para cada fotografía con el fin de conocer la mayor altura de cada tratamiento; como un dato de interés, se toma también el área que ocupa la planta en la fotografía teniendo en cuenta que se espera que una planta saludable sea frondosa y ocupe una mayor área verde, para esto se considera el área promedio de la planta en pixeles de cada tratamiento, así como su área máxima, es decir de su planta más frondosa. Estos datos son almacenados en el código durante toda su ejecución y cuando se termine de analizar se exportan como 6 archivos de texto. Cada archivo de texto contiene 24 datos que corresponderían a la altura de la planta, área máxima y área promedio; estas variables se almacenan para los dos frijoles.

Estos archivos de texto son leídos por otro código que se encarga de leer los datos y graficarlos con el fin de registrar visualmente lo obtenido por visión artificial y analizar de forma más eficiente el experimento.

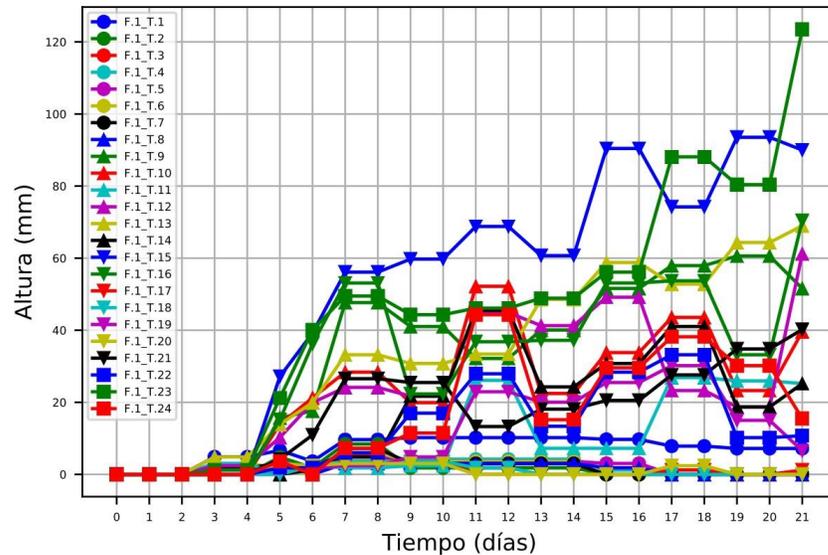
8.13.5 RESULTADOS EXPERIMENTO 2

Con el fin de realizar un mejor análisis de los resultados finales obtenidos durante el desarrollo del experimento se dividieron los resultados para observar el comportamiento de las plantas primero por altura y posteriormente por área:

Altura de las plantas correspondiente al:

Frijol 1:

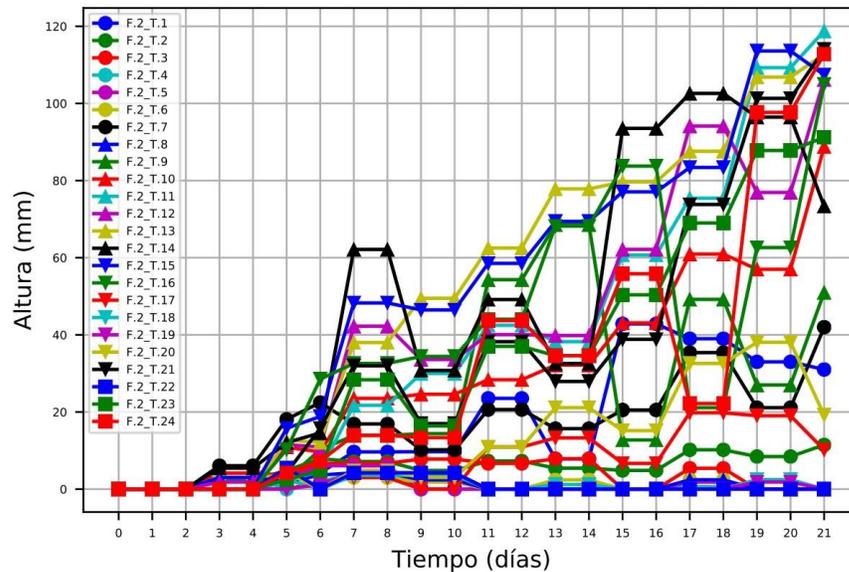
Figura 111. Altura de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

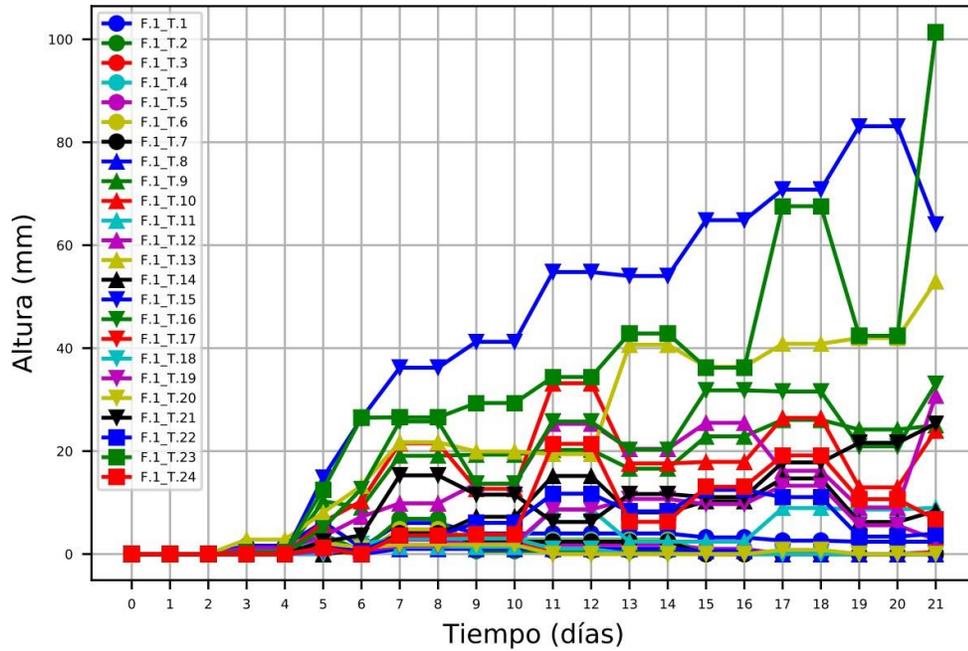
Figura 112. Altura de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

**Altura promedio de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:**

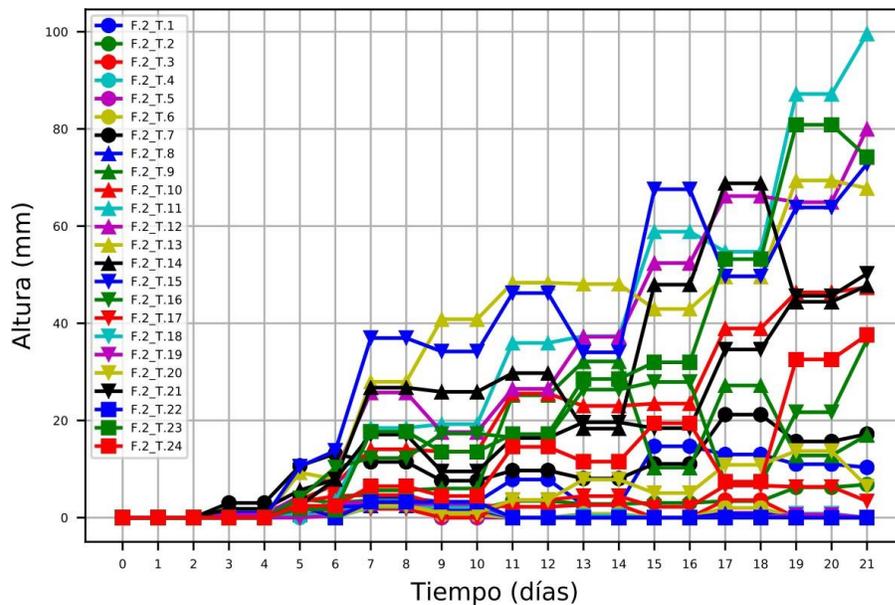
Figura 113. Altura promedio de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

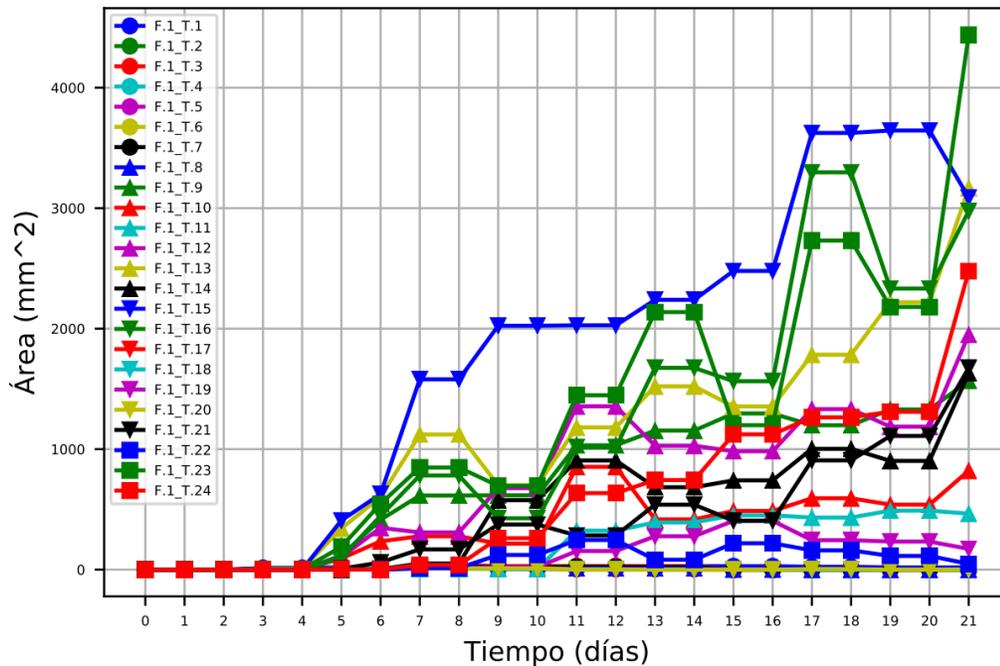
Figura 114. Altura promedio de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Área de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:

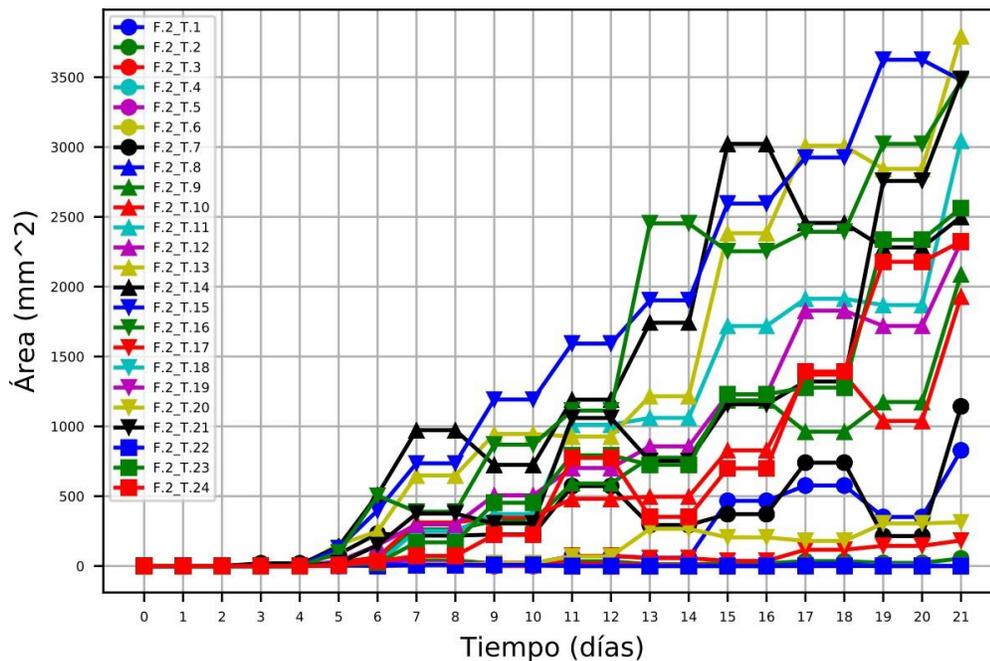
Figura 115..Área de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

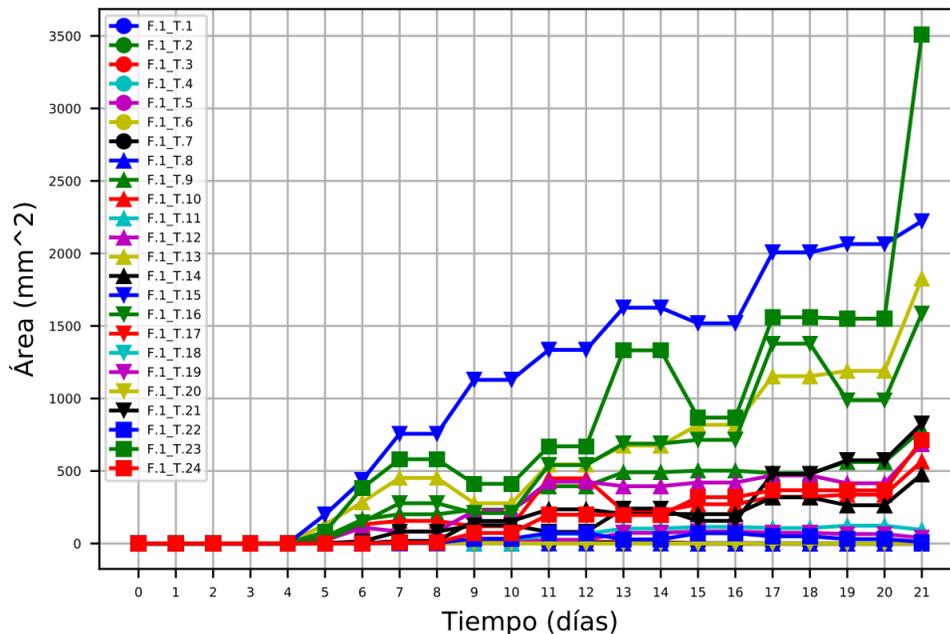
Figura 116. Área de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Área promedio de las plantas correspondiente al:
Frijol 1:

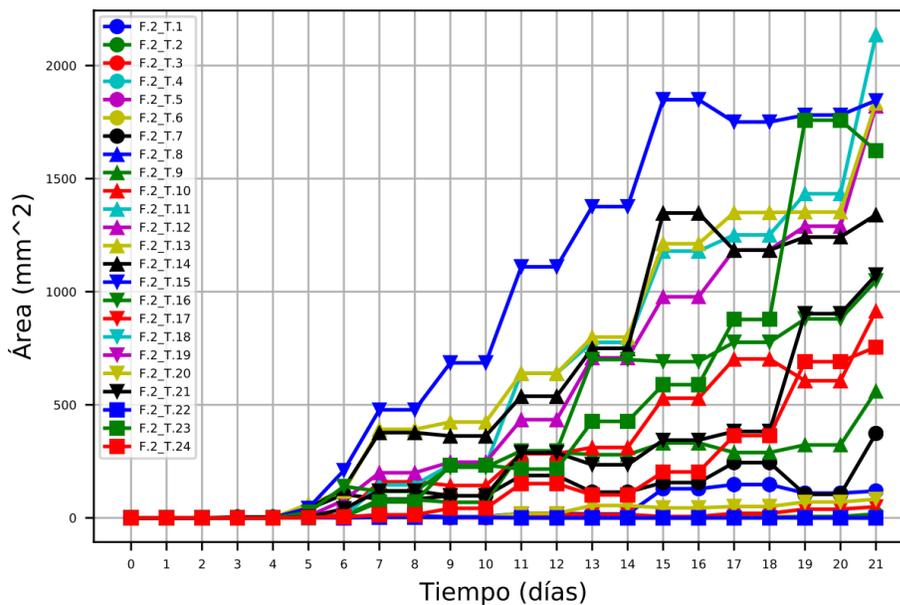
Figura 117. Área promedio de las plantas de frijol 1 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Frijol 2:

Figura 118. Área promedio de las plantas de frijol 2 a través del tiempo



Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2020)

Análisis

Entre los aspectos que se pueden destacar a simple vista en la mayoría de las gráficas presentadas es el hecho de que hubo una cantidad de tratamientos que no presentaron germinación, de aquí se puede obtener el primer dato relevante y es que se puede observar que el frijol que presentó un menor porcentaje de germinación es el frijol 1, es decir el frijol caupí cabecita negra. También es importante destacar que la cantidad de tratamientos que germinaron es superior en el frijol 2 (Frijol Guajiro) que en el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), esto en primera instancia se le atribuye a la variable de porcentaje de sal en agua; es decir, el frijol 2 al ser endémico de una zona del país donde la escasa agua que se consigue tiene un pequeño porcentaje de salinidad, desarrolló una resistencia superior a estas condiciones, dando como resultado un porcentaje de germinación superior en comparación al frijol 1.

Se observó que los tratamientos del 1 al 8 no presentaron muy buenos resultados en cuanto a porcentaje de germinación. El factor común y seguramente el motivo del mal rendimiento de este grupo de tratamientos es el uso de la arlita como sustrato, ya que este sustrato no brinda un buen espacio para el asentamiento de sus raíces y dificulta la absorción de agua por parte de la semilla. Así mismo se observó que, entre los tratamientos con mayor porcentaje de germinación y crecimiento, aquellos que destacaban correspondían a tratamientos en los cuales se aplicó una concentración de nutrientes diferente a la recomendada por la FAO, con lo cual podemos comenzar a sesgar cuales son las variables más determinantes en cuanto al crecimiento de las plantas.

No fueron perceptibles diferencias muy importantes entre los tratamientos cuya única diferencia era el volumen de riego, obteniendo como resultado que un volumen de riego elevado en un punto deja de ser necesario, puesto que se consume más agua y no se observan cambios importantes en cuanto al crecimiento de la planta.

Los tratamientos que más destacaron para el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), no solo por su volumen de crecimiento, sino por su velocidad y constancia en el tiempo inician con el tratamiento número 15, el cual consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 4 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo. El segundo mejor tratamiento a nivel general fue el tratamiento número 23, que consistía en: Coco como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Y el tercer mejor tratamiento fue el tratamiento número 13, que consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de

nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Los tratamientos que más destacaron para el frijol 2 (Frijol Guajiro), no solo por su volumen de crecimiento, sino por su velocidad y constancia en el tiempo inician con el tratamiento número 15, el cual consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 4 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo. El segundo mejor tratamiento a nivel general fue el tratamiento número 13, que consistía en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de cero, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 20 mL, es decir, el volumen mínimo. Y el tercer mejor tratamiento fue el tratamiento número 11, que consistió en: Perlita como sustrato, un porcentaje de sal en agua de 0.4, una concentración de nutrientes de equivalente a 5 mL por litro de elementos mayores, 2 mL por litro de elementos menores y un volumen de riego de 40 mL, es decir, el volumen máximo.

8.13.6 CONCLUSIONES EXPERIMENTO 2

Se destaca la perlita como el mejor sustrato ya que en esta las plantas presentaron una mejor absorción de agua, mejor crecimiento y asentamiento de las raíces.

A pesar de utilizar la proporción de nutrientes recomendada por la FAO, se pudo apreciar que existen otras configuraciones, tal como la utilizada en el experimento, que presentan un mejor resultado; evidenciándose de esta manera que la configuración idónea de nutrientes depende de las características de la especie de planta en crecimiento.

El porcentaje de sal en agua demostró ser una variable de peso únicamente para el frijol 1 (Frijol Caupí cabecita negra), ya que en los tratamientos del frijol 2 (Frijol Guajiro) no se observó una diferencia considerable entre los tratamientos cuya única diferencia era el porcentaje de sal en agua. De esta manera se confirmó la resistencia a la salinidad propia del frijol guajiro.

Se selecciona el tratamiento número 15 junto con el frijol 2 (Frijol Guajiro) como ganadores del experimento, debido a sus excelentes resultados finales y su comportamiento constante a lo largo del tiempo.

8.14 CÓDIGO DEL LOGO USADO EN LA IMPLEMENTACIÓN EN SANTANDER

El código en sus archivos de LogoSoft se encuentran en la carpeta compartida de Google drive *PLC Code*. Se accede a esta carpeta mediante el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1965L_5Gd-JuLZTI6zdoslCuClrYOlgYT?usp=sharing

8.15 RECURSOS

Tabla 49. Recursos

RUBROS	VALOR UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL
Frijol Cabecita Negra 500 gr	\$ 4.680	1	\$ 4.680
Sal Marina 800 gr	\$ 4.340	2	\$ 8.680
Jeringa	\$ 900	2	\$ 1.800
Sensor de conductividad Mini Conductivity Probe K 1.0	\$ 229.540	1	\$ 229.540
Transmisor de conductividad IXIAN	\$ 980.763	1	\$ 980.763
Sensor de pH Mini pH Probe	\$ 166.897	1	\$ 166.897
Transmisor de pH IXIAN	\$ 730.356	1	\$ 730.356
Envío Sensores Atlas Científica a Colombia	\$ 338.260	1	\$ 338.260
Tanque Coltanker de 1000 L	\$ 319.039	1	\$ 319.039
Flete de Tanque de 1000 L y Tubos de 6 metros	\$ 120.000	1	\$ 120.000
Fuente de 24 VDC	\$ 162.630	1	\$ 162.630
Arduino Mega 2560	\$ 68.812	1	\$ 68.812
Servomotor + Paquete de resistencias + DIP Switch	\$ 51.400	1	\$ 51.400
Módulo para Tarjeta SD	\$ 4.800	1	\$ 4.800
Módulo Cámara OV7670 con Buffer AL422B FIFO	\$ 59.800	1	\$ 59.800
Módulo Sensor de Humedad YL69	\$ 4.600	1	\$ 4.600
Jumpers	\$ 13.566	1	\$ 13.566
Envíos de Vistronica	\$ 44.000	1	\$ 44.000
PLC LOGO! 12/24RCE Siemens	\$ 585.500	1	\$ 585.500
Módulo de expansión LOGO! AM2	\$ 296.723	1	\$ 296.723
Módulo de expansión LOGO! DM16 24R	\$ 376.134	1	\$ 376.134
Riel Omega	\$ 7.000	1	\$ 7.000
Electroválvula de 1/2" de 24 VDC con Presión y Flete	\$ 55.254	2	\$ 110.508
Electroválvula de 1/2" de 24 VDC sin Presión y Flete	\$ 55.269	5	\$ 276.346
Cable Duplex 14 AWG Nexans	\$ 2.200	30	\$ 66.009
Toma Industrial Codelca	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Toma Doble S/P AVE	\$ 5.000	1	\$ 5.000
Madera Base Experimento Visión Artificial	\$ 43.000	1	\$ 43.000
Electroválvula de 1/2" de 12VDC sin Presión	\$ 29.500	5	\$ 147.500
Módulo Sensor de Humedad del Suelo	\$ 25.000	1	\$ 25.000
Envío de Ferretrónica	\$ 15.313	1	\$ 15.313
Vinilo	\$ 3.000	2	\$ 6.000
Bomba BLDC DC80E	\$ 235.112	1	\$ 235.112
Flete Bomba BLDC DC80E	\$ 73.491	1	\$ 73.491
Sustrato Experimento Visión Artificial	\$ 97.300	1	\$ 97.300
Envío Sustrato Experimento	\$ 62.700	1	\$ 62.700
Buffers de pH Experimentos	\$ 47.100	1	\$ 47.100
Nutriente Hidropónico Experimentos	\$ 26.000	1	\$ 26.000
Cámara Experimento Visión Artificial	\$ 60.000	1	\$ 60.000
Baldes Experimento Visión Artificial	\$ 32.000	1	\$ 32.000
Vasos Experimento Visión Artificial	\$ 8.000	1	\$ 8.000
Gramera Experimento Visión Artificial	\$ 40.000	1	\$ 40.000
Soluciones Nutritivas Experimento Visión Artificial	\$ 26.000	3	\$ 78.000
Flete Soluciones Nutritivas Experimento Visión Artificial	\$ 12.500	2	\$ 25.000
Semillas	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Envío de Semillas	\$ 18.100	1	\$ 18.100
Estructura de Madera	\$ 420.000	1	\$ 420.000
Motorreductor 24 VDC	\$ 332.302	1	\$ 332.302
Flete Motorreductor 24 VDC	\$ 406.581	1	\$ 406.581
Tubo Alcantarillado 6"	\$ 130.543	1	\$ 130.543
Tubo Alcantarillado 8"	\$ 159.530	1	\$ 159.530
Tubo PVC 1/2"	\$ 12.115	4	\$ 48.462
Sensor Capacitivo de Proximidad	\$ 40.000	5	\$ 200.000
Polisombra	\$ 200.000	1	\$ 200.000
Caja de Protección	\$ 42.700	1	\$ 42.700
Cable Calibre 14	\$ 808	30	\$ 122.240
Mosfet IRF1407	\$ 8.000	2	\$ 16.000
Bornera Plástica de Conexiones 20 A	\$ 4.000	1	\$ 4.000
Termoencogible	\$ 1.000	4	\$ 4.000
Condensadores	\$ 200	12	\$ 2.400
Buffers de pH y Soluciones Nutritivas	\$ 220.000	1	\$ 220.000
Flete Buffers de pH y Soluciones Nutritivas	\$ 40.150	1	\$ 40.150
Perlita y Flete	\$ 57.000	1	\$ 57.000
Acople Motor/Agitador	\$ 190.000	1	\$ 190.000
Tapas de Acrílico	\$ 67.000	1	\$ 67.000
Conector SMA Hembra	\$ 3.500	2	\$ 7.000
Conector SMA Macho	\$ 3.700	2	\$ 7.399
Chumacera	\$ 17.500	1	\$ 17.500
Soluciones de Calibración Sensores de Ph y CE	\$ 191.128	1	\$ 191.128
Flete de Soluciones de Calibración Sensores de Ph y CE	\$ 15.000	1	\$ 15.000
Tanque Polinter de 250 L	\$ 132.900	1	\$ 132.900
Malla para Siembra	\$ 5.300	20	\$ 106.000
Válvula Cheque	\$ 15.000	1	\$ 15.000
Válvula manual de bola	\$ 12.000	2	\$ 24.000
Sensor de humedad de suelo	\$ 29.000	1	\$ 29.000
Bomba peristáltica 12 VDC	\$ 51.940	4	\$ 207.760
Flete de Electronlab	\$ 17.168	1	\$ 17.168
Tornillos para Acople y Base del Motor	\$ 6.000	1	\$ 6.000
Metro de Manguera para Bombas Peristálticas	\$ 2.000	2	\$ 4.000
Sintetizada	\$ 11.000	5	\$ 55.000
Ele Metálica	\$ 800	10	\$ 8.000
Perfil Omega de aluminio de 3 metros	\$ 5.000	1	\$ 5.000
Pimpina de 20 L	\$ 8.000	4	\$ 32.000
Soldadura PVC 1/32 gal	\$ 18.900	3	\$ 56.700
Limpiador 1/32 gal	\$ 10.350	1	\$ 10.350
Cinta Teflón 40 m	\$ 5.950	1	\$ 5.950
Cinta Aislante Negra 20 m	\$ 16.000	1	\$ 16.000
Metro de Alambre Dulce Calibre 12	\$ 371	80	\$ 29.673
		TOTAL	\$ 9.757.396

Fuente Montañez, Higuera, Benítez (2021)